# ANAIS DO 25º CONGRESSO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA

*Volume 2 - Fabricação Mecânica e Materiais, Automação Industrial e Gestão da Manufatura*

Universidade de Brasília - Faculdade do Gama - UNB/ FGA
Centro Universitário do Distrito Federal - UDF
Brasília 27 a 31 de Agosto de 2018
www.eventos.abcm.org.br/creem2018/

# XXV CREEM
# BRASILIA 2018
## CONGRESSO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA

Anais do

25º Congresso Nacional de

Estudantes de Engenharia Mecânica

Vol.2 – Fabricação Mecânica e Materiais, Automação Industrial e Gestão da Manufatura

Universidade de Brasília – Faculdade do Gama

Centro Universitário do Distrito Federal

Brasília, 27 a 31/AGO/2018

https://eventos.abcm.org.br/creem2018

CREEM 2018

Caros colegas Professores, Pesquisadores e Alunos

É com imenso prazer que disponibilizamos os Anais do XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – CREEM 2018, contendo na íntegra os artigos submetidos e aprovados para apresentação durante o evento.

O CREEM 2018 ocorre em Brasília, no campus do Centro Universitário do Distrito Federal - UDF, entre os dias 27 e 31 de agosto de 2018. Esta é a 25ª edição deste tradicional congresso na agenda da ABCM e que reúne professores, pesquisadores e estudantes de graduação brasileiros, desse modo o evento adquire um importante papel na iniciação da carreira científica dos alunos de engenharia mecânica do Brasil. Durante os cinco dias de evento são apresentadas palestras do mais alto nível, para as quais foram convidados eminentes pesquisadores nacionais.

Agradecemos a todos que enviaram seus trabalhos, apresentados nas seções temáticas orais no decorrer do congresso. Agradecemos também ao comitê científico pela revisão dos artigos submetidos.

Um agradecimento especial deve ser feito às agências, instituições e empresas que apoiaram este evento, tornando possível a sua realização.

Cordialmente

Comissão Organizadora do XXV CREEM

ABCM Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas

UDF Centro Universitário

UnB Gama O novo endereço da tecnologia

CREEM 2018
27 a 31 de agosto de 2018 – UDF e UnB

PROMOÇÃO: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas – ABCM

Comissão Organizadora:

Daniel de Oliveira Fernandes
Jalusa Maria da Silva Ferrari
Jhon Nero Vaz Goulart
José Leandro Cardoso Rivera Vila
Kauan de Torres Eiras
Laís Almeida Nunes
Laís Rocha Carvalho
Lara Cristina Pereira de Araújo
Lucas Henrique Vieira Dias
Pedro Paulo Silva de Almeida
Tiago de Melo

Comitê Científico (Chairman):

Adrián Alberto Betancur Arroyave
Christian Doré
Christian Venditozzi
David Gustavo Dias
Jhon Nero Vaz Goulart
Juliano Ferreira Martins
Leonel Leonardo Delgado Morales
Linconl Araújo Teixeira
Maura Angelica Milfont Shzu
Tiago de Melo
Willian Arvey Molano Gabalan

Palestrantes Convidados:

Carlos Alberto Gurgel Veras
Gherhardt Ribatski
João Pedro Taborda Lottermann
João Manoel Dias Pimenta
Marco Antonio Rodríguez Martínez
Marco Aurélio Candia Braga
Maria del Pilar Hidalgo Falla
Sergio Henrique da Silva Cordeiro
Suzana Moreira Avila
Tiago de Bortoli Luciano

Comissão Organizadora do XXV CREEM

CREEM 2018
27 a 31 de agosto de 2018 – UDF e UnB

PROMOÇÃO: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas – ABCM

Comissão Organizadora:

Daniel de Oliveira Fernandes
Jalusa Maria da Silva Ferrari
Jhon Nero Vaz Goulart
José Leandro Cardoso Rivera Vila
Kauan de Torres Eiras
Laís Almeida Nunes
Laís Rocha Carvalho
Lara Cristina Pereira de Araújo
Lucas Henrique Vieira Dias
Pedro Paulo Silva de Almeida
Tiago de Melo

**Apoio:**

**Promoção:**

**Organização:**

# ÍNDICE

## Fabricação Mecânica e Materiais


**A INFLUÊNCIA DE PONTOS CONCENTRADORES DE TENSÃO SOBRE A TENSÃO DE ESCOAMENTO DE UM CORPO DE PROVA DE POLIPROPILENO** 1
Alex Maciel da Costa, Ewerton Scaliante, Lucas França Mendes, Maxuel Aparecido Lang Matos e Rudson Nolasco de Abreu

**A PERFORMANCE DE UMA TRINCA BASEANDO-SE NOS CONCEITOS DE MECÂNICA DA FRATURA** 10
Thiago de Almada Lopes e Kléber Agustin Sabat da Cruz

**ANÁLISE DA BARRA ESTABILIZADORA EM UM VEÍCULO OFFROAD** 17
Ana Caroline Feltrini Garcia de Souza, Mateus Coutinho de Moraes e Miguel Ângelo Menezes

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA A TRAÇÃO DE CORPOS DE PROVA PRODUZIDOS COM TECNOLOGIA DE DEPOSIÇÃO DE FILAMENTO FUNDIDO** 32
Camilla Mara Mendonça, Alexandre Queiroz Bracarense, Douglas de Oliveira Santana e Marcelo Teodoro Assunção

**ANÁLISE DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO ADITIVA USANDO MODELOS REDUZIDOS DE PÁS EÓLICAS** 42
José Ferreira da Silva Junior e Antônio Piratelli Filho

**ANÁLISE NUMÉRICA DA PERDA DE CARGA EM ESCOAMENTOS TURBULENTOS EM DUTOS CURVOS** 39
Hugo Campos Lima Silva e Diego Alves de Moro Martins

**ANÁLISE E DIAGNÓSTICO DAS TRELIÇAS E COMPONENTES DA PONTE FERROVIÁRIA DE LIGAÇÃO SÃO LUÍS – CONTINENTE DA CFN SOBRE O ESTREITO DOS MOSQUITOS** 52
Luiz Gustavo Barbosa de Amorim

**ANÁLISE NUMÉRICA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR DURANTE A SOLIDIFICAÇÃO DE LIGAS METÁLICAS EM MOLDES DE AREIA** 60
Castilho, E. R. S., Costa, G. B., Oliveira, E. P., e Lins, E. F.

**APLICABILIDADE DO MÉTODO CALORIMÉTRICO NA MEDIÇÃO DO CALOR DISSIPADO EM FURAÇÃO** 66
Guilherme Henrique Alves Andrade, Ivanilson Sousa da Costa e Márcio Bacci da Silva

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE USINAGEM EM UMA BANCADA DE USINAGEM ELETROQUÍMICA** 74
Gabriela Rocha Franco e Daniel Fernandes da Cunha

**AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TENSÃO DE SOLDAGEM USANDO Ar+25%He NA DEPOSIÇÃO DE NiCrMo-3 POR MIG/MAG** 84
Gabriela Rocha Franco, Henrique Eugenio Siqueira, Kaio Cesar Oliveira Abreu e Demostenes Ferreira Filho

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CEMENTANTES ATRAVÉS DA MEDIÇÃO DE MICRODUREZA VICKERS** 92
Bernardo Rota, Alisson Geovane Silva de Souza, Annemarie Henker e Daniel Amoretti Gonçalves

**AVALIAÇÃO NÃO-DESTRUTIVA POR RAIO-X DE COMPONENTES MECÂNICOS DO PROJETO BAJA SAE** 99
Yuri Gubert Souza, Edilson Nunes Pollnow e Wagner Da Silveira

**AVALIAÇÃO ÓPTICA DA INFLUÊNCIA DA TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL EM AMOSTRAS DE FERRO FUNDIDO CINZENTO** 106
Erika Michele Damas, Pedro Henrique R. Ribeiro e Washington M. da Silva Júnior

**CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS COMPOSITOS DO FORMATO ESTRUUTRAL HONEYCOMB** 112
Pedro Jorge Soares Correa, João Victor da Silva Oliveira, Letícia Santos Lula Barros, Pedro Cunha de Lima Emmanuel Pacheco Rocha Lima e Manuel Nascimento Dias Barcelos Júnior

**ANÁLISE MECÂNICA DE ABSORVEDORES DE ENERGIA HÍBRIDOS AÇO E FIBRA DE CARBONO** 121
Tulyane Migotto dos Santos, Rita de Cássia Silva e Alessandro Borges de Souza Oliveira

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE MATERIAIS UTILIZADOS EM PROTOTIPAGEM RÁPIDA POR DEPOSIÇÃO DE MATERIAL FUNDIDO PARA APLICAÇÃO AEROESPACIAL** 129
Marcus Vinicius Barros da Silva e Manuel Nascimento Dias Barcelos Júnior

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E DOS EFEITOS DO TRATAMENTO TÉRMICO NO AÇO SAE 4340** 139
Victor Santana da Rocha e Tiago de Melo

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL EM AÇOS DE BAIXO CARBONO UTILIZADOS EM PLANTAS DE PAPEL E CELULOSE** 149
Bruno de Oliveira Schneider, Matheus Alves Lima, Guilherme Agues Emerick, Bruno Azeredo Passigatti e Davi Pereira Garcia

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA LIVRE PARA PLANEJAMENTO COMPOSTO CENTRAL** 157
Silane Neves da Silva, Paulo Vinícius da Silva Resende, Ildeu Lúcio de Oliveira e Anselmo Elcana de Oliveira

**DESGASTE POR DESLIZAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 430 A UTILIZANDO CONTRA-CORPOS ESFÉRICOS DE ZIRCÔNIA E ALUMINA** 166
Pedro Henrique R. Ribeiro, Vinícius R. Caixeta, Demian Abreu e Washington M. da Silva Junior

**DIMENSIONAMENTO, SIMULAÇÃO E TESTE DE UM CHASSI PARA UM TRICICLO MOTORIZADO DEDICADO PESSOAS COM DEFICIÊNCIA FÍSICA** 175
Rayanne de Jesus Pereira Braga, Paulo de Melo Silva e Simone Cristina Ferreira Neves

**ESCADA RETRÁTIL PARA AUTOMÓVEL** 181
João Paulo Marchi Benachio, Matheus Vinicius da Silva Mazuquiel, Bruno R. de Paula, Daniel J. Laporte, Fernando M. Barbosa e Fabiano P. Branco

**ESTUDO DE DIFERENTES REVESTIMENTOS DE FERRAMENTAS DE USINAGEM PELO MÉTODO DA ESCLEROMETRIA LINEAR DE CARGA PROGRESSIVA** 191
Thiago França Reges,Luiz Eduardo Rodrigues Vieira,Guilherme de Oliveira Castanheira , Leonardo Rosa Ribeiro da Silva e Wisley Falco Sales

**ESTUDO DE UM CICLO ALTERNATIVO PARA ESFEROIDIZAÇÃO NO AÇO SAE 5160** 197
Gustavo de Oliveira Benites e Guilherme Pellat dos Santos

**FABRICAÇÃO E ANÁLISE DE ÓLEOS DE CORTE COM BASES PARAFÍNICAS E NAFTÊNICAS EM SUBSTITUIÇÃO AO ÓLEO COMERCIAL** 203
Gustavo Santos de Toledo, Igor Veneroso do Nascimento, Lucas Santos Moura, Pedro Henrique de Q. Rocha e Thaynara Késsia Espíndola Pereira

**IDENTIFICAÇÃO DOS MATERIAIS DE UM PISTÃO DE MOTOR A COMBUSTÃO** 211
Gabriel Coelho da Silva, João Paulo Sanches Guimarães, Mateus Felipe Massa Pereira e Rafael Paiva Lôbo

**INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA-BICO-CONTATO-PEÇA NA ESTABILIDADE E PERFIL SOLDADO COM ER-NiCrMo-3 PELO PROCESSO MIG/MAG** 218
Adriane Faria de Almeida, Isabela de Magalhães Barcelos Costa, Mike Bezerra Paiva Ribeiro, Murilo Calaça Caetano e Demostenes Ferreira Filho

**INFLUÊNCIA DA ESPUMA DE ALUMÍNIO NA DISSIPAÇÃO DE CALOR** 227
Daniel de Oliveira Fernandes, Maurício Simões Santanna e Rodrigo Alkimim Faria Alves

**INFLUÊNCIA DA TAXA DE RESFRIAMENTO SOBRE MACROESTRUTURA DA LIGA DE ALUMÍNIO SAE 323 SOLIDIFICADO EM MOLDE DE AREIA** 234
Rafael Brasil da Costa, Rodrigo da Silva Miranda

**INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO EM SOLDAS GMAW SOB Ar+25%He COM ER-NiCrMo-3** 240
Lucas Posse e Souza, Thiago Fernando Santiago de Freitas, Ygor Peixoto Leonel e Demostenes Ferreira Filho

**INFLUÊNCIA DO ENSAIO METALÚRGICO DE TÊMPERA NA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS** 248
Rodrigo da Silva Miranda e Adilto Pereira Andrade Cunha

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE E A GEOMETRIA DA FERRAMENTA SOBRE POTÊNCIA, FORMAÇÃO DO CAVACO E GRAU DE RECALQUE NA USINAGEM DE LIGAS DE ALUMÍNIO** 257
Guilherme Agues Emerick, Jordan Deambrosio Cussuol, Matheus Alves Lima e Mário Cezar dos Santos Júnior

**MANEIRAS DE SE EVITAR O PROCESSO DE CORROSÃO NOS TRILHOS DA VALE S.A.** 267
Israel Conceição Rocha, Alberth Rodolfo Ferreira Viana e Nícolas Rodrigues Ferreira

**MATERIAIS SELF-HEALINGS** 274
Lais Rocha Carvalho

**MEDIÇÃO DE CALOR E TEMPERATURA DE CAVACOS POR MEIO DO MÉTODO CALORIMÉTRICO** 278
Guilherme Henrique Alves Andrade, Ivanilson Sousa da Costa e Márcio Bacci da Silva

**NITRETAÇÃO DO DURALUMÍNIO AA 2011 POR ELETROEROSÃO** 285
Freddy Alejandro Portillo Morales, Marco Aurélio de Freitas Santos Júnior, Maria Cecília Pontes Silva

**PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM CHAPAS DE AÇO AISI 316** 293
Victor von Glehn Mateus, Leonardo Rosa Ribeiro da Silva, Eder Silva Costa, Leandro Carvalho Pereira e Wisley Falco Sales

**PROCESSO DE SOLDAGEM TIG CONVENCIONAL E A-TIG: UMA REVISÃO DE LITERATURA** 301
Rômulo Hudston Campos Neves, Thiago José Donegá e Isadora Ferreira Caixeta

**PROJETO DE ADAPTAÇÃO DE IMPRESSORA 3D PARA IMPRESSÃO DE PEEK** 306
Ramon Carim Bevilacqua, Cristian Vendittozzi e Manuel Nascimento Dias Barcelos Júnior

**SISTEMÁTICA DE UM DISPOSITIVO EMBARCADO PARA SUPRIMENTO CRIOGÊNICO NA USINAGEM CNC EM LAMINADOS COMPÓSITOS** 316
Kalil Emmanuel Pereira Cruz e Carlos Alberto Mendes Oliveira

**TESTE BIOMECÂNICO: ENSAIO DE TRAÇÃO EM TENDÃO CALCÂNEO DE RATOS** 326
Karla Cristina Rodrigues Pereira, Carla Tatiana Mota Anflor, Rita de Cássia Marqueti, Fabrício Reichert Barin

# Automação Industrial

**HidroDim: UMA FERRAMENTA PARA DIMENSIONAMENTO PARCIAL DE SISTEMAS HIDRÁULICOS INDUSTRIAIS** 334
Ian Leitão Ferreira, André Pimentel Moreira, Evaldo Correia Mota e Danielle Alves Barbosa

**A INFLUÊNCIA DA INTERNET DAS COISAS NA INTERNET 4.0, INDUSTRIA 4.0 E NO COTIDIANO** 345
Daniela Garcia Rodrigues

**PROTOTIPAGEM DE UM EQUIPAMENTO PARA AUTOMAÇÃO DO ABASTECIMENTO E CONTROLE DE ARMAZENAMENTO DE GRÃOS EM SILOS** 354
Isadora Ferreira Caixeta, Murilo Caixeta Machado e Rodrigo Hiroshi Murofushi

# Gestão de Manufatura

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA ATRELADA A ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO PARA INSTALAÇÃO DE MELHORIAS EM EQUIPAMENTOS: ESTUDO DE CASO APLICADO EM UMA SIDERURGIA DO ESTADO DO PARÁ** 361
Alex Fagundes Brito, Victor Rodrigues Matos, Isaias de Oliveira Barbosa Junior, Jéssica Pollyanna V.W.Rodrigues e Luiz Allan Pinho Dutra

**PROJETO CONCEITUAL DE UM PROTÓTIPO DE MICROGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NAS TUBULAÇÕES DE ÁGUA PREDIAIS** 371
Beatriz Guilliod Bianchi, Elaine Tavares de Souza, Karen Rodrigues Faria Rosa e Francisco Jarmeson Silva Bandeira

**PROPOSIÇÃO DE UM PLANO DE MANUTENÇÃO POR MEIO DA ANÁLISE RAM: UM ESTUDO DE CASO EM UMA FÁBRICA DE EMBALAGENS PLÁSTICAS NO ESTADO DO PARÁ** 380
Leonardo Rodrigues de Freitas, Nilza Cristina de Sousa Lima, Isaías Barbosa de Oliveira Júnior, Luiz de Souza Silva e Victor Rodrigues Ribeiro

**REALIZAÇÃO DO APPCC EM UMA FÁBRICA DE MOLHO DE PIMENTA** 390
Kassio Felipe da Costa Serra e Amaurilio Vital Gomes Junior

# *Fabricação Mecânica e Materiais*

XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 27 à 31 de agosto de 2018 – Brasília, DF

# A INFLUÊNCIA DE PONTOS CONCENTRADORES DE TENSÃO SOBRE A TENSÃO DE ESCOAMENTO DE UM CORPO DE PROVA DE POLIPROPILENO

**Alex Maciel da Costa, Ewerton Scaliante, Lucas França Mendes, Maxuel Aparecido Lang Matos, Rudson Nolasco de Abreu**
Universidade Católica Dom Bosco - UCDB
Av. Tamandaré, 6000 - Jardim seminário, Campo Grande - MS, 79117-010
englucas1995@gmail.com

**RESUMO:** O presente artigo tem como propósito analisar a influência de pontos concentradores de tensão em corpos de prova fabricados em polipropileno. Os corpos foram construídos primariamente seguindo a Norma ASTM-D638mas, devido ás configurações do desenho em um software CAD eles apresentaram problemas em sua geometria e acabamento gerando pontos de concentração de tensão. Corpos de prova com grandes danos em sua superfície, alcançaram uma tensão ao escoamento média de cerca de 18,6 MPa enquanto corpos de prova considerados ideais, obtiveram valores médios em torno de 30,4 MPa, muito próximos da faixa considerada padrão para o polipropileno que fica entre 31 e 37 MPa.

**Palavras-Chave:** Tensão, Concentradores de tensão, Polipropileno

***ABSTRACT:****The purpose of this paper is to analyze the influence of stress concentrator points on bodies made of polypropylene. The bodies were primarily constructed following the ASTM-638 standard but due to the design settings in an CAD software they presented problems in their geometry and finishing generating points of concentration of tension. Test specimens with large surface damage reached an average flow stress of about 18.6 MPa as test specimens considered to be ideal, obtained average values around 30.4 MPa, very close to the range considered standard for polypropylene which is between 31 and 37 MPa.*

***Keywords:****Tension,Stress Concentrator,Polypropylene*

## INTRODUÇÃO

As grandes guerras mundiais marcaram, de infinitas maneiras, história da humanidade. Em um contexto cientifico grande parte do desenvolvimento tecnológico no campo de materiais, ocorreu durante e após estes períodos de conflito. De acordo com Bannach *et al*. (2011), os polímeros sintéticos passaram a ser fortemente estudados e caracterizados com o desenvolvimento de técnicas de termo gravimetria, que é uma técnica de ensaio destrutiva de materiais que monitora a variação da massa de uma amostra em função do tempo ou da temperatura em um ambiente controlado, especificas para materiais poliméricos.

Atualmente existem no mercado polímeros altamente complexos e com uma gama incrivelmente grande de aplicações. Materiais poliméricos são utilizados, por exemplo, em revestimento de equipamentos eletrônicos como smartphones e notebooks, em automóveis nos painéis, para choques e reservatórios de fluídos e também na indústria alimentícia como recipientes de armazenamento.

Os polímeros são materiais com estruturas moleculares repetidas denominadas monômeras. A junção de várias estruturas monoméricas, ou menos, em cascata da origem aos polímeros. Usualmente os polímeros podem ser subdivididos em três subgrupos denominados termorrígidos, termoplásticos e elastômeros.

Termorrígidos: são polímeros que se tornam permanentemente duros quando sujeito a aplicação de calor e não amolecem com aquecimento subsequente. Geralmente são mais duros, mais fortes e mais frágeis que os polímeros termoplásticos, e possuem melhor estabilidade dimensional (Callister, 2008).

Termoplásticos: são polímeros que ao serem aquecidos amolecem (e por fim se liquefazem) e endurecem quando são resfriados. Além disso, os termoplásticos são relativamente moles e dúcteis (Callister, 2008).

Elastômeros: são polímeros que apresentam a característica de recuperar rapidamente suas características dimensionais iniciais, após cessar a aplicação de uma tensão (ISO1382, 1996).

O polipropileno (PP) é um polímero termoplástico polimerizado a partir do gás propeno(Harper & Petrie, 2003). Altamente empregado nas mais diversas aplicações ele tem como algumas de suas características excelentes propriedades elétricas, resistência a fadiga (que o torna capaz de trabalhar em ambientes sujeitos a vibrações), é quimicamente inerte e relativamente barato quando comparado a outros polímeros com as mesmas características.

Com o propósito de descobrir as propriedades mecânicas de um polímero, realizam-se ensaios de tração uniaxial padronizados e normalizados pelos órgãos competentes, que neste caso é a ASTM (American Society for testing and Materials). A norma ASTM-D638 fornece todo o embasamento necessário para a obtenção das propriedades mecânicas de um material polimérico.

Com todos os dados, geometria do material e analise do gráfico da Figura 1, permite a identificação de varias propriedades mecânicas que obtém no material estudado.

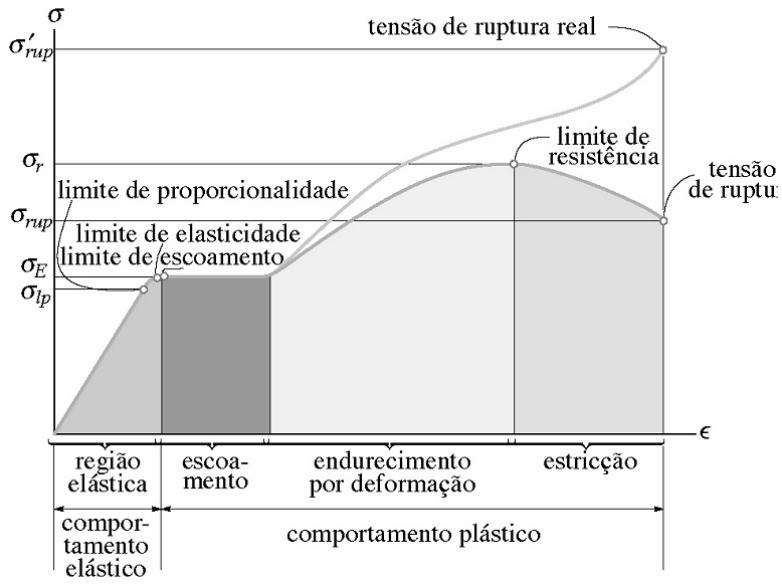



**Figura 1.** Gráfico de Tensão versus Deformação (Hibbeler, 2010)

## METODOLOGIA

Quanto aos ensaios de tração, os corpos de prova são fixados em "garras" (dispositivos de fixação), estas por sua vez são acopladas à travessa fixa e a travessa móvel da máquina universal de ensaios. O coeficiente de deformação de tração é controlado por um mecanismo de direcionamento, enquanto a tensão de tração que a amostra sustenta é registrada por uma célula de carga, ambos acoplados a travessa fixa da máquina universal de ensaios. As garras para ensaios de tração podem ter acionamento manual ou pneumático e devem ser utilizados de acordo com o material alvo de estudo. Para a maioria dos termoplásticos são utilizadas garras de acionamento manual que possuem serrilhados na superfície de contato com o corpo de prova, o que impede o seu deslizamento durante os ensaios. Os corpos de prova para os ensaios de resistência a tração são preparados sob forma de halteres com a superfície da secção cruzada plana, as dimensões dos corpos de prova devem ser escolhidas de acordo com o comportamento mecânico do polímero a ser ensaiado. Na Figura 2 temos a representação de um corpo de prova e na Tabela 1 suas dimensões.

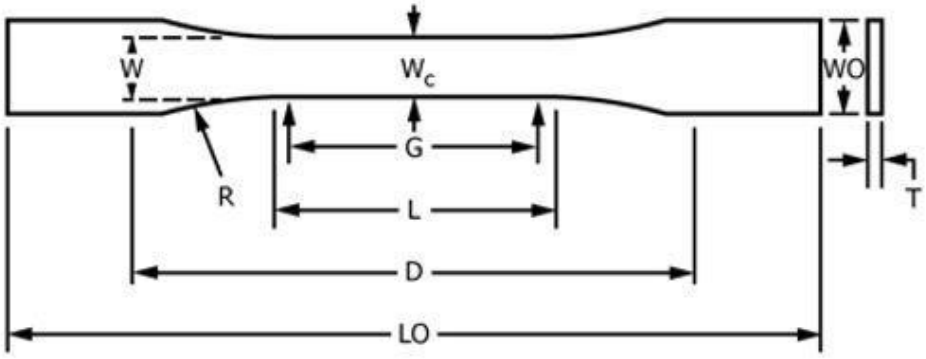



**Figura 2.** Corpo de Prova conforme a norma ASTM-D638

**Tabela 1.** Dimensões do corpo de prova

| DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA | |
|---|---|
| **REFERÊNCIAS DO CORPO DE PROVA** | **MEDIDAS (mm)** |
| W | 13 |
| L | 57 |
| WO | 19 |
| LO | 165 |
| G | 50 |
| D | 115 |
| R | 76 |
| T | 3 |

As medidas representadas na Tabela 1, referentes à Figura 2, podem variar de acordo com o material a ser ensaiado. Maiores detalhes podem ser encontrados na norma ASTM-D638, dentre estes detalhes o que indica o tipo do corpo de prova.

As relações tensão versus deformação de muitos plásticos não seguem a lei de Hooke, mesmo estando dentro das suas regiões de comportamento elástico. Estes materiais possuem desvios desta lei para tensões abaixo do limite elástico, que é definido como a maior tensão que o material é capaz de suportar sem que haja deformação permanente. Para tais materiais o modulo de elasticidade é tomado como a inclinação da curva de tensão versus deformação para baixas tensões e deformações (Canevarolo, 2007).

Os corpos de prova foram cortados por uma máquina de corte a laser como mostra a Figura 3. Inicialmente pensou-se que este tipo de operação seria ideal por dar maior uniformidade dimensional e um acabamento superior quando comparado com outros tipos de processo de fabricação. Porém durante o corte a laser a máquina fez a leitura das formas geométricas que compõe o corpo de prova sem a função de linha contínua presente no software de desenvolvimento AutoCad, ocasionando uma variação indesejada no corte dos corpos de prova gerando fatores concentradores de tensão.

Quando um material tem uma variação brusca de sua área de seção transversal ocorrem os chamados fatores concentradores de tensão. Estes fatores amplificam a tensão distribuída sobre a estrutura no ponto em que eles estão agindo, consequentemente podendo ocorrer a falha do material em tensões aplicadas a baixo das tensões que estão agindo no restante da estrutura.

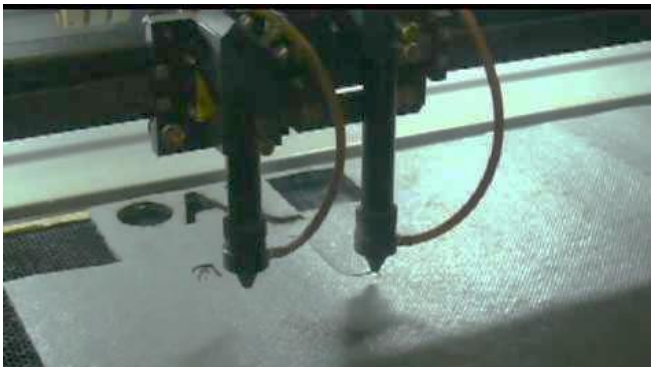


**Figura 3.** Máquina corte a laser

Os ensaios foram todos realizados no laboratório de Metrologia da Universidade Católico Dom Bosco (UCDB), utilizando uma máquina de tração (Marca: PANTEC, Modelo: VERSAT 20K) com célula de carga com capacidade de 20 KN, mostrada na Figura 4.

**Figura 4.** Máquina utilizada no ensaio de tração (Modelo: VERSAT 20K)

Com o intuito de caracterizar as propriedades mecânicas do polipropileno através do ensaio de tração, com e sem os erros de corte que afetaram a geometria do corpo de prova e geraram pontos de concentração de tensão, aplicaram-se os testes descritos na norma ASTM-D638. Os corpos de prova foram separados em três diferentes grupos conforme as avarias sofridas durante o processo de corte.

O tipo A foi processado conforme a Figura 5. O problema deste corte foi a descontinuidade na progressão do laser da máquina que ao invés de aplicar continuamente o corte, contornando todo o esboço do corpo de prova, fez os contornos separadamente, sequencialmente nas regiões I, III e II.

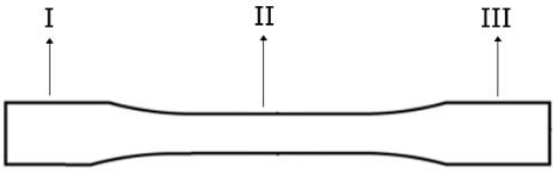



**Figura 5.** Corpo de prova

O tipo B, representado na Figura 6, é caracterizado pelo início de operação da máquina no meio da região denominada pescoço, causando os que os operadores denominaram de Piercing. Este ponto é um forte concentrador de tensões que fez, na maioria dos ensaios, que os corpos de prova falhassem precocemente.

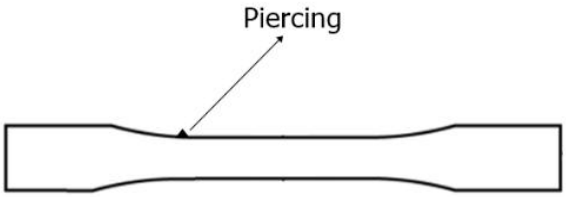



**Figura 6.** Corpo de prova tipo B

O tipo C é caracterizado por sua geometria totalmente dentro dos padrões da norma ASTM-D638. Houve a preocupação de dar início ao processo de corte na região de fixação do corpo de prova e de fazer um corte de linha contínua, eliminando as falhas que ocorreram nos tipos A e B.

Com os valores das tabelas de cada um dos tipos de corpo de prova foram calculadas as médias das tensões através da Eq.(1) e valores do desvio utilizando a Eq.(2).

$$M = \frac{\sum(Amostras)}{N} \quad (1)$$

Onde:
M é a Média Aritmética.
N é o Numero de amostra.

$$D = \sqrt{\frac{\sum(di - M)^2}{(N-1)}} \quad (2)$$

Onde:
D é o Desvio Padrão.
di é o valor da amostra.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tensão de escoamento obtida para os corpos de prova do tipo A estão representadas na Tabela 2.

**Tabela 2.** Dados dos corpos de prova do tipo A

| Corpo de Prova | Tensões [MPa] |
|---|---|
| A1 | 16,820 |
| A2 | 19,906 |
| A3 | 17,043 |
| A4 | 21,632 |
| A5 | 20,491 |
| A6 | 21,594 |
| A7 | 12,045 |
| A8 | 16,997 |
| A9 | 19,396 |
| A10 | 17,713 |
| A11 | 13,976 |
| A12 | 19,091 |
| A13 | 21,883 |
| A14 | 22,142 |
| A15 | 17,627 |
| A16 | 16,820 |

Os resultados para o corpo e prova do tipo B estão na Tabela 3.

**Tabela 3.** Dados dos corpos de prova do tipo B

| Corpo de Prova | Tensão [MPa] |
|---|---|
| B1 | 25,344 |
| B2 | 25,904 |
| B3 | 26,484 |
| B4 | 25,383 |
| B5 | 23,584 |
| B6 | 26,413 |
| B7 | 22,446 |
| B8 | 23,013 |
| B9 | 26,49 |
| B10 | 22,508 |
| B11 | 25,59 |
| B12 | 26,188 |

| | |
|---|---|
| B13 | 26,993 |
| B14 | 26,181 |
| B15 | 24,816 |
| B16 | 26,697 |
| B17 | 26,788 |
| B18 | 26,829 |

Os resultados para o corpo e prova do tipo C estão na Tabela 4.

**Tabela 4.** Dados dos corpos de prova do tipo C

| Corpo de Prova | Tensão [MPa] |
|---|---|
| C1 | 28,879 |
| C2 | 29,406 |
| C3 | 30,923 |
| C4 | 29,493 |
| C5 | 34,162 |
| C6 | 29,524 |

A Tabela 5 expõe os valores médios para as tensões e desvios padrões.

**Tabela 5.** Dados dos desvios padrões calculados

| | Tipo A | Tipo B | Tipo C |
|---|---|---|---|
| Média aritmética das tensões [Mpa] | 18,6 | 25,4 | 30,4 |
| Desviopadrão | 4,35 | 1,52 | 1,97 |

Os gráficos de Deslocamento [mm] x Força [N] representados pelas Figuras 7, 8 e 9 são, respectivamente, dos tipos A, B e C. Estes gráficos foram os que mais aproximaram-se dos valores de força que geram as tensões médias, pode ser observado que gráficos do tipo C obtiveram um deslocamento muito maior antes que ocorresse a ruptura do corpo de prova.

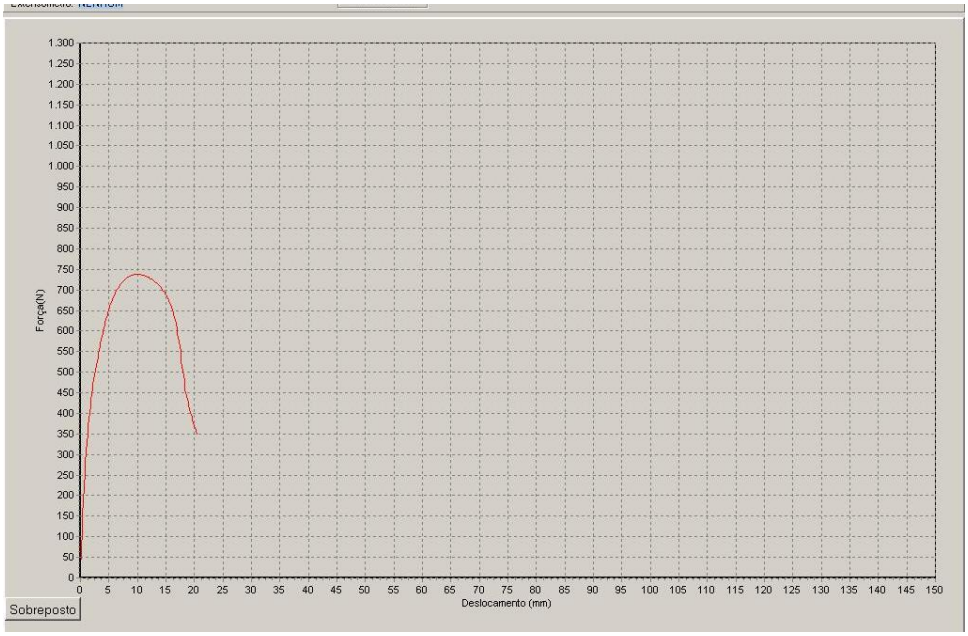



**Figura 7.** Representação do ensaio número 5 do corpo de prova A

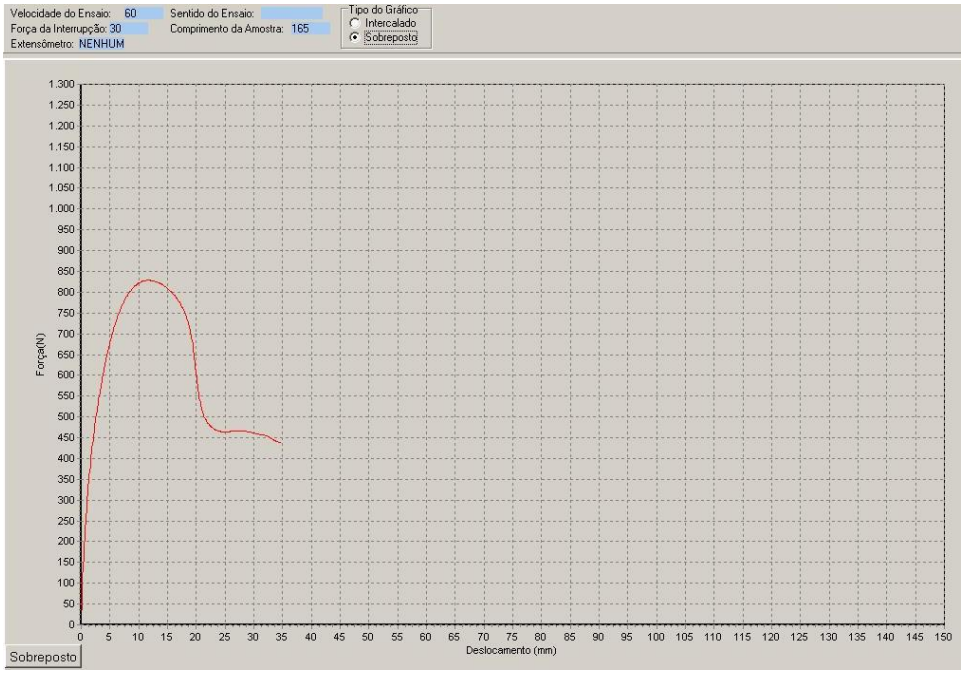



**Figura 8.** Representação do ensaio número 20 do corpo de prova B

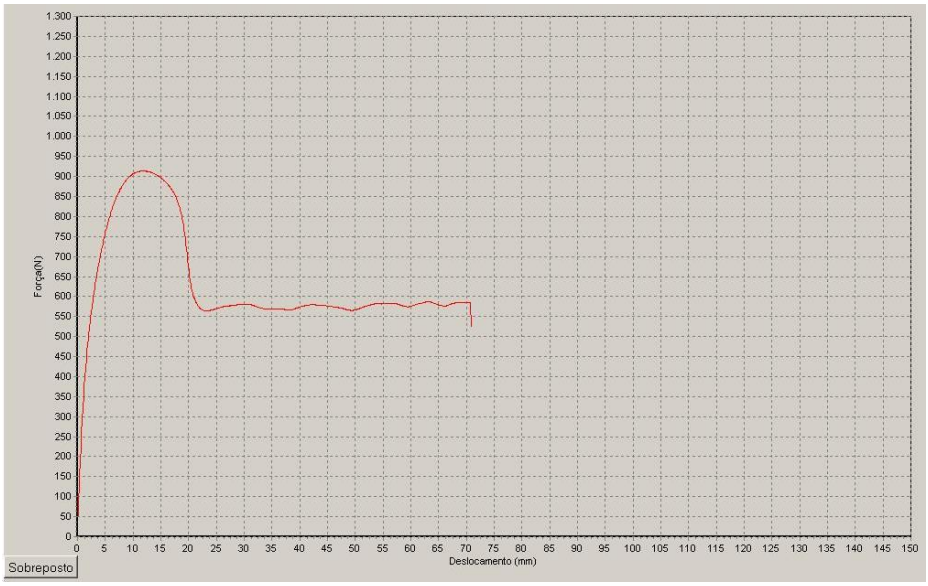



**Figura 9.** Representação do ensaio número 15 do corpo de prova C

Os valores de tensão de escoamento tabelados para o polipropileno estão situados entre 31 MPa e 37 MPa. Os valores médios de tensão obtidos para o corpo de prova do tipo C, com geometria e acabamento dentro dos padrões, aproximaram-se muito dos valores comuns para o material.

Como pode serobservado na Tabela 5 o corpo de prova da família A teve o maior desvio padrão entre as outras famílias. A variação da geometria do corpo de prova e os pontos de concentração de tensão mais destacados fizeram com que estes corpos de prova falhassem mais facilmente e em menores tensões que os outros dois tipos.

O tipo B, que possui características intermediárias, teve um desvio padrão menor dentre as amostras, com uma tensão de escoamento menor que os da família C. Na Figura 10 pode ser observado o desenvolvimento do empescoçamento em um corpo de prova do tipo A, exatamente no ponto de concentração de tensão localizado na lateral esquerda da figura.

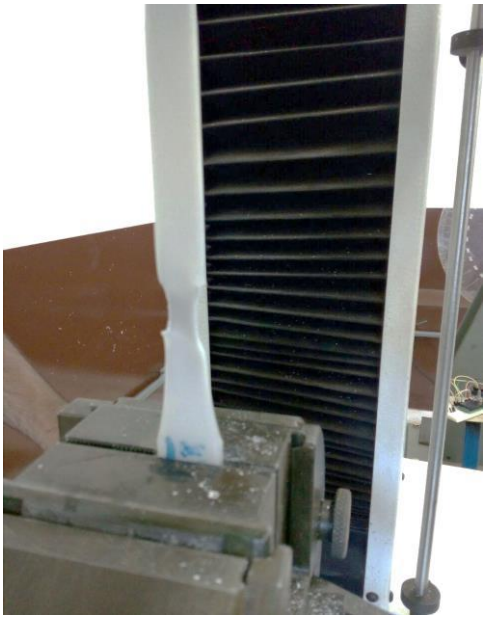


**Figura 10.** Ensaio do corpo de prova

## CONCLUSÃO

Através da análise dos gráficos obtidos pelos ensaios de tração nos três diferentes tipos de corpos de prova afetados pela circunstância de corte tornando-se possível observar uma variação considerável da tensão de escoamento devido aos pontos concentradores de tensão.

Nota se que a tensão de escoamento do corpo de prova do tipo C, com geometria dentro dos padrões estabelecidos pela norma ASTM-D638 aproximou-se muito do valor fornecido pela tabela do fabricante. A tensão de escoamento média obtida foi de 30,4 MPa para o tipo C, enquanto os tipos A e B obtiveram 18,6 MPa e 25,4 MPa respectivamente. Estes valores comprovam a influência negativa dos concentradores de tensão no corpo de prova.

Portanto, torna-se aparente a necessidade de um planejamento cuidadoso do processo de fabricação do corpo de prova, especificamente no caso do corte a laser. Cortes mal planejados podem vir a gerar saliências e reentrâncias capazes de acumular tensão de maneira que o corpo de prova falhe muito antes da tensão ao escoamento do material ser ultrapassada, gerando resultados errôneos que em aplicações de engenharia podem impactar diretamente sobre os custos de confecção de um produto.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Doutor Fabiano Branco Pagliosa pela atenção, compreensão, sabedoria, ideias e orientação dispensadas a nós durante o período de elaboração deste projeto.

A Universidade Católica Dom Bosco e pela estrutura concedida para elaboração do projeto.

## REFERÊNCIAS

ASTM D638-14, “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM International”, West Conshohocken, PA, 2014, <www.astm.org>

Bannach, Gilbert, *et al*. "Efeitos da história térmica nas propriedades do polímero PET: um experimento para ensino de análise térmica." Química Nova (2011): 1825-1829.

Callister Jr, William D. "Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 589 p." (2008).

Canevarolo, S.V.Jr., 2007, “Técnicas de Caracterização de Polímeros”, Ed.Artliber, S.Paulo, Brazil, 448 p.

Garcia, A., 2010, “Ensaio de tração de materiais polímericos”, Ed.Prentice Hall Brasil, S.Paulo, Brazil, 378 p.

Hibbeler, R.C., 2010, “Resistência dos Materiais”, Ed.Prentice Hall Brasil, S.Paulo, Brazil, 656 p.

Harper, Charles A., and Edward M. Petrie. Plastics materials and processes: a concise encyclopedia. John Wiley & Sons, 2003.

ISO1382,1996. “Rubber -- Vocabulary”. 25 Jun. 2018, <http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=36974.>

Vinicius, M.S.S., 2013, Tese de Mestrado “Materiais poliméricos para contato com etanol em condições agressivas”, Universidade de São Paulo, Brazil, 656 p.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores Alex Maciel da Costa, Ewerton Scaliante, Lucas França Mendes, Maxuel Aparecido Lang Matos e Rudson Nolasco de Abreu são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

,

**ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO**

Assinalar aqui, com um X, a seção 'área de conhecimento do trabalho'.

( )Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(X) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

**XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 27 a 31 de agosto de 2018 – Brasília, DF**

# A PERFORMANCE DE UMA TRINCA BASEANDO-SE NOS CONCEITOS DE MECÂNICA DA FRATURA

Thiago de Almada Lopes[1]
Kléber Agustin Sabat da Cruz[1]
[1]Universidade Federal do Oeste do Pará
Rua Vera Paz, s/n (Unidade Tapajós) Bairro Salé CEP 68040-255 – Santarém, Pará, Brasil
Thiagoalmada23@gmail.com
Klsabat@gmail.com

**RESUMO:** A aquisição de lucros pela indústria petrolífera depende da atuação eficaz do grupo técnico que a apoia. Em se tratando da indústria marítima o guindaste representa o instrumental principal da plataforma, pois responde pela produção. Sendo assim, é necessário ter ciência de quão importante é essa ferramenta, a fim de direcionar sua utilidade e conservação. Com base nesse interesse, o objetivo desse artigo científico é ponderar acerca do pedestal de um guindaste, a partir das Normas BS 7848 e BS 7910, pois a ideia é fazer com que esse equipamento tenha vida longa e, assim contribua com seus operadores. Foi necessário, então, verificar o material que conforma o guindaste, isto é, o aço ASTM A-36. Os métodos suscitados para a presente avaliação são ensaios de tração, flexão e metalográfico, os quais estabeleceram as propriedades do material a ser analisado. Para julgar a trinca do pedestal do instrumento, recorreu-se aos cálculos que são próprios da mecânica da fratura. De posse dos ensaios laboratoriais, obteve-se o perfil do material testado junto ao pedestal do guindaste, por exemplo, a extensão do comprimento da trinca, quando o guindaste está trabalhando, foi aferida pelo fator de tenacidade à fratura $K_{IC}$.

**Palavras-Chave:** Mecânica da Fratura, Trinca, Bs 7910.

***ABSTRACT:*** The acquisition of profits by the oil industry depends on the effective performance of the technical group that supports it. In the case of the maritime industry, the crane represents the main instrument of the platform, since it is responsible for the production. Therefore, it is necessary to be aware of how important this tool is in order to direct its usefulness and conservation. Based on this interest, the objective of this scientific study is to consider the pedestal of a crane, from Standards BS 7848 and BS 7910, because the goal is to make this equipment has a long life and thus to contribute to its operators. It was necessary to test the material of the crane (ASTM A-36 steel). The methods proposed for this evaluation are the tensile and bending tests, which established the mechanical properties of the material to be analyzed, and the fracture surface was characterized by means of scanning electron microscopy (SEM). To analyze the crack of the instrument's pedestal, it was used the calculations that are based on the fracture mechanics. From the laboratory tests, the profile of the tested material was obtained next to the crane pedestal, for example, the length of the crack, when the crane is working, was measured by the fracture toughness factor ($K_{IC}$).

**Key words**: Fracture Mechanics, Crack, Bs 7910.

## INTRODUÇÃO

A atuação correta dos componentes da mecânica manda que a configuração destes obedeça uma linha peculiar de tensão, assim, pesam-se a tensão de escoamento, o estado concreto do material, bem como metodologias de segurança, a fim de que os elementos da mecânica se apresentem de modo seguro. Recorre-se, então, aos fatores numéricos para provocar o aparecimento de riscos e as ações empreendidas pelo material, obtendo, afinal, o fator de segurança (FS). (RUCHERT, 2014).

Porém, nem sempre os insumos na engenharia se mostram harmonicamente, visto que ao analisar seu universo interno, vê-se que há defeitos de feitura pela indústria responsável, o que leva a concluir que, ao requisitar trabalho do material, a tensão venha a incidir, quando disseminada ao longo de toda a estrutura, exatamente onde há imperfeição. Consequentemente, é possível que as tensões não respeitem os limites do material em ação. Se as tensões resultarem em furos, entalhes, rasgos e arestas vivas há recurso de abordagem ofertado pela mecânica clássica, para consolidar projetos. Entretanto, se há defeito interno ou trincas, faz-se necessário recorrer à mecânica da fratura, pois a finalidade desta é,

senão, prever injúrias ao componente analisado, decorrentes da trinca, no decorrer dos conflitos de trabalho (PORCARO et al, 2017).

A vantagem da mecânica da fratura é predizer se um material é resistente o suficiente, por meio de números, assim, favorece a elaboração de projetos que conferem segurança e vantagem econômica. O trabalho da mecânica da fratura na fadiga e corrosão que está em tensão consiste em assegurar, previamente, o funcionamento dos elementos que possuem defeitos ou trincas. Essa vantagem, quando se utiliza a mecânica da fratura é devida ao advento desse tipo de mecânica, ou seja, ante a proliferação de acidentes e fraturas de materiais pelas indústrias ferroviária, naval e aeronáutica, em função de concentradores geométricos de tensão, bem como tensões residuais, no período que sucede à 2ª Guerra Mundial, a mecânica da fratura se fez oportuna (FRANCESCHINI, 2011).

A partir do advento e aplicação da mecânica da fratura, foi possível à indústria ponderar cientificamente a respeito de materiais que sofriam fraturas crônicas antes mesmo de serem comercializados, considerando tensões harmônicas de trabalho do material propenso à fratura. Com a mecânica da fratura se passou a determinar o nível de segurança do material trincado (SANTOS, 2014).

A mecânica da fratura dispõe das seguintes classificações: Mecânica da fratura linear-elástica (MFLE) e Mecânica da fratura elasto-plástica. (MFEP). Aplica-se o primeiro tipo nos casos em que há ligas com maior resistência e para as que são de média tenacidade mecânica. Contudo, a espessura define que tipo de mecânica será aplicada, por exemplo, se o estado de tensão é plano (axial de tensões) cabe a Mecânica da fratura elasto-plástica.

Em vista dos benefícios proporcionados pela mecânica de fraturas é que o setor industrial lucra. Assim, são expressivas as vantagens para a indústria, especificamente quando se depara com o alto custo de reparos das plataformas de petróleo, acaso não se disponha de um sistema eficaz para prever catástrofes quanto às tensões e fraturas de materiais em condições normais de serviço. Além do custo com o reparo da plataforma, contabilizam-se outros serviços, igualmente importantes para a estabilização do seu funcionamento, são eles: transporte e instalação, a necessidade de ativação da plataforma para não dar prejuízo à produção. Quer dizer, a mecânica da fratura representa alto grau de prevenção de riscos ocasionados por fraturas e trincas nos insumos industriais, além de proporcionar o tempo de vida de um equipamento.

Os guindastes são utilizados para içar e movimentar cargas, no plano horizontal e vertical. A sua utilidade ocorre de modo difuso, qual seja, em indústrias, canteiros de obras, plataformas, portos e onde mais for necessário transportar cargas pesadas. A respeito da história dos guindastes pode-se definir como seu precursor os gregos por se tratar de um instrumento utilizado na idade antiga, em os propulsores eram homens e animais. Tal perspectiva modifica com o advento de engrenagens manejadas pela força humana e o peso dos içamentos alcançou maior volume (FORTES, 2010). O guindaste da atualidade consiste de cabos e roldanas que movimentam as cargas, grau elevado de tecnologia e arranjos de wireless. Consta da figura 1 um guindaste moderno:

**Figura 01 – Modelo de Guindaste Moderno** ***Fonte:*** *FORTES 2010.*

A exploração do petróleo tem no guindaste seu maior instrumento de transporte de cargas que ultrapasse a capacidade humana de manejo. A finalidade do guindaste consiste, ainda, de arranjo do convés, extração de cargas do rebocador ou condução de passageiros em ações de transbordos. Para que o guindaste realize toda a atividade descrita são necessários planos de controle, ação e manutenção do instrumento da plataforma, do contrário pode cessar a produção que culmina em prejuízo material. Mas, a administração de um guindaste, em todos os seus aspectos requer profunda ciência e acatar os planos destinados à prevenção de perdas do equipamento (MOREIRA, 2015; AMORIM, 2010).

A composição química dos aços contempla liga de ferro-carbono, em que a faixa percentual de 0,008% até 2,11% correspondente a faixa composicional do aço carbono, mais a presença de elementos residuais, decorrentes de fabricação. Os aços que possuem menos que 0,008% de carbono significa que possuem percentuais de carbono abaixo do nível

máximo de solubilidade de carbono no ferro, sob temperatura ambiente. Já os aços com o nível de carbono a mais que 2,11% atinge o maior grau de solubilidade de carbono no ferro, sob temperatura de 1148°C (PAULA, 2015).

Os aços de estrutura pertencem a dois tipos: aços-carbono e aços de alta resistência, com teor inferior em liga. Consta dos aços-carbono elementos residuais como Si, Mn, P e S, os quais se ramificam em baixo, médio e alto teor de carbono, sob as seguintes condições: ductilidade, homogeneidade, nível acentuado de resistência e limite de escoamento, ótima solubilidade e eficácia de corte por chamas, sem endurecer. A elevada tenacidade dos aços é requisito para incrementar a força mecânica, assim otimiza a resistência à corrosão atmosférica, ao choque, o grau de fadiga e aumenta o nível de escoamento propenso à dificuldade ofertada à tração, livre do prejuízo à ductilidade (CHIAVERINI, 2005).

Se os aços contiverem teor de carbono abaixo de 0,25% o fortalecimento de sua resistência somente ocorrerá mediante o trabalho a frio, pois se aplicar o cuidado térmico eles não respondem. Os aços com carbono abaixo de 0,25% dispõem internamente de ferrita e perlita, o que resulta em resistência inferior ao requerido pela boa ductilidade e tenacidade das ligas. No caso dos aços que possuem médio teor de carbono, isto é, entre 0,25 e 0,60%, apresentam baixo potencial de endurecibilidades, assim podem receber tratamento térmico. Os aços mais resistentes devem conter em suas estruturas em torno de 0,60 e 1,4% de carbono, o que não significa que sejam dúcteis, porém se apresentam sob aspecto endurecido e revenido, sendo resistes aos desgastes e tendente ao fio de corte afiado. Os elementos de liga dos aços de resistência e baixa liga são: vanádio, cobre, níquel e molibdênio, cujos níveis se organizam em forma de arranjos e podem alcançar 10% de teor do carbono, assim maior resistência (RÊGO, 2017).

A norma BS 7910 se secciona em 10 seções e 21 anexos. Nas seções de 1 a 6 da norma BS 7910 é possível identificar que dados são relevantes para realizar uma avaliação da criticidade da presença de trincas, tais como dimensões dos defeitos, carregamentos aplicados e natureza dos materiais. A providência para mensurar fratura, fadiga, defeitos advindos de fluência está na seção de 7 a 10 da norma BS 7910. Nesta, pode-se ainda verificar falha de fratura dúctil, fadiga, fluência, vazamentos em vasos, corrosão, trincamento assistido pelo meio e falha por instabilidade (BS, 2005).

Nos moldes da BS-7910 há três níveis de avaliação de trincas: diagrama de análise e falhas o FAD (representação gráfica), nível dos materiais, dados de entrada. A adoção de cada um dos níveis está condicionada à qualidade dos materiais, do grau dos dados e entradas disponibilizadas, sobretudo o estado geral do material (MEI, 2010).

## METODOLOGIA

Após a realização de inspeção visual em um guindaste de plataforma de petróleo e constatação de trinca na superfície do seu pedestal, destaca-se que no meio dele está trincado, procedeu-se a uma radiografia para melhor descrever o quadro da trinca, isto é, tamanho e tipologia. O critério para avaliar a trinca foi a Norma BS 7910, conforme a figura 2 ilustra:

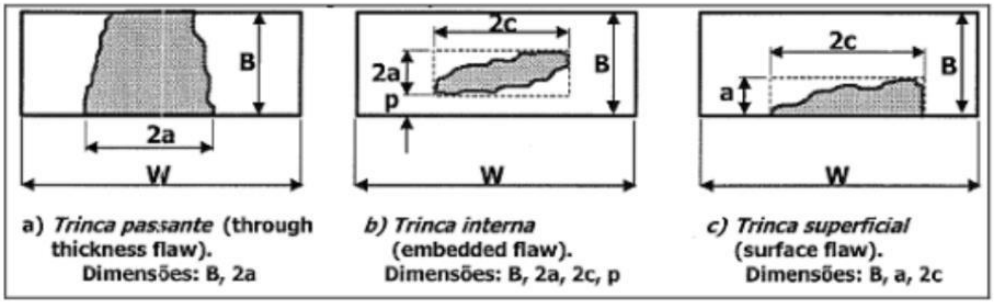



**Figura 2**: Geometria e notação de defeitos do pedestal do guindaste.
**Fonte:** BS-7910

Conforme a figura 2 foram notificadas as injúrias físicas no guindaste, o que lhe atribuiu os seguintes tamanhos:

**Tabela 1**: Dimensões da trinca do pedestal do guindaste.

| Geometria | tamanho (mm) |
|---|---|
| 2c | 20 |
| A | 5 |
| B | 25,4 |
| W | 2838,45 |

Fonte: BS-7910.

A fim de prever as tensões que agiram sobre a trinca, visto que o objetivo era descobrir em que medida a tensão age em função da existência da trinca, se aplicou o cálculo da tenacidade, cuja equação, que advém das normas:

$$\sigma_{max} = 1x10{,}4 + 1[81{,}28 + (1-1)x10{,}4] + 51{,}37$$

$\sigma_{max} = 143{,}05$ MPa

Descoberta a abertura do defeito, procedeu-se à ponderação acerca da correção de intensidade de tensão, por meio da seguinte fórmula:

$Y\sigma = 1x1x0{,}88x143{,}05$
$Y\sigma = 125{,}884$ MPa

Em seguida, se achou a tenacidade da ponta do defeito, conforme a equação:

$K_1 = 125{,}884\sqrt{3{,}14x0{,}005}$
$K_1 = 15{,}77\sqrt{m}$

Posteriormente, o parâmetro $K_R$ foi mensurado para verificar se a trinca iria afetar o funcionamento do guindaste:

$$K_R \frac{K_I}{K_{IC}} \rightarrow K_R = \frac{15{,}77}{77} \rightarrow K_R = 0{,}20$$

Por meio da construção de um diagrama, FAD, se deu a constatação acerca dos limites de falha da estrutura do material analisado que compõe o guindaste, em que foram utilizados os parâmetros, visto à necessidade em constatar o máximo alcançado do valor de $K_{R(máx)} = 0{,}707$, conforme referência concedida pela norma BS7910.

Procedeu-se, em seguida, à aferição da razão de colapso plástico $S_R$, valendo-se da BS 7910. Com isso, foi possível estimar o parâmetro de fratura linear elástico, ou seja, mediu-se o risco de acontecer o colapso da estrutura, em que foi considerada a $\sigma_n$Tensão devido a flexão, $\sigma_f$ -o valor médio entre a tensão de escoamento e o limite de resistência do material:

$$S_R = \frac{\sigma_n}{\sigma_f}$$

Por sua vez, a mensuração de $\sigma_f$ foi o seguinte:

$$\sigma_f = \frac{\sigma_e + \sigma_r}{2}$$
$$\sigma_f = \frac{256{,}85 + 280}{2} \rightarrow \sigma_f = 268{,}4\ MPa$$

Mas a aferição do motivo de colapso ocorreu por meio do cálculo:

$$S_R = \frac{\sigma_n}{\sigma_f} \rightarrow S_R = 0{,}302$$

**RESULTADO E DISCUSSÕES:**

A disseminação de tensão *in loco* na trinca, por causa das cargas permite aferir o nível de tenacidade na ponta da trinca. Além, pode-se determinar os tipos de tensões que podem ser: Tensões Primárias, Tensões Secundárias e Tensões Residuais. Essas classes são extraídas a partir de elementos de correção e concentrações de tensão.

Com o cálculo da tenacidade acha-se o defeito de abertura da trinca, resultante da tensão verificada. A mensuração da tenacidade no ponto onde foi identificado o defeito permitiu evidenciar que se a tenacidade supera a fratura do material ASTM A-36, então a partir de $K_1 < K_{IC}$, a trinca não representa ameaça ao trabalho a ser desempenhado pelo equipamento. E, se o guindaste fizer esforço, não ocorre a propagação da trinca.

A postulação gráfica do FAD deu-se a partir do cálculo do parâmetro, que por sua vez determinou o nível da fratura, por meio da mecânica da fratura linear elástica, calculada pela divisão entre profundidade de tensões onde há uma inconformidade KI e a tenacidade do material KIC. Mas, foi necessária a contribuição do diagrama FAD nível 1ª, para comparar o parâmetro calculado e o apresentado pelo diagrama, com vistas a revelar se a trinca representava risco. Assim, sendo o cálculo $K_{R(máx)}$ maior que o diagrama, a trinca representa elevado risco.

Baseando-se nisto, foi necessário calcular em que medida o risco afetaria o material analisado, isto é, o colapso plástico. O diagrama de FAD para determinar se o defeito na trinca pode ser aceito ou não é apresentado na Figura 03.

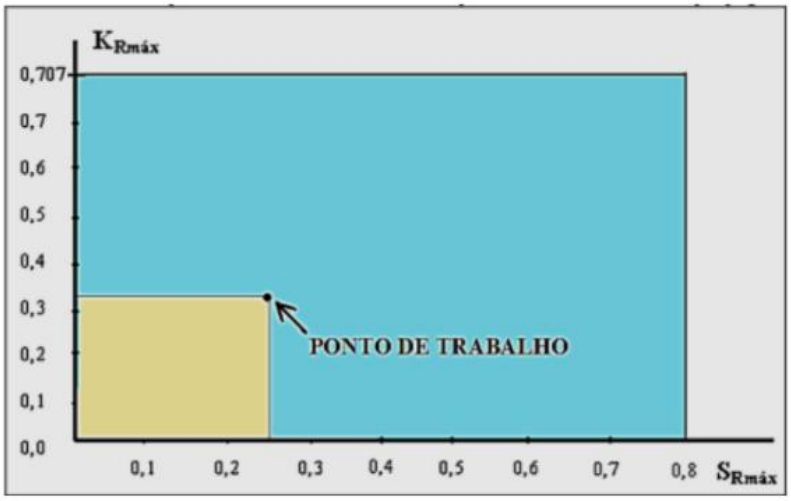



**Figura 3:** Resultados alcançados no diagrama.

Vê-se que o nível 1A alcança os limites de $S_R$ e $K_{R,}$ logo o defeito não é nocivo ao guindaste, quando este em trabalho. Mesmo que seja constatada essa falha, o equipamento pode trabalhar. No que concerne à possibilidade da trinca aumentar, aplicou-se o seguinte diagrama:

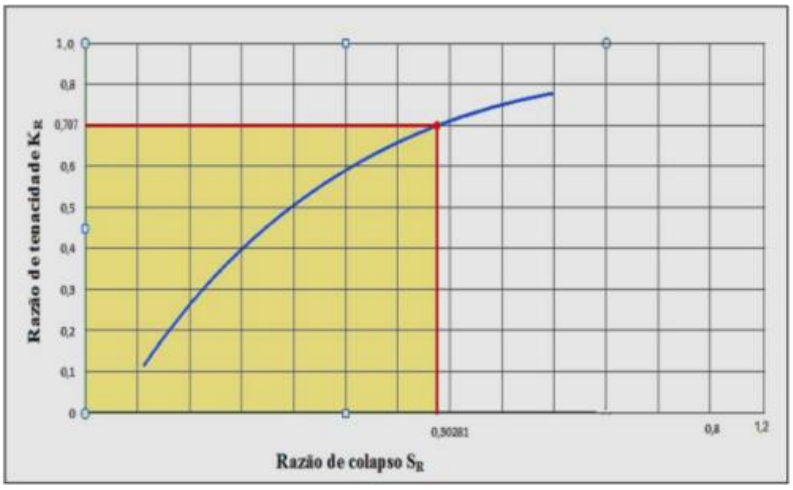



**Figura 4:** Possibilidade do crescimento da trinca.

A estimativa acima do diagrama resultou de iterações extraídas do programa Excel, em que foi possível testar a possibilidade de incremento da trinca, aumentando em 10 X o comprimento da mesma e intensidade. Resultou na medida do comprimento e da profundidade, consequentemente, um ponto de trabalho que não se adequa ao FAD. Sendo assim, se trinca apresentar profundidade "a", em torno de 25 mm e comprimento "2c" medindo 160mm, abala os valores permitidos por $S_R$ e $K_{R,}$de acordo com que manda a norma.

De acordo com um gráfico representativo da relação entre tensão e defeito (figura 5), identifica-se $K_R = 1,0$ e $S_R = 1,2$, o que permite observar que para esses valores não se verifica fator se segurança, pois de acordo com a norma o nível 1ª requer o diagrama FAD minimizado, que por sua vez já é um fator de segurança. Entretanto, de acordo com a norma referencial desse trabalho, se $K_I$, for além de $K_{IC}$, o material analisado apresenta riscos de declínio em sua função. Por isso que, se realizaram iterações, com base em $K_{I,}$ a fim de constatar se o nível crítico da trinca.

**Figura 5**: Intensidade X defeito.

Se a trinca atingir comprimento de 2c = 230 mm e profundidade de a = 25 mm, o nível de $K_I$ superará o de $K_{IC}$ em razão do defeito do pedestal. Porém, ao verificar o gráfico, constatou-se contradição, visto que em momento anterior, o pesquisador havia afirmado que, em vista do diagrama de FAD, o comprimento da trinca permitida era de 2c= 160mm. Pois bem, essa contradição deu-se em razão de que o diagrama no nível 1A gera coeficiente de segurança, com valores extremados em $K_R$ e $S_R$. Assim, se a trinca chegar a 2c= 160mm, tem-se $K_{R=1.}$

## CONCLUSÃO

Como afirmado no decorrer desse artigo, o presente é um projeto, em que alguns aspectos foram analisados. Por exemplo, a partir dos ensaios realizados salientaram-se características similares ao aço ASTM A-36, o que legitimou as conclusões de propriedades identificadas, ao longo dos ensaios de tração.

Quanto ao ensaio de tenacidade à fratura do material, observou-se que, em vista da mecânica da fratura, em que a norma referencial é a BS-7848, o ensaio não foi validado, culminando, então, em protótipo de aprendizagem e simbologia. Não se validou o presente ensaio em razão de que o corpo de prova, cujo tamanho determinado pela norma, não galgou êxito em sua condição triaxial de tensão. Em vista das limitações do material analisado pelo pesquisador, não se alcançou a elaboração de um corpo de provas de maior amplitude.

Não fosse a inviabilidade do material, consoante o método CTOD, o ensaio teria sido real. Em vez disso, o ensaio se deu pelo critério do $K_{IC.}$ Dessa forma, se justifica a realização do ensaio, sem a baliza do CTOD, nas limitações financeiras e ausência de equipamentos para a mesma propositura. Então, o valor de $K_{IC}$ foi adquirido na literatura, adequado ao material usado no pedestal do guindaste.

Se consultada a norma BS-7910, o defeito encontrado no aço do guindaste não se mostrou nocivo ao equipamento, quando em trabalho. As estimativas mobilizadas no presente ensaio evidenciaram as dimensões de criticismo e instabilidade da trinca, a ponto de causar ou não riscos extremados, isto é, fratura catastrófica. Achou-se, assim, os valores da trinca de 160 mm de comprimento, seguida de profundidade de 25 mm, o que indica que a trinca não apresenta perigo.

## REFERÊNCIAS

AMORIM, T. O. **Plataforma offshore: uma breve análise desde a construção ao descomissionamento.** Monografia de Graduação. Centro Universitário Estadual da Zona Oeste. Rio de Janeiro, RJ, 2010.

_____**BS 7910:2005. Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures, British Standard Institution**, 2005.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos.** 7. ed. São Paulo: ABM; 2005.

FORTES. C. **Mecânica da Fratura**. Disponível em: http://blogdoguindaste.com.br/.

FRANCESCHINI, A. S. **Avaliação do fenômeno de união de trincas induzidas pelo hidrogênio e sua influência na integridade estrutural de um vaso de pressão**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2011.

MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. 3 ed. São Paulo: Blucher; 2010. 646p.

MOREIRA LP. **Tenacidade à fratura e no crescimento de trinca por fadiga de aços perlíticos de aplicação ferroviária [dissertação de mestrado].** Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto; 2015.

PAULA, Jefferson; **Estrutura metálica é aposta na construção. CBCA- Centro Brasileiro da Construção do Aço.** 2015. Disponível em: www.metalurgicaassis.com.br/estrutura-metalica-e-aposta-na-construcao/. Acesso em: 15/06/2018.

PORCARO, Rodrigo Rangel. *Et al*. **Microestrutura e Propriedades Mecânicas de um Aço para Trilhos Ferroviários Soldado por Centelhamento**. Soldagem & Inspeção. 2017;22(1):59-71.

RÊGO, Eduardo Martins Fontes do**. Mecânica da fratura baseada em deformação aplicada em fadiga por fretting.** 2017. xxii, 120 f., il. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) —Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

RUCHERT, Cassius. **Mecânica das fraturas e fadiga dos Materiais**. 2014. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=151523. Acesso em: 14/06/2018.

SANTOS, D. **Avaliação à fratura dúctil em dutos contendo trincas circunferenciais instalados pelo método carretel**. Monografia de Graduação. Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro, RJ, 2014.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(veis) pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção 'área de conhecimento do trabalho'.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(X) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 27 à 31 de agosto de 2018 – Brasília, DF

# ANÁLISE DA BARRA ESTABILIZADORA EM UM VEÍCULO *OFFROAD*

**Ana Caroline Feltrini Garcia de Souza, Mateus Coutinho de Moraes, Miguel Ângelo Menezes**
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – campus de Ilha Solteira
Avenida Brasil Sul, 56 – Centro, Ilha Solteira – SP, 15385-000
E-mail: carolgfeltrini@gmail.com, mateuscoutinhom@gmail.com, miguel.menezes@unesp.br

**RESUMO:** A rolagem da carroceria de um veículo acontece quando o mesmo realiza uma manobra de curva; isso advém da transferência lateral de carga causada pela força centrífuga em que a carga é deslocada da roda externa à interna na curva. Para diminuí-la, uma das opções é a instalação de uma barra de torção, também conhecida como barra estabilizadora ou barra antirrolagem. O propósito do presente trabalho é avaliar a barra estabilizadora instalada em um veículo *off Road* e a sua influência no ângulo rolagem e comportamento dinâmico.

**Palavras-Chave:** transferência de carga lateral, barra antirrolagem, sobre-esterçante

***ABSTRACT:*** *The rolling of the body of a vehicle happens when it makes a maneuver of curve; this comes from the lateral load transfer caused by the centrifugal force in which the load is displaced from the outer wheel to the inner wheel in the curve. To reduce it, one of the options is the installation of a torsion bar, also known as a stabilizer bar or anti-roll bar. The purpose of the present work is to evaluate the stabilizer bar installed in an off-road vehicle and its influence on the rolling angle and dynamic behavior.*

***Keywords:*** *lateral load transfer, anti-roll bar, oversteer*

## INTRODUÇÃO

Antes de analisar a rolagem de um veículo é necessário introduzir alguns conceitos importantes sobre o comportamento dinâmico e da suspensão do mesmo.
A tendência sub-esterçante ou *understeer* é o escorregamento da dianteira em relação à traseira, ou seja, a dianteira do carro acaba derrapando e o piloto não tem nenhuma ação, o carro vai continuar tangenciando a curva de modo a escapar para fora dela. Já a sobre-esterçante ou *oversteer* é o escorregamento da traseira em relação à dianteira e necessita de pilotos mais experientes, pois, como a traseira derrapa, eles precisam dar "contra volante" para o carro continuar tangenciando a curva.
Os carros de competição, como o Baja, são configurados para ter tendência *oversteer*, pois, além do piloto ter a opção de corrigir o carro, o raio de curvatura é diminuído e a curva é realizada em um tempo menor. Por esses motivos, a suspensão é projetada de tal modo que o carro atinja esse comportamento dinâmico.
Para o projeto dinâmico da suspensão é primordial o estudo da transferência lateral de carga. Através dela, define-se as rigidezes das molas e as alturas dos centros de rolagem, ambos importantes para uma maior tendência *oversteer*.

A transferência de carga lateral conforme Nicolazzi (2008), acontece quando há o deslocamento de carga da roda interna para a roda externa da curva e é proveniente de influências distintas:

1. Momento no eixo considerado, devido a força centrífuga das massas suspensas;
2. Momento devido à parcela dessa força centrífuga agindo no centro de rolamento do eixo;
3. Momento devido ao estabilizador existente no eixo;
4. Momento devido à força centrífuga das massas não suspensas desse eixo.

Pela equação de Transferência de carga lateral abaixo, nota-se que a altura do centro de rolagem ($z_F$ *e* $z_R$), o peso (W) e as rigidezes ($K_F$ *e* $K_R$) do veículo interferem no cálculo, além das dimensões do mesmo, como o entre-eixos dianteiro e traseiro ($t_F$ *e* $t_R$).

$$\frac{\Delta W_F}{A_y} = \frac{W}{t_F}\left[\frac{HK_F}{K_F + K_R} + \frac{b}{l} z_F\right]$$

$$\frac{\Delta W_R}{A_y} = \frac{W}{t_R}\left[\frac{HK_R}{K_F + K_R} + \frac{a}{l} z_R\right]$$

A altura do centro de rolagem afeta a transferência de carga lateral, pois quanto maior a altura, maior a transferência. O eixo de rolagem é dado pela linha que liga os centros de rolagem dianteiro com o traseiro.
Durante uma manobra de curva, o veículo rola em direção ao lado de fora da mesma, devido a força centrífuga consequente da transferência de carga; esse fato recebe o nome de rolagem, quantificado pelo ângulo de rolagem.
Além disso, a rigidez à rolagem é a resistência que o rolamento encontra e é responsável pelo controle da tendência *oversteer*, a mais buscada pelos carros *offroads*.
Finalizada a parte dinâmica do projeto, é necessário dar início a análise cinemática, realizada através do software Lotus.
Como o foco deste trabalho é a suspensão traseira, há dois ângulos cinemáticos de grande importância para a compreensão do estudo: os ângulos de *toe* e *camber*, pois, quando quantificados corretamente, auxilia o comportamento *oversteer*.
Convergência ou *Toe in* refere-se ao ângulo entre o eixo longitudinal do veículo e as linhas do plano central das rodas, conforme mostra a Figura 1.
Em curvas, as rodas externas a ela estão mais carregadas e regem o maior percentual da trajetória. Para diminuir o raio de curvatura e aumentar a tendência *oversteer*, adota-se nas rodas dianteiras convergentes e traseiras divergentes, devido a essa pré-inclinação existente na roda externa.

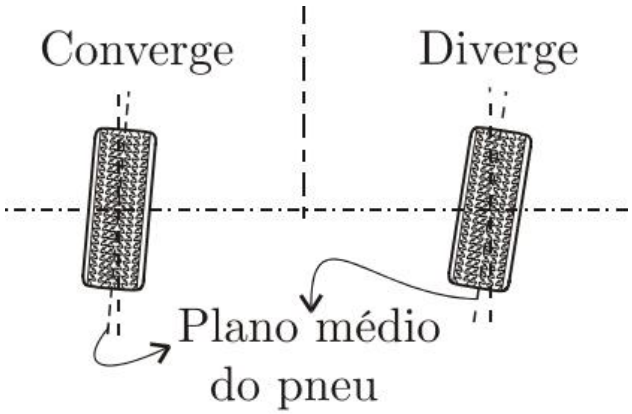



**Figura 1.** Esquema dos ânguloes de convergência e divergência (Nicolazzi, 2008)

*Camber* ou Cambagem é a inclinação do plano da roda em relação a uma vertical que passa pelo centro da superfície de contato pneu/pista (Nicollazzi, 2008). Essa inclinação pode ser negativa ou positiva, como é ilustrado na Figura 2.

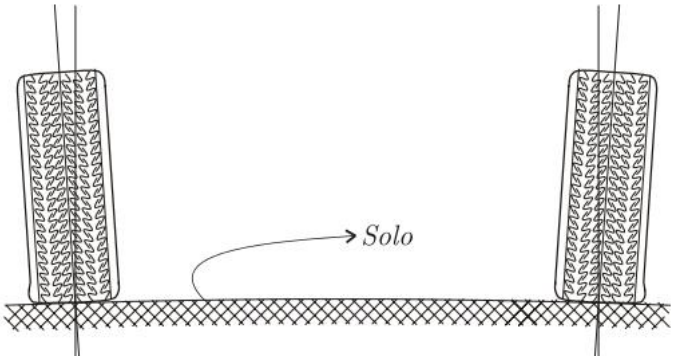



**Figura 2.** Esquema de *camber* positivo e negativo (Nicolazzi, 2008)

No caso abordado, utiliza-se *camber negative* para melhorar a absorção de forças laterais e aumentar a estabilidade em curvas, pois amplia o nível de aderência com o aumento da área de contato entre pneu e solo de modo que o desgaste desta banda de rodagem ocorra de forma uniforme.
Constatou-se que a rigidez traseira da suspensão do Mini Baja da equipe TEC Ilha não era suficiente para que o carro tivesse tendência *oversteer*, por isso, optou-se pela instalação da barra estabilizadora. Ela funciona como uma barra de torção pura na qual se utiliza da resistência torsional para resistir ao movimento de subida de uma roda e de descida da outra. Para maior efetividade, o ângulo formado entre os links que vão na suspensão e o braço da barra deve ser de 90º.

O modelo adotado é a barra estabilizadora em tipo U. Quanto maior a rigidez da barra, maior será a resistência a torção da carroceria. Quando aplicada na suspensão traseira, ocasiona uma maior saída de traseira, ou seja, o veículo torna-se mais *oversteer*. Isso acontece porque o carregamento no pneu externo irá aumentar a medida que as barras se torcem, pois, as forças que fazem o carro rolar são absorvidas pela barra estabilizadora, e essas forças são alimentadas através dos braços inferiores de controle.

## METODOLOGIA

Primeiramente, calculou-se a rigidez total ($K_{st}$) que a suspensão deveria ter através da equação 1

$$K_{st} = \frac{Wh}{\phi_{teórico}} \qquad (1)$$

Feito isso, calculou-se a rigidez que a suspensão possui através da equação 2 para verificar se havia a necessidade da instalação de uma barra antirrolagem

$$K_{sf} = \frac{{\omega_{sf}}^2 RR_f}{57{,}3} \qquad (2)$$

$$K_{sr} = \frac{{\omega_{sr}}^2 RR_r}{57{,}3} \qquad (3)$$

onde $\omega$ é a frequência natural e RR é o ride rate.

Constatando que seria necessário a instalação da barra, iniciou-se o projeto da mesma. Na Tabela 1 contém os dados do projeto e na Figura 3, seu desenho.

**Tabela 1.** Dados do projeto da Barra antirrolagem da Equipe TEC Ilha

| | |
|---|---|
| **Mancal** | Aço AISI 1020 |
| **Tubo** | Aço AISI 4130 1” |
| **Material da bucha** | Nylon |
| **Links** | Aço AISI 4130 – ¾” |
| **Braço com ajuste** | Chapa Aço AISI 1020 4 mm |
| **Terminal aurora** | 3/8” |
| **Comprimento** | 650 mm |
| **Braço de alavanca 2º ajuste (b)** | 59 mm |

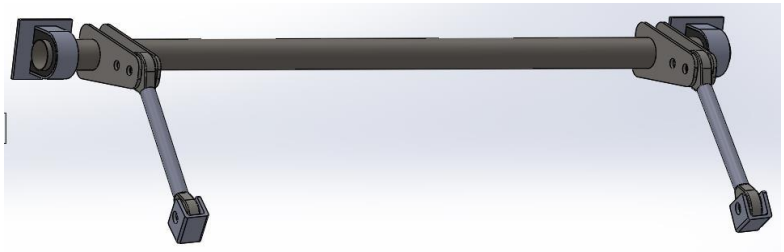


**Figura 3.** Projeto da barra de torção da Equipe TEC Ilha feito no Software SolidWorks licenciado para estudantes

Para realizar a análise da influência da barra em um veículo *offroad*, calculou-se a rigidez à rolagem ($K_\phi$) sem a barra de torção através da equação 4:

$$K_\phi = K_{sf}{S_f}^2 + K_{sr}{S_r}^2 \qquad (4)$$

onde, $K_{sf}$ e $K_{sr}$ são as rigidezes lineares da mola e $S_f$ e $S_r$ são as distâncias, respectivamente, entre as molas dianteiras e traseiras.

O cálculo do ângulo de rolagem (ϕ) foi feito pela equação 5:

$$\phi = \frac{-F_Y h}{K_\phi} \qquad (5)$$

onde $F_Y$ é a força lateral, $h_r$ é a altura do centro de rolagem

Como houve um acréscimo na rigidez da traseira por causa da barra ($K_E$), a equação para o cálculo da rigidez se tornou a equação 6:

$$K_\phi = K_{sf} {S_f}^2 + K_{sr} {S_r}^2 + K_E \qquad (6)$$

onde $K_E$ é dado pela equação 7 e $K_{barra}$ pela 8:

$$K_E = \frac{K_{barra} b^2}{2} \qquad (7)$$

$$K_{barra} = \frac{EI}{2(1+\upsilon)l} \qquad (8)$$

Com os valores das rigidezes e os ângulos de rolagem, elaborou-se um gráfico ilustrado na Figura 5.
Para validar o modelo analítico, simulou-se a barra utilizando elementos finitos através do Software Ansys disponibilizado pela ESSS a fim de obter a rigidez dela. Na simulação, as condições de contorno utilizadas estão na Figura 4:

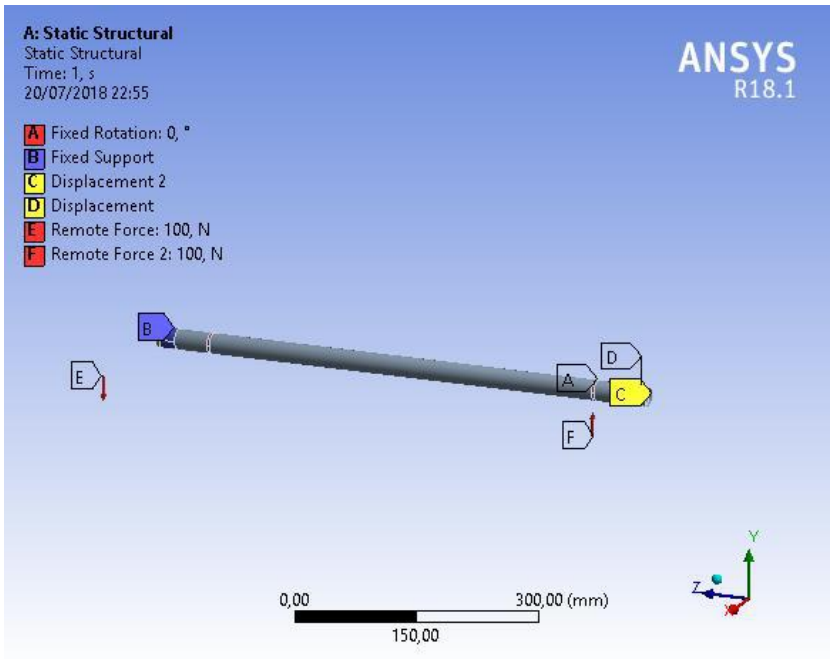



**Figura 4.** Condições de contorno utilizadas na simulação da barra estabilizadora no Software Ansys licenciado pela ESSS

**RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Inicialmente, através da equação 1, calculou-se a rigidez necessária para a suspensão do veículo, obtendo $K_{st}$ =242,268 Nm/º.
Em seguida, com as equações 2,3,4 e 5, calculou-se os valores das rigidezes sem a barra. Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 2 para melhor visualização.

**Tabela 2.** Resultados obtidos sem a instalação da barra estabilizadora

| | |
|---|---|
| **Rigidez à rolagem dianteira** | 58,45 Nm/º |

| | |
|---|---|
| **Rigidez à rolagem traseira** | 149,33 Nm/º |
| **Rigidez à rolagem total** | 207,78 Nm/º |
| **Ângulo de rolagem** | 5,18º |

Com isso, pode-se verificar que havia a necessidade da instalação de uma barra estabilizadora. Optou-se por ser feita na traseira objetivando o veículo possuir comportamento dinâmico de tendência *oversteer*.
Na simulação, variou-se a força e os valores de deformações obtidos estão na tabela 3. Encontrou-se assim, $K_{barra}$=1246 N/m e com o modelo analítico descrito pela equação 8, $K_{barra}$=1403,9 N/m.

**Tabela 3.** Valores máximos e mínimos obtidos para cada força

| Força(N) | Deformação máxima (mm) | Deformação mínima (mm) |
|---|---|---|
| 100 | 1,613359809 | -0,000833028 |
| 200 | 3,226719618 | -0,001666056 |
| 300 | 4,840079784 | -0,002499084 |
| 400 | 6,453439236 | -0,003332112 |
| 500 | 8,066799164 | -0,00416514 |
| 600 | 9,680159569 | -0,004998168 |
| 700 | 11,29351902 | -0,005831197 |
| 800 | 12,90687847 | -0,006664225 |
| 900 | 14,52023888 | -0,007497253 |
| 1000 | 16,13359833 | -0,008330281 |

Novamente, os resultados obtidos para as rigidezes com a barra estabilizadora estão dispostos na Tabela 4.

**Tabela 4.** Resultados obtidos após a instalação da barra estabilizadora

| | |
|---|---|
| **Rigidez à rolagem dianteira** | 58,45 Nm/º |
| **Rigidez à rolagem traseira** | 393,68 Nm/º |
| **Rigidez à rolagem total** | 452,13 Nm/º |
| **Ângulo de rolagem** | 2,31º |

Nota-se que a rigidez à rolagem na traseira aumentou em 1,83 vezes. Isso aconteceu porque o material utilizado foi o aço AISI 4130.
Com a instalação da barra, observou-se que, para realizar o mesmo percurso, o carro gastou quase 2.37 segundos a menos.
Na Figura 5, observa-se graficamente a variação da rolagem em função da rigidez.

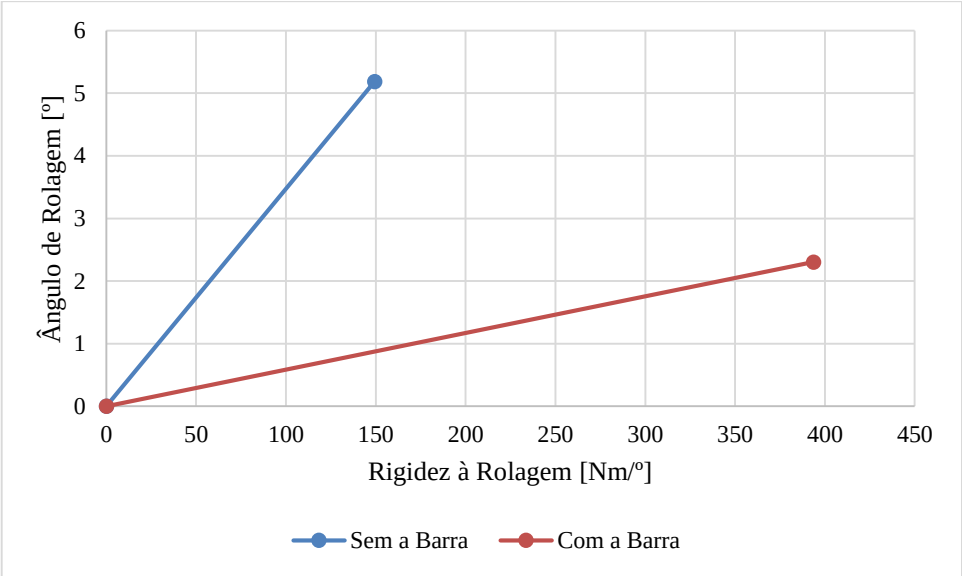



**Figura 5.** Gráfico representativo da variação do ângulo de rolagem em função da rigidez

## CONCLUSÃO

O trabalho demonstra que, após a instalação da barra estabilizadora na traseira do veículo, a rigidez à rolagem do mesmo aumentou em 37,93% e consequentemente, a rolagem da carroceria diminuiu em 44,59%. Portanto, esse resultado mostra que o desempenho do veículo em curva melhora devido ao aumento da estabilidade já que diminui o levantamento da roda traseira interna à curva.
Pela simulação numérica, obteve-se um erro percentual de 21,3%.
Nota-se ainda que o material utilizado foi superdimensionado. Como sugestão para trabalhos futuros, aconselha-se a utilizar materiais com menor resistência mecânica, como o aço AISI 1020, pois ainda possui um baixo custo quando comparado ao aço AISI 4130.

## AGRADECIMENTOS

A UNESP, a Unidade e ao Departamento de Engenharia Mecânica pelo apoio material e financeiro.

## REFERÊNCIAS

Adams, H. Chassis Engineering. USA. 1992.
Almeira, D.A. Análise da influência da barra estabilizadora no ângulo de rolagem da suspensão dianteira de ônibus. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: 2009.
Gillespie, T.D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. USA: SAE - Inc. 1992.
Milliken, Douglas L., milliken, William F. Race Car Vehicle Dynamics. 1995.
Nicolazzi, L.C., Rosa. Uma Introdução à Modelagem Quase Estática de Veículos Automotores de Rodas. Brasil: Publicação interna do GRANTE – Depto. de Engenharia Mecânica da UFSC. 2008.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção ‘área de conhecimento do trabalho’.

(X) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(X) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

**DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE**

Os autores Ana Caroline Feltrini Garcia de Souza, Mateus Coutinho de Moraes e Miguel Ângelo Menezes são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

**XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 27 à 31 de agosto de 2018 – Brasília, DF**

# ANÁLISE DA RESISTÊNCIA A TRAÇÃO DE CORPOS DE PROVA PRODUZIDOS COM TECNOLOGIA DE DEPOSIÇÃO DE FILAMENTO FUNDIDO

**Alisson Geovane Silva de Souza, Bruno Conti Franco, Daniel Amoretti Gonçalves**
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Ibirubá
Rua Nelsi Ribas Fristch, nº1.111. Bairro Esperança, Cep: 98.200-000 – Ibirubá, RS
alisson.souza@ibiruba.ifrs.edu.br, bruno.franco@ibiruba.ifrs.edu.br, daniel.goncalves@caxias.ifrs.edu.br

**RESUMO:** A prototipagem rápida vem sendo empregada pela indústria como uma forma de melhorar os seus produtos e distribuí-los no mercado de forma mais rápida. Uma destas tecnologias de prototipagem é a *Fused Deposition Modeling (FDM)*, sendo esta parte do foco deste trabalho. Será apresentado um estudo sobre as propriedades mecânicas do termoplástico biodegradável Poliácido Láctico (PLA), em corpos de prova construídos com a tecnologia FDM por uma impressora 3D de fabricação nacional. Os dados apresentados são de ensaios de tração de duas amostras de corpos de prova. Com a análise dos dados foram alcançados valores de tensão próximos aos encontrados na literatura. Com estes dados pode-se determinar a resistência à tração de uma peça produzida pela tecnologia FDM presente na impressora 3D usada para o desenvolvimento deste trabalho.

**Palavras-chave:** Ensaio de tração, impressora 3D, corpo de prova

***ABSTRACT:*** *The rapid prototyping has been used by industry as a way to improve their products and distribute them in the market faster. One of these prototyping technologies is the Fused Deposition Modeling (FDM), being this part of the focus of this work. Will be presented a study about the mechanical properties of the biodegradable thermoplastic Polylactic Acid (PLA), in workpiece built with the FDM technology by a nationally manufactured 3D printer. The data presented are from tensile tests of two samples of workpiece. With the data analysis were achieved stress values close to those found in the literature. With this data canned be determine the tensile strength of a part produced by the FDM technology present in the 3D printer used for the development of this work.*

***Keywords:*** *Tensile test, 3D printer, workpiece*

## INTRODUÇÃO

Comercialmente há uma extensa gama de máquinas e tecnologias de prototipagem rápida utilizadas para a confecção de protótipos ou produtos para uso final (Almeida, 2017). Dentre as tecnologias mais importantes em equipamentos de prototipagem rápida estão a sinterização seletiva à laser (SSL), a estereolitografia (*Stereo Lithography Apparatus* - SLA) e a deposição de material fundido (*Fused Deposition Modeling* – FDM), esta última sendo parte do foco deste trabalho (Pradela e Folle, 2014).

O emprego das tecnologias de prototipagem rápida vem aumentado progressivamente ao longo dos anos, com indústrias buscando novas formas de melhorar seus produtos e reduzir o tempo entre a concepção e a comercialização do mesmo (Pereira, 2014). Esta constante inovação faz com que seja necessário aprofundar os estudos sobre a tecnologia de deposição de material fundido para que se compreenda e se delimite os parâmetros do processo com o objetivo de otimizar o uso destes equipamentos.

Máquinas voltadas para prototipagem rápida com base na FDM são capazes de utilizar diferentes tipos de termoplásticos. Para a correta seleção deste termoplástico é preciso estudar e analisar quais deles contém propriedades mecânicas que melhor atendem às condições pelas quais o protótipo será submetido. Deste modo, empregando o termoplástico Poliácido Láctico (PLA) como material de estudo, torna-se importante realizar uma análise sobre a resistência de protótipos gerados a partir da tecnologia FDM presente na impressora 3D Cliever CL2 Pro usada para a realização deste trabalho.

Desenvolvendo um estudo voltado para a tecnologia de deposição de filamento fundido, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver uma análise das propriedades mecânicas do material PLA por meio de ensaios de tração em corpos de prova produzidos pela impressora 3D, de modo que também seja possível analisar se houve influência dos parâmetros de impressão 3D na determinação das propriedades mecânicas do material impresso.

A tecnologia por deposição de material fundido está disponível há aproximadamente 25 anos no mercado, tendo um custo relativamente menor, quando comparada às tecnologias SSL e SLA (Raulino, 2011). Desde o desenvolvimento dos primeiros equipamentos, foram publicados estudos sobre a tecnologia FDM que continuam até o presente, mostrando

novas técnicas para se obter melhores impressões, novas aplicações na indústria, etc. Desta forma, este trabalho servirá como uma forma de ampliar e aprofundar os conhecimentos voltados para área de prototipagem rápida com o uso da tecnologia de deposição de material fundido, mostrando as possibilidades que a impressora 3D utilizada neste estudo é capaz de realizar.

## METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho foi adotada uma metodologia de pesquisa de caráter exploratório com uma abordagem quantitativa. Inicialmente realizou-se uma pesquisa bibliográfica, afim de conhecer e compreender melhor a tecnologia FDM empregada na prototipagem rápida, focando em tópicos como: o princípio de funcionamento da tecnologia, os efeitos da intensidade da velocidade de deposição, a temperatura ideal de deposição para cada tipo de material, as propriedades mecânicas de cada material utilizado na FDM, etc.

### Fundamentação teórica

O funcionamento da tecnologia de deposição de filamento fundido consiste na deposição de um filamento termoplástico aquecido a partir de um bico extrusor fixado em um cabeçote que se movimenta nos eixos X-Y, enquanto a plataforma onde o material é depositado se movimenta no eixo Z (Macedo, 2011). O bico extrusor recebe continuamente o termoplástico na forma de um fio, e o deposita de forma controlada e já fundido sobre uma plataforma, em camadas, uma sobre a outra, até que o protótipo seja finalizado (Macedo, 2010).

Segundo Chua *apud* Pereira (2017, p. 13) este processo de prototipagem apresenta baixo desperdício de material, visto que é utilizado somente o necessário para construção de um protótipo.

### Materiais e métodos

Foram realizados dez ensaios de tração conforme a norma ASTM D638, em corpos de prova com duas geometrias distintas produzidos por FDM. Para a execução dos ensaios de tração foi utilizada a máquina universal de ensaios mecânicos da marca QUANTEC, com capacidade máxima de 50kN e faixa de velocidades de 0,005 a 500 mm/minuto. O material para a confecção dos corpos de prova usado foi o termoplástico Poliácido Láctico (PLA). Para o desenvolvimento dos corpos de prova, empregou-se a impressora 3D Cliever CL2 Pro, fabricada no ano de 2015, de origem nacional.

### Procedimento experimental

Os corpos de prova foram confeccionados seguindo as medidas do Tipo I, com espessura de 7mm, conforme mostra a Fig. (1), e foram tracionados no ensaio com velocidade de 5 mm/min, seguindo a norma ASTM D638. Foram construídas duas amostras distintas de corpos de prova, sendo que a geometria externa de ambas amostras é igual e conforme consta na norma, diferindo, no entanto, na estrutura interna. Serão confeccionados cinco corpos de prova para cada tipo de amostra.

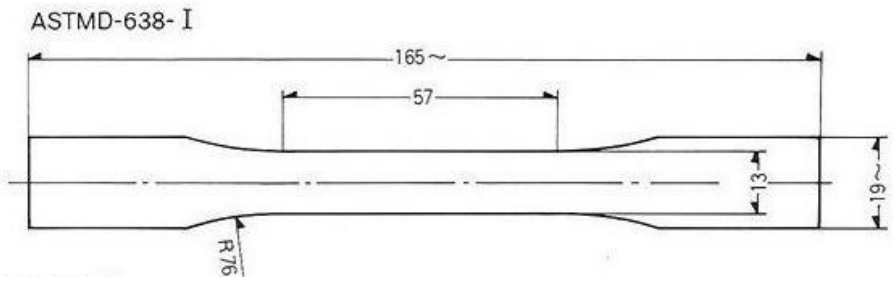



**Figura 1.** Dimensões do corpo de prova do Tipo I especificado na norma ASTM D638

A primeira amostra (amostra A) tem uma estrutura interna que corresponde a um preenchimento de 50% de material, conforme mostra a Fig. (2). A segunda amostra (amostra B) possui o preenchimento máximo feito pela impressora 3D, ou seja, de 90% de material, Fig. (3). O preenchimento utilizado para os corpos de prova é formado por uma estrutura de formato hexagonal, adaptando o seu tamanho conforme a porcentagem definida para cada corpo de prova.

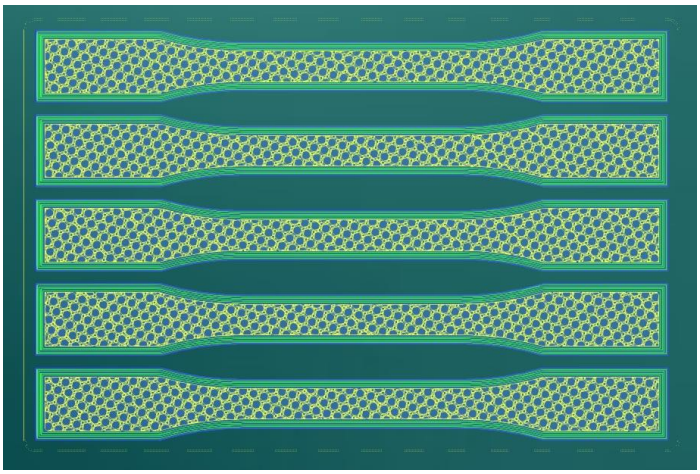


**Figura 2.** Amostra A com cinco corpos de prova mostrando o preenchimento interno de 50%

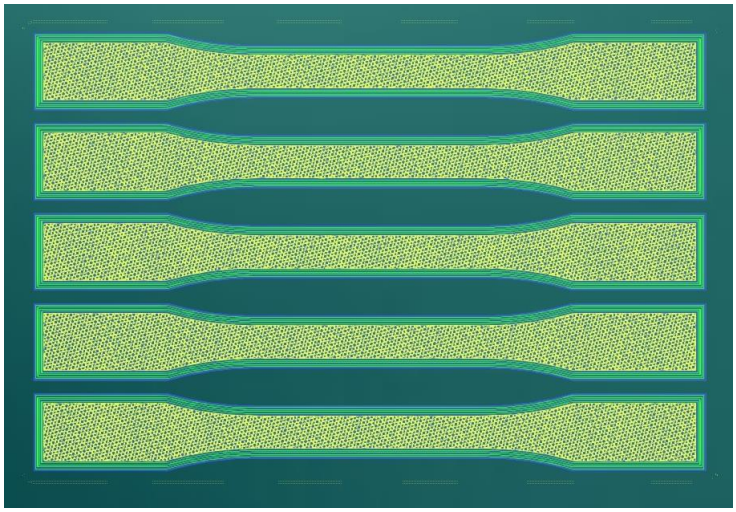


**Figura 3.** Amostra B com cinco corpos de prova mostrando o preenchimento interno de 90%

Com base na recomendação do fabricante da impressora 3D, foi empregada 70% da velocidade de deposição do termoplástico pelo equipamento, com o aquecimento do material a uma temperatura de 180° C. Com esta velocidade e com a geometria dos corpos de prova, o software da impressora estimou que o tempo de confecção seria de 8 horas e 30 minutos para a construção da primeira amostra e 13 horas e 40 minutos para a segunda amostra.

A espessura das camadas de deposição do material foi de 0,1mm, sendo inicialmente construída a base maciça composta por dez camadas e finalizando com a construção do topo igualmente maciço, composta por dez camadas. As laterais do corpo de prova são maciças, compostas por cinco paredes com espessura de 0,3mm cada. A Fig. (4) ilustra as camadas de deposição da base, do topo e das paredes dos corpos de prova de ambas as amostras

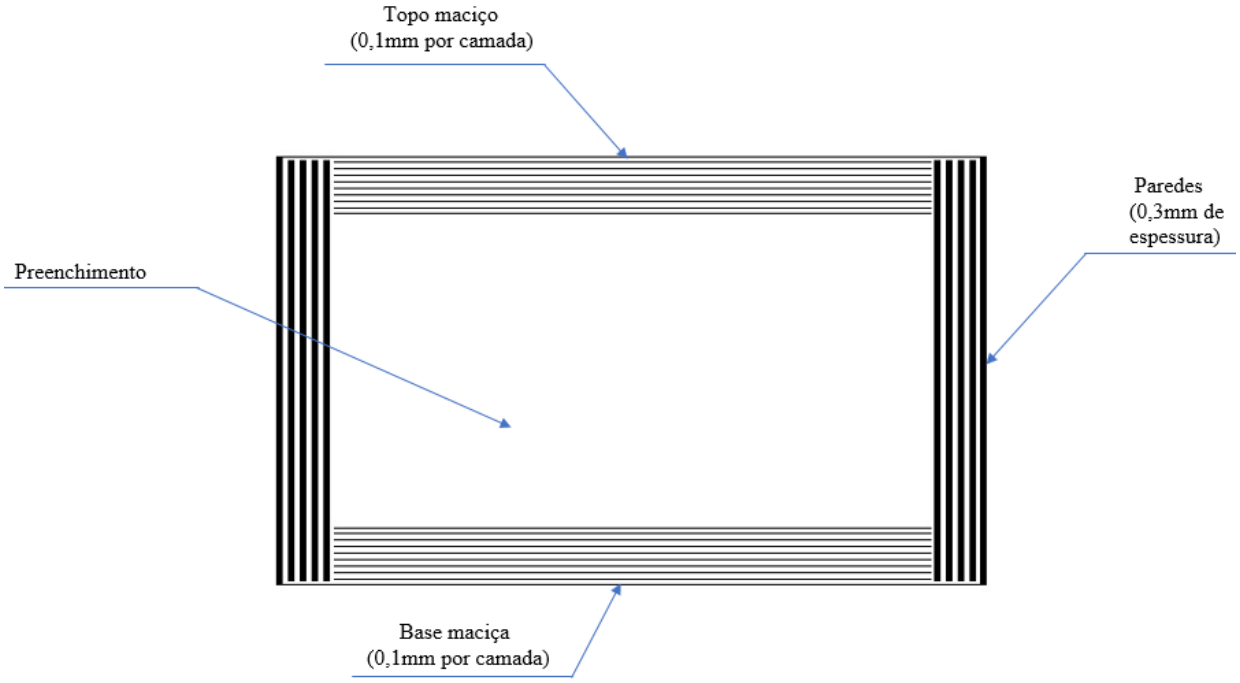



**Figura 4.** Seção transversal dos corpos de prova das amostras A e B

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo Silveira (2015), o termoplástico PLA em sua composição puro possui uma resistência à tração de 56 MPa, tendo como característica ser um material de fratura frágil, ou seja, com pouca ou quase nenhuma deformação plástica. A Fig. (5) apresenta o gráfico de tensão *vs* deformação mostrando o comportamento do PLA extrudado e do EMA-GMA puro, terpolímero em bloco randômico etileno-éster acrílico - glicidil metacrilato, junto a corpos de provas feitos com diferentes tipos de blendas.

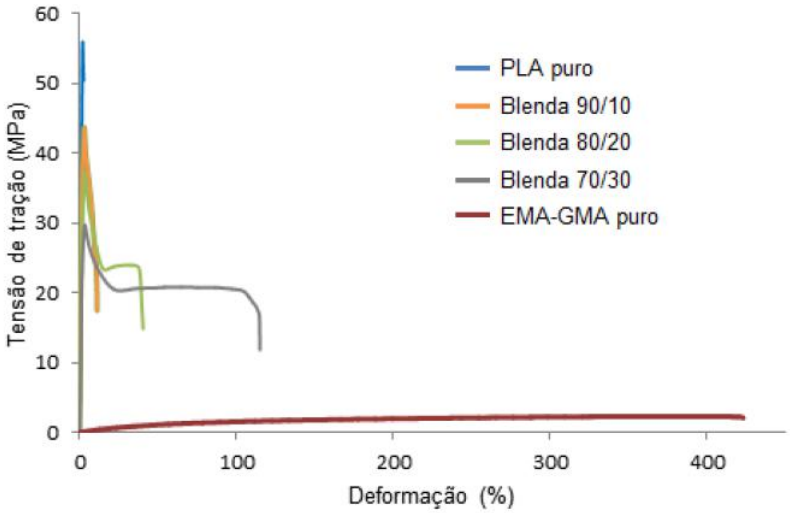



**Figura 5.** Gráfico de tensão *vs* deformação mostrando o comportamento do PLA em relação a diferentes tipos de blendas quando submetido à tração
Fonte: Silveira, 2015

Com os resultados dos ensaios de tração deste trabalho, foi possível determinar o limite de resistência à tração de cada corpo de prova da amostra A, com preenchimento de 50%, e da amostra B, com preenchimento de 90%. Nas tabelas 1 e 2 é possível visualizar a tensão de ruptura obtida pelo ensaio em cada um dos cinco corpos de prova usados nas duas amostras.

**Tabela 1.** Tensão de ruptura de cada corpo de prova da amostra A, de preenchimento de 50%, seguido da média e do desvio padrão e da relação resistência máxima a tração e massa do corpo de prova

| CORPO DE PROVA | RESISTÊNCIA A TRAÇÃO (MPa) | RESISTÊNCIA A TRAÇÃO/MASSA (MPa/g) |
|---|---|---|
| **1** | 39,44 | 1,97 |
| **2** | 40,36 | 2,00 |
| **3** | 40,91 | 2,04 |
| **4** | 40,53 | 1,95 |
| **5** | 40,68 | 2,34 |
| **MÉDIA** | 40,38 | 1,99 |
| **DESVIO PADRÃO** | 0,56 | - |

**Tabela 2.** Tensão de ruptura de cada corpo de prova da amostra B, de preenchimento de 90%, seguido da média e do desvio padrão e da relação resistência máxima a tração e massa do corpo de prova

| CORPO DE PROVA | RESISTÊNCIA A TRAÇÃO (MPa) | RESISTÊNCIA A TRAÇÃO/MASSA (MPa/g) |
|---|---|---|
| **1** | 54,72 | 2,32 |
| **2** | 54,72 | 2,32 |
| **3** | 55,26 | 2,35 |
| **4** | 54,99 | 2,32 |
| **5** | 55,41 | 2,34 |
| **MÉDIA** | 55,02 | 2,33 |
| **DESVIO PADRÃO** | 0,31 | - |

Com base nos resultados das médias e desvio padrões apresentados, pode-se estimar o tamanho da amostra necessário, utilizando um alfa de -0,05, para um erro de 0,5MPa. Para a amostra A o tamanho da amostra para um erro permitido de 0,5MPa é de n=5. Para a amostra B o tamanho da amostra para um erro permitido de 0,5MPa é de n=2.

Nos gráficos da Fig. (6) é possível visualizar as curvas tensão *vs* deformação de cada corpo de prova da amostra A, com preenchimento de 50%, e da amostra B, com preenchimento de 90%.

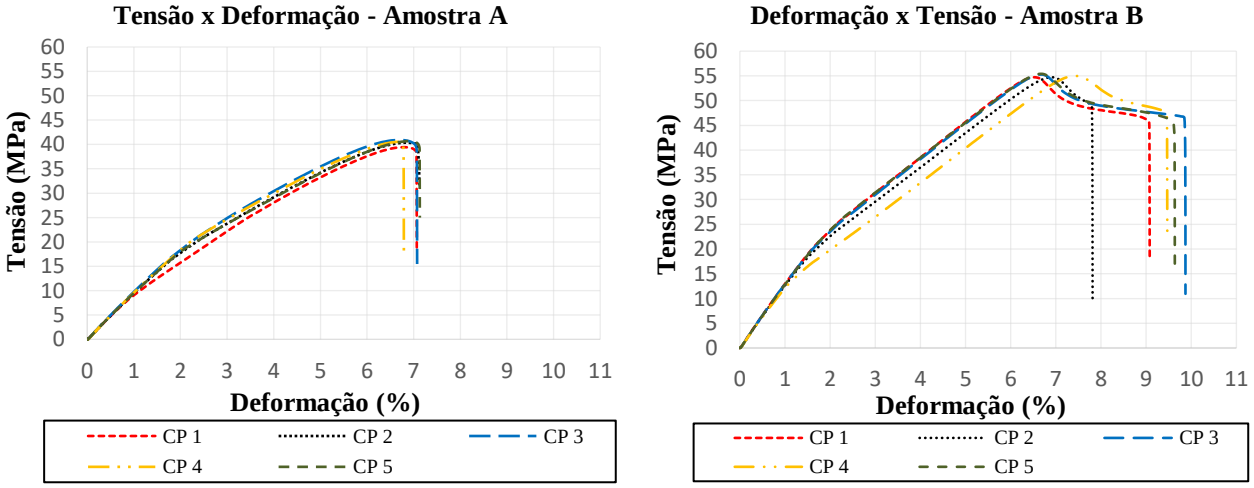



**Figura 6.** Gráfico do comportamento do PLA nos ensaios de resistência à tração das amostras de corpos de prova com preenchimento de 50% e 90% de material

Segundo a literatura, o PLA apresenta um comportamento que o classifica como material frágil, com pouca deformação plástica quando submetido à tração. Nos ensaios deste trabalho foi possível observar deformação uniforme considerável na amostra A de corpos de prova com preenchimento de 50%, conforme mostra o primeiro gráfico da Fig. (6), rompendo logo após a tensão máxima de tração, sem apresentar deformação com estricção da seção. A amostra B com 90% de preenchimento, segundo gráfico da Fig. (6), apresentou menor fragilidade que a amostra A, deformando uniformemente até a tensão máxima, com estricção da seção transversal quando atingida a tensão de ruptura.

Os resultados obtidos pelos ensaios realizados são semelhantes aos encontrados na literatura, porem diferenciam-se no comportamento plástico que o material tracionado apresentou. Esse comportamento plástico pode ser explicado pelo modo que a impressora 3D depositou o material sobre a mesa de impressão para construção do corpo de prova.

Na amostra A, de preenchimento de 50%, foi obtido uma tensão máxima de 40,38 MPa com a realização dos ensaios. Nesta amostra, a base, a superfície e as paredes dos corpos de prova eram maciças, porém o seu interior era feito de estruturas hexagonais que continham espaços em seu interior. Quando os corpos de prova foram submetidos à tração, a primeira trinca formada se propagou através da seção transversal do corpo de prova em direção ao núcleo, que era parcialmente oco. Ao atingir este vazio, houve uma propagação da fratura, tendo um efeito dominó, levando ao rompimento do corpo de prova. A deformação plástica considerável do material se dá pelo fator de deposição linear das paredes e a deposição a 45º da base e da superfície do corpo de prova. Essa deposição, por se tratar da tecnologia FDM que deposita o material em fios para formação do corpo de prova, fez com que os filamentos depositados fundidos uns aos outros, acabassem se deformando quando submetido a tração. Esse fator pode ser visualizado nos corpos de prova após o ensaio, pois houve um esbranquiçamento em áreas ao longo da seção transversal do mesmo, o que indica que houve deformação no ponto de união entre os filamentos depositados. A Figura 7 mostra um corpo de prova com esbranquiçamento em áreas ao longo da seção transversal.

**Figura 7.** Corpo de prova da amostra A apresenta pontos de esbranquiçamentos ao longo da seção transversal

Na amostra B, de preenchimento de 90%, foi possível obter uma tensão máxima de 55,02 MPa. Nesta amostra a base, a superfície e as paredes dos corpos de prova foram construídas da mesma maneira que a amostra anterior, porém o interior dos corpos de prova era quase que preenchido totalmente, tendo poucos espaços ocos em seu interior. Por este fator esta amostra suportou uma tensão maior que a amostra anterior, já que durante o ensaio a propagação da trinca atingiu uma profundidade maior, ocorrendo, inclusive, uma deformação plástica. A deformação alcançada por esta amostra de corpos de prova se dá pelo mesmo fator que ocorreu na amostra A. Houve uma deformação no ponto de união entre os filamentos que foi possível ser identificada através do esbranquiçamento de pequenas áreas da seção transversal do corpo de prova, conforme mostra a Fig. (8).

**Figura 8.** Corpo de prova da amostra A apresenta pontos de esbranquiçamentos ao longo da seção transversal

Dois fatores que podem ter favorecido a deformação considerável dos corpos de prova da amostra A, de preenchimento de 50%, e da amostra B, de preenchimento de 90%, são a temperatura de fusão do termoplástico PLA e a velocidade de deposição do mesmo pela impressora 3D. A velocidade de impressão de 70% pode ter favorecido a fundição dos filamentos uns aos outros de forma mais uniforme se compararmos a uma impressão com velocidade de 100%, onde os filamentos podem ficar mal fundidos e com falhas de deposição em algumas áreas. A temperatura adotada de 180°C pode ter sido um fator que influenciou na fundição entre os filamentos depositados de forma consolidada, mesmo considerando o tempo que a impressora leva para fazer a deposição completa de uma camada.

## CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, pode-se obter a resistência a tração de materiais impressos com preenchimento de 50% e 90% pela impressora 3D Cliever CL2 Pro utilizando o termoplástico Poliácido Láctico (PLA) como matéria prima. Com preenchimento de 90% observou-se maior resistência a tração. Quando usado o preenchimento de 50%, a amostra A apresentou uma redução da resistência a tração em torno de 27%, comparada com a amostra B.

São necessários mais estudos para concluir sobre a relação entre taxa de preenchimento e resistência a tração. Entretanto, foram observados valores de tensão próximos aos do PLA especificados pela literatura e valores de deformação superiores, fator este, que resultou na redução da fragilidade do material.

Os parâmetros de velocidade de deposição e temperatura do material são fatores que podem influenciar nas propriedades mecânicas do material impresso, pois garantem fundição mais uniforme entre os filamentos depositados pela impressora. Desta forma, os corpos de prova das amostras A e B tiveram deformações superiores às encontradas na literatura, sendo possível observar o esbranquiçamento em pontos onde os filamentos estavam unidos (fundidos) uns aos outros.

A impressora 3D Cliever CL2 Pro, com a conclusão deste trabalho, mostrou ser um equipamento que não se limita à apenas a criação de protótipos, mas que possui a capacidade de construir peças que tenham como destino final uma aplicação prática.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. “D-638: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics”. West Conshohocken, 2014. 17 p.

ALMEIDA, Wagner José de. “Otimização estrutural de protótipos fabricados pela tecnologia FDM utilizando o método dos elementos finitos”. 2007. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos Departamento de Engenharia Mecânica, São Carlos, 2007.

BRAMBILLA, Vanessa Cristina. 2013. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Mestrado em Engenharia de Processos e Tecnolog“Avaliação das propriedades mecânicas, térmicas, morfológicas e degradação de compósitos de poli(ácido lático)/buriti”. ias, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2013.

FOGGIATTO, José Aguiomar *et al*. “Estudos de parâmetros da tecnologia de prototipagem rápida FDM para melhorias no planejamento de processo”. V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**,** Belo Horizonte, v. 12, n. 12, p.1-10, 17 abr. 2009.

MACEDO, Graciele Marcela Almeida. “A utilização de tecnologias de prototipagem rápida no processo de desenvolvimento de produto: um estudo de caso”. VII Congresso Nacional de Excelência em Gestão, p.1-20, 12 ago. 2011.

MACEDO, Graciele Marcela Almeida. **“**Comparação de duas diferentes tecnologias de prototipagem rápida na concepção de novos produtos: estereolitografia e modelagem por deposição de material fundido (FDM) - um estudo de caso”. 2010. 66 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Juiz de Fora Curso de Graduação em Engenharia de Produção, Juiz de Fora, 2010.

PEREIRA, Frederico David Alencar de Sena. **“**Desenvolvimento de um Cabeçote para Extrusão de Filamento Fundido Aplicado a Manufatura Aditiva”. 2014. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2014.

PORTO, Thomás Monteiro Sobrino. **“**Análise de mercado sobre tecnologias de prototipagem rápida por adição de material”. 2016. 93 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

PRADELLA, Marcelo Pinto; FOLLE, Luis Fernando. “Análise de mercado sobre tecnologias de prototipagem rápida por adição de material”. Blucher Design Proceedings, Gramado, v. 1, n. 4, p.1-12, 30 set. 2017.

RAULINO, Bruno Ribeiro. **“**Manufatura aditiva: desenvolvimento de uma máquina de prototipagem rápida baseada na tecnologia FDM (modelagem por fusão e deposição)”. 2011. 111 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenheiro de Controle e Automação, Universidade de Brasília Faculdade de Tecnologia Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Brasília, 2011.

SILVEIRA, Eder Baroni da. “Estudo da tenacificação do PLA pela adição de elastômero termoplástico EMA-GMA”. 2015. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção ‘área de conhecimento do trabalho’.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(X) Fabricação Mecânica e Materiais

( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

# ANÁLISE DO FENÔMENO DAS BOLHAS EM SOLDAGEM SUBAQUÁTICA MOLHADA COM ARAME TUBULAR AUTOPROTEGIDO

**Camilla Mara Mendonça**
**Alexandre Queiroz Bracarense**
**Douglas de Oliveira Santana**
**Marcelo Teodoro Assunção**
Universidade Federal de Minas Gerais – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica
Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha 31270-901 - Belo Horizonte, MG – Brasil
camillammendonca@yahoo.com.br

**RESUMO:** O fenômeno de formação de bolhas está fortemente ligado a variação dos sinais elétricos e estabilização do arco de solda na soldagem subaquática molhada com arame tubular (FCAW). O bom entendimento desses fenômenos pode ser usado para uma melhor otimização dos parâmetros de soldagem e consequentemente uma melhoria na qualidade final da solda. Com este trabalho observou-se o comportamento dinâmico das bolhas formadas, uma possível relação de mudança de frequência e do tamanho das bolhas geradas com a mudança dos parâmetros de soldagem. Analisou-se ainda a ocorrência dos modos de evolução de bolhas e sua correlação com os valores dos sinais elétricos, e a comparação da formação de bolhas com bico de contato mantido seco e molhado. A formação de bolhas se mostrou um fenômeno instável e a geometria da bolha está em constante mudança. Assim, por meio do controle dos parâmetros de soldagem percebeu-se que é possível otimizar um tamanho de bolha ideal para melhorar a proteção do arco elétrico e evitar a sua extinção.

**Palavras-Chave:** Soldagem subaquática, estabilidade do arco, formação de bolhas.

***ABSTRACT:*** *The bubble formation mechanism is strongly associated with variation in electrical signals and arc stability in flux cored underwater welding (FCAW). Good understanding of bubble formation mechanism can be helpful in achieving welding parameters that produce better weld beads. This work aims to investigate the dynamic behavior of bubbles formed in underwater welding, searching for a relation between frequency of formation and size of formed bubbles associated with changes in welding parameters. Verify the bubble evolution modes related to electrical signals and compare bubble formation in two different conditions, welding with the contact tip immerged in water and with the contact tip dry inside a welding torch that isolates it from the water environment. The bubble formation mechanism was an unstable phenomenon and bubble geometry is constantly changing. Thus, it was possible to conclude that controlling the welding parameters is possible to optimize bubble diameter and, so, improve arc protection avoiding its extinction.*

***Keywords:****Underwater welding, arc stability, bubble evolution mechanism..*

## 1. INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda de combustíveis fosseis, as instalações offshore precisam cada vez mais aumentar a produção de petróleo e gás natural. Haverá sempre a necessidade de se fazer reparos em embarcações, oleodutos e até mesmo nas próprias plataformas. Até então, a soldagem subaquática com eletrodo revestido tem sido a mais utilizada. Entretanto, reparos em águas mais profundas necessitam de sistemas automatizados de soldagem, no qual, a soldagem com arame tubular pode ser totalmente robotizada, aumentando a importância do seu estudo (Teichmann, 2000).

Como a soldagem é realizada no ambiente aquoso, o principal obstáculo encontrado é a presença da água no processo. Quando comparada com outros óxidos e ingredientes presentes no fluxo do arame, a água é termodinamicamente instável e se decompõe facilmente em contato com o arco elétrico produzindo hidrogênio e oxigênio. Esses átomos ou gases em conjunto com os gases provenientes da decomposição do fluxo, formam bolhas que protegem o arco. As bolhas crescem até atingir o volume crítico, depois do qual o equilíbrio de forças é quebrado. Quando a força de flutuação domina, as bolhas movem-se para a superfície onde entram em colapso. Depois que a bolha se torna instável uma nova bolha se forma dando continuidade ao ciclo (Pessoa, 2007).

O deslocamento das bolhas carrega consigo muito calor da superfície do metal causando o efeito de rápido resfriamento durante o processo. Com a elevada velocidade de resfriamento são impostas algumas características micro estruturais ao metal de solda e à zona termicamente afetada (ZTA). São geradas na ZTA microestruturas de elevada dureza, diminuindo a ductilidade e, consequentemente, a capacidade de deformação da solda (Oliveira et.al, 2013).

O objetivo deste trabalho é observar o comportamento dinâmico das bolhas formadas, o modo predominante de evolução das bolhas, uma possível relação de mudança no tamanho e frequência de formação das bolhas geradas com a mudança de parâmetros de soldagem e com a mudança do uso do bico de contato seco e molhado. O uso dos arames tubulares possui um grande potencial para a aplicação na soldagem subaquática molhada e o fenômeno das bolhas no processo de soldagem subaquática está intimamente relacionado a estabilidade do arco elétrico. Desta forma, o bom entendimento deste fenômeno pode propiciar soldas de melhor qualidade.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Materiais

Para realização das soldas foram utilizadas chapas de aço SAE 1020 com dimensões de 200 de comprimento, 90 mm de largura e 19 mm de espessura. O consumível utilizado foi eletrodo tubular auto protegido AWS SFA 5.20 E71T-11 com 1,6 mm de diâmetro do arame, um eletrodo comercial da empresa ESAB-TUBROD 711OA. Todas as soldagens foram realizadas em um aquário com água doce na profundidade de 0,30 m de coluna d'água e em temperatura ambiente.

A tocha de soldagem utilizada para ambos os processos FCAW subaquática molhada (bico seco e molhado) foi desenvolvida no Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação – LRSS- UFMG, pelo mestre em Engenharia Mecânica Marcelo Teodoro Assunção e pelo professor PhD Alexandre Queiroz Bracarense. Esse dispositivo possui um sistema de vedação na saída do arame tubular que impede a entrada de água na região do bico de contato. A tocha também possibilita que o processo de soldagem seja realizado como na maneira convencional, mantendo o bico de contato na água quando os componentes do sistema de vedação são retirados (Assunção & Bracarense, 2017). Na Figura 1 é possível visualizar a tocha de soldagem com ambas as disposições:

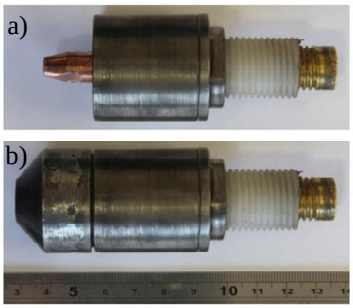



**Figura 1.** Tocha de Soldagem para FCAW subaquática. (a). Sem sistema de vedação (b). Com o sistema de vedação

Utilizou-se ainda uma câmera de alta velocidade no modelo PHANTO MIRO 110, com capacidade de gravação de 1600 quadros por segundo e as lentes Pentax ALBINAR ADG com auto zoom macro 80-200 mm f 4.5-4.6 e a lente Canon Zoom Lens EF 90-300 mm f 4.5-5.6 USM- Objetiva. A fonte de soldagem utilizada foi um retificador de tensão constante, modelo Bambozzi TRR 3100 S. Para a aquisição dos sinais de tensão, corrente e velocidade do arame, fez-se o uso do sistema SAP V4.

Um sistema de deslocamento linear com um dispositivo de soldagem do tipo "tartaruga" foi utilizado fixado em um carrinho sobre um trilho, garantindo um deslocamento linear do corpo de prova com velocidade constante.

### 2.2 Procedimento experimental

A câmera foi posicionada próxima ao aquário, de modo a obter o melhor foco, e os parâmetros utilizados foram: resolução de 1024 x 768 pixels, taxa de amostragem de 1000 quadros por segundo. Com esses parâmetros, foi possível gravar 5 s de filmagem. As imagens obtidas foram analisadas pelo software Phantom CV 2.8.

As soldagens foram realizadas em um aquário com água doce, à temperatura ambiente, ne profundidade de 0,30 m. A água era substituída a cada duas soldas. Os parâmetros de soldagem mantidos fixos podem ser vistos na Tab. 1:

**Tabela 1.** Valores para os parâmetros fixos de soldagem

| Parâmetro | Valor |
|---|---|
| Ângulo de inclinação da tocha | 0 graus |
| Velocidade de soldagem | 450 mm/min |
| Stick Out | 20 mm |
| Profundidade | 0,3 m |

Foram realizadas 8 soldas para a análise das imagens e sinais elétricos. Para cada solda foi estabelecido um parâmetro inicial distinto, afim de comparar a dinâmica da formação de bolhas com a variação dos parâmetros de soldagem. Na Tabela 2 estão evidentes os 8 parâmetros escolhidos:

**Tabela 2.** Valores iniciais para os parâmetros variáveis de soldagem

| Amostra | Condição | Tensão[V] | Vel. Arame [m/mim] |
|---|---|---|---|
| 1 | Bico seco | 26 | 4 |
| 2 | Bico seco | 26 | 5 |
| 3 | Bico seco | 30 | 4 |
| 4 | Bico seco | 30 | 5 |
| 5 | Bico molhado | 26 | 4 |
| 6 | Bico molhado | 26 | 5 |
| 7 | Bico molhado | 30 | 4 |
| 8 | Bico molhado | 30 | 5 |

Na condição de bico seco foi utilizada a tocha com o sistema de vedação para impedir a entrada de água no ponto de contato. Já o sistema com bico molhado, utilizou-se a mesma tocha, sem o sistema de vedação.

Para cada soldagem, o corpo de prova foi fixado ao carrinho e a tocha a um suporte. O polo positivo da fonte foi acoplado na chapa e o negativo ao alimentador de arame. A medição da corrente elétrica foi realizada com um sensor Hall posicionado na saída do terminal positivo da fonte de soldagem. A velocidade de alimentação do arame foi medida com o sensor posicionado entre a bobina e o motor do alimentador. Por fim, para medição da tensão, os terminais do sensor foram conectados à tocha e à chapa de soldagem. A montagem completa pode ser vista na Fig. (2):

**Figura 2.** Montagem do sistema de soldagem

O início da aquisição dos sinais elétrico e da gravação das filmagens foram acionados manualmente no mesmo instante, com intuito de sincronizar as medições.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Análise dos Sinais Elétricos e Velocidade de Alimentação do Arame

Os valores médios dos sinais de tensão, corrente e velocidade de arame com seus respectivos desvios padrões podem ser visualizados na Tab. 3:

**Tabela 3.** Valores médios para tensão, corrente e velocidade do arame

| Amostra | Condição | Tensão [V] | Desvio Padrão | Corrente [A] | Desvio Padrão | Vel. Arame [m/mim] | Desvio Padrão |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Bico seco | 24,56 | 2.27 | 262,48 | 37,72 | 3,91 | 0,14 |
| 2 | Bico seco | 23,8 | 2,42 | 300,06 | 39,58 | 5,21 | 0,15 |
| 3 | Bico seco | 30,47 | 3,32 | 269,43 | 55,06 | 3,8 | 0,14 |
| 4 | Bico seco | 30 | 3,7 | 297,72 | 93,85 | 4,72 | 1,19 |
| 5 | Bico molhado | 24,57 | 2,25 | 312,93 | 51,78 | 4,08 | 0,11 |
| 6 | Bico molhado | 23,97 | 2,7 | 334,75 | 61,29 | 5,14 | 0,16 |
| 7 | Bico molhado | 30,27 | 3,72 | 304,89 | 91,11 | 4,03 | 0,15 |
| 8 | Bico molhado | 29,66 | 3,87 | 337,9 | 87,03 | 5,28 | 0,14 |

Por meio dos valores de desvio padrão da corrente e tensão é notório que houve pouca dispersão em relação à média, com valores de desvio menores para o bico de contato seco, se comparado as mesmas condições, ou seja, amostra 1 com a 5, 2 com 6 e assim sucessivamente. Isso indica uma maior estabilidade do arco elétrico quando mantido o bico de contato seco. Apenas o valor para amostra 4 mostrou um desvio maior, devido a uma falha ocorrida na alimentação do arame.

É possível ainda analisar as variações dos sinais elétricos para as oito amostras utilizando oscilogramas, os quais podem ser vistos na Fig.3.

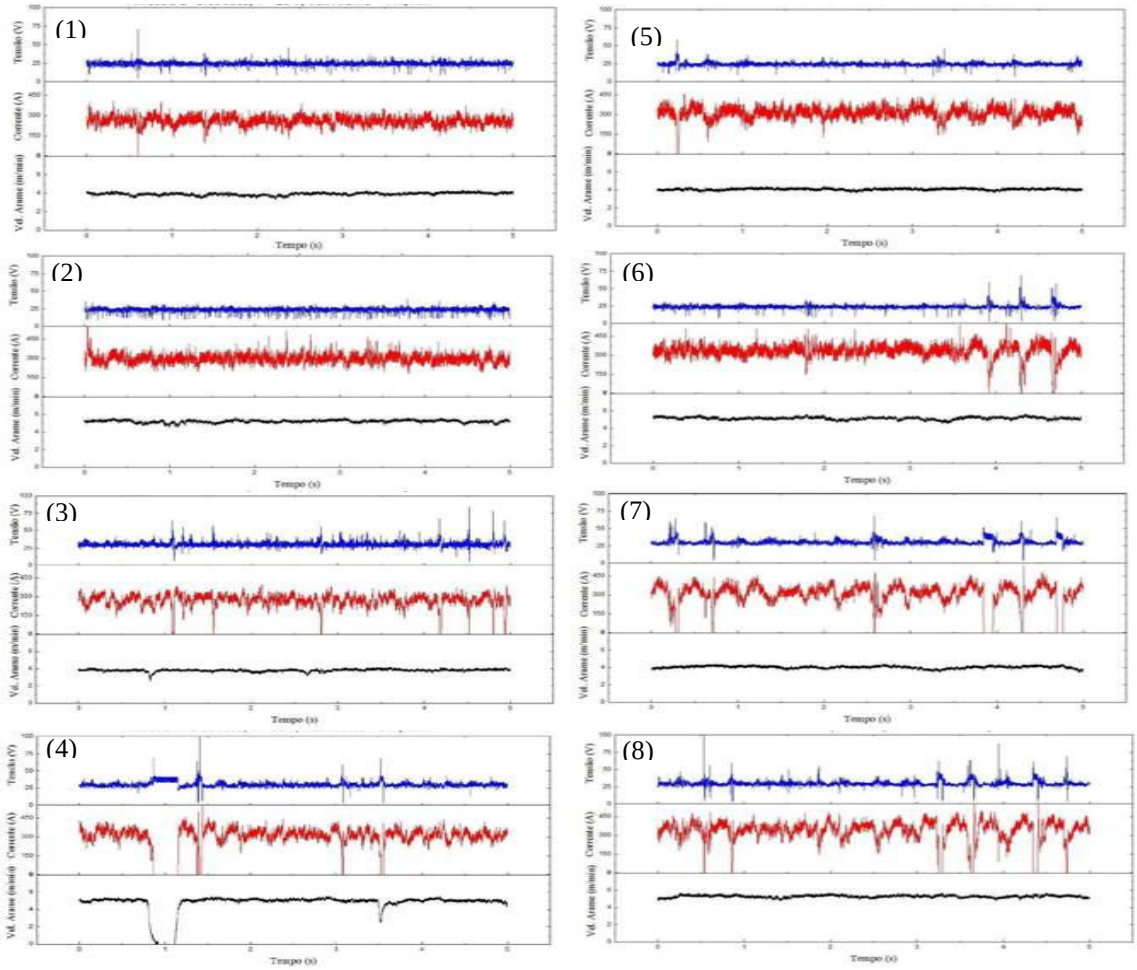



**Figura 3.** Valores dos sinais de corrente, tensão e velocidade de alimentação de arame para as amostras de bico seco (1 a 4) e bico molhado (5 a 8)

Analisando as amostras 1 e 2, verifica-se que ambas apresentaram velocidade de arame com baixa dispersão. No oscilograma de tensão houve uma distribuição pequena em relação à média e há a formação de curtos circuitos mais

frequentes na amostra 2. Já a corrente apresenta um comportamento inverso ao de tensão, havendo um ponto de extinção do arco na amostra 1, no intervalo de 0 a 1 s.

A amostra 3 indica modo de transferência globular e há extinção do arco em vários pontos ao longo do tempo, sendo refletidos pelos picos de tensão. Já na amostra 4 houve um intervalo de interrupção da alimentação de arame, próximo ao tempo de 1 s, ocasionando um período mais longo de extinção do arco, levando a tensão do arco a permanecer próximo ao valor de 42 V (tensão em vazio da fonte). Houve mais 3 pontos de extinção do arco, entretanto não houve muita variação da tensão e da corrente em torno dos seus valores médios.

As amostras 5 e 6 apresentaram a formação de curtos circuitos, sendo mais frequentes na 6, embora tenha havido pouca dispersão nos valores da tensão em relação à média. Em relação à corrente, a amostra 5 apresentou boa estabilidade do arco, tendo apenas um ponto de extinção próximo ao início da aquisição dos dados. Já a amostra 6, apesar de apresentar uma boa estabilidade ao longo do tempo, no final do processo indicou três pontos de extinção do arco elétrico. A velocidade o arame manteve com baixa dispersão para ambas as amostras.

As amostras 7 e 8 apresentaram comportamentos muito semelhantes. As velocidades de arame se mantiveram com baixas oscilações em relação à média, houve extinção do arco em ambas as amostras e houve a presença de tensão em vazio, também nas duas amostras

### 3.2. Análise das Filmagens

As imagens obtidas com as soldagens realizadas com o bico de contato seco podem ser vistas na Fig. 4, no entanto, não ficaram com uma boa qualidade, assim não foi possível observar a dinâmica de evolução das bolhas e o seu diâmetro máximo. Foi possível, entretanto, analisar as imagens quando as bolhas já estavam na fase de destacamento. À medida que foram aumentando os valores de tensão e corrente, pode-se observar que os volumes das bolhas também aumentaram.

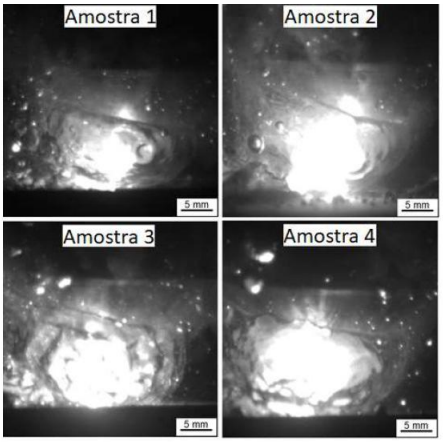



**Figura 4.** Formas típicas das bolhas com bico de contato seco para as amostras 1-4

O fenômeno de formação de bolhas não apresenta um padrão na forma e tamanho das bolhas formadas. Pode ser visto na Fig.5 a sequência de oito bolhas da amostra 5 quando estavam com seus diâmetros máximos.

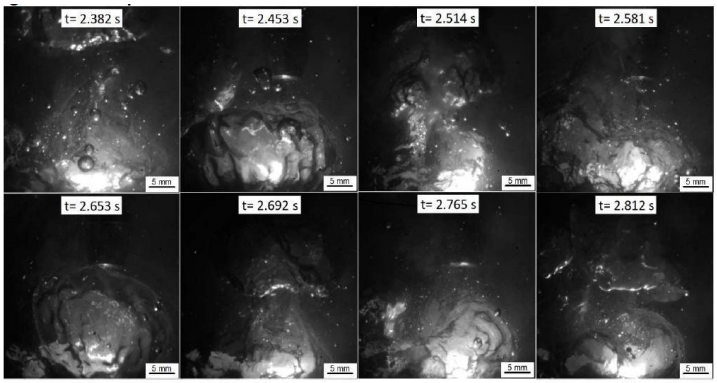



**Figura 5.** Sequência de bolhas da amostra 5 com diâmetro máximo

Com os valores de tensão e corrente menores, as bolhas geradas apresentaram diâmetros menores, com formatos irregulares e ondulatórios. À medida que uma bolha atingia um diâmetro maior, a bolha gerada seguinte já apresentava um menor diâmetro. A menor bolha apresentou um diâmetro máximo de 16 mm, a maior, 28 mm. A média aproximada foi de 23,5 mm. Os valores de tensão e corrente de soldagem apresentam pouca oscilação em torno do seu valor médio, não houve extinção do arco e o modo de transferência metálica foi possivelmente a globular.

Para a amostra 6 as imagens dos diâmetros máximos são apresentadas na Fig.6.

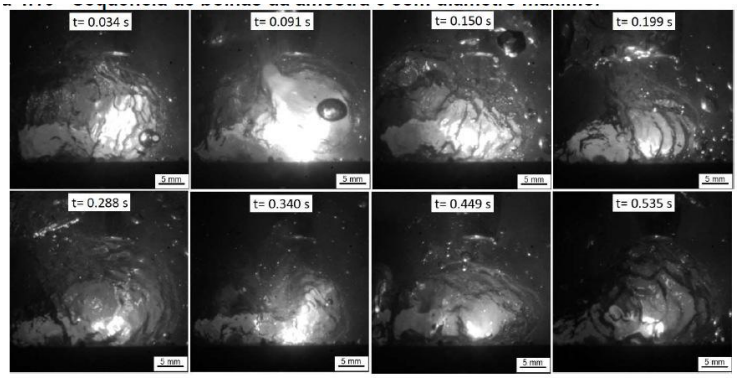



**Figura 6.** Sequência de bolhas da amostra 6 com diâmetro máximo

Com o aumento da velocidade de alimentação de arame, de 4 para 5 m/min, as bolhas passaram a ter um aumento no seu diâmetro máximo. Novamente as bolhas apresentaram formas irregulares e ondulatórias, não seguindo um padrão no seu formato. O mesmo comportamento observado com a amostra 5 se repetiu também com a amostra 6, quando é formado uma bolha de diâmetro maior, a próxima já é formada com o diâmetro menor. Este fenômeno pode ser explicado devido ao tempo no qual a bolha demora para atingir seu diâmetro máximo. Quanto mais tempo a primeira bolha leva para atingir esse diâmetro, a próxima bolha tem menos tempo para crescer, assim a nova bolha atinge seu diâmetro máximo com o tamanho reduzido se comparado a anterior. Por sua vez, os valores de tensão e corrente já começaram a apresentar maiores oscilações com a aumento da velocidade de alimentação de arame, e observa-se o início da formação de quedas na tensão, resultando numa maior instabilidade do arco elétrico.

Com apenas o aumento no valor da tensão de 26 V para 30 V e mantendo a velocidade de alimentação de arame em 4 m/min as bolhas geradas pela amostra 7 são apresentadas na Fig.7.

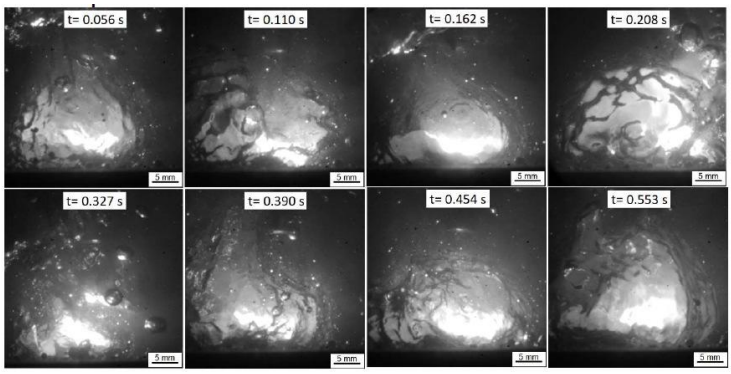



**Figura 7.** Sequência de bolhas da amostra 7 com diâmetro máximo

As bolhas da amostra 7 já apresentaram formas mais arredondadas e diâmetros máximos maiores se comparado as amostras 5 e 6. A média do diâmetro máximo das bolhas ficou em torno de 28,5 mm, maior que a média da amostra 6 que foi de 25 mm, desta forma o aumento no valor da tensão do arco contribui mais para o aumento do diâmetro máximo da bolha se comparada ao aumento no valor da velocidade de alimentação do arame. Em contrapartida há aumento das oscilações dos sinais elétricos em torno do valor médio. O aumento no valor da tensão acarretou na piora na estabilidade do arco elétrico, chegando a ocorrência de um período de extinção do arco, o que acarretou em uma queda no diâmetro máximo das duas bolhas formadas a partir do período de extinção.

Por fim, com todos os parâmetros maximizados as bolhas formadas com a amostra 8 são ilustradas na Fig. 8.

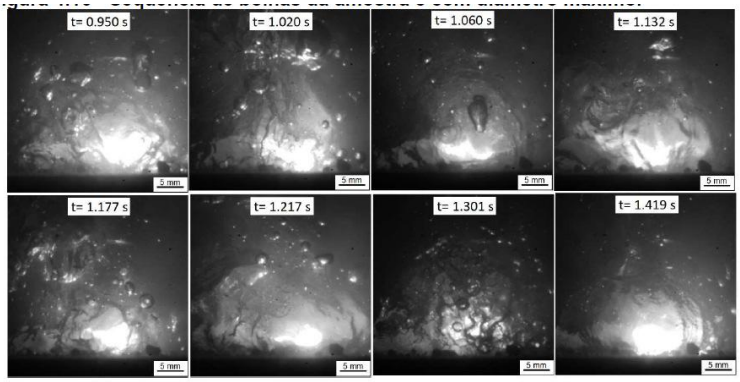



**Figura 8.** Sequência de bolhas da amostra 8 com diâmetro máximo

O diâmetro máximo das bolhas variou bastante ao longo do tempo, não seguindo um padrão. Houve a formação de bolha com diâmetro máximo acima de 32 mm e por outro lado, outras bolhas com diâmetro de 20 mm. A média das oito bolhas ficaram em torno de 27,5 mm sendo a maior média entre as outras amostras. Devido à maximização dos parâmetros de soldagem dessa amostra em relação as demais, o trecho analisado apresentou picos de maior oscilação em torno da média. Houve algumas quedas e picos mais consideráveis nos valores de tensão e corrente.

### 3.3. Modo de Evolução das bolhas

No presente trabalho não foi observado a ocorrência do primeiro e do segundo modo de evolução de bolha com os parâmetros utilizados, pois os valores de velocidade de arame e tensão do arco são suficientemente grandes para evitar a ocorrência desses dois primeiros modos (FENG et al, 2017). Entretanto observaram-se o terceiro e quarto modo de evolução de bolhas.

**Terceiro modo**

Por meio das filmagens foi possível identificar a ocorrência do terceiro modo de evolução de bolhas em todos as amostras com o bico de contato molhado. Entretanto não foi possível afirmar a ocorrência do terceiro modo nas amostras que usaram o bico de contato mantido seco devido à má qualidade da filmagem. Por outro lado, com a análise dos oscilogramas das amostras de bico de contato seco, provavelmente este modo deve estar ocorrendo também, pois nas amostras 1 e 2 além de não ocorrer extinção do arco, os valores de tensão e corrente oscilam em torno do seu valor médio, resultando em uma boa estabilidade que é uma característica do terceiro modo. Outro fator é a mudança nos parâmetros de soldagem. A amostra 2 em relação a amostra 1 obteve somente um aumento na velocidade de arame e com isso, não houve a ocorrência de extinção de arco. Entretanto as amostras 3 e 4 mesmo havendo pequenas ocorrências de extinção do arco, grande parte dos sinais se mostraram com poucas oscilações e boa estabilidade, assim pode estar prevalecendo a ocorrência do terceiro modo de evolução de bolhas. Na Figura 9 é possível verificar o comportamento dinâmico de bolhas e do arco de soldagem no terceiro modo.

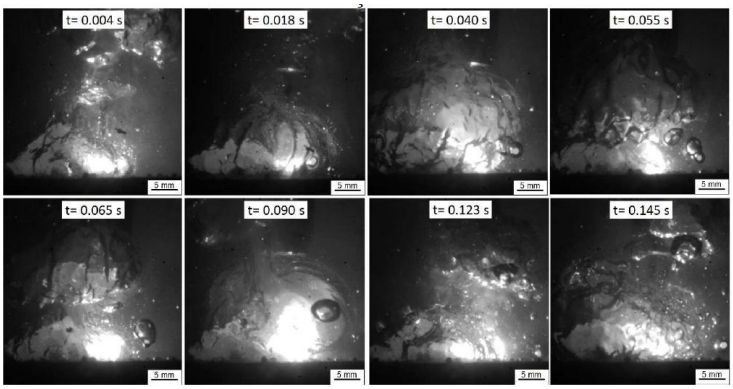



**Figura 9.** Comportamento dinâmicos da bolha e do arco de soldagem no terceiro modo de evolução

No terceiro modo de evolução de bolhas o arco elétrico sempre é protegido pela atmosfera gasosa, como se pode perceber em 0,004 s a bolha protegendo o arco elétrico. Em 0,055 s, uma nova bolha surge e gera uma grande área efetiva em contato com a bolha anterior, juntas elas cobrem a área de queima de arco e contribuem para o efeito protetor e a conservação dos valores dos sinais elétrico mais estáveis. Em 0,065 s a bolha anterior, agora com o formato mais alongado, continua com seu destacamento, enquanto a nova bolha continua a crescer e a proteger o arco, mantendo o

arco elétrico estável. De 0,090 s a 0,145 s ocorre a repetição do comportamento dinâmico do terceiro modo de evolução. Percebe-se que os valores de tensão do arco e corrente de soldagem oscilam em torno do seu valor médio, há uma flutuação uniforme dos sinais, evidenciando uma boa estabilidade do arco elétrico. Não há ocorrência de extinção do arco, pois as bolhas geradas sempre estão criando uma atmosfera protetora, caracterizando o terceiro modo de evolução de bolhas como ideal para manter o arco mais estável na soldagem subaquática molhada.

**Quarto modo**

O surgimento do quarto modo de evolução das bolhas é evidenciado com o aumento nos valores da tensão do arco. Nas amostras que foram usados o bico de contato seco, como relatado anteriormente, não foi possível afirmar a ocorrência do quarto modo pelas análises das imagens, entretanto com o auxílio do oscilograma, pôde-se perceber que as amostras 3 e 4 obtiveram um aumento no valor de tensão do arco, e assim começaram a ocorrência da extinção de arco e piora em sua estabilidade. Segundo Feng et al (2017), o principal fator para a ocorrência do quarto modo de evolução de bolhas é o aumento da tensão do arco. Na Figura 10 é possível perceber o comportamento dinâmico de bolhas no quarto modo.

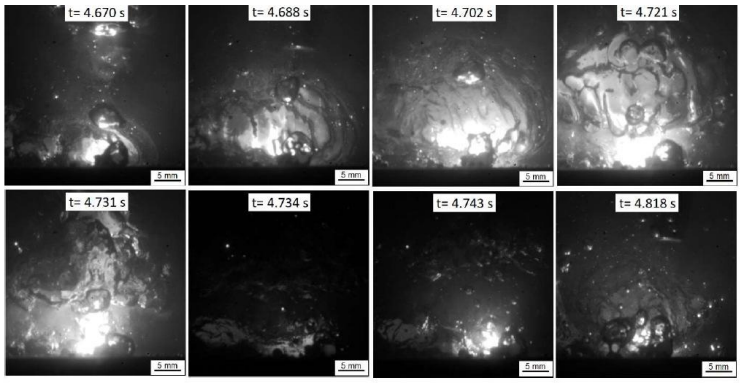



**Figura 10.** Comportamento dinâmico da bolha e do arco de soldagem no quarto modo de evolução

No quarto modo de evolução de bolhas há sempre a extinção do arco elétrico. De 4,670 s a 4,702 s a bolha cresce até atingir seu diâmetro máximo. Em 4,721 s devido ao grande tamanho da bolha e alta pressão dos gases, a bolha se torna tão densa que impede que uma nova bolha seja gerada. Em 4,731 s a bolha se destaca levando consigo toda a atmosfera protetora, assim o início da formação de uma nova bolha ainda não é o suficiente para proteger o arco elétrico ocasionando a sua extinção, como visto em 4,734 s. De 4,743 s a 4,818 s o arco é novamente reestabelecido dando continuidade à dinâmica de formação de bolhas.

Devido à maior tensão do arco, neste modo de evolução, o diâmetro máximo da bolha tende a aumentar significativamente e mais gases dentro da bolha são gerados antes da bolha destacar da poça de fusão. Após o destacamento da bolha o valor de tensão do arco excede para 69 v e a corrente de soldagem reduz até se aproximar de 0 A, o que indica a extinção do arco. Após um pequeno intervalo de tempo a corrente de soldagem volta a aumentar dando início ao arco elétrico. Neste quarto modo de evolução de bolhas os sinais elétricos não são muitos estáveis, há a ocorrência de extinção de arco, caracterizando esse modo como inapropriado para a soldagem subaquática molhada com arame tubular.

### 3.4 Frequência de Destacamento das Bolhas

Com o aumento nos parâmetros de soldagem, os tamanhos do diâmetro máximo da bolha também aumentam, como relatado anteriormente. Por outro lado, quanto maior é esse diâmetro máximo, menor será a frequência de destacamento das bolhas, a qual pode ser vista na Tab. 4:

**Tabela 4.** Frequência de formação de bolhas ao longo do tempo.

| | Frequência [Hz] | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Amostra | 0 a 1s | 1 a 2 s | 2 a 3 s | 3 a 4 s | Média | Desvio Padrão |
| 1 | 15 | 16 | 15 | 14 | 15 | 0,816 |
| 2 | 15 | 15 | 13 | 13 | 14 | 1,155 |
| 3 | 13 | 14 | 13 | 12 | 13 | 0,819 |
| 4 | 11 | 9 | 12 | 13 | 11 | 1,708 |
| 5 | 18 | 18 | 18 | 17 | 18 | 0,500 |
| 6 | 17 | 16 | 16 | 16 | 16 | 0,500 |
| 7 | 15 | 14 | 15 | 15 | 15 | 0,500 |
| 8 | 13 | 13 | 14 | 15 | 14 | 0,957 |

Houve pouca variação no número de bolhas geradas ao longo do tempo para cada amostra. Para a mesma condição de bico de contato mantido seco ou molhado, à medida que os valores de tensão e velocidade de arame foram aumentando, a frequência de formação de bolhas diminui. Isso pode ser explicado de acordo com o tamanho das bolhas, pois as maiores levam mais tempo até atingirem o seu diâmetro máximo para depois se destacarem, diminuindo assim, o número de bolhas geradas. Quando a única diferença entre os parâmetros é o fator condição, as frequências de formação das bolhas foram menores para a condição de bico de contato seco em relação ao bico molhado. Segundo Wang et al (2018) isso pode ser explicado devido a pequena barreira mecânica do dispositivo de vedação, fazendo com que a bolha fique retida por mais tempo.

## 4. CONCLUSÃO

A dinâmica de formação e destacamento das bolhas se mostrou um fenômeno muito complexo e aleatório. As bolhas geradas estão em constante mudança de tamanho e formato. A bolha possui um formato mais esférico no início de sua formação e quando está na fase de destacamento ela já assume a forma mais alongada.

De fato, a estabilidade do arco elétrico está relacionada ao fenômeno de formação de bolhas. A bolha cria uma atmosfera protetora impedindo que o arco entre em contato direto com a água. Quando essa atmosfera protetora deixa de existir, ou seja, a bolha não mais está cobrindo a área do arco, ocorre a extinção do mesmo.

Com a mudança dos parâmetros de soldagem o diâmetro máximo e a frequência de formação de bolha também sofrem alterações. Quando se aumenta a tensão ou velocidade de arame o diâmetro máximo da bolha aumenta e a frequência de formação diminui.

Não foi possível analisar a dinâmica de formação de bolhas para a condição de bico de contato seco, devido à má qualidade das imagens. Entretanto, para a condição de bico de contato molhado foi possível identificar a ocorrência do terceiro e do quarto modo de evolução de bolhas. Em relação a estabilidade do arco para a condição de bico de contato molhado, a amostra 5 se mostrou mais estável, apresentando apenas o terceiro modo de evolução de bolha. Com o aumento, principalmente, no valor da tensão, a estabilidade do arco foi piorando, dando início a formação do quarto modo de evolução de bolha e desta forma a ocorrência de extinção do arco.

A estabilidade do arco elétrico se mostrou melhor para a condição de bico de contato seco quando comparado a condição de bico de contato molhado. Com o aumento nos parâmetros de soldagem a condição de bico contato seco se mostrou menos sensível para a instabilidade do arco do que a condição de bico contato molhado. A condição de bico de contato seco apresentou uma frequência de formação de bolhas inferior quando comparado à condição de bico de contato molhado.

Finalmente, este trabalho evidencia que o bom entendimento da dinâmica de formação de bolhas no processo de soldagem subaquática molhada com arame tubular é de fundamental importância para haver melhorias na estabilidade do arco elétrico. Ajustando os parâmetros de soldagem é possível otimizar um tamanho máximo de diâmetro de bolha e de frequência de formação de modo a obter arcos elétricos mais estáveis durante o processo de soldagem.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação – LRSS do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais pelo suporte laboratorial.

## 6. REFERÊNCIAS

Assunção, Marcelo Teodoro; Bracarense, Alexandre Queiroz. “Evaluation of the Effect of the Water in the Contact Tip on Arc Stability and Weld Bead Geometry in Underwater Wet FCAW”, Soldagem & Inspeção, v. 22, n. 4, p. 401-412, 2017.

Feng, J. et al. “Investigation on dynamic behaviors of bubble evolution in underwater wet flux-cored arc welding”, Journal of Manufacturing Processes, v. 28,p. 156-167, 2017.

Oliveira, F. R. Soares, W. R., Bracarense, A. Q. “Estudo sobre o correlacionamento do fenômeno das bolhas e sinais elétricos na soldagem subaquática molhada com eletrodos revestidos", Soldagem & Inspeção, vol.18, no 02, São Paulo, 2013.

Pessoa, E. C. P., “Estudo da variação da porosidade ao longo do cordão em soldas subaquáticas molhadas”, Universidade Federal de Minas Gerais. Brasil, Tese, 2007.

Teichmann, E. W. “Contribuição ao desenvolvimento da soldagem molhada com arames tubulares”, Universidade Federal de Santa Catarina. Brasil, Tese, 2000.

Wang, J. et al. “Characterization of the underwater welding arc bubble through a visual sensing method”, Journal of Materials Processing Technology, v. 251, p. 95-108, 2018.

## 7. DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

## 8. ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção ‘área de conhecimento do trabalho’.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(X) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

# ANÁLISE DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO ADITIVA USANDO MODELOS REDUZIDOS DE PÁS EÓLICAS

**Nome do autor: José Ferreira da Silva Junior**
**Nome do co- autor: Antônio Piratelli Filho**
Instituição: Universidade de Brasília
Endereço: Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasilia, CEP 70910-900
E-mail para correspondência: junior.ferreiras@hotmail.com

**RESUMO:**

A indústria busca inovações como forma de facilitar os processos e para alcançar os seus objetos em diferentes áreas, utilizando para isso instrumentos, métodos e técnicas diversas. Dentre estas, a Engenharia Reversa (ER) surge como uma técnica para obter um produto ou objeto a partir de um modelo, sendo as aplicações para esta as mais diversas possíveis, desde projeto de peças de superfície regular até peças com geometria livre, como pás de turbina eólica e fuselagem de avião. Para a obtenção desses modelos é necessário seguir as etapas de medição, construção do modelo Computer Aided Design (CAD), fabricação usando a tecnologia de Computer Aided Manufacturing (CAM) e inspeção. Este trabalho tem o objetivo de realizar todas essas etapas e após a obtenção de um protótipo fazer uma análise de desvios entre o modelo CAD de uma pá de turbina eólica produzida por fabricação aditiva e uma nuvem de pontos medida após o final do processo, de modo a comparar o projeto com a peça obtida pela fabricação. Foi possível comprovar após a execução dos passos que o componente obtido tem desvios com dispersão de 0,103 próximo a incerteza dos equipamentos de medição e fabricação, 0,120 e 0,1 mm respectivamente.

**Palavras-Chave: Engenharia Reversa, Fabricação Aditiva ,Superfícies de Geometria Livre**

***ABSTRACT:***

*The industry looks for innovations as a way to facilitate the processes and to reach their objects in different areas, using diverse instruments, methods and techniques. Among these, Reverse Engineering (RE) appears as a technique to obtain a product or object from a model, the applications for which are as diverse as possible from design of regular surface parts to parts with free geometry such as blades wind turbine and airplane fuselage. To obtain these models it is necessary to follow the steps of measuring, building the Computer Aided Design (CAD) model, manufacturing using Computer Aided Manufacturing (CAM) technology and inspection. This work aims to perform all these steps and after obtaining a prototype make an analysis of deviations between the CAD model of a wind turbine blade produced by additive manufacturing and a cloud of points measured after the end of the process, so to compare the design with the part obtained by the fabrication. It was possible to verify after the execution of the steps that the obtained component has deviations with dispersion of 0.103 near the uncertainty of the measuring and manufacturing equipment, 0.120 and 0.1 mm respectively.*

***Keywords: Reverse engineering, Additive Fabrication, Free Geometry Surfaces***

## INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, com o aumento da competitividade entre as empresas, busca-se maneiras de desenvolver produto com menor custo possível e que atenda as exigências técnicas. Como alternativa para reduzir os custos do processo produtivo, a indústria tem recorrido a softwares para o desenvolvimento de projetos, os quais permitem fazer modelagem e simulação do comportamento de uma determinada peça ou produto dentro das condições operacionais. Dentre essas tecnologias, podem ser citados programas para modelagem computacional como Catia, Solidworks, Rhinoceros, dentre outros, além dos que realizam simulação como Abacus e Ansys. Todas essas ferramentas são capazes de gerar resultados que auxiliam no projeto dos componentes antes de serem encaminhados para linha de fabricação.

Outra tecnologia que também tem ganho espaço no projeto de componentes é a Engenharia Reversa (ER), uma vez que permite o desenvolvimento de produtos com prazo de entrega reduzido, com maior qualidade e menor custo (LIMA, 2003). Essas características têm alavancado a engenharia reversa e proporcionado que seja cada vez mais

usada nas diversas áreas. Um exemplo de aplicação do uso de ER é o projeto de aerogeradores utilizados na geração de energia eólica, o qual envolve os mais variados processos, desde a construção de modelos até a simulação computacional, visando obter um produto com alto nível de qualidade e desempenho.

Dickin (1996) define a engenharia reversa como o processo que produzir novas peças, produtos ou ferramentas a partir de modelos ou componentes existentes. Para isso, utiliza os mais variados softwares e segue um conjunto de passos que são: medição tridimensional, reconstrução da superfície do produto, usinagem dos pontos digitalizados, verificação da qualidade da geometria e por fim interface para o protótipo (GONZALEZ CARDOZO, 2012).

O primeiro desses passos é a medição tridimensional do componente, podendo ser utilizados variados instrumentos de medição. No caso de peças com uma geometria regular, o processo de medição é simples, visto que os elementos geométricos possuem equações de modelagem bem conhecidas. Porém, nos casos em que a peça apresenta uma superfície com forma complexa, como uma pá de turbina, a fuselagem de um avião ou um órgão de implante no corpo humano, a etapa de medição exige instrumentos de medição mais específicos (PIRATELLI–FILHO *et al*., 2014).

O processo de medição de uma peça que apresenta geometria complexa é geralmente realizado em Máquinas de Medir por Coordenadas (MMCs), as quais apresentam um maior custo e complexidade. Nesse caso, duas técnicas distintas podem ser usadas: captura de pontos sem contato ou captura de pontos com contato com a superfície da peça. A medição sem contato pode ser realizada com um scanner laser 3D, o qual emprega a luz laser incidindo sobre a superfície para a captura de uma nuvem de pontos, a qual é transformada em uma malha e posteriormente em um modelo sólido. Já o processo de medição com contato, envolve a utilização de apalpadores que tocam a superfície, como em uma MMC, para capturar pontos da superfície do objeto e ajustar a geometria (PIRATELLI–FILHO *et al.*, 2013)

Dentro da categoria das máquinas que medem com contato, existe uma classificação em alguns tipos principais, são eles: Ponte móvel, Ponte Fixa, Cantilever, Braço Horizontal, Pórtico e Braço articulado de Medição (PEREIRA, 2011). A MMC modelo Braço articulado apresenta uma série de articulações, compondo 5,6 ou 7 graus de liberdade e medidores angulares (encoders) para determinar a posição de um apalpador no espaço tridimensional. Uma das suas principais vantagens em relação às demais MMCs é a possibilidade de ser transportado e realizar a medição no campo (GONÇALVES, 2006).

Ao contrário das MMCs, os scanners laser são equipamentos que realizam a medição sem contato. (LIMA, 2003).Esses instrumentos permitem determinar um elevado número de pontos sobre a superfície do objeto, porém a precisão dos dados obtidos nesse tipo de instrumento é geralmente inferior aos instrumentos que medem por contato (PIRATELLI-FILHO et al. 2013). Mesmo com esta característica, este tipo de instrumento pode ser adequado em algumas situações, como no caso em que se necessita medir peças fabricadas em materiais macios (que se deformam com o contato) ou até mesmo líquidos (SILVA, 2010).

As MMCs são equipamentos que estão sujeitos a erros, os quais podem ser classificados em aleatórios, sistemáticos e de histerese. Os erros aleatórios são imprevisíveis, em que o agente (operador) é o responsável por resultados diferentes nas medições. Já o erro sistemático pode ser determinado pela diferença entre o valor médio e o valor verdadeiro convencional da grandeza, ele tende a se manter constante se as condições em que as medições foram feitas não forem alteradas ao longo do processo de medição (ALBERTAZZI, 2008). Outra classificação pode ser feita segundo a fonte e fatores de influência, como erros geométricos, erros térmicos e erros dinâmicos (MORAIS, 2012).

Após realizar as medições de um determinado componente é possível realizar o tratamento dos dados, para isso é utilizado os métodos da estatística descritiva, de modo a organizar, resumir e descrever os aspectos importantes de um conjunto de características observadas. Através das diversas ferramentas para síntese e descrição, que podem ser por meio de gráficos, tabelas, porcentagens, índices e médias. Todas geram uma perda de informação comparada ao que se tem inicialmente, porém esta perda é pequena quando comparada ao ganho na interpretação dos dados como um todo (REIS, 2002).

Dentre as formas gráficas de interpretação dos dados, a estatística descritiva apresenta o gráfico Boxplot, o qual permite a detecção de valores discrepantes (outliers), que são aqueles valores muito distantes do restante do conjunto de dados. Esses valores podem representar erro no processo de coleta ou de processamento dos dados, e, nesse caso, devem ser corrigidos ou excluídos do conjunto (REIS, 2002). Além do gráfico Boxplot, outra forma gráfica que auxilia na interpretação dos dados é o gráfico de probabilidade normal, o qual permite avaliar se os dados de uma amostra provêm de uma população com distribuição Normal ou Gaussiana. Esta é uma das mais importantes distribuições de probabilidade da estatística, especificada por dois parâmetros: a média populacional, $\mu$, e o desvio padrão, $\sigma$. Quando a distribuição dos dados é Normal, a média é centralizada e igual à mediana e a moda (Lopes *et al.*, 2013).

Após a medição do componente, seguindo as etapas da ER, o próximo passo é a construção do modelo CAD. Dentre os softwares disponíveis, o Rhinoceros e o Geomagic permitem a construção de curvas e superfícies NURBS (Non Uniform Rational B-Splines) a partir dos dados da medição (PIRATELLI-FILHO *et al.*, 2013). Outro programa utilizado é o CATIA, que utiliza curvas e superfícies baseado também em NURBS e que permite trabalhar com peças grandes e com geometria complexa (FISCHER *et al.*, 2003)

Após a construção do modelo CAD, a etapa seguinte é a fabricação de um protótipo, que pode ser realizada por diferentes processos de fabricação, como a fabricação aditiva. Esta técnica de processamento permite a produção de

modelos físicos tridimensionais a partir de um modelo CAD, em alguns minutos ou horas, com pouca necessidade de intervenção humana. Sua característica principal consiste na adição sucessiva de material em camadas, em que as "fatias" com semelhança bidimensional são agrupadas uma em cima da outra de modo a formar o protótipo (RELVAS *et al.*, 2012). Este tipo de processo de fabricação é classificado em sete categorias segundo a Sociedade Americana para Testes e Materiais (ASTM), para cada categoria os fabricantes possuem diferentes modelos de impressoras, que variam entre elas em termos de velocidade de fabricação, espessuras das camadas, volume de construção, diâmetro do filamento, resolução, gama de materiais, precisão e custos (ABREU, 2015).

A partir das concepções brevemente explanadas, este trabalho tem por objetivo a realização de uma análise metrológica em uma pá de turbina eólica de dimensões reduzidas, fabricada por processo CAD/CAM, seguindo a metodologia da engenharia reversa. As etapas desenvolvidas passaram pelas fases da medição, da modelagem CAD, da fabricação de protótipo em impressora 3D, de uma nova medição e da avaliação da qualidade dimensional do componente obtido.

## METODOLOGIA

Neste trabalho foi desenvolvido um estudo das técnicas de Engenharia Reversa através da fabricação CAD/CAM de peças com geometria livre, foi utilizada uma pá de turbina eólica com aproximadamente 2,3 metros de comprimento como modelo inicial.

### Material e Métodos

A peça utilizada no desenvolvimento deste trabalho é apresentada na figura (1), em que ela está posicionada sobre o desempeno de granito do laboratório de Metrologia, ao lado do braço articulado de medição utilizado.

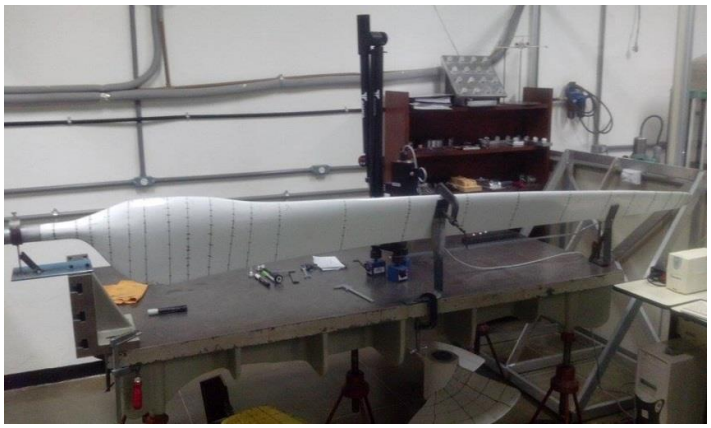


Figura 1: Pá de turbina eólica utilizada como modelo

### Procedimento experimental

Inicialmente, foi realizado o processo de medição da peça para capturar pontos sobre a superfície, de modo que a partir desses dados medidos se conseguisse construir um modelo CAD da pá. A pá foi fixada sobre dois suportes, presos sobre o desempeno de granito, de modo a tornar todas as superfícies acessíveis ao apalpador da MMC e a garantir rigidez na montagem. A estratégia de medição foi delineada sobre as superfícies através da marcação de pontos sobre a peça, sendo um total de 24 linhas e com 20 pontos distribuídos sobre cada linha. Durante essa marcação foi observada as regiões mais complexas, nelas foram feitas mais pontos e linhas, de modo a facilitar a etapa de modelagem, bem como obter um modelo CAD com uma superfície com raio de curvatura próximo ao do objeto em estudo.

Em seguida foi verificado se o braço de medição conseguia medir todos os pontos da peça. Devido ao comprimento da peça, foi utilizada uma extensão junto à ponta apalpadora da MMC, com aproximadamente 20 cm de comprimento, de forma que a peça foi medida sem a necessidade de realizar movimentação da máquina de medir.

O equipamento utilizado para capturar os pontos foi uma Máquina de Medir por Coordenadas (MMC), modelo braço articulado, marca Romer, modelo Arm100, com apalpador tipo "ponta seca" (diâmetro da ponta d = 0 mm, formato de agulha), com incerteza expandida de medição (95%) igual a 0,06 mm (certificado de calibração).

As condições ambientais do laboratório foram observadas antes de iniciar a medição, de modo a garantir que temperatura ambiente de 20 ± 1°C, umidade relativa do ar entre 40 e 60% e objeto com ausência de poeira sobre a sua superfície. Foi medida cada linha apresentada na figura 1 como um conjunto de pontos e na região cilíndrica, (base da

pá) círculos externos e uma linha. Em seguida, foi medido um conjunto de 200 pontos para cada lateral da pá, sendo os dados da medição exportados em formato .igs.

O arquivo resultante da medição foi importado para o CATIA, utilizando o módulo Generative Shape Design, aplicado a peças com geometria de forma livre. A modelagem foi conduzida ajustando cada linha do perfil a uma curva spline. Como as linhas medidas não estavam totalmente alinhadas, devido ao processo de captura dos pontos ser manual e livre sobre a superfície, foi necessário criar planos para cada uma das linhas de secção apresentada na figura (2) com o objetivo de criar um sólido fechado. Posteriormente foi feita a projeção de cada uma das splines e utilizando o comando Multsections Volume o modelo CAD foi construído.

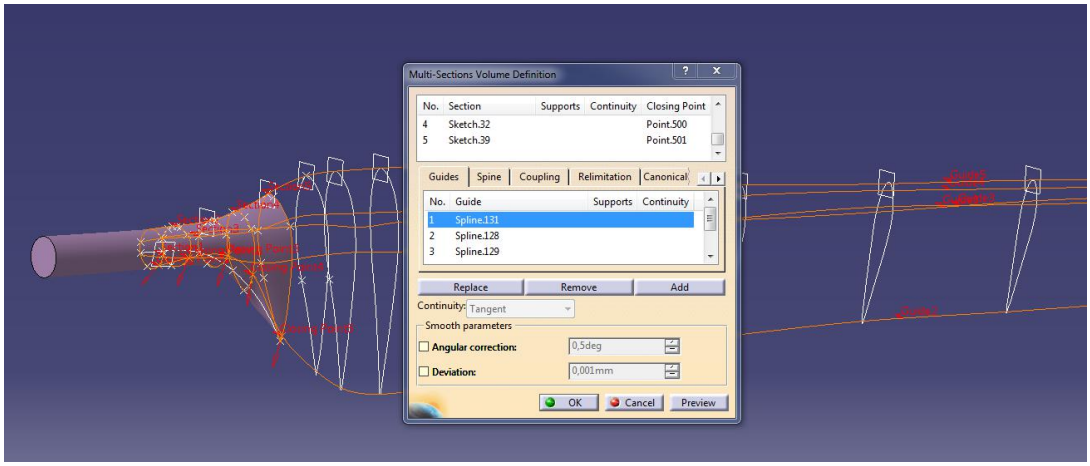



Figura 2: Curvas ajustadas para construção do modelo CAD

Após a modelagem, o arquivo resultante foi salvo em formato stl, sendo em seguida importado para o programa MeshMixer. Nesse programa, o modelo foi reduzido em escala para 10% do tamanho real, ficando com aproximadamente 27 centímetros, tornando possível a impressão de um protótipo.

A fabricação foi realizada por uma impressora da empresa Stratasys, modelo object 30 prime, com exatidão de 0,1 mm, dependendo da geometria da peça, do material e da metodologia de impressão, O equipamento é capaz de imprimir camadas de espessura com até 16 micrometros, conforme catálogo do fabricante.

Posteriormente a fabricação, o protótipo obtido foi novamente medido para que pudesse ser realizada a análise de desvios entre o modelo CAD e a nuvem de pontos obtida após a fabricação. Para isso, foi utilizado o Scanner 3D marca NextEngine controlado pelo software ScanStudio Pro. As configurações de medição adotadas foram: uma vista simples, quatro divisões, resolução HD, alvo claro e longo alcance. Foram capturados 14305 pontos sobre a superfície, esses exportados em formato igs e em seguida importados novamente para o Catia para realizar a análise dos desvios.

Uma etapa muito importante na análise é o alinhamento da nuvem de pontos com o modelo CAD. Isso foi realizado utilizando os comandos *Align using the Compass* para alinhamento inicial e em seguida o comando *Align by Best Fit*, comando esse que alinha a nuvem de pontos à superfície através de uma rotina de topologia. Em seguida, foi utilizando o comando *deviation analysis* para realizar a análise de desvios entre o modelo CAD e a nuvem de pontos. Os desvios determinados foram exportados em formato txt e após importados no software Matlab, para determinação dos parâmetros estatísticos média, desvio padrão, amplitude, desvio máximo e mínimo. Foram também construídos gráficos para avaliação da distribuição de probabilidade em relação à distribuição gaussiana, bem como a construção do gráfico Boxplot para identificação de valores discrepantes (outliers).

A partir dos resultados obtidos com o gráfico do Boxplot se conseguiu os valores do menor outlier positivo e maior outlier negativo, com isso foi desenvolvido um filtro em que todos os desvios acima desses valores discrepantes foram retirados da nuvem. Em seguida foram gerados novos valores de média, desvio padrão, amplitude e o gráfico para avaliação da normalidade.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nesse trabalho foram divididos em três partes: resultados da modelagem CAD, resultados da fabricação e por fim os resultados da análise de desvios entre a nuvem de pontos medida após a fabricação e o modelo CAD original. Como resultado da modelagem CAD após à construção de diversos planos e splines a superfície tomou a forma final apresentada na figura (3), esta que foi reduzida em escala de 10% do tamanho real para possibilitar a impressão do protótipo.

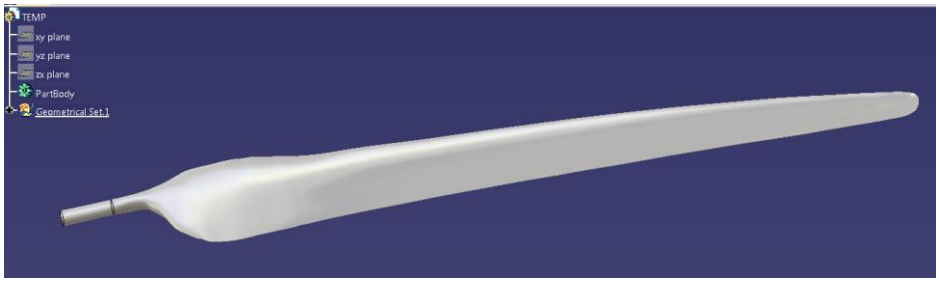



Figura 3: Modelo CAD da pá de turbina eólica construído em escala de 10%

Após a impressão do modelo CAD, o resultado foi um protótipo com cerca de 27,5 centimetros de comprimento fabricado em material termoplástico (*Acrylonitrile Styrene Acrylate -ASA*). A figura (4) apresenta a peça obtida, os pontos marcados em verde sobre a superfície foram feitos com pincel atômico para facilitar o processo de escaneamento e alinhamento.

Figura 4: Protótipo obtido após processo de fabricação aditiva

Através da análise visual do protótipo fabricado é possível observar que a peça obtida possui uma superfície uniforme, com ausência de defeitos na deposição de camadas, os dois lados com padrão de qualidade semelhante. Com o modelo CAD fabricado, uma nuvem de pontos foi medida sobre sua superfície e alinhada no Catia utilizando os comandos de alinhamento, o resultado é apresentado na figura (5) em que a nuvem (pontos em verde) está posicionada sobre o modelo (marrom claro).

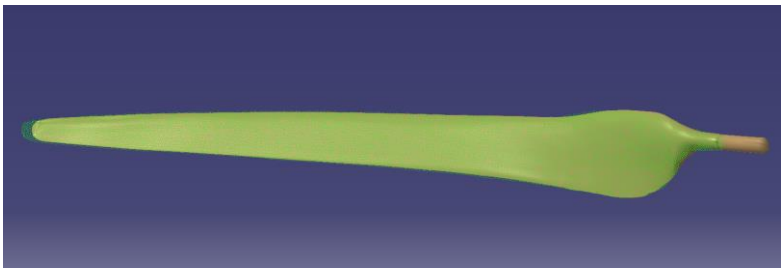


Figura 5: Resultado do alinhamento da nuvem de pontos sobre o modelo CAD

A partir do alinhamento foi desenvolvida a análise de desvios, em que foi dividida em duas etapas: Uma primeira sem a utilização de filtro de valor limite de desvios e a segunda utilizando um filtro. Os valores limites utilizados no filtro foram obtidos a partir da construção de um boxplot para os dados brutos, para observar a existência de outliers e os menores valores desses dados discrepantes foram usados como critério para filtrar os desvios. Para a primeira

situação (sem filtro) os resultados são apresentados na figura (6) que apresenta a distribuição dos desvios sobre a superfície juntamente com a legenda com o intervalo de valores e as porcentagens.

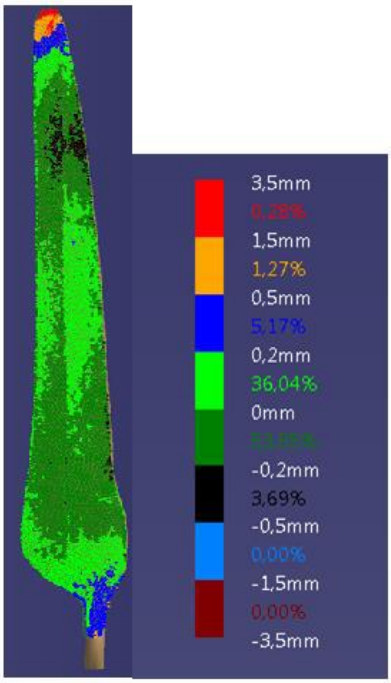



Figura 6: Distribuição dos desvios entre o modelo CAD e a nuvem de pontos (sem filtro)

Com os dados dessa análise de desvios feita no Catia foi realizado o cálculo de alguns parâmetros estatísticos que auxiliaram na interpretação dos dados. Para isso, os valores dos desvios foram exportados em formato .txt, em seguida importados para o software Matlab. Os resultados obtidos são apresentados na Tab.1, em que a média de desvio foi de 0,0072 mm, o desvio padrão de 0,1950.

Tabela 1: Parâmetros estatísticos calculados para análise sem filtro

| Parâmetros estatísticos calculados (sem filtro) | |
|---|---|
| Média | 0,0072 mm |
| Desvio Padrão | 0,1950 |
| Desvio Máximo | 3,4309 mm |
| Desvio Mínimo | -0,4352 mm |
| Amplitude | 3,8661 mm |

A partir dos dados da Tab. 1 é possível observar que para esta massa de dados brutos (sem filtro) mesmo apresentando elevado desvio máximo e mínimo, na média os valores não foram elevados, como também apresentaram baixa variabilidade, dado o desvio padrão 0,1950. Outra observação a ser feita é o paralelo entre a Tab. 1 e a localização dos desvios sobre a superfície, figura 6. Pode-se observar que o valor de máximo desvio está situado na ponta da pá, esta que é uma região crítica, dado a espessura da peça nessa região e a curvatura.

Após o cálculo dos parâmetros da tabela anterior, foi plotado um gráfico para avaliação da normalidade dos desvios, apresentado na figura (7), em que os pontos em azul representam o comportamento dos desvios em comparação com a distribuição gaussiana, reta em vermelho. Da análise do gráfico, é possível observar que o comportamento dos desvios até um determinado ponto tem comportamento semelhante com a distribuição gaussiana, porém ao atingir cerca de 0,3 mm de desvio os dados começam a se afastar totalmente de uma distribuição normal.

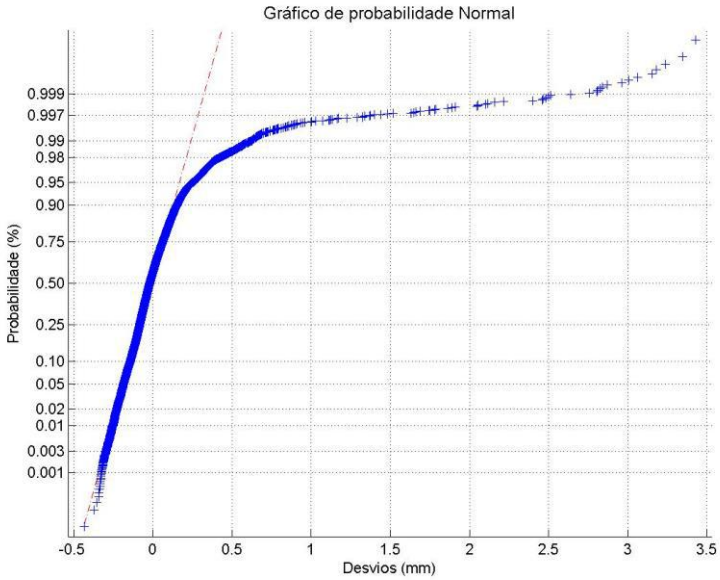



Figura 7: Gráfico de avaliação da normalidade dos desvios obtidos (sem filtro)

Dado este comportamento, foi desenvolvido o gráfico do tipo boxplot a fim de avaliar se os valores que se afastam da distribuição normal são valores discrepantes (outliers). A figura (8) apresenta o boxplot com a representação de valores que se afastaram do limite máximo e mínimo.

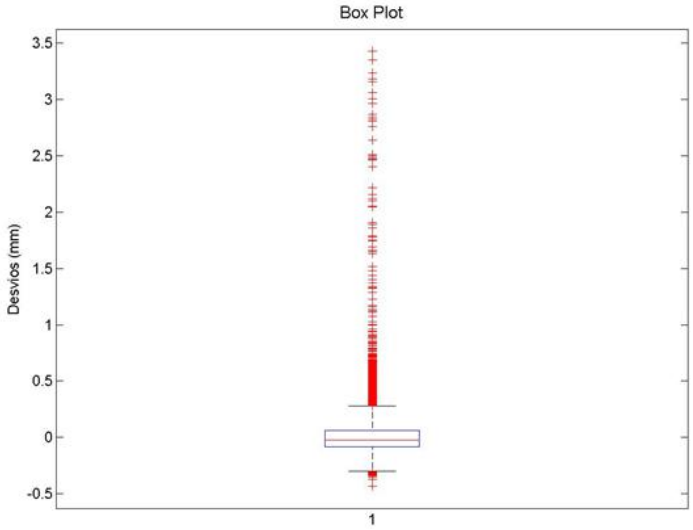



Figura 8: Boxplot para desvios sem filtro

Conforme apresenta a figura (8) é possível observar uma grande quantidade de valores discrepantes, ou seja, que estão bastante afastados do máximo e mínimo que são aceitáveis pelo critério do boxplot. Tais valores, segundo a literatura, podem representar erro no processo de coleta ou de processamento dos dados, e, nesse caso, devem ser corrigidos ou excluídos do banco de dados. Por isso foi decidido utilizar um filtro sobre os dados dos desvios utilizando como critério de valor limite os valores do menor outlier positivo e maior outlier negativo como limite superior e inferior respectivamente do filtro de valor limite. Tais valores foram calculados e são apresentados na Tab. 2.

Tabela 2: Valores dos outliers utilizados para filtro

| Valores de outliers críticos do Boxplot | |
|---|---|
| Menor outlier Positivo | 0,2795 mm |
| Maior outlier Negativo | -0,3030 mm |

Com os valores dos outliers apresentados na Tab.2 foi desenvolvida a segunda análise. Porém, dado que o Catia não permite a inserção de dois valores para valor limite, foi utilizado no software um valor de 0.3 mm, para este caso o Catia gerou a distribuição de desvios ao longo da superfície do modelo CAD conforme apresentado na figura (9), sendo os desvios máximo e mínimo iguais a 0,299 e -0,30 mm respectivamente.

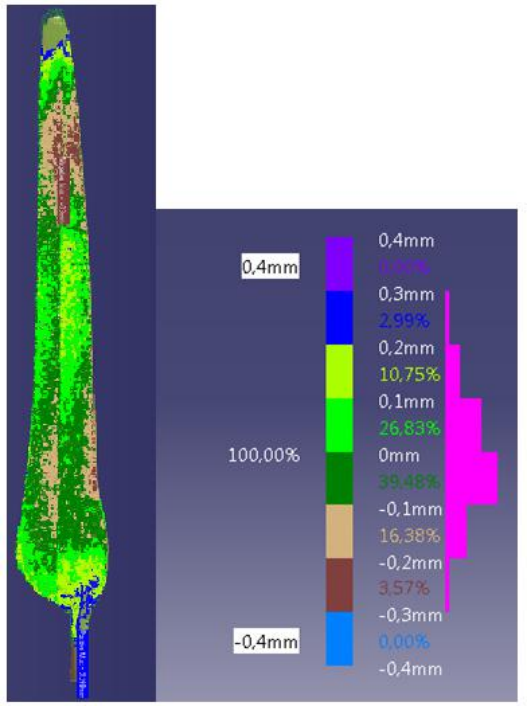



Figura 9: Distribuição dos desvios entre o modelo CAD e a nuvem de pontos (com filtro)

Ao observar a figura (9) é possível verificar que 93,44% dos desvios estão entre -0,2 e 0,2 mm. Assim como, na superfície da pá na região central a maioria dos desvios foram representados pela cor verde claro e verde escuro, estas cores representam que aproximadamente 67% dos desvios foram entre -0,1 e 0,1 mm. Após esta análise qualitativa do comportamento dos desvios foi desenvolvido procedimento semelhante ao feito na etapa sem utilizar filtro, em que os dados de desvios foram exportados em formato .txt e importado no Matlab para cálculo de alguns parâmetros que permitem auxiliar na interpretação dos dados. Os resultados são apresentados na Tab. 3.

Tabela 3: Parâmetros estatísticos calculados para análise com filtro

| Parâmetros estatísticos calculados (com filtro) | |
|---|---|
| Média | -0,1840 mm |
| Desvio Padrão | 0,103 |
| Desvio Máximo | 0,280 mm |
| Desvio Mínimo | -0,303 mm |
| Amplitude | 0,583 mm |
| Número de pontos malha sem filtro | 14305 |
| Número de pontos da malha filtrada | 13651 |
| Pontos retirados | 654 |
| Tamanho da malha filtrada | 95,43% da malha original |

Ao observar o valor da média na Tab. 3 (-0,1840 mm) é possível validar a informação da figura (9), pois o valor médio dos desvios está dentro da faixa de -0,2 a 0,2 mm. Também é possível verificar que, na média, após filtragem os desvios são maiores comparados ao desvio médio apresentado na Tab.1 (0,0072 mm). Porém se observarmos o desvio padrão 0,1950 na análise sem filtro e 0,103 após filtragem, podemos constatar que os dados apresentam uma menor dispersão. Tal comportamento era esperado, pois ao retirar os valores discrepantes a dispersão tende a diminuir. Assim como o valor da média tende a sofrer alteração, pois esses valores conforme indica a literatura são influenciados pelos valores discrepantes que possuem a capacidade de "puxar" o valor da média e desvio padrão em sua direção.

Outra observação a ser feita a partir da Tab.3, é a localização do máximo e mínimo desvio. Pela tabela eles são 0,280 e -0,303 mm respectivamente, observando esses valores na figura 4.8 é possível verificar que a região em azul escuro (zona próxima ao cilindro de base) é a região onde está localizado o maior desvio. Esta área próxima do cilindro de base é crítica, pois apresenta elevada curvatura. Já o desvio mínimo está na região em marrom, mais ao centro da peça. Também é importante observar a quantidade de pontos que foram levados em consideração para realizar a avaliação de desvios, para a nuvem de pontos original foram coletados 14305 pontos e após a filtragem restaram 13651, ou seja, uma redução 654 pontos, que representa uma diminuição de 4,57% do tamanho da nuvem, assim mesmo retirando uma quantidade de pontos relativamente alta, ela representa menos do que 5% do tamanho da nuvem.

Após realizar essa avaliação dos parâmetros estatísticos, foi plotado um gráfico do tipo Normplot a fim de verificar se esses desvios provinham de uma distribuição normal, esta distribuição que segundo a literatura é uma das mais estudadas e importantes distribuições. A figura (10) apresenta o gráfico, em que os pontos em azul representam o comportamento dos desvios e a reta em vermelho à distribuição gaussiana. É possível observar através da figura que os dados possuem uma distribuição semelhante à distribuição normal, porém com um afastamento na região próxima aos valores limites de -0,3030 e 0,2795 mm.

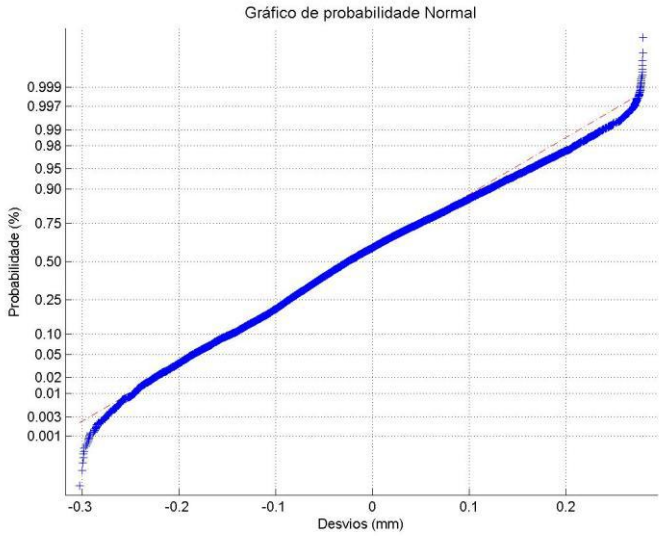



Figura 10: Gráfico de avaliação da normalidade dos desvios obtidos (com filtro)

Ao realizar uma comparação entre os gráficos de normalidade sem/com filtro. Na figura (7) sem filtro, os dados apresentam um comportamento que tendem a se afastar da normalidade completamente, após a filtragem, figura (10) os desvios apresentam um comportamento com menor afastamento. Os valores de desvio que contribuíram para esse afastamento são apresentados no gráfico boxplot na forma de outliers.

## CONCLUSÃO

Ao longo desse trabalho foi apresentada a análise metrológica de um componente como geometria de forma livre, uma pá de turbina eólica, visando estudar o efeito das etapas de engenharia reversa, medição, modelagem CAD, fabricação de protótipo em impressora 3D e nova medição na avaliação da qualidade dimensional do componente obtido.

Foi observado que é possível construir um protótipo com geometria de forma livre de maneira relativamente rápida, sendo obtido um protótipo em aproximadamente 4 horas. A análise dos desvios entre o modelo CAD e a nuvem de pontos determinados sobre a superfície fabricada mostrou um comportamento não normal e através do gráfico Boxplot foi possível determinar os limites para extrair outliers dos dados. A aplicação desse filtro estatístico permitiu reduzir a dispersão dos desvios, resultantes da reflexão da luz laser do escâner no processo de medição. O desvio padrão dos dados após filtragem foi de 0,103 mm, valor esse muito próximo da incerteza do scanner que é de 0,120 mm. Assim, se torna possível utilizando a engenharia reversa fabricar uma peça de formato não regular com um nível de desvio muito próximo do erro dos equipamentos de medição e fabricação, e que pode ser aplicado conforme indica a literatura, das mais variadas formas, desde a indústria automotiva até a medicina. Por isso, recomenda-se trabalhos futuros são para investigar as variáveis de processamento por manufatura aditiva.

## REFERÊNCIAS

ABREU, Sofia Alexandra Chaves. Impressão 3D baixo custo versus impressão em equipamentos de elevado custo. Porto Portugal, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2015. 235 p. (Dissertação Mestrado)

ALBERTAZZI, Armando. Fundamentos de Metrologia Cientifica e Industrial.1º ed. Barueri, São Paulo: Manole, 2008. 407 p.

DICKIN, Peter. Reverse engineering regains popularity. IEE Review, Stevenage, v. 42, 1996, 213 p.

FISCHER, Martin; HAYMAKER, John; LISTON Kathleen. Benefits of 3D and 4D Models dor Facility managers an AEC service providers. Stanfor, USA, 2003

GONÇALVES, Clídio Richardson de Lima. Um estudo comparativo de sistemas de medição aplicáveis ao controle dimensional de superfícies livres em peças de médio e grande porte, Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006. 108 p. Dissertação (Mestrado).

GONZALEZ CARDOZO, Carlos Aurelio. Manufatura Digital Aplicada no Contexto de engenharia reversa. Estudo de Caso: protótipo virtual do avião Blériot. Campinas – SP, Univrsidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2012. Dissertação (Mestrado)

LIMA, Cristiane Brasil, *Engenharia Reversa – Estudo de Casos*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 98 p. Dissertação de (Mestrado).

LOPES, M. M, CASTELO BRANCO V.T.F., BARBOSA S.J. Utilização dos testes estatísticos de kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para verificação da normalidade para materiais de pavimentação. Transportes v.21,n.1,ISSN:2237-1346,2013.

MORAIS, César Augusto Galvão de. Modelos de sintetização plena e reduzida de erros em máquinas de medir por coordenadas. São Carlos, Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, 2012. 205 p. Dissertação (Mestrado).

PEREIRA, P.H; Coordinate Measuring Machines and Systems. Boca Raton: CRC Press,2011.

PIRATELLI-FILHO, A.; CASSIANO, E.R S; VIANA, D.M; ZAMBONI, J.G. Uma abordagem para digitalização de figuras humanoides visando a animação computadorizada. Design & Tecnologia, Porto Alegre,2013

PIRATELLI-FILHO, A.; JOBIM, Pedro Henrique Souza; VALDÉS, Rosenda Arencibia; ANWER, Nabil. Study of Contact and Non-contact Measurement Techniques Applied to Reverse Engineering of Complex Freeform Parts. International Journal of Mechanical Engineering and Automation, p 166-175, 25 de Setembro de 2014

REIS, E. A., REIS, I. A. Análise Descritiva de Dados- Síntese Numérica. (Relatório Técnico), 2002.

RELVAS, Carlos; RAMOS, António; COMPLETO, António; SIMÕES, José A. A systematic approach for na accuracy level using rapid prototyping Technologies. Portugal, University of Aviero, 2012.

SILVA, F.P.; DUARTE, L.C.; ROLDO, L.; KINDLEIN JR, W. A digitalização tridimensional móvel e sua aplicação no design de produto. Design & Tecnologia, v. 1, n. 1, p. 60-65, 2010.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores José Ferreira da Silva Junior e Antonio Piratelli Filho são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(X) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

**XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 27 à 31 de agosto de 2018 – Brasília, DF**

# ANÁLISE E DIAGNÓSTICO DAS TRELIÇAS E COMPONENTES DA PONTE FERROVIÁRIA DE LIGAÇÃO SÃO LUÍS – CONTINENTE DA CFN SOBRE O ESTREITO DOS MOSQUITOS

**Luiz Gustavo Barbosa de Amorim**
Universidade Estadual do Maranhão
Cidade Universitária Paulo VI, Av. Lourenço Vieira da Silva, nº 1000 - Bairro: Jardim São Cristovão
CEP 65055-310 – São Luís/MA
gustavo.amorim.lg@gmail.com

**RESUMO:** A corrosão é um problema constante que ocorre em pontes metálicas desde a revolução industrial no século XVIII com a introdução de estruturas metálicas na construção; entre os fatores mais importantes que aceleram esse fenômeno tem-se a variação de umidade, presença de poeira, o envelhecimento da ponte, além dos gases corrosivos. A degradação ocorre em locais específicos, como fundações, bloco, pilares, aparelhos de apoio e encontros, que merecem uma inspeção mais cuidadosa. As conclusões das inspeções servem como critério para a aplicação de medidas preventivas. O objetivo deste trabalho é analisar e diagnosticar o fenômeno de corrosão desenvolvida na ponte ferroviária de ligação São Luís – Continente da CFN sobre o estreito dos mosquitos através de ensaios de simulação feito em laboratório, e através dos resultados classificar a patologia.

**Palavras-Chave:** Ponte, Corrosão, Análise

***ABSTRACT:*** *Corrosion is a constant problem that occurs in metallic bridges since the industrial revolution in the eighteenth century with the introduction of metallic structures in the construction; among the most important factors that accelerate this phenomenon is the variation of humidity, presence of dust, the aging of the bridge, besides the corrosive gases. Degradation occurs at specific sites, such as foundations, blocks, pillars, support devices, and encounters, which merit more careful inspection. The conclusions of the inspections serve as a criterion for the application of preventive measures. The objective of this work is to analyze and diagnose the corrosion phenomenon developed in the São Luís - Continente railway bridge of the CFN on the narrow mosquitoes through laboratory simulation tests, and through the results to classify the pathology*

***Keywords:*** *Bridge, Corrosion, Analysis*

## INTRODUÇÃO

É bastante comum o consenso que o material sofreu uma descaracterização, como corrosão comprometendo a estrutura ou equipamento, devendo então, na maioria dos casos serem substituído e esta operação envolve custos (Gentil, 2011). Em termos gerais, a capacidade de não enferrujar está ligada à qualidade e durabilidade do produto, o que influi na escolha do consumidor (Gallego, 2009).

O fenômeno de corrosão ocorre de maneira espontânea, particularmente em estruturas metálicas, em decorrência de projeto inadequado, além do não emprego de manutenção periódica. É fato notório que a cultura dominante nos órgãos responsáveis pelas obras públicas de infraestrutura, nos âmbitos federal, estaduais e municipais prioriza apenas as ações voltadas para a execução de obras novas, relegando a um plano secundário as questões relacionadas à conservação das obras antigas. Um exemplo concreto desse fato é o atual estado de degradação das pontes e viadutos da malha viária brasileira, que não recebem manutenções, sequer as corretivas, que na maioria das vezes só são realizadas quando uma obra já está quase atingindo o estado de ruína.

O Brasil sequer tem uma norma para projeto de pontes metálicas. A norma da ABNT que define os procedimentos para Vistoria de Pontes e Viadutos (NBR 9452/1986) trata apenas das obras de concreto. A revisão dessa norma, realizada em 2015, não incluiu as pontes metálicas.

A ponte ferroviária da CFN – Companhia Ferroviária do Nordeste, foi finalizada na década de 1930, é uma ponte ferroviária metálica em treliça, apoiada em pilares de concreto armado; até o final da década de 1980, a ponte férrea sobre o Estreito dos Mosquitos, que une São Luís ao continente, servia a trens e automóveis. Com o advento das privatizações da década de 1990, a via foi então adquirida pela “Companhia Ferroviária do Nordeste” e, até o início da década seguinte, passou sem qualquer utilização. Nos dias de hoje, como parte da “Transnordestina Logística”, é utilizada para o transporte de combustíveis.

Atualmente, a estrutura de madeira que compõe a ponte foi comprometida, ocasionando as trocas de todos os pranchões e impedindo o tráfego de veículos pesados.

Os aços atualmente utilizados nas estruturas são geralmente divididos entre aços- carbono e os aços de baixa liga, porém o primeiro material siderúrgico empregado em construções foi o ferro fundido, adotado em inúmeras pontes em arco

Ou treliçadas entre 1780 e 1820, conforme PFEIL (2009). Durante anos e até meados do século passado, as estruturas eram construídas com aço-carbono. A partir das décadas de 1960 e 1970, iniciou-se o emprego de aços de baixa liga.

## METODOLOGIA

## LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Cerca de 1% a 5% do PIB é destinado a repor perdas causadas pela corrosão. No Brasil, os gastos podem chegar a cerca de US$ 10 bilhões. Com a intensificação dos estudos sobre o assunto, a cada ano têm surgido novas técnicas para prever e evitar seus danos.

As pontes históricas são um legado herdado da transição do século XIX e XX no Brasil quando se iniciava o desenvolvimento sócio econômico nas principais capitais. As estruturas metálicas, geralmente em aço, estavam ganhando espaço em grandes construções na Europa e esta tendência teve repercussão nos países da América do Sul. Como o aço é material suscetível a corrosão e a decorrência de projetos inadequados, além do não emprego de manutenção periódica, a corrosão tende a se prologar mais rapidamente.

A corrosão atmosférica é um fenômeno que causa a deterioração de um material por ação química, física ou eletroquímica do meio ambiente, combinada ou não a esforços mecânicos, sendo responsável por grandes prejuízos causados pelos custos envolvidos nos reparos de estruturas metálicas deterioradas, em especial as das pontes que se tratam de estruturas externas (expostas diretamente à atmosfera) e sofrem a influência dos fatores climáticos (chuva, insolação, poluentes, etc.).

A corrosão atmosférica de um aço carbono pode ser representada simplificadamente pela equação 1:

$$Fe_{(s)} \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-} \quad \text{(oxidação do ferro)} \qquad (1)$$

$$4\,Fe + 3\,O_2 \rightarrow 2\,Fe_2O_3 \quad \text{(equação geral da formação da ferrugem)}$$

Observa-se, portanto, que a corrosão atmosférica depende da interação entre o metal e a atmosfera onde está inserido, e que para que aconteça a reação deve haver a presença de oxigênio e água.

Houve um estudo das diversas patologias encontradas em pontes férreas, como a Ponte Marechal Hermes em Ouro Preto e a Ponte Seca em Espírito Santo, além de aprender os conceitos básicos de corrosão e suas formas de prevenção para um futura visita ao local de estudo.

O aço identificado na estrutura metálica da ponte se aproxima do aço ASTM A36, enquadrando-se nos aço utilizados na construção de pontes em estrutura metálica no início de século XX, segundo a literatura e levantamento histórico realizado.

## VISITA DE CAMPO

Foram feitas duas visitas à ponte, com o objetivo de se coletar dados. A primeira foi bastante valiosa para se tomar conhecimento no que diz respeito à estrutura, ao sistema estrutural da ponte e às condições globais da estrutura, além de permitir o conhecimento dos dados que deveriam ser coletados numa visita futura. A segunda, constituiu-se em uma investigação mais detalhada do que já havia sido notado anteriormente. A figura 1 mostra a vista da ponte.

Figura 1 - Vista da ponte ferroviária da CFN

## ENSAIO DOS MATERIAIS

Realizou-se uma inspeção visual que possibilitou localizar os principais pontos com maiores problemas de corrosão.

A partir de amostras do aço A36 de 1 diâmetro de polegada(Fig. 2), que compõe a estrutura foi feito um preparo dos corpos de prova de acordo com a NBR 6210 e realizou-se um ensaio de imersão para medir a taxa de corrosão de acordo com a norma ASTM G31, o material ficou imerso em uma solução salina de 3% de NaCl por 2 meses, este teste em laboratório foi feito com o objetivo de simular as condições ambientais.

Feito o ensaio e verificado a taxa de corrosão, um ensaio microscópico possibilitou identificar os principais tipos de corrosão encontrado na estrutura metálica.

Figura 2 - Corpos de prova

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Verificou-se que a ponte férrea da CFN encontra-se em elevado estado de degradação por corrosão, principalmente pela falta de manutenção. Foi possível perceber que, de um modo geral, os pontos de corrosão parecem repetir-se nos vários vãos da ponte. Dentre esses pontos os que mais chamam a atenção são os que se encontram na região de ligação das treliças das passarelas com o banzo inferior da treliça principal.

As inspeções visuais realizadas na estrutura metálica indicaram elevado estado de degradação por corrosão, principalmente, em regiões onde ocorre acúmulo de eletrólito, devido provavelmente a falhas de drenagem que ocasionam acúmulo de águas pluviais nos encontros das longarinas, transversinas, montante ou diagonais que provocaran a perda de material por corrosão pontual e uniforme. Foi utilizada a norma SSPC-VIS 2/ASTM D610 08(2012) Standard Practice for Evaluating Degree of Rusting on Painted.Steel Surfaces , corrosion, rusting" para relacionar o tipo de corrosão. A Figura 3 mostra pontos de corrosão.

A norma brasileira NBR 8800/2008 classifica os ambientes em seis categorias de corrosividade: C1, C2, C3, C4, C5-I e C5-M. A ponte férrea se localiza num ambiente classificado como C4, é uma categoria de corrosividade alta devido á ser uma área costeira com salinidade moderada.

Figura 3 -. Ligação das treliças das passarelas com o banzo inferior da treliça principal

A Figura 4 apresenta, principalmente, o tipo de corrosão generalizada (uniforme) na Ponte; no entanto, pode haver também corrosão localizada. Estas regiões, geralmente, encontram-se nas partes superiores das estruturas, particularmente, onde praticamente não são estabelecidas frestas com acúmulo de eletrólito entre elas.

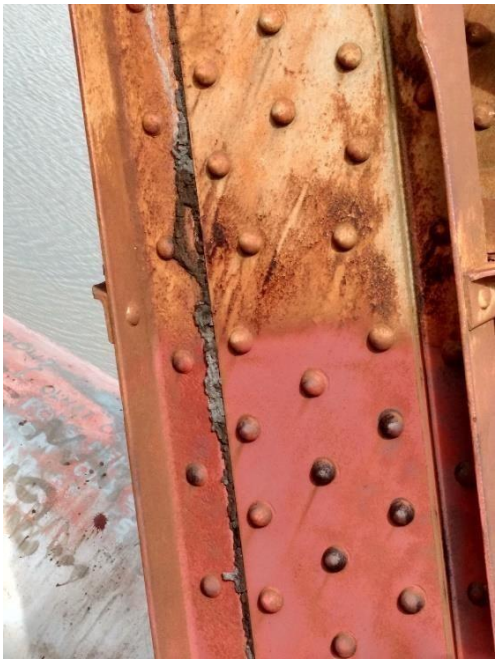


Figura 4 - Corrosão encontrada em umas das treliças principais

A região de contato entre as treliças da passarela/madeira acaba por reter a umidade e intensifica o ataque no material metálico, além de criar frestas como mostra a Fig. 5.

Figura 5 - Região de contato metal/madeira

A Figura 6 mostra alguns pontos críticos onde o fenômeno de corrosão tem sido desenvolvido em função de aspectos geométricos; nestes lugares são estabelecidas regiões de frestas. Este aspecto tem propiciado uma grande intensificação do fenômeno de corrosão no material metálico uma vez que são geradas pilhas de concentração e, também, acúmulo de eletrólitos.

Figura 6 - Parafusos enferrujados

Foram feitas três amostras para análise como mostra a figura 2, as amostras passaram um período de dois meses submersas em recipientes com solução de 3% de NaCl. A figura 7, 8 e 9 mostra o estado de corrosão com algumas semanas de teste.

Figura 7 - Amostra I – Quatro primeiras semanas respectivamente.

Figura 8 - Amostra II – Quatro primeiras semanas respectivamente

Figura 9 - Amostra III – Quatro primeiras semanas respectivamente

Na última semana do ensaio foi feito um último registro das amostras, a figura 10 mostra o estado final das amostras.

Figura 10 - Amostra I, II e III respectivamente

Após o fim do ensaio, foi feito uma pesagem das amostras para ver a perda de massa registrada em uma balança de precisão de 0,01 mg. A tabela 1 tem o registro dos pesos antes e depois do ensaio.

Tabela 1 - Pesagem das amostras

| Amostras | Peso Inicial | Peso Final | Perda de massa | Percentual de massa |
|---|---|---|---|---|
| I | 74.2551 g | 73.9723 g | 0.2828 g | 0.38% |
| II | 109.3865 g | 109.0137 g | 0.3728 g | 0.34% |
| III | 89.1574 g | 88.8159 g | 0.3415 g | 0.38% |

A taxa de corrosão é dada pela Eq. 2, e as variáveis já foram pré-estabelecidas. A tabela 2 mostra a taxa de corrosão das amostras.

$$T_c = \frac{k * \Delta M_c}{A * t * r} \quad (2)$$

k - Fator de conversão para mm/ano: 8,76 x $10^4$;
ΔMc – Perda de massa em gramas;
A – Área do corpo de prova, em $cm^2$;
t – Tempo de ensaio, expresso em horas;
r – Massa específica do material metálico ensaiado 7,86 $g/cm^3$;
Tc – Taxa de corrosão, expressa em mm/ano.

Tabela 2 - Taxa de corrosão

| Amostras | Área | Taxa de Corrosão ($T_c$) |
|---|---|---|
| I | 32.2327 $cm^2$ | 0.066898 mm/ano |
| II | 35.8141 $cm^2$ | 0.07946 mm/ano |
| III | 34.6203 $cm^2$ | 0.075298 mm/ano |

A taxa de corrosão média é de 0.073885 mm/ano com desvio de 0.0052, essa taxa de corrosão é moderada segundo a NACE, o critério para avaliação da corrosividade segundo a NACE está na tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - taxa de corrosão segundo a NACE

| Potencial de Corrosividade | Taxa de Corrosão |
|---|---|
| Severo | >0,125 |
| Moderado | 0,025 a 0,125 |
| Baixo | <0,025 |

Após calcular a taxa de corrosão, os corpo de provas foram lavados com água destilada, rinsados com álcool para secagem, em seguida foi feita uma análise microscópica com um aumento de 300 vezes como mostra a figura 11.

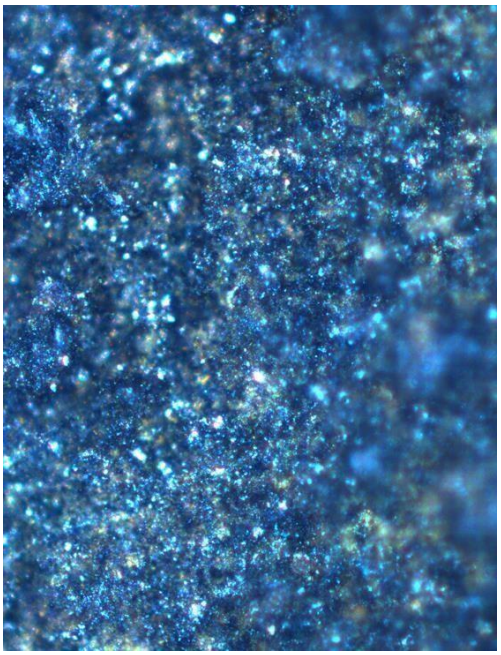


Figura 11 - Análise microscópica

Pela análise da figura 11, ver-se pequenos pontos de pites, é uma corrosão localizada devido a presença de íons de Cloro presente no eletrólito de acordo com a literatura, mostrando sua formação devido ao ambiente marítimo presente na região.

## CONCLUSÃO

Os danos estruturais que ocorrem nas pontes metálicas dependem de diversos fatores e variam conforme o sistema estrutural utilizado, o tipo de aço, a qualidade das ligações, etc. Porém, excetuando os acidentes estruturais imprevisíveis,

os fatores que mais influenciam as manifestações patológicas nessas estruturas são a agressividade ambiental e a falta de conservação.

Os locais com presença de frestas têm desenvolvido intensa ataque corrosivo, esses produtos de corrosão que atuam como concentradores de tensão podem ocasionalmente provocar deformação e até ruptura de algumas peças que compõem os elementos estruturais.

Mesmo o ambiente tendo uma corrossividade alta e as amostras apresentam uma taxa de corrosão moderada isso ocorre devido a adição de cobre nos aços de baixa liga que impede a corrosão devido a água ou atmosfera marítima criando uma película aderente.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) D610 - 08(2012): Standard Practice for Evaluating Degree of Rusting on Painted.Steel Surfaces , corrosion, rusting".

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8800/08 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

BRINCK, F.M. Efeito da corrosão na integridade estrutural da ponte metálica Marechal Hermes. 2004. 177p. (Dissertação de Mestrado - Construções Metálicas) Ouro Preto: Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto, 2004.

GALLEGO, Juno. Materiais de Construção Mecânica I. UNESP. 2009.

GENTIL, Vicente. Corrosão. 6ª Ed. Revisada. Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora, 2011.

PFEIL, W., PFEIL, M. - Estruturas de Aço – Dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008. Ed. LTC, Rio de Janeiro, 2009.

National Association of Corrosion Engineers – NACE International

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

O autor Luiz Gustavo Barbosa de Amorim é o responsável pela publicação do artigo em questão

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção 'área de conhecimento do trabalho'.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(X) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 27 à 31 de agosto de 2018
Brasília, DF

# ANÁLISE NUMÉRICA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR DURANTE A SOLIDIFICAÇÃO DE LIGAS METÁLICAS EM MOLDES DE AREIA

**Castilho, E. R. S.**[1]
**Costa, G. B.**[2]
**Oliveira, E. P.**[3]
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
Folha 17, Quadra 04, Lote Especial, Nova Marabá, Marabá Pará, 68505-080
castilho@unifesspa.edu.br[1]
gisamec@unifesspa.edu.br[2]
edilma@unifesspa.edu.br[3]
**Lins, E. F.**[3]
Universidade Federal do Pará
Rua Augusto Corrêa. Belém, Pará, 68505-080
erb@ufpa.br[3]

**RESUMO:** A solidificação de ligas metálicas tem importância em diversos processos de manufatura como fundição, lingotamento e soldagem. O processo de fundição ocorre com a mudança de fase onde é comum observar a presença de uma interface de solidificação que avança na direção de extração de calor. O calor adicional observado na região de transformação de uma fase em outra é o calor latente. Neste trabalho, foram aplicadas ferramentas numéricas para o estudo de solidificação das ligas metálicas de Alumínio-Silício durante o processo de fundição com intuito de aperfeiçoar o processo para obter ligas metálicas mais resistentes e de melhor qualidade. A formulação utilizada é baseada em volumes finitos para as equações de conservação da energia, massa e quantidade de movimento. O software *ANSYS* foi utilizado para obter a distribuição do campo de temperatura em diversos pontos. Uma boa concordância foi obtida quando os resultados da simulação foram comparados com os resultados experimentais.

**Palavras-Chave:** Solidificação, Ligas Metálicas, Molde de areia, Métodos Numéricos, Transferência de Calor.

***ABSTRACT:*** *The solidification of metal alloys is important in many manufacturing processes such as melting, casting and welding. The casting process occurs with phase change where it is common to observe the presence of a solidification interface that advances in the direction of heat extraction. The additional heat observed in the region of transformation from one phase to another is the latent heat. This paper, numerical tools were applied to the solidification study of the aluminum-silicon alloys during the casting process in order to improve the process to obtain better and better quality metallic alloys. The formulation used is based on finite volumes for the conservation equations of energy, mass and momentum. The ANSYS software was used to obtain the temperature field distribution at several points. A good agreement was obtained when the results of the simulation were compared with the experimental results.*

***Keywords:*** *Solidification, Aetal Alloys, Sand mold, Numerical Methods, Heat Transfer.*

## INTRODUÇÃO

Na atualidade, com a necessidade da utilização das técnicas de solidificação nos processos de fabricação como soldagem, fundição e lingotamento contínuo, percebe-se a importância da manipulação dos metais e suas ligas bem como são configuradas suas características e propriedades mecânicas para aplicações diversas em todos os seguimentos manufatureiros e fabris. É durante a concepção da fase de solidificação que muitas de suas propriedades são conferidas, pois as diversas formas de aquecimento e resfriamento lhes configuram fases microestruturais características que influenciam nas propriedades mecânicas.

No processo de solidificação, a etapa crucial para obtenção das propriedades dos produtos semiacabados se dá nas taxas de resfriamento em consonância com as temperaturas médias de aquecimento. Durante a perda de calor é comprovado que, com a variação da velocidade de resfriamento, há uma propriedade estrutural intrínseca ligada à metodologia abordada que é a transformação morfológica celular em dendritas, uma vez que o surgimento dos espaçamentos dendríticos primários e secundários exercem uma forte influência nas propriedades dos materiais fundidos, caracterizando a importância do produto (Rocha, 2003).

Os modelos matemáticos e físicos de maior aplicabilidade na descrição do processo de solidificação empregam equações diferenciais não lineares. Para a solução destas equações, dada a dificuldade de obtenção de uma solução analítica e a complexidade geométrica, utilizam-se métodos numéricos como o método dos elementos finitos, de diferenças finitas ou de volumes finitos. O modelo matemático deve conter em sua formulação uma forma de descrever a transferência de calor no líquido e no sólido, a mudança de fase e a consequente liberação de calor latente na interface, a transferência de calor para o meio vizinho, ou seja, na interface metal-molde e o movimento do fluido na região líquida, devido à convecção.

Uma formulação adequada na abordagem da transição líquido-sólido durante o processo de solidificação, chamada de entalpia-porosidade, é implementada no software ANSYS®FLUENT, que considera a conservação de energia por meio da entalpia para a formação de sólido e identifica a região de transformação através da pseudo-porosidade. Além disso, pode-se simplificar o problema, com base na viscosidade da liga fundida, desprezando as influências da convecção na transferência de calor. Com isso, apenas a condução atuará no processo térmico.

Por outro lado, a transferência de calor na interface metal-molde é bastante complexa, fazendo com que haja diferentes configurações. Dessa forma, deve-se levar em conta essa variação dentro das formulações matemática e física. De acordo com Peres (2004), o tratamento mais usual para este contato é feito pelo uso de formulações empíricas, cujos parâmetros são ajustados pelo confronto (comparação direta) com as curvas de resfriamento obtidas experimentalmente por meio de alguns termopares. Tornando um procedimento subjetivo e trazendo incerteza com relação à qualidade do método numérico, uma vez que não permite comparações adequadas. No trabalho citado, foi feita uma análise do processo de solidificação para fundição utilizando moldes metálicos. Para moldes de areia, pouca literatura tem sido encontrada, principalmente relacionada a simulações computacionais nesse tipo de fundição.

O objetivo deste trabalho é estudar o impacto do coeficiente de resistência de contato na interface metal-molde em solidificação de ligas metálicas durante o processo de fundição de lingotes em molde de areia. Será utilizado um software comercial fundamentado no método de volumes finitos para a modelagem e simulação desse sistema. A implementação e teste numérico será efetuado com o objetivo de verificar a capacidade do software de adequadamente representar esse tipo de fenômeno e analisar o impacto de diferentes valores do coeficiente de contato metal-molde no processo de solidificação.

## METODOLOGIA

Para este trabalho, foi utilizada um lingote de alumínio que na forma de ligas, apresenta diversas aplicações práticas e existem diversos dados experimentais e simulações computacionais disponíveis na literatura pois o efeito do silício na matriz de alumínio produz uma família de ligas altamente atraentes para aplicações de engenharia. Essas ligas são amplamente utilizadas na indústria automotiva devido às suas excelentes características de fundição e boas propriedades mecânicas, como desempenho de corrosão, usinabilidade e capacidade de fundição. Essas ligas também têm outras vantagens, como peso leve, baixo coeficiente de expansão térmica, boa conformabilidade e baixo custo (Chen et al., 2014; Yang et al., 2012).

Como interessa apenas a análise térmica, consideramos apenas a substância pura. Para a geometria do lingote foi utilizado um cilindro de 50 mm de diâmetro e 150 mm de altura. Este cilindro representará o metal que passará pelo processo de solidificação. Em torno deste cilindro, uma segunda camada de material de 1 mm de espessura foi criada no software. Esta camada, inexistente no processo físico real, representará, quando corretamente ajustado os dados do material que a compõe, a resistência térmica metal-molde. Por fim, um cilindro de 500 mm de raio e 300 mm de altura foi criado no modelo CAD para representar a areia. A figura esquemática do modelo CAD criado para este trabalho está mostrada na Figura 1.

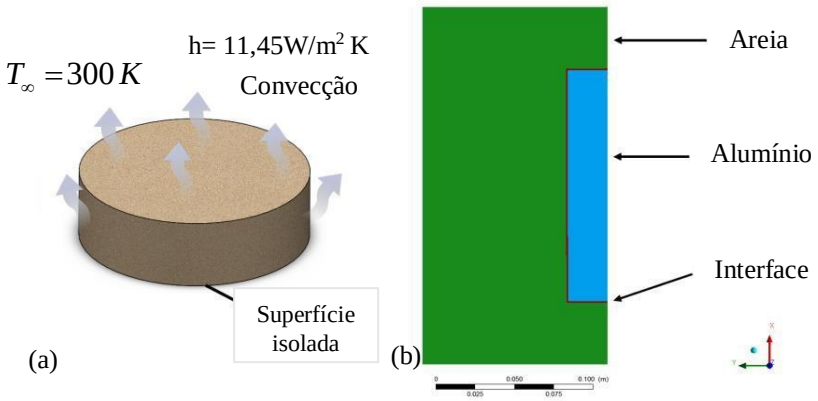



**Figura 1.** Sistema físico: Solidificação de um cilindro de em molde de areia
(a) Molde de areia e condições laterais; (b) Representação do plano de axissimetria utilizado

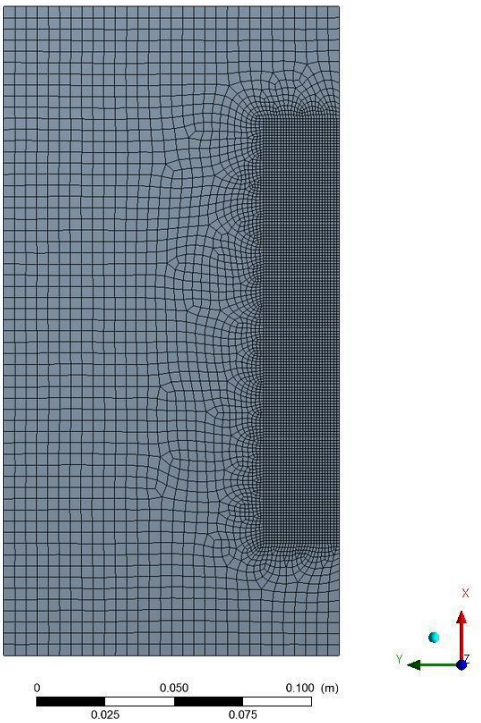



**Figura 2.** Modelo numéricos malha utilizada

De forma a simplificar o modelo numérico utilizou-se apenas um plano axissimétrico. Quanto as condições de contorno foi utilizada convecção forçada nas regiões lateral e superior, enquanto a base foi considerada termicamente isolada, conforme mostrado na Figura 1(a), como condição inicial, toda a região do espaço ocupada pelo alumínio foi considerada a 940K (temperatura de vazamento), enquanto que toda a região do molde de areia iniciou a 300 K. A malha para este domínio é mostrada na Figura 2. Esta malha é composta por 20427 nós e 6712 elementos. O passo de tempo utilizado na simulação corresponde a 1 segundo, em período total equivalente a 400 segundos.

A liga metálica em análise é composta de alumínio com 3% de porcentagem em peso de silício (Al-3%wt). As propriedades termo físicas desta liga tem grande variabilidade com a temperatura. As propriedades do molde de areia industrial e do lingote de alumínio puro são apresentadas na Tabela 2, foram obtidas através dos trabalhos de Pariona (2005) e Gandi (2000), respectivamente. Vale ressaltar que algumas propriedades do alumínio puro variam com a temperatura, assim essas são regidas por funções polinomiais obtidas por interpolações de dados experimentais.

Fazendo uso de interpolações polinomiais dentro de faixas restritas de temperatura, podemos calcular as propriedades termo físicas de cada componente utilizando as expressões, em função da temperatura T, mostradas na tabela 1.

**Tabela 1.** Propriedades termo físicas dos componentes, em função da Temperatura T

| | **Alumínio** | **Silício** | **Areia Industrial** |
|---|---|---|---|
| Massa específica [Kg/m$^3$] | 2535 se 300K < T < 933,35K | 2330 | 1494,71 |
| | 2370 se 933,35K < T < 1500 | | |
| Calor Específico [J/Kg.K] | 852,15 + 0,37865 T se 300K < T < 933,35K | 921,70-0,6901T+ 0,0010416T$^2$-7,1568x10$^{-7}$T$^3$+1,8922x10$^{-10}$T$^4$ se 300K < T < 1000K | 1172,3 |
| | 1205,9 – 0,12843 T, se 933,35K < T < 1500 | 821,73-0,18393T+ 0,000143396T$^2$-3,7762.10$^{-8}$T$^3$+3,3584.10$^{-12}$T$^4$ se 1000K < T < 4000K | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Condutividade térmica [W/m.K] | $232,12 + 0,043369T-7,1796x10^{-5}T^2$ se $300K < T < 933,35K$ | $707,92 - 2,9941T+ 0,0049859T^2-2,9691x10^{-6}T^3$ se $219,16K< T < 625,39K$ | 0,52 |
| | $46,454 + 0,058891T-1,2316 x10^{-5}T^2$ se $933,35K < T < 1500$ | $-70,971+ 0,78127T- 0,0014706T +1,0513x10^{-6}T^2 - 2,6069X10^{-10}T^3$ se $625,39< T < 1503,2K$ | |
| Viscosidade dinâmica [kg/m.s] | $1,72x10^{-5}$ | - | - |
| Calor latente [J/kg] | 385000 | - | - |
| Temperatura de fusão [K] | 933,35 | - | - |

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores da temperatura e fração de liquido estão mostrados nas Figuras (3a) e (3b), para o instante de tempo relativo a t = 100 s, respectivamente. Como pode ser visto, neste passo de tempo o metal encontra-se parcialmente solidificado. Como esperado, a troca térmica se dá de maneira mais intensa nas regiões próximas as extremidades do cilindro, onde a região de troca de calor é maior, ou seja, a porcentagem de líquido cai à medida que se avança em direção às extremidades. Também é importante observar enquanto o tempo avança, a fração de liquido diminui das extremidades para o centro, sendo está a direção de propagação da frente de solidificação, como mostrado nas Figuras (4a) e (4b) no instante de tempo t = 300 s. Nas Figuras (5a) e (5b) mostram a configuração após o processo de solidificação completo no instante de tempo t = 500 s.

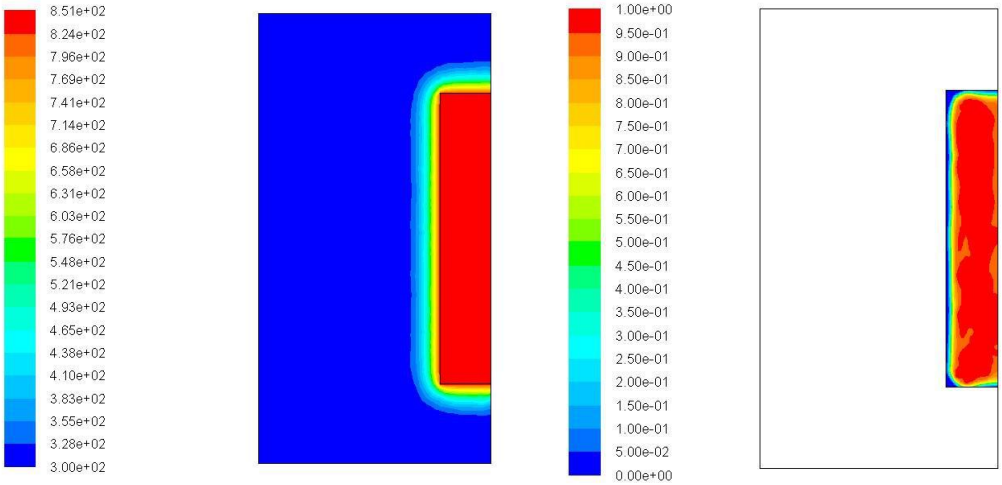



**Figura 3. (a)** Mapa de contorno de Temperatura e **(b)** fração de liquido no instante 100s

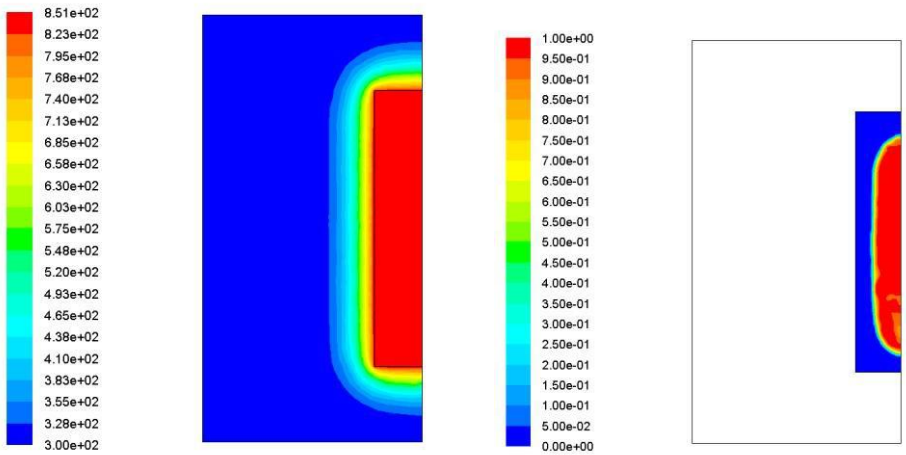



**Figura 4. (a)** Mapa de contorno de Temperatura e **(b)** fração de liquido no instante 300s

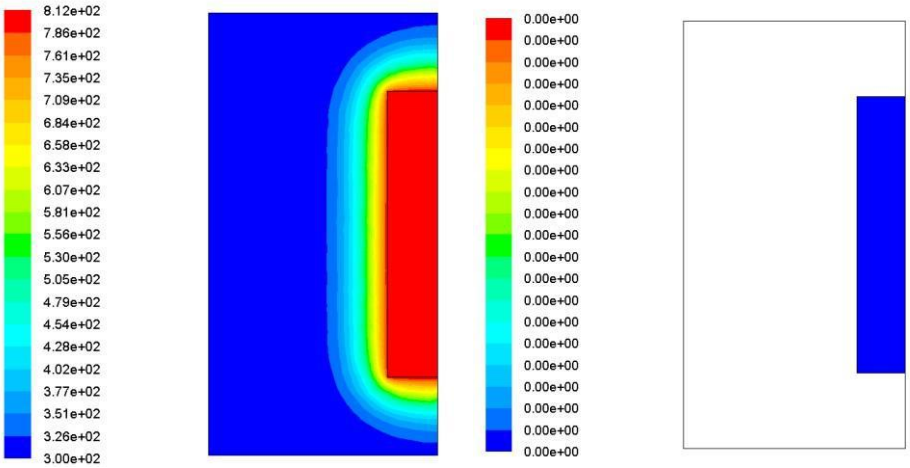



**Figura 5. (a)** Mapa de contorno de Temperatura e **(b)** fração de liquido no instante 500s

A Figura 6 mostra a variação da temperatura em função do tempo em alguns pontos localizados na seção utilizada. Observa-se em tais pontos o resfriamento do metal e o aquecimento do molde de areia, com posterior resfriamento deste. Através dos dados obtidos é possível inferir, que no ponto 1 a queda de temperatura é mais acentuada à medida que o tempo avança, enquanto nos pontos 2 e 3 o resfriamento é mais lento. Isso se deve a maior velocidade de extração de calor. Esta informação é de grande importância para estimar a microestrutura a ser formada. Dessa forma, essas curvas de resfriamento podem ser utilizadas para caracterizar a microestrutura cristalina do metal após a solidificação.

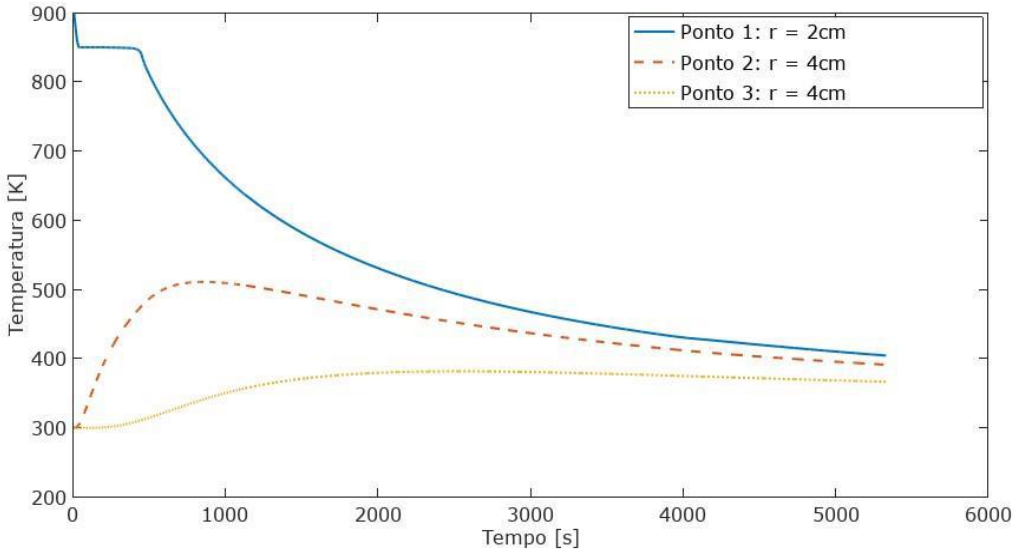



**Figura 6.** Termogramas de 3 pontos situados nas posições radias de 2 cm (interno lingote), 4cm (areia) e 6 cm (areia) da seção

## CONCLUSÃO

O fenômeno de solidificação, é de extrema importância para aperfeiçoar a qualidade de ligas fundidas. A simulação computacional tem se mostrado bastante eficaz, sendo uma ferramenta rápida e econômica para a descrição deste problema. A geometria computacional e os modelos matemáticos e físicos utilizados na simulação devem ser as mais próximas possíveis do real e devem conter dados empíricos que aumentem a fidedignidade com os dados experimentais.

As simulações computacionais geraram resultados satisfatórios, grande parte condiz com a teoria encontrada em literaturas. Foi possível analisar o processo de solidificação em uma liga metálica em um molde de areia, conservando as suas propriedades termo físicas. Para isso, usou-se os modelos de energia, transporte e de solidificação não-lineares. Assim, a solidificação ocorre da extremidade para o centro, tal fato foi comprovado com a porcentagem de fração líquida

nos primeiros instantes de resfriamento. Além disso, as curvas de resfriamento em alguns pontos permitirão prever as microestruturas formadas na solidificação, assim como as curvas de aquecimento do molde avaliar a sua eficiência térmica, temas de trabalhos futuros. Portanto, este trabalho consegue descrever uma metodologia de solidificação que pode ser utilizada mesmo em geometrias complexas, dependendo da correta calibração das propriedades da interface. Medidas experimentais relacionadas ao sistema físico mostradas serão realizadas e publicadas em trabalhos futuros.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e à FAPESPA pelo apoio financeiro concessão de pesquisa 88881.159113 / 2017-1.

## REFERÊNCIAS

ANSYS. ANSYS FLENT. Disponível em: <http://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Fluent> Acessado em: 25 junho.2018

Peres, M. D., Siqueira, C. A., Garcia, A. "Macrostructural and microstructural development in Al-Si alloys directionally solidified under unsteady-state conditions". Journal of Alloys and Compounds, v.381, 181p, 2004.

Rocha, O. L., Siqueira, C. A., Garcia, A. "Heat flow parameters dendrite spacings during unsteady state solidification of Sn-Pb and Al-Cu alloys". Metallurgical and Materials Transactions A, v.34A, p.995-1006, 2003

Gandi, A. **"**From constrained to unconstrained growth during directional solidification". *Acta Materialia*, Elsevier, 2000, 48 (10), pp.2483 – 2501

Pariona, M. M.; Mossi, A. C. "Numerical simulation of heat transfer during the solidification of pure iron in sand and mullite molds**".** Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, 2005, vol.27, n.4, pp.399-406. ISSN 1678-5878.

Chen, Y., Pan, Y., Lu, T., Tao, S. and Wu, J., 2014. "Effects of Combinative Addition of Lanthanum and Boron on Grain Refinement of Al-Si". Casting Alloys. Materials and Design, Vol. 20, p. 423-426.

Yang, C., Chang, Y., Lui, T. and Chen, L., 2012. "Effects of friction stir processing and artificial peak aging on erosion resistance of Al-11Si-4Cu-2Ni-0.7Mg cast alloy". Materials and Design, Vol. 40, p. 163-170.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(veis) pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção 'área de conhecimento do trabalho'.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
( ) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
(X) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

# APLICABILIDADE DO MÉTODO CALORIMÉTRICO NA MEDIÇÃO DO CALOR DISSIPADO EM FURAÇÃO

**Guilherme Henrique Alves Andrade, Ivanilson Sousa da Costa, Márcio Bacci da Silva**
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Av. João Naves de Ávila, 2121, Uberlândia - MG, CEP 38400-089, Brasil
E-mail: guilhermehenriqueaa@gmail.com, ivanilsonsousacosta@hotmail.com

**RESUMO:** Pesquisadores em usinagem são unânimes em afirmar que a maior parte da potência consumida na usinagem de metais é convertida em calor próximo a aresta de corte da ferramenta e, uma das técnicas experimentais utilizadas para medição desse calor, é o confinamento das trocas térmicas em usinagem no interior de um calorímetro. O objetivo deste trabalho foi avaliar a aplicabilidade de um calorímetro de água na medição do calor dissipado na furação de ferro fundido cinzento. O calorímetro utilizado neste trabalho foi constituído de duas cubas cilíndricas encaixadas entre si, a externa de Technyl® e a interna de PVC (Policloreto de Vinila). Entre os dois recipientes foi adicionado poliestireno expandido para isolação térmica. Termopares foram utilizados para medição das temperaturas no interior do calorímetro. A metodologia se mostrou adequada e promissora para avaliação do calor gerado em processos de usinagem, com resultados demonstrando que entre 46,75 % e 56,30 % da energia mecânica utilizada para o corte foi transformada em calor em usinagem e percebida pelo método calorimétrico, desconsiderando a partição de calor da ferramenta de corte.

**Palavras-Chave:** calorímetro, temperatura de corte, furação

***ABSTRACT:*** *Machining researchers are unanimous in stating that most of the power consumed in the machining of metals is converted into heat near the cutting edge of the tool and one of the experimental techniques used for measuring this heat is the confinement of thermal exchanges in machining inside a calorimeter. The purpose of this work was to evaluate the applicability of a water calorimeter in the measurement of dissipated heat in the drilling of gray cast iron. The calorimeter used in this work consisted of two cylindrical containers enclosed, the external of Technyl® and the internal of PVC (Polyvinyl chloride). Expanded polystyrene was added between the two containers for thermal insulation. Thermocouples were used to measure the temperatures inside the calorimeter. The methodology was adequate and promising for the evaluation of the generated heat in machining processes, with results demonstrating that between 46.75 % and 56.30 % of the mechanical energy used for the cutting was transformed into heat in machining and perceived by the calorimetric method, disregarding the heat partition of the cutting tool.*

***Keywords:*** *calorimeter, cutting temperature, drilling*

## INTRODUÇÃO

Pesquisadores em usinagem são unânimes em afirmar que a maior parte da energia consumida na usinagem dos metais é convertida em calor próximo à aresta de corte da ferramenta e muitos problemas técnicos e econômicos são oriundos, direta ou indiretamente, desse aquecimento (Trent e Wright, 2000). A literatura científica aborda vários métodos experimentais bastante utilizados para medição de temperaturas e calor em usinagem (Da Silva e Wallbank, 1999; Trent e Wright, 2000; Komanduri e Hou, 2001). Uma destas técnicas experimentais é o método calorimétrico, no qual as trocas térmicas do processo de corte são confinadas no interior de um calorímetro.

Este trabalho é proposto com objetivo de avaliar a aplicabilidade de um calorímetro de água, construído por Silva (2015), na determinação da quantidade de calor gerado na furação do ferro fundido cinzento. O estudo e desenvolvimento de uma metodologia para medição de calor e temperatura utilizando o método calorimétrico, uma técnica ainda pouco explorada, tem se mostrado de grande importância para os estudos em usinagem e, apesar de suas dificuldades experimentais inerentes, tem contribuído para o melhor entendimento de todo processo de corte, desde a formação de cavacos até a avaliação de desgaste e dos custos de usinagem, por exemplo.

## CALOR E TEMPERATURA EM USINAGEM

A geração de calor no processo de formação dos cavacos ocorre em três regiões distintas: na zona primária de cisalhamento ($Q_z$), na interface entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta ou zona secundária de cisalhamento ($Q_{a1}$); na interface de contato da peça com a superfície de folga da ferramenta ou zona terciária de cisalhamento ($Q_{a2}$). A

quantidade de calor produzida por estas fontes energéticas é dissipada através do cavaco ($Q_c$), da peça ($Q_p$), da ferramenta ($Q_{fer}$) e do meio ambiente ($Q_{ma}$).

Tem sido um consenso entre os pesquisadores que grande parte da energia mecânica associada à formação do cavaco se transforma em calor (Trent e Wright, 2000; Ferraresi, 2012). Assim, a taxa de geração de calor é aproximadamente equivalente ao trabalho de usinagem na unidade de tempo. Pode-se determinar, com boa aproximação, a taxa de geração de calor produzida na usinagem, considerando que 100 % da energia envolvida se transforma em calor, por meio de medições de potência de corte (Machado *et al.*, 2011; Ferraresi, 2012).

Muitas técnicas experimentais foram desenvolvidas para as medições de calor e temperatura em processos de usinagem e cada uma delas tem suas vantagens e desvantagens. A técnica adequada para um determinado problema depende da situação em consideração, tais como a facilidade de acesso e tamanho da área de medição, a dinâmica do corte (contínuo ou interrompido), a precisão requerida, o custo de instrumentação, etc. (Da Silva e Wallbank, 1999; Komanduri e Hou, 2011).

Neste trabalho, foi empregada a técnica experimental denominada método calorimétrico. Define-se calorímetro como um sistema fechado que não permite trocas de calor com o ambiente e todas as trocas de calor ocorrem no seu interior. Um calorímetro ideal não permite qualquer perda de energia térmica para o ambiente e o seu conteúdo pode ser considerado como um sistema termicamente isolado (Santos, 2018).

A literatura apresenta importantes resultados obtidos por meio deste método (Komanduri e Hou, 2001; Quan, He e Dou, 2008; Silva, 2015; Costa, Borba Jr., Da Silva, 2018). Segundo Komanduri e Hou (2001), o calor gerado no corte pode ser determinado com bastante precisão pelo método calorimétrico, apresentando boas concordâncias entre as medidas de potência obtida a partir de medições de torque. Uma metodologia semelhante foi empregada neste trabalho e é apresentada nas seções seguintes.

## METODOLOGIA

### Calorímetro de água

O calorímetro utilizado foi um calorímetro de água desenvolvido por Silva (2015) constituído de duas cubas cilíndricas encaixadas entre si. A cuba externa foi fabricada em Technyl® e a cuba interna fabricada em PVC (Policloreto de Vinila). A cuba externa possui um rebaixo para fixação da cuba interna que também possui um rebaixo para fixação do corpo de prova. Para melhorar a isolação térmica do calorímetro foi adicionado placas de poliestireno expandido de aproximadamente 13,6 mm de espessura entre as cubas.

A tampa do calorímetro foi fabricada em Technyl® e encaixa-se com a cuba interna, sendo fixada ao recipiente externo do calorímetro por parafusos. Foram usinados oito furos para a passagem dos termopares. No recipiente interno do calorímetro foram adicionados 90 ml de água destilada como fluido do calorímetro.

Os componentes do calorímetro e suas dimensões estão apresentados na Fig. (1) e na Tab. 1.

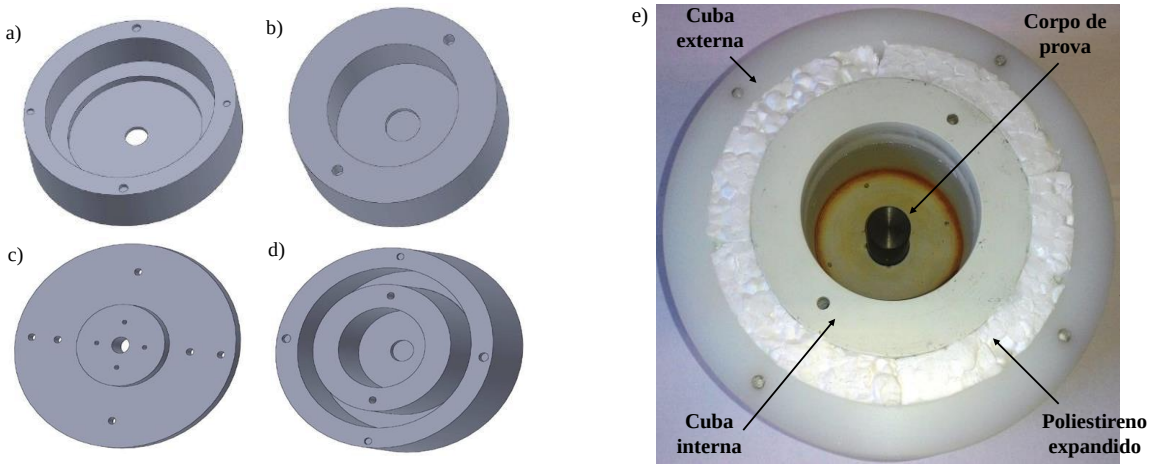



**Figura 1.** Componentes do calorímetro: a) cuba externa; b) cuba interna; c) tampa; d) cuba interna juntamente a cuba externa (adaptado de Silva, 2015); e) configuração final do calorímetro, com corpo de prova fixado

**Tabela 1.** Dimensões dos componentes do calorímetro de água

| Componente | Ø externo (mm) | Ø interno (mm) | Ø do rebaixo (mm) | Altura (mm) |
|---|---|---|---|---|
| Cuba externa (Technyl®) | 150 | 122 | 95 | 66 |
| Cuba interna (PVC) | 95 | 60 | 16 | 55 |
| Tampa (Technyl®) | 150 | - | 60(1) | 5 |

(1): No caso da tampa, a dimensão corresponde a um ressalto.

Os corpos de prova foram peças cilíndricas de ferro fundido cinzento com 16 mm de diâmetro e 30 mm de altura e fixados, em sua face inferior, no rebaixo do recipiente interno do calorímetro por parafuso. Termopares do tipo T com diâmetro de 0,127 mm foram soldados na peça com dispositivo de soldagem capacitiva. Também foram inseridos termopares no calorímetro para medição da temperatura da água.

O equipamento para medição de temperaturas foi uma unidade de aquisição, comutação e registro de dados Keysight Technologies® modelo 34970A comandado pelo programa computacional Agilent BenchLink Data Logger 3.

A ferramenta de corte utilizada foi uma broca helicoidal de corte a direita com duas arestas cortantes (Ø 10 mm), fabricada em aço-rápido/cobalto tipo M42 (8% Co) revestida de TiAlN (nitreto de titânio e alumínio).

Para medição dos esforços de furação foi utilizado um dinamômetro rotativo Kistler® modelo 9123C1211, com condicionador de sinal de multicanal Kistler®. O dinamômetro é fixado no mandril da máquina, transmitindo os sinais de força e torque por telemetria, por meio de um programa computacional em linguagem LabVIEW. A taxa de aquisição utilizada foi de 20 Hz.

A máquina-ferramenta utilizada para realização dos testes de furação foi um Centro de Usinagem Romi® Discovery CNC 760 com potência do motor principal de 11 kW e rotação máxima de 10 000 rpm.

**Testes realizados**

Foram realizados testes em duas etapas, ambas com termopares soldados no corpo de prova e termopares no interior do calorímetro monitorando a temperatura da água: primeiramente os testes foram realizados retrocedendo a broca no fim de curso da ferramenta, não permitindo a troca de calor no interior do calorímetro (testes denominados “A”). Em seguida, foi permitida a troca de calor da ferramenta no interior do calorímetro, admitindo que a ferramenta de corte permanecesse no fim de curso (testes denominados “B”).

Os termopares que monitoraram as temperaturas do corpo de prova foram soldados perpendicularmente à superfície, em linha reta, conforme a Fig. (2). As posições de soldagem, medidas pelo comprimento do termopar até à face superior, foram medidas com paquímetro analógico (resolução de 0,05 mm). Foram inseridos dois termopares para medição da temperatura da água, na posição vertical e 25 mm de distância desde a tampa do calorímetro até o interior do calorímetro.

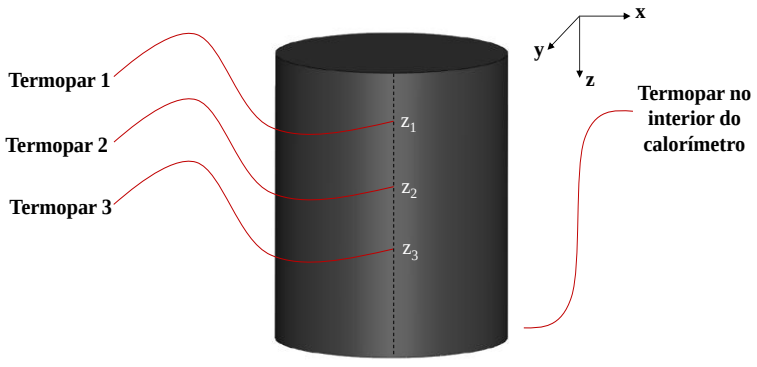



**Figura 2.** Posição de soldagem dos termopares no corpo de prova (adaptado de Costa, Borba Jr., Da Silva, 2018)

Os parâmetros de usinagem utilizados foram: velocidade de corte de 30 m/min, avanço de 0,10 mm/volta e profundidade do furo de 15 mm. Durante a furação não foi utilizado fluido de corte, contudo, o volume de água no calorímetro foi suficiente para submergir totalmente a peça e, consequentemente, a zona de corte.

Testes adicionais foram realizados com o intuito de avaliar a aplicabilidade do calorímetro na medição das partições de calor em usinagem. Assim, o teste C foi proposto com o objetivo de obter a porcentagem de calor dissipado pela ferramenta de corte ($Q_{fer}$).

Foi realizada a furação com o corpo de prova fixado fora do calorímetro e, imediatamente após a usinagem, a ferramenta de corte foi imersa no interior do calorímetro. Dentro do calorímetro foram inseridos três termopares para medição da temperatura da água, na posição vertical a 25 mm de distância desde a tampa. O volume de 90 ml de água destilada foi adicionado como fluido do calorímetro.

Para estes testes adicionais os parâmetros de usinagem utilizados foram: velocidade de corte de 30 m/min, avanço de 0,10 mm/volta e profundidade do furo de 15 mm. Não houve utilização de fluido de corte.

**Estimativa da porcentagem de energia mecânica transformada em calor**

Para estimativa da porcentagem de energia mecânica transformada em calor, foram utilizadas como base as metodologias desenvolvidas por Silva (2015) e Costa, Borba Jr. e Da Silva (2018), resumidas a seguir.

A avaliação das trocas de calor ocorridas no interior do calorímetro foi realizada por meio da equação fundamental da Calorimetria.

O valor de calor específico (*c*) do ferro fundido cinzento utilizado foi de 0,460 kJ/kgºC (Guesser, 2009).

O calor total dissipado é calculado pelo somatório das quantidades de calor dissipado pela água ($Q_a$) e as quantidades de calor retido pelo corpo de prova ($Q'_p$), cavacos ($Q'_c$) e ferramenta ($Q'_{fer}$), todos no interior do calorímetro, Eq. (1):

$$Q_{tot} = Q_a + Q'_p + Q'_c + Q'_{fer} \qquad (1)$$

A quantidade de calor retida pela peça no interior do calorímetro ($Q'_p$) é calculada por meio da equação fundamental da Calorimetria, onde *m* é a massa do corpo de prova, $T_f$ é a média das temperaturas finais dos termopares soldados no corpo de prova, após o equilíbrio térmico e $T_i$ é a média das temperaturas iniciais dos termopares soldados no corpo de prova.

De forma semelhante, a quantidade de calor retida pelos cavacos ($Q'_c$) é calculada por meio da equação fundamental da Calorimetria, onde *m* é a massa dos cavacos formados, $T_f$ é a média das temperaturas finais dos termopares imersos na água, após o equilíbrio térmico e $T_i$ é a média das temperaturas iniciais dos termopares soldados no corpo de prova.

Por fim, a quantidade de calor retida pela ferramenta de corte ($Q'_{fer}$) é calculada por meio da equação fundamental da Calorimetria, onde *m* é a massa do corpo da broca, $T_f$ é a média das temperaturas finais dos termopares imersos na água, após o equilíbrio térmico e $T_i$ é a média das temperaturas iniciais da broca, que não foi medida neste trabalho por limitações experimentais. Desta forma, a quantidade de calor retida pela ferramenta de corte não foi avaliada.

A massa do corpo de prova e da broca foram medidas por meio de balança digital (resolução de 0,01 g). A massa dos cavacos foi estimada por meio da diferença na pesagem dos corpos de prova antes e depois da usinagem. Foram realizadas 5 medições e a média foi apresentada com intervalo de confiança de 95,45 %.

Para o teste C, proposto com o objetivo de obter a porcentagem de calor dissipado pela ferramenta de corte ($Q_{fer}$), o calor cedido pela broca deve ser igual ao calor absorvido pela água, conforme a Eq. (2).

$$Q_{fer} = Q_a \Rightarrow Q_{fer} = m_a c_a \Delta T_a \qquad (2)$$

Assim, a temperatura inicial da ferramenta de corte ($T_i^{fer}$), ao adentrar no calorímetro no teste C, é dada por:

$$T_i^{fer} = \frac{m_a \cdot c_a \cdot (T_{eq} - T_i^a) + m_{fer} \cdot c_{fer} \cdot T_{eq}}{m_{fer} \cdot c_{fer}} \qquad (3)$$

Onde $T_{eq}$ é a temperatura de equilíbrio no interior do calorímetro.

O torque medido (τ) é utilizado para cálculo da energia consumida ($E_{tot}$) em todo processo de usinagem, Eq. (4):

$$E_{tot} = \frac{2\pi \cdot \tau \cdot p}{f} \qquad (4)$$

Onde *p* é a profundidade do furo (mm) e *f* é o avanço da broca (mm/volta).

A partir da razão do calor gerado pela energia consumida, através da Eq. (1) e da Eq. (4), obtêm-se a porcentagem de energia transformada em calor, no processo de furação do ferro fundido cinzento, Eq. (5):

$$R = \frac{Q_{tot}}{E_{tot}} \qquad (5)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas figuras (3) e (4) são apresentadas as variações de temperaturas do corpo de prova e da água no interior do calorímetro antes, durante e após a usinagem, nos testes A e réplica (A-2), teste B e réplica (B-2), respectivamente. Os termopares 1 a 3 representam a temperatura no corpo de prova enquanto os termopares 4 e 5 apresentam a temperatura da água no interior do calorímetro. As posições de soldagem dos termopares no corpo de prova estão registradas na Tab. 2.

**Tabela 2.** Posição dos termopares soldados no corpo de prova

| Distâncias (mm) | Teste A | Teste A-2 | Teste B | Teste B-2 |
|---|---|---|---|---|
| $z_1$ | 3,00 | 2,60 | 3,50 | 3,30 |
| $z_2$ | 9,00 | 10,60 | 7,50 | 7,20 |
| $z_3$ | 11,25 | 15,70 | 10,90 | 14,10 |

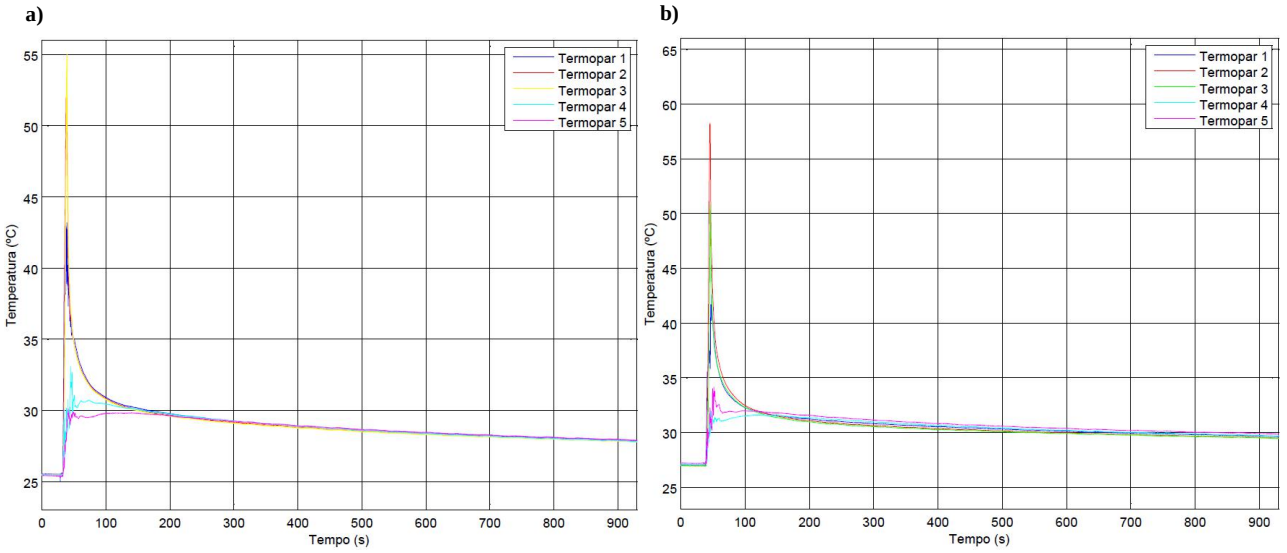



**Figura 3.** Medição de temperaturas: a) para o teste A; b) para a réplica A-2

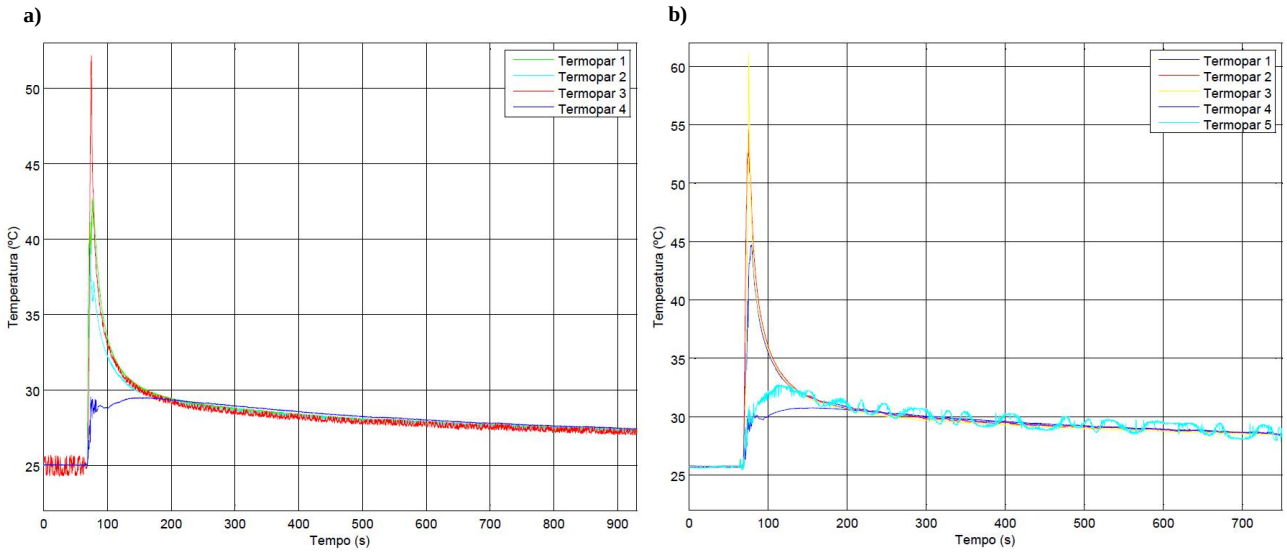



**Figura 4.** Medição de temperaturas: a) para o teste B; b) para a réplica B-2

A análise das Fig. (3) e (4) revela um padrão durante os testes: os termopares soldados em uma região mais próxima da posição final do furo (15 mm) apresentam maiores valores de temperatura. Esse comportamento acontece devido à condução do calor gerado pela interface cavaco-ferramenta. Essa região pode ser comparada a uma fonte de geração de calor movendo-se na direção vertical com a velocidade de avanço. Assim, essa fonte móvel se desloca, gerando calor, que é propagado pelo corpo de prova. Essa propagação de calor aumenta as temperaturas do corpo de prova e, no momento em que as arestas de corte passam pelo ponto de menor distância entre o eixo da ferramenta e a face lateral onde o termopar foi soldado, a temperatura captada é máxima. Os termopares próximos ao fim de curso apresentam maiores temperaturas devido à soma do calor propagado desde o início do corte e o calor gerado pela fonte móvel quando a distância entre ferramenta de corte e termopar é mínima. Nos testes A-2 e B-2 este comportamento evidencia que, devido às posições dos termopares 3, 15,70 mm e 14,10 mm, estes apresentaram as maiores temperaturas registradas no respectivo teste.

Na figura (5) são apresentadas as temperaturas obtidas nos testes C e C-2. De forma semelhante, observa-se o acréscimo de temperaturas oriundos da condução de calor da ferramenta de corte para a água.

A massa do corpo de prova foi de (42,08 ± 0,78) g. A densidade do ferro fundido foi estimada em (7,16 ± 0,06) g/cm$^3$. A massa dos cavacos foi estimada em (8,44 ± 0,07) g. A massa da ferramenta de corte medida foi de (60,47 ± 0,02) g.

Aplicando as equações Eq. (1), (4), (5) e a equação fundamental da Calorimetria obtêm-se os resultados sumarizados na Tab. 3.

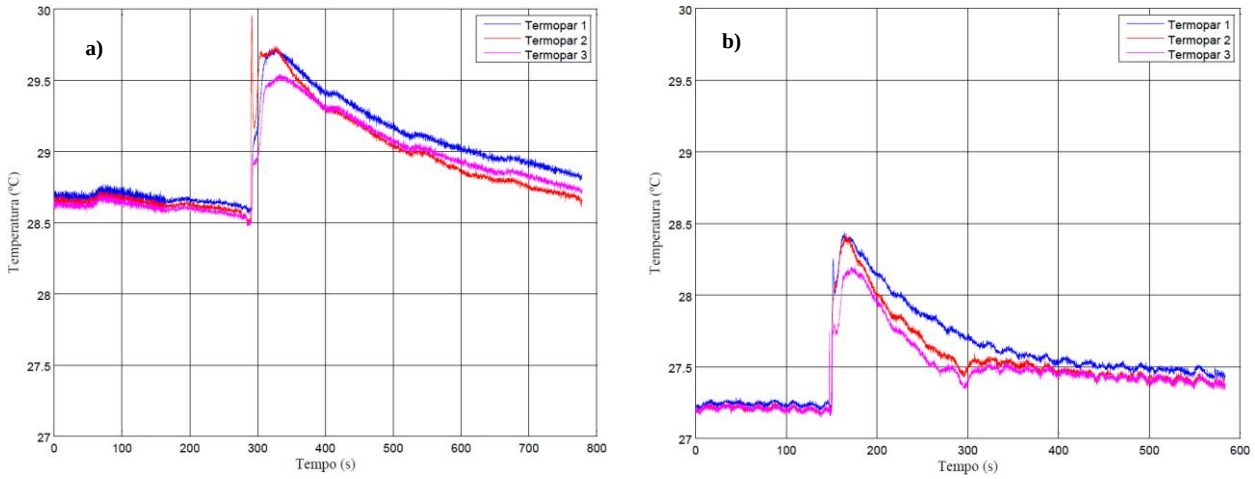



**Figura 5.** Medição de temperaturas: a) para o teste C; b) para a réplica C-2

**Tabela 3.** Resultados obtidos nos testes A e testes B

| Parâmetros | Teste A | Teste A-2 | Teste B | Teste B-2 |
|---|---|---|---|---|
| $T_{inicial}$ (°C) | 25,445 | 27,140 | 25,039 | 25,636 |
| $T_{final}$ (°C) | 27,870 | 29,785 | 27,450 | 28,546 |
| ΔT (°C) | 2,425 | 2,645 | 2,411 | 2,910 |
| Torque (N.m) | 2,331 | | | |
| $E_{tot}$ (kJ) | 2,197 | | | |
| $Q_a$ (kJ) | 0,913 | 0,996 | 0,908 | 1,096 |
| $Q'_p$ (kJ) | 0,047 | 0,051 | 0,047 | 0,056 |
| $Q'_c$ (kJ) | 0,009 | 0,011 | 0,011 | 0,011 |
| $Q'_{fer}$ (kJ) | - | - | 0,061 | 0,074 |
| $Q_{fer}$ (kJ) | 0,010 | | - | - |
| $Q_{tot}$ (kJ) | 0,974 | 1,063 | 1,027 | 1,237 |
| $R_{tot}$ | 44,33 % | 48,38 % | 46,75 % | 56,30 % |

É importante ressaltar a diferença entre calor dissipado pela ferramenta ($Q_{fer}$) e o calor retido pela ferramenta ($Q'_{fer}$). A ferramenta de corte dissipa uma determinada quantidade do calor gerado na zona de corte. Esta parcela é uma partição, denominada $Q_{fer}$. Uma vez que a ferramenta de corte permanece no calorímetro após a usinagem, há perda de calor da ferramenta para a água. Entretanto, como pode ser visto na Fig. (5), as temperaturas finais da ferramenta de corte não são

iguais às temperaturas iniciais, demonstrando que uma parcela de calor foi "retida" na ferramenta, denominada por $Q'_{fer}$. Conceitos semelhantes podem ser enunciados para a peça ($Q'_p$) e os cavacos ($Q'_c$).

Nos testes A e A-2 não foi calculado o calor retido, pois a ferramenta de corte foi retraída logo após a usinagem. Em compensação, o teste C permitiu a avaliação do calor dissipado pela ferramenta.

Os resultados demonstram que, entre 46,75 % e 56,30 % da energia mecânica utilizada para o corte foi transformada em calor em usinagem e percebida pelo método calorimétrico, desconsiderando a partição de calor da ferramenta de corte. Para fins comparativos, Costa, Borba Jr. e Da Silva (2018) obtiveram valores entre 51,15 % e 54,15 % da potência consumida na furação de ferro fundido cinzento com mesmos parâmetros de corte, também desconsiderando a partição de calor da ferramenta de corte.

## CONCLUSÃO

Os resultados demonstram que, entre 46,75 % e 56,30 % da energia mecânica utilizada para o corte foi transformada em calor em usinagem e percebida pelo método calorimétrico, desconsiderando a partição de calor da ferramenta de corte. Assim, a metodologia de avaliação de calor dissipado na furação de ferro fundido se mostrou adequada e promissora para avaliação do calor gerado em processos de usinagem.

## AGRADECIMENTOS

Os autores deveras agradecem ao CNPq, a CAPES e à FAPEMIG pelo apoio às pesquisas realizadas no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem da Universidade Federal de Uberlândia (LEPU/UFU).

## REFERÊNCIAS

Costa, I.S., Borba Jr., M.B., Da Silva, M.B., 2018, "Medição de calor e temperatura em usinagem por meio do método calorimétrico", Acta Mechanìca et Mobilitatem, Vol. 3, N. 6, pp. 53-59.

Da Silva, M.B., Wallbank, J., 1999, "Cutting temperature: prediction and measurement methods – a review", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 88, Issues 1–3, pp. 195–202.

Ferraresi, D., 2012, "Fundamentos da Usinagem dos Metais", Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 751 p.

Guesser, W.L., 2009, "Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos", Ed. Blucher, São Paulo, 336 p.

Komanduri, R.; Hou, Z.B., 2001, "A Review of the Experimental Techniques for the Measurement of Heat and Temperatures Generated in Some Manufacturing Processes and Tribology", Tribology International, Vol. 34, Issue 10, pp. 653–682.

Machado, Á.R., Abrão, A.M., Coelho, R.T., Da Silva, M.B., 2011, "Teoria da Usinagem dos Materiais", Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 397 p.

Quan, Y.; He, Z.; Dou, Y., 2008, "Cutting Heat Dissipation in High-speed Machining of Carbon Steel Based on the Calorimetric Method", China Mechanical Engineering, 3(2): pp. 175–179.

Santos, M.A.S., Calorímetro, Mundo Educação, http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/calorimetro.htm, acessado em 27/02/2018.

Silva, M.D., 2015, "Desenvolvimento e Construção de um Calorímetro para o Processo de Furação", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 90 p.

Trent, E.M., Wright, P.K., 2000, "Metal Cutting", Butherwords, London, 446 p.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção 'área de conhecimento do trabalho'.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(X) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas

( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

# AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE USINAGEM EM UMA BANCADA DE USINAGEM ELETROQUÍMICA

**Gabriela Rocha Franco, Daniel Fernandes da Cunha**
Universidade Federal de Goiás - Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação
Av. Universitária, 1488 - Qd. 86 Bloco A, Goiânia - GO, 74605-010
gabrielarochaf@gmail.com, danielcunha@ufg.br

**RESUMO:** Usinagem eletroquímica é um processo de usinagem não convencional, cujo processo consiste na eletrólise para remoção de material. Peça e ferramenta são imersas em uma mesma solução contendo um líquido eletrolítico no intuito de permitir a passagem de corrente elétrica e remover material. Esse procedimento é indicado para usinar materiais muito duros e reproduzir formas complexas. A taxa de remoção deste processo, que independe da dureza do material, é principalmente influenciada pela densidade de corrente. A densidade de corrente é controlada não apenas pela quantidade de corrente que a fonte de alimentação é capaz de fornecer, mas também pelo tamanho da folga entre a ferramenta e a peça de trabalho (gap) e concentração da solução. O presente trabalho tem a finalidade de avaliar a influência de diferentes valores de corrente elétrica, tempo de usinagem e distância peça-ferramenta no processo de usinagem em uma bancada de usinagem eletroquímica experimental desenvolvida no próprio laboratório. Durante os ensaios maiores taxas de remoção de material foram obtidas com maiores valores de tensão, enquanto que menores valores de rugosidade foram obtidos a 3,5A com 1,45mm, conjunto de parâmetros que provavelmente favoreceram uma boa circulação do fluido eletrolítico no gap garantindo melhores resultados de superfície.

**Palavras-Chave:** Usinagem, Eletroquímica, Parâmetros.

***ABSTRACT:*** *Electrochemical machining is an unconventional machining process whose process consists of electrolysis to remove material. Workpiece and tool are immersed in the same solution containing an electrolytic liquid (electrolyte) in order to allow the passage of electric current and cause the removal of material. This procedure is indicated for machining very hard materials and reproducing complex shapes. The removal rate of this process, which is independent of the hardness of the material, is mainly influenced by the current density. The current density is controlled not only by the amount of current that the power supply is capable of delivering, but also by the size of the gap between the tool and the workpiece (gap) and concentration of the solution. This work has the purpose of evaluating the influence of different values of electric current, machining time and tool part distance in the machining process in an experimental electrochemical machine developed by our laboratory. During the tests, higher rates of material removal were obtained with higher stress values, while lower roughness values were obtained at 3.5A with 1.45mm, a set of parameters that probably favored a good circulation of the electrolytic fluid in the gap, guaranteeing better results.*

***Keywords:*** *Machining, Eletrochemical, Parameters.*

## INTRODUÇÃO

Usinagem é um termo que abrange uma grande gama de processos de fabricação projetados para remover material conferindo à peça sua geometria final, geralmente na forma de cavaco. Esse processo é usado para converter peças fundidas, forjadas ou blocos pré-formados de metal em formas desejadas, com tamanho e acabamento especificados para atender aos requisitos do projeto. Quase todos os produtos fabricados atualmente têm componentes que exigem usinagem, geralmente com grande precisão, visto que a demanda por macro e micro produtos e componentes de materiais de difícil usinagem, como aço ferramenta, carbonetos, superligas e ligas de titânio vem aumentando rapidamente nos setores automotivos, aeroespacial, eletrônico, óptico, fabricação de dispositivos médicos e comunicações indústrias (RAJURKARA et al, 2013).

Os processos não tradicionais de usinagem são subdivididos de acordo com a forma de energia que está sendo utilizada, podendo ser divididos nas seguintes categorias: mecânica, elétrica, térmica e química. Em comparação com os processos convencionais, os processos não tradicionais possuem capacidades quase ilimitadas, com uma exceção das baixas taxas de volume de remoção de material, conforme apontado por Benedict (1988). Dentre os processos não convencionais de usinagem, o processo de usinagem eletroquímica é o mais adequado, segundo Chouhan(2013), quando se visa alcançar um alto nível de precisão em materiais duros com as vantagens de evitar o surgimento de

tensões térmicas residuais em suas microestruturas e também a ausência de desgaste da ferramenta durante o processo de usinagem.

Este processo consiste na remoção controlada de metais por dissociação anódica em uma célula eletrolítica na qual a peça de trabalho é o anodo e a ferramenta é o cátodo. O líquido eletrolítico, que consiste em uma solução salina inorgânica, é bombeado através do espaço de corte (gap) entre a ferramenta e a peça de trabalho. O sal ioniza-se ao ser dissolvido em água, fazendo dispersarem-se no líquido os íons. Estes íons, então, permitirão a passagem de elétrons, e, portanto corrente elétrica, entre a peça e a ferramenta. Conforme elétrons saem da peça, o material que a constitui sofre oxidação e os íons do material oxidado flutuarão no líquido eletrolítico e se ligarão aos íons do sal (LIEVESTRO, 1889). A figura 1 abaixo apresenta de forma esquemática o processo de usinagem eletroquímica.

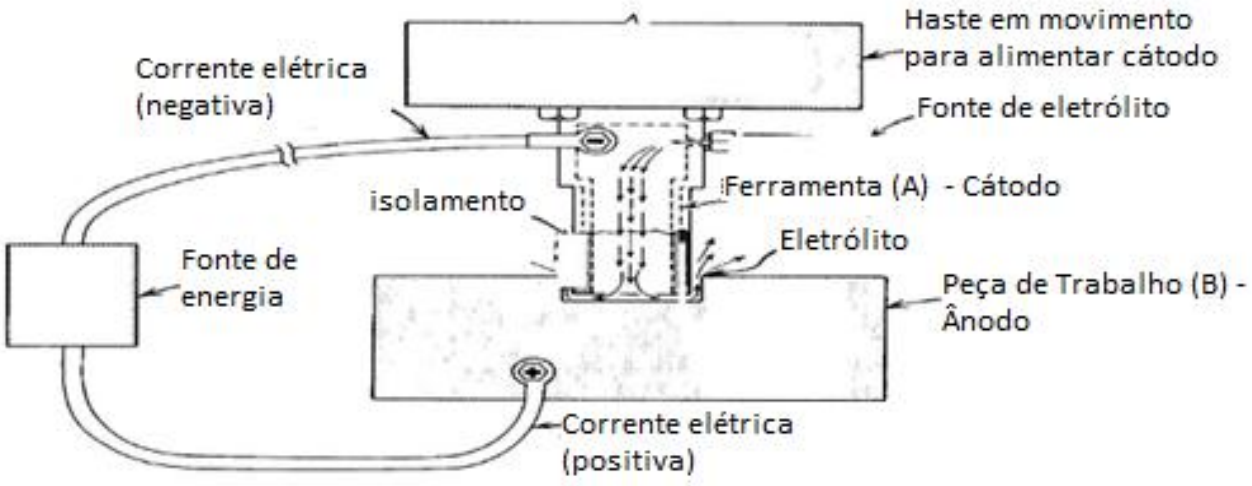



**Figura 1.** Esquematização do processo de usinagem eletroquímica(Benedict, 1987)

Em muitas aplicações, um acabamento polido é desejável em componentes usinados. A produção de uma superfície eletroquimicamente polida é geralmente associada à remoção aleatória de átomos da peça anódica, cuja superfície foi coberta com uma película de óxido. Os metais submetidos à Usinagem Eletroquímica ocasionalmente apresentam uma superfície polida e/ou fosca, mas uma área com corrosão localizada, que pode acontecer pela formação de bolhas entre o conjunto cátodo-ânodo (MCGEOUGH, 1988).

A taxa de remoção de material da Usinagem Eletroquímica, que independe da dureza do material, é principalmente influenciada pela densidade de corrente. A densidade de corrente é controlada não apenas pela quantidade de corrente que a fonte de alimentação é capaz de fornecer, mas também pelo tamanho da folga entre a ferramenta e a peça de trabalho e concentração da solução (gap). Uma distância peça-ferramenta pequena resulta na maior densidade de corrente, e existe o perigo de partículas de material oxidado acumularem no espaço entre a ferramenta e a peça de trabalho e provocarem um curto-circuito. Enquanto que quando o gap é grande, a densidade de corrente é reduzida, resultando em um acabamento superficial ruim e uma diminuição na taxa de remoção de material (BENEDICT, 1987).

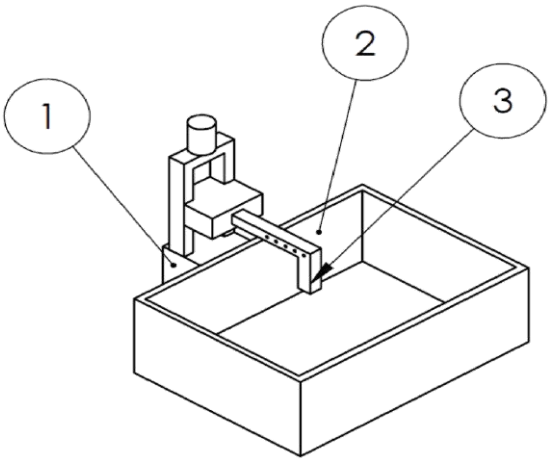
O presente trabalho em como objetivo, realizar o projeto e fabricação de uma bancada experimental de usinagem eletroquímica, de pequeno porte, capaz de executar o processo de usinagem eletroquímica e determinar sua eficiência a partir de experimentos delineados com diferentes parâmetros. Após a verificação da funcionalidade do equipamento, serão realizados estudos para otimização do projeto e otimização dos parâmetros avaliados por medição da qualidade superficial após usinagem.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A bancada de usinagem eletroquímica foi feita utilizando-se de quatro materiais principais: aço ABNT 1020, alumínio, tecnil e polímero, devido à facilidade de obtenção e ao baixo custo que esses materiais apresentam. Excluindo-se dessa lista a fonte de corrente elétrica, a bomba e as mangueiras de silicone desta, bem como os elementos de fixação dos componentes (fonte, bomba, reservatório, etc.) que foi feita utilizando parafusos. O avanço da ferramenta é feito por um conjunto de peças em tecnil e alumínio que é responsável pela regulagem da altura por meio de uma barra roscada de aço ABNT 1020 no conjunto regulador de altura da ferramenta. Para apoio da peça a ser usinada é utilizado uma chapa de alumínio no interior da cuba que é ligada ao polo positivo da fonte a fim de conduzir corrente elétrica até a peça a ser usinada. A base retangular que apoia todo o conjunto da máquina foi feita de alumínio. Durante os processos um multímetro foi utilizado como instrumento de medição e conferência da corrente elétrica durante o

experimento. O reservatório que contém o líquido eletrolítico é feito de polímero, a fim de isolar a corrente elétrica que passa pelo líquido.

Para realizar-se a usinagem, foi utilizada como eletrólito uma solução de cloreto de sódio (sal de cozinha) e água de concentração 72g/L. Como gerador de corrente elétrica, foi escolhida uma fonte estabilizadora modelo TCA, que fornece corrente máxima de 5A. Uma bomba de máquina de lavar roupas da marca ASKOLL de 30W que opera a 60Hz, 220V, 0,22A garante o fluxo de eletrólito entre a peça e a ferramenta. A voltagem máxima alcançada e utilizada em todos os ensaios foi de 5,5V. A Fig. 2 a seguir apresenta o desenho da bancada projetada, enquanto que uma foto da bancada em uso é apresentada na Fig. 3.




| | |
|---|---|
| 1 | Conjunto regulador de avanço da ferramenta |
| 2 | Reservatório |
| 3 | Ferramenta |

**Figura 2.** Projeto da bancada de usinagem eletroquímica

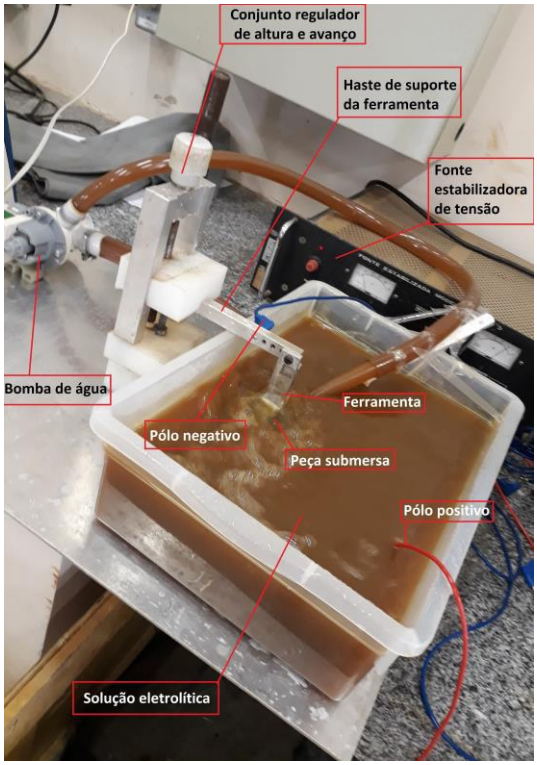



**Figura 3.** Bancada de usinagem eletroquímica em uso

Após a seleção e correto posicionamento dos componentes, foi definido os parâmetros de usinagem que seriam variados durante o ensaio a fim de comparar taxas de retirada de material e qualidade da superfície final da peça

usinada. Para realização do experimento foram utilizadas correntes de 3A, 3,5A e 4A, para os tempos de 30min, 60min e 75min com gaps de 1mm, 1,45mm e 1,95mm.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após realizados os ensaios com gap de 1mm foram obtidas como resultado as superfícies usinadas mostradas na Fig. 4, para correntes de 3A, 3,5A e 4A após a peça ser usinada durante 30min, 60min e 75min.

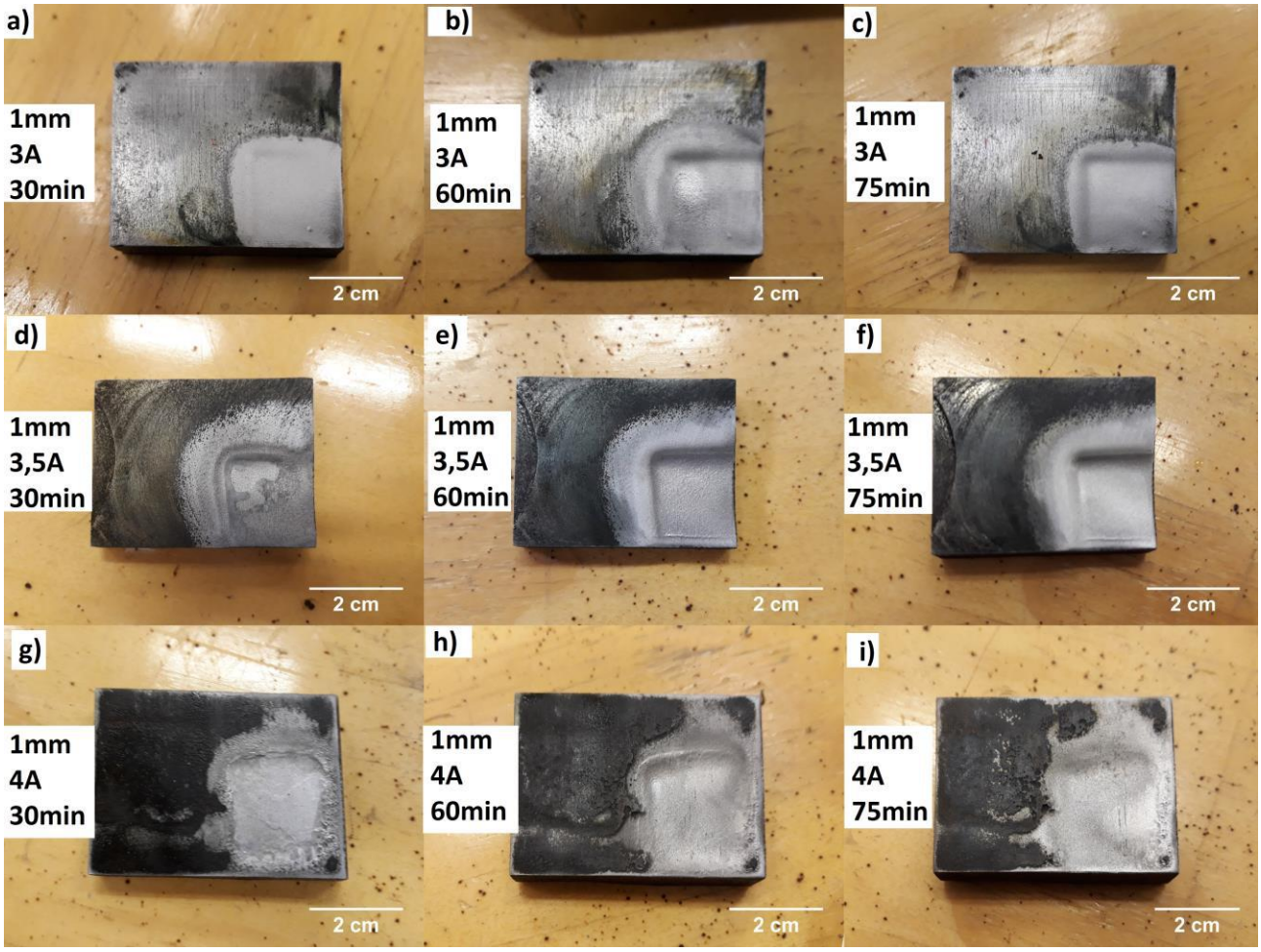



**Figura 4.** Superfície usinada com gap de 1 mm

A partir da análise da Fig. 4 pode-se inferir que os ensaios com corrente de 3,5A foram os que apresentaram um melhor resultado visual ao final do processo de usinagem, conforme representado pelo item f), enquanto que os realizados a 3A apresentaram um menor remoção aparente de material. Observa-se também que as amostras usinadas a 4A apresentaram bolhas nas superfícies ensaiadas, item g), h) e i). Isso pode ser consequência de uma má circulação de fluido eletrolítico durante o processo, isto é, o fluido não foi capaz de carregar as partículas de material removidas na região do gap entre a peça e a ferramenta de forma uniforme, ocasionando o surgimento de uma corrosão localizada na superfície. Esse defeito na superfície é também apontado por Sathiyamoorthy e Sekar(2014), que abordam em seus estudos a influencia do comportamento da solução eletrolítica nas taxas de remoção no material e na rugosidade da superfície usinada. Com a continuidade do processo esse comportamento se normaliza e observa-se uma melhora na superfície usinada, bem como uma diminuição nos valores de rugosidade medidos, conforme é apresentado na Tabela 1 que contém as rugosidades médias desses processos.

**Tabela 1.** Rugosidades médias Ra, Rq e Rz em (μm) para ensaios com gap de 1mm

| | 3A | | | 3,5A | | | 4A | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ra | Rq | Rz | Ra | Rq | Rz | Ra | Rq | Rz |
| 30min | 1,356 | 1,679 | 8,004 | 1,251 | 1,526 | 6,854 | 1,405 | 1,779 | 8,288 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 60min | 1,529 | 1,436 | 7,958 | 1,183 | 1,473 | 7,353 | 1,190 | 1,729 | 8,699 |
| 75min | 0,938 | 1,164 | 5,806 | 0,788 | 0,999 | 5,035 | 1,055 | 1,475 | 7,347 |

Para os ensaios realizados com gap de 1,45mm foram obtidas como resultado as superfícies usinadas mostradas na Fig. 5, para correntes de 3A, 3,5A e 4A após a peça ser usinada durante 30min, 60min e 75min, enquanto que a Tabela 2 a seguir apresenta as rugosidades médias desses processos.

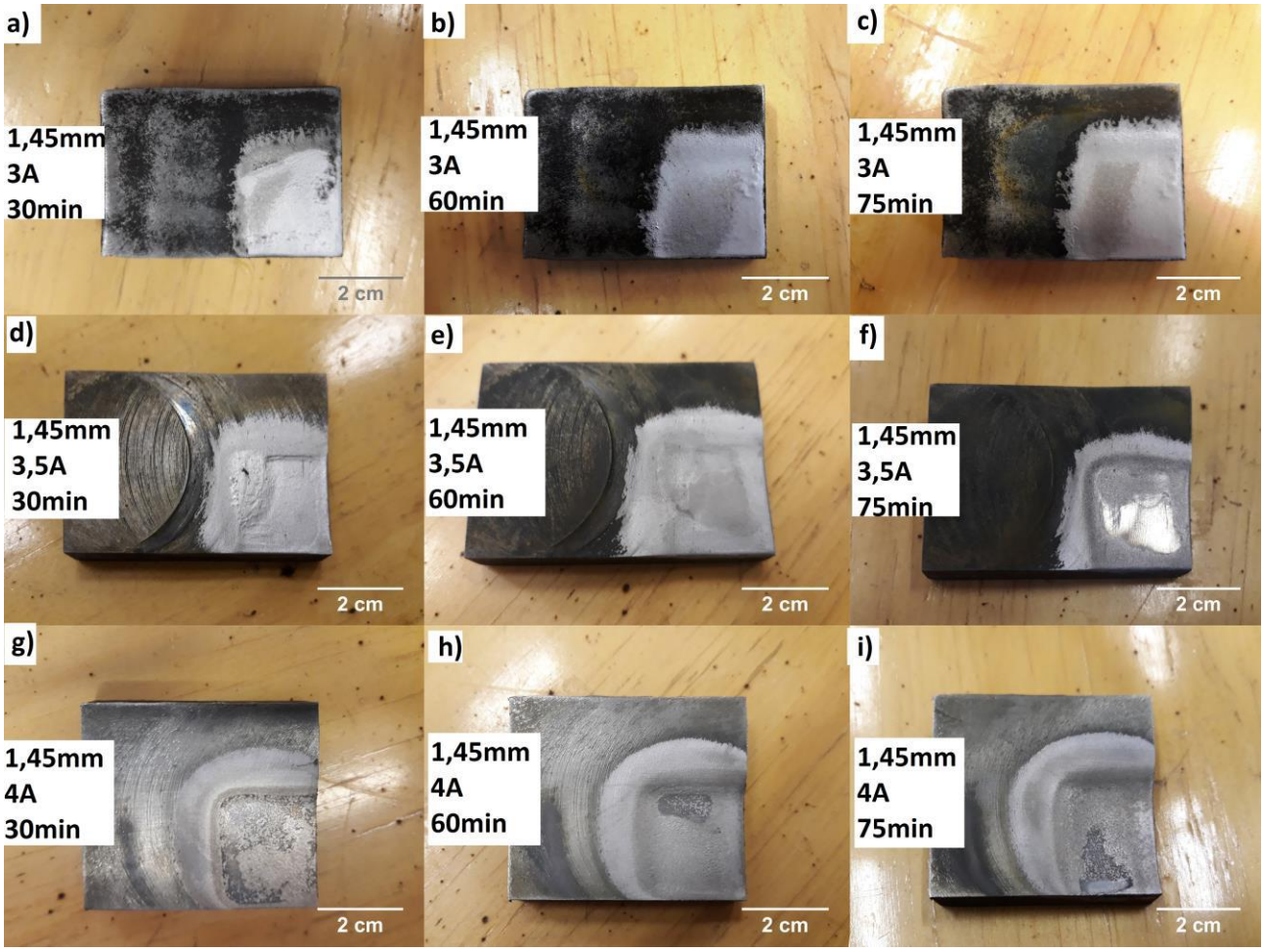



**Figura 5.** Superfície usinada com gap de 1,45 mm

Observa-se visualmente que, para os mesmos intervalos de tempo, a condição de corrente equivalente a 3,5A sugere uma superfície mais homogênea. Mesmo com o aparecimento de bolhas durante o processo, item d) da Figura 5, esse defeito na superfície se desfaz nos tempos de 60min e 75min. Algumas irregularidades visuais aparecem novamente na usinagem com corrente de 4A, itens g), h) e i) porém, o que pode ser percebido também nos valores médios de rugosidade apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Rugosidades médias Ra, Rq e Rz em (μm) para ensaios com gap de 1,45mm

| | 3A | | | 3,5A | | | 4A | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ra | Rq | Rz | Ra | Rq | Rz | Ra | Rq | Rz |
| 30min | 1,134 | 1,783 | 6,143 | 0,923 | 1,155 | 6,046 | 1,625 | 1,983 | 8,618 |
| 60min | 1,137 | 1,408 | 5,292 | 0,890 | 1,091 | 5,435 | 1,197 | 1,517 | 7,450 |
| 75min | 1,236 | 1,033 | 5,050 | 0,758 | 0,901 | 3,464 | 1,170 | 1,459 | 7,117 |

Já as superfícies usinadas com um gap de 1,95mm com os mesmos valores de corrente variando e os mesmos intervalos de duração dos ensaios são mostradas na Fig. 6 a seguir.

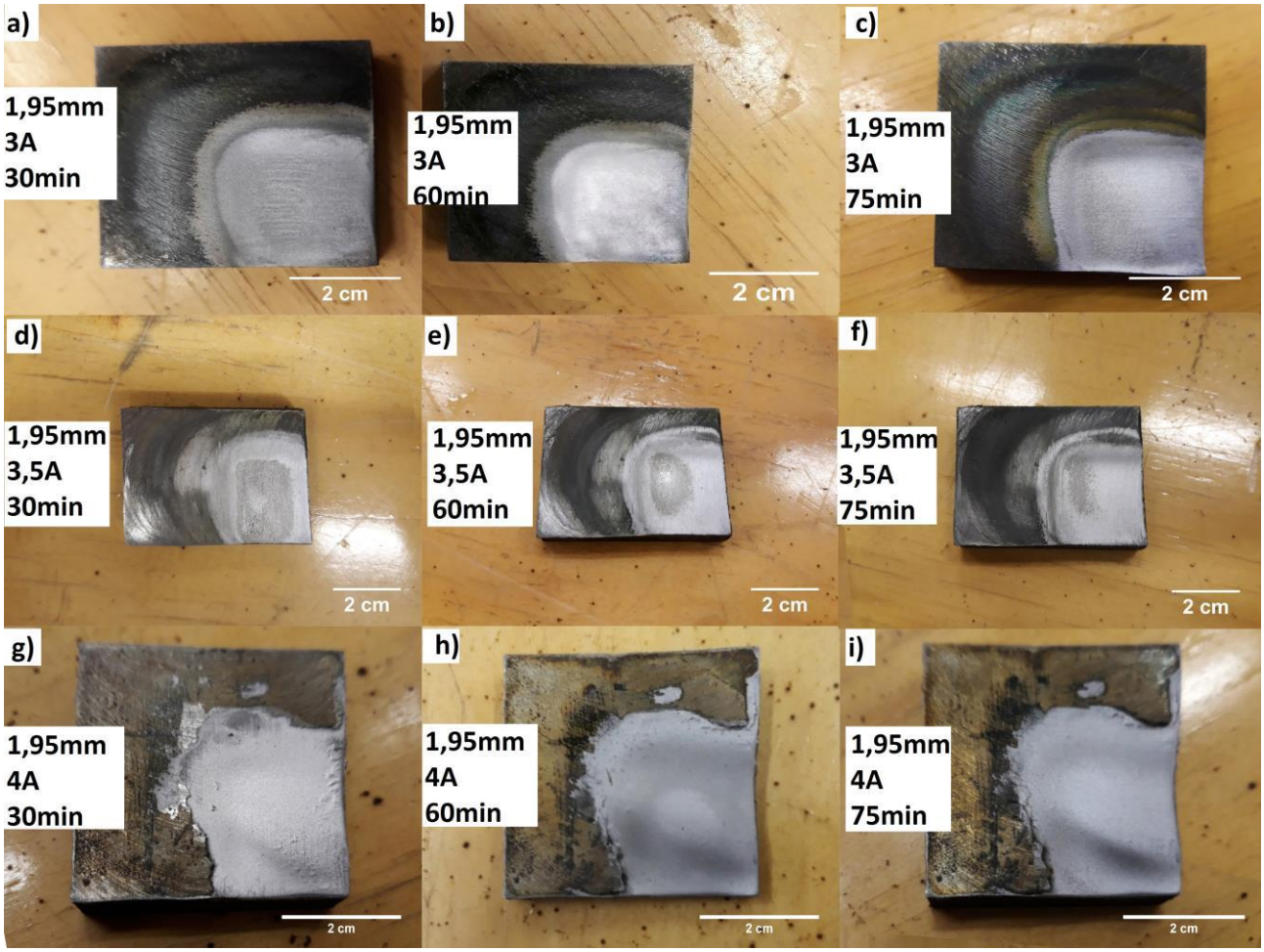


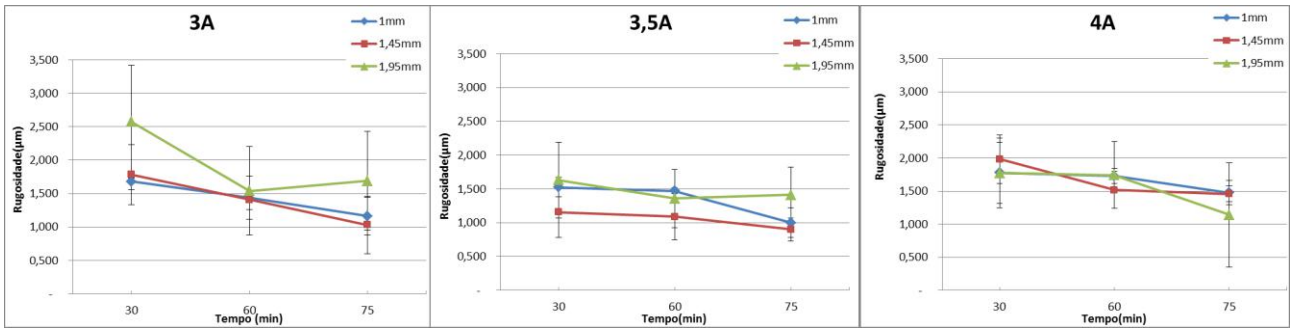

**Figura 6.** Superfície usinada com gap de 1,95 mm

Com base na Figura 6 nota-se que os ensaios com gap de 1,95mm apresentam maior tendência de ocorrer ondulações(erosões abauladas) na superfície usinada conforme a corrente aumenta. Percebe-se também que apesar disso as superfícies não apresentam tantos sinais de aparecimento de bolhas durante a usinagem, com exceção do item d) da Fig 6. O aspecto deste item pode ser explicado segundo Liviestro(1988) e Sathiyamoorthy e Sekar(2014) pelo uso de uma vazão muito alta de fluido eletrolítico durante o processo, que acarreta o comportamento não uniforme do fluido eletrolítico no gap peça-ferramenta, que é o maior dentre os ensaios realizados, afetando a qualidade da superfície final usinada, bem como as taxas de remoção de material ao final do processo. Porém esse defeito não se propaga com o aumento do intervalo de tempo de usinagem do ensaio. A presença de ondulações visíveis na superfície é percebida também nos valores de rugosidade medidos e apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3.** Rugosidades médias Ra, Rq e Rz em (μm) para ensaios com gap de 1mm

| | 3A | | | 3,5A | | | 4A | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ra | Rq | Rz | Ra | Rq | Rz | Ra | Rq | Rz |
| 30min | 2,320 | 2,575 | 13,082 | 1,298 | 1,630 | 7,256 | 1,323 | 1,773 | 9,059 |
| 60min | 1,244 | 1,540 | 7,753 | 1,103 | 1,358 | 6,456 | 1,318 | 1,741 | 8,479 |
| 75min | 1,310 | 1,689 | 9,534 | 1,128 | 1,414 | 7,181 | 0,894 | 1,140 | 5,368 |

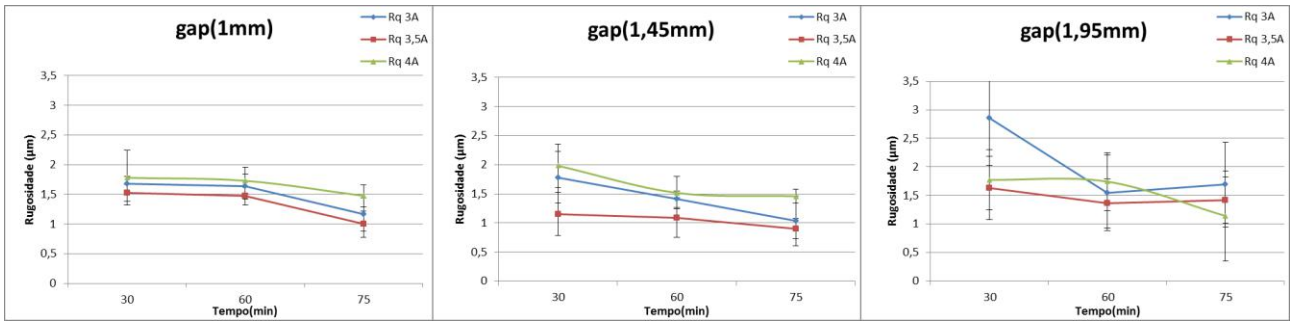
Com base nos dados obtidos, foram plotados os gráficos de rugosidade Rq média com corrente constante, e gap constante, apresentados das Figuras 7 e 8, respectivamente. Todos os gráficos foram plotados com curvas de 2x o desvio padrão, para uma confiabilidade de 95%.




**a)** **b)** **c)**

**Figura 7.** Rugosidades Rq medias em (µm) com correntes constantes

Nos gráficos da Figura 7 percebe-se que o comportamento da rugosidade para gap de 1,95 são usualmente maiores que os valores obtidos nas usinadas com gap de 1mm e 1,45mm, o que é esperado, já que a corrente de alimentação é parcialmente isolada pela própria solução eletrolítica com o aumento do gap. Observa-se também que dada as condições, os resultados obtidos com gap de 1mm e 1,45mm são bem próximos, sendo que o de 1,45mm apresentou melhores resultados em dois dos casos, o que pode ser consequência de uma ligeira melhora na lubrificação quando comparado com o gap inferior.




**a)** **b)** **c)**

**Figura 8.** Rugosidades Rq medias em (µm) com gap constantes

A análise dos gráficos da Figura 8 apresenta o comportamento esperado segundo a literatura de Liviestro(1988), isto é, menores valores de rugosidade para maiores tempos de usinagem. No entanto o esperado era que os menores valores de rugosidade fossem também obtidos com correntes mais altas, como acontece no gráfico de 1,95mm com 75min de usinagem. Pode-se inferir que essa diferença de comportamento para tensões mais altas é causada pelas características do jato d'água, conforme foi dito anteriormente na análise das superfícies usinadas.
Outra explicação para o valor ótimo ter sido obtido quando usinado a uma corrente média de 3,5A pode se dar através da curva característica de corrente-tensão(Fig. 9) em um processo de acabamento por usinagem eletroquímica (ECF), apresentada por Lee et al(2003) e presente na revisão de Tailor et al(2013). Em ambos os processos, usinagem e acabamento eletroquímicos, a fonte de alimentação controla o volume e a taxa de remoção de material, bem como a integridade da superfície desejada após a eletrólise.

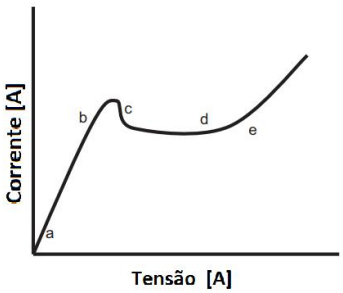



**Figura 9.** Curva de Corrente-Voltagem (Lee et al, 2003)

A curva mostra quatro diferentes características de dissolução anódica e Lee et al(2003) aponta que nas combinações de nível moderado de corrente-tensão, região (b-c) na Fig. 9, ocorre o brilho das superfícies, provavelmente devido ao fato

da corrente ser alta o suficiente nessa região para agitar e dissolver ou evaporar os compostos metálicos, inferindo que para obter um melhor acabamento superficial, o processo deve ser operado nessa zona "b-c-d". O efeito de brilho descrito pelos autores é obtido nos ensaios após a usinagem utilizando corrente de 3,5A, com 1,45mm de gap e 75min do presente trabalho, e pode-se inferir que essa combinação de parâmetros esteja na região (b-c-d) apresentado no gráfico.

Quanto à taxa de remoção de material, foi observado o aumento da texa de remoção de material com o aumento dos valores de corrente elétrica ao longo do tempo, conforme apresentado no gráfico da Figura 10, enquanto que a Figura 11 apresenta os gráficos de taxa de remoção (diferença de massa no final e no início do processo) para os gaps de 1mm, 1,45mmm e 1,95mm separadamente.

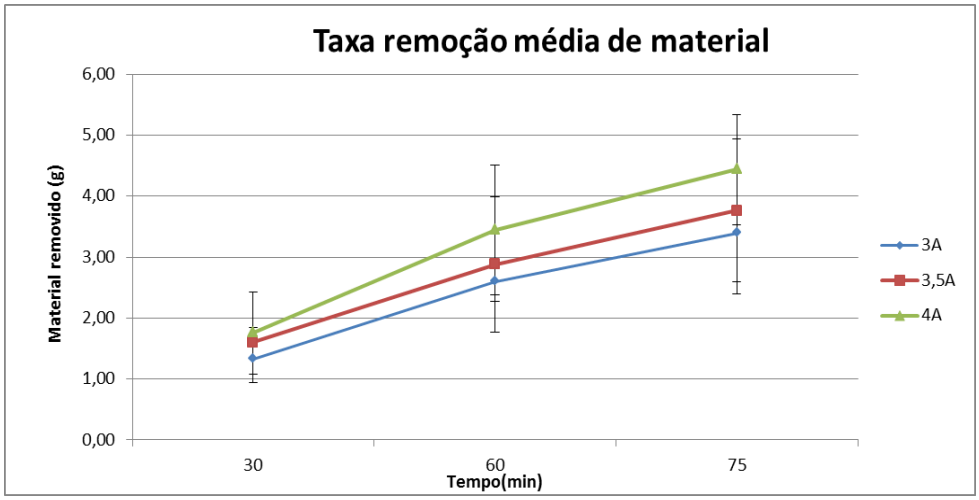
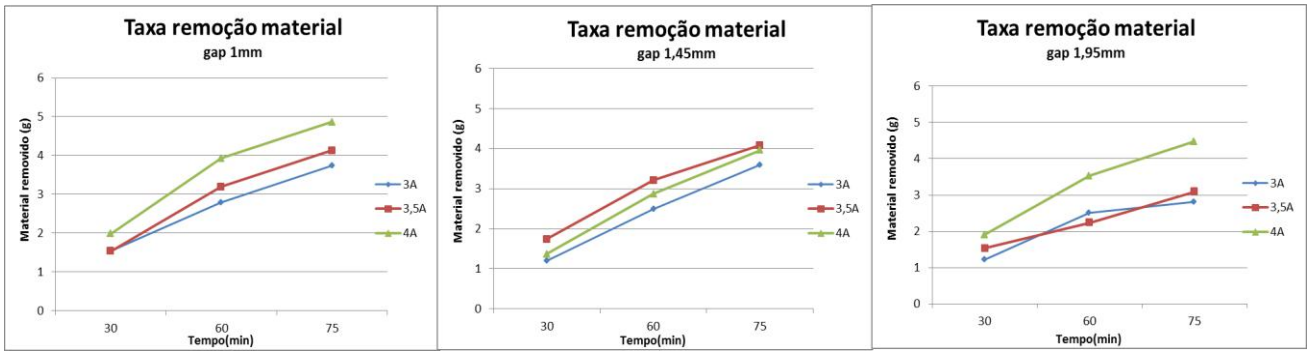



**Figura 10.** Taxa de remoção média de material




**a)** **b)** **c)**

**Figura 11.** Taxa de remoção de material para gap de 1mm, 1,45mm e 1,95mm

Das Figuras 10 e 11 tem-se que as maiores taxas de remoção de material são obtidas com o menor gap, o que está de acordo com o que é proposto por Liviestro(1988), que sugere gap de até 1,5mm para melhores resultados. Do gráfico da Fig. 10 tem-se também que na maioria dos casos altas densidades de corrente acarretam em uma maior taxa de remoção, o que é o esperado visto que o sistema opera segundo a lei de Faraday, no entanto pode-se notar uma queda na remoção de material para gap de 1,45mm, já que nesse ensaio as maiores taxas foram obtidas quando usinando com 3,5A. A tabela 4 a seguir contém as taxas de remoção obtidas.

**Tabela 4.** Taxas de remoção de material obtidas para gap de 1mm, 1,45mm e 1,95mm

| Taxa de remoção(g) para 1mm | | | | Taxa de remoção(g) para 1,45mm | | | | Taxa de remoção(g) para 1,95mm | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 30min | 60min | 75min | | 30min | 60min | 75min | | 30min | 60min | 75min |
| 3A | 1,54 | 2,79 | 3,74 | 3A | 1,20 | 2,50 | 3,60 | 3A | 1,22 | 2,51 | 2,82 |
| 3,5A | 1,53 | 3,19 | 4,13 | 3,5A | 1,74 | 3,21 | 4,08 | 3,5A | 1,53 | 2,24 | 3,09 |
| 4A | 1,98 | 3,93 | 4,86 | 4A | 1,37 | 2,87 | 3,96 | 4A | 1,91 | 3,53 | 4,48 |

## CONCLUSÃO

Com base nos princípios teóricos estudados, foi possível realizar o projeto e fabricar uma máquina de usinagem eletroquímica funcional, que pode ser reproduzida utilizando materiais acessíveis e que se mostra efetiva quanto à retirada de material e acabamento superficial, o que torna o processo vantajoso já que este processo deixa nenhuma ou mínimas tensões residuais na peça usinada. Através dos ensaios realizados foi observado que o aumento na corrente, bem como a redução da distância peça-ferramenta leva a um acabamento superficial melhor na maioria dos casos, com valores de rugosidade média (Ra) chegando até 0,758µm para 3,5A e 1,45mm de distância peça-ferramenta.

Observou-se também que a lubrificação durante a usinagem é outro ponto crítico durante o processo, visto que a formação de bolhas e a má lubrificação entre a peça e ferramenta podem ocasionar irregularidades no acabamento superficial. A vazão da solução bombardeada no conjunto peça ferramenta, bem como o comportamento dessa circulação de fluido, tambem interfere no acabamento final a peça. Os ensaios em que foram empregados um gap de 1,95mm e uma corrente de 4A, ilustram os efeitos indesejáveis que podem surgir na peça por conta de más condições de descarga eletrolítica, como ondulações em regiões de alta velocidade de fluxo eletrolítico.

O maior valor de rugosidade Rq média obtido foi de 2,575µm à uma corrente de 3A e gap de 1,95mm após 30minutos de usinagem. Esse resultado é condizente já que essa foi a menor corrente empregada, juntamente com o maior parâmetro de gap e menor duração de tempo de usinagem. Já o menor valor de Rq médio obtido foi de 0,901 µm, o que mostra que o par de parâmetros ótimo para utilização desta bancada é de corrente de 3,5A e gap de 1,45mm. Esse resultado é condizente, pois essa é corrente média e mais estável obtida durante a realização dos ensaios e o gap médio confere uma boa condição de lubrificação dada a vazão empregada pela bomba durante o processo.

Quanto à taxa de remoção de material o resultado dos ensaios foi o esperado, maiores taxas para maiores correntes e menores valores de gap, com exceção do ensaio realizado a 3,5A e 1,45mm, que apresentou melhores resultados em relação às demais combinações de parâmetros, evidenciando a vantagem dessa regulagem no processo.

A bancada se mostra eficiente, porém o controle manual dos parâmetros limita o processo e resulta em um processo mais demorado e com remoção de material em geometrias simples. Uma automatização do processo permitirá a reprodução de geometrias complexas, bem como acelerar a remoção de material da peça sem comprometer o acabamento superficial desejado.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Goiás pelo suporte infraestrutural para a realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

Benedict, G. F., 1989. “Metals Handbook, Vol. 16: Machining Processes”. American Society for Metals. 9ª Edição. Alled-Signal Aerospace Company, Garrett Engine Dvision, ASM International.

Benedict, Garry F., 1987. “Nontraditional Manufacturing Processes”. Marcel Dekker Inc., Nova York.

Chouhan, R., Goswami, R., Chaturvedi, V., 2013. “Optimization of electrochemical machining process parameters using Taguchi approach,” International Journal of Engineering Science and Technology, vol. 5, no. 5, pp. 999–1006.

Lee, S.J., Lee, Y.M., Du, M.F., 2003. “The polishing mechanism of electrochemical mechanical polishing technology”. Journal of Materials Processing Technology 140 (1–3), 280–286.

Lievestro, L. T., 1989. American Society for Metals. “Metals Handbook, Vol. 16: Machining Processes”. 9ª Edição. lehr Precision, Inc, ASM International.

Mcgeough, J. A., 1988. “Advanced Methods of Machining”. Londres: Chapman and Hall Ltd.

Rajurkara, K.P., Sundaramb, M. M., Malshec, A. P., 2013. “Review of Electrochemical and Electrodischarge Machining”. The Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM) Procedia CIRP. 6, 13 – 26;

Sathiyamoorthy, V., Sekar, T., 2014. “Experimental studies on improving the performance of electrochemical machining of high carbon, high chromium die steel using jet patterns”. Carbon - Science and Technology. 6. 321-329.

Tailor, B. P., Agrawal, A., Joshi, S., 2013. “Evolution of electrochemical finishing processes through cross innovations and modeling”. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 66. 15–36. 10.1016/j.ijmachtools.2012.11.005.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

**ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO**

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(X) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

# AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DA TENSÃO DE SOLDAGEM USANDO Ar+25%He NA DEPOSIÇÃO DE NiCrMo-3 POR MIG/MAG

**Gabriela Rocha Franco, Henrique Eugenio Siqueira, Kaio Cesar Oliveira Abreu, Demostenes Ferreira Filho**
Universidade Federal de Goiás
Av. Universitária, Quadra 86, 1488 – Setor Leste Universitário, Goiânia - GO, 74605-220
gabrielarochaf@gmail.com, heick2011@live.com, kaioc.o.a@gmail.com, demostenesferreira@ufg.br

**RESUMO:** O processo de soldagem MIG/MAG operando no modo de transferência por curto-circuito é amplamente utilizado quando se requer baixo calor e baixa energia no processo. O presente trabalho apresenta um estudo para a avaliação da variação de tensão na soldagem através de análises macrográficas das amostras soldadas, bem como análise do desempenho do processo de soldagem utilizando-se do Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência por Curto-circuito para mensurar a estabilidade do processo durante os ensaios, a fim de se obter uma regulagem ótima desse parâmetro dentro da faixa de valores avaliada. Para esta avaliação foi utilizado arame ER NiCrMo-3 e gás de proteção Ar+25%He e valores de tensão de 15V, 20V e 25V para diferentes valores de distância bico contato peça e velocidade de alimentação. Os resultados apontam a tensão de 20V como parâmetro mais estável de soldagem, com acréscimo nas área do reforço, área de penetração, largura do cordão e altura de penetração, e redução da microdureza na maioria dos casos. Conclui-se também que um aumento na tensão implica uma menor incidência de respingos nos cordões de solda, falhas na penetração do cordão de solda, melhor fusão do metal de adição, melhores índices de estabilidade, bem como aumento a microdureza da junta soldada, com maiores áreas de penetração e alturas de reforço.

**Palavras-Chave:** *MIG/MAG*, ER NiCrMo-3, Curto-circuito, Tensão, Estabilidade.

***ABSTRACT:*** *The MIG/MAG welding process operating in the short circuit transfer mode is widely used when low heat and low energy rates are required in the process The present work presents a study evaluation of the voltage variation in the final welding capacity through micrographic analyzes of the samples welded, as well as the analysis of the performance of the welding process using the "Vilarinho Index of Regularity of Short Circuit Transfer" to evaluate the stability of the MIG/MAG welding through the processes, in order to obtain an optimal regulation for this parameter within the range of values evaluated. The consumable electrode and protection gas used in this study were NiCrMo-3 and Ar + 25%He, while the voltage values ranged from 15V, 20V to 25V for different values of stick-out distance and feeding speed. The results indicate the voltage of 20V as an more estable parameter value of welding, with consequent increase in areas of penetration and reinforcement height, also minimum values of the microhardness in the weld area in most cases, as well as a lower number of weld splashes, weld bead penetration failures, better fusion of the metal and better stability indexes.*

***Keywords:*** *MIG/MAG, ERNiCrMo-3, short circuit, Voltage, Stability.*

## INTRODUÇÃO

Devido à importância do processo de soldagem para área de fabricação, o processo MIG/MAG é um dos processos de soldagem mais utilizados atualmente na indústria devido à necessidade de se obter uma boa qualidade dos cordões de solda. Os termos que dão nome ao processo refletem a classificação do processo de acordo com o gás de proteção utilizado, sendo MIG a designação para a proteção composta por gases inertes ou rica neles e MAG para a proteção feita por gases ativos ou que contenham uma mistura rica neles (Marques et al, 2016). Em Soldagem – Processos e metalurgia (Wainer et al, 2000), o autor define esse processo de soldagem como aquele que utiliza como fonte de calor um arco elétrico mantido entre o eletrodo consumível nu, continuamente alimentado, e a peça a ser soldada. Um aspecto importante nesse processo é a forma do arco elétrico, já que ele é a fonte de calor capaz de fundir os materiais. Segundo Egerland (2015), a tensão do arco apresenta uma relação aproximadamente linear com o comprimento do arco, sendo que um aumento de tensão conduz à extensão do arco e vice-versa.

A soldagem MIG/MAG, também conhecida como GMAW, é usualmente classificada com base nos principais modos de transferência metálica em três classes, de acordo com os tipos de forças dominantes no destacamento do metal do arame eletrodo. Esses três modos são: Curto-circuito, ocorre devido à força dominante de tensão superficial circuito e é adequado para soldagem em todas as posições; Globular, acontece devido à força dominante da gravidade); e Spray ou aerossol, que é decorrente do efeito da força dominante de origem eletromagnética (Lancaster, 1999; Iordachescu e Quintino, 2008). Um dos modos operacionais mais utilizados desse processo é a transferência metálica por curto-circuito, que ocorre quando são utilizados baixos valores de tensão e corrente, soldagem de seções finas ou

soldagens fora da posição plana e quando baixa energia de soldagem é necessária. Neste tipo de transferência, segundo Wainer et al (2000), é indicado o uso de arames eletrodos nus de diâmetros de 0,8 a 1,2 mm com algum gás de proteção. Por causa da importância da aplicação desse tipo de transferência são realizados estudos a fim de entender e aperfeiçoar este tipo de transferência. Os autores Baixo e Dutra(2009) analisando os efeitos de diferentes gases de proteção e do modo de transferência utilizando o processo MIG/ MAG com metal de adição Inconel 625 para produzir depósitos sobre chapa de aço carbono ABNT 1020, observaram que a utilização de atmosferas de proteção com 20% Hélio e baixo percentual de gás ativo se mostrou eficaz na soldagem com deposição sobre chapa, produzindo depósitos com boas molhabilidade, quando comparado aos demais gases, Ar, Ar/CO2, Ar/O2 e Ar/He/O2, utilizados em seus ensaios.

Já Silva et al. (2014) avaliou a influência dos parâmetros de soldagem na formação de defeitos na soldagem de revestimentos com ligas à base de níquel, e sua possível eliminação através do correto ajuste dos referidos parâmetros. Entre os parâmetros avaliados estudou-se a influência do gás de proteção (Ar, Ar+He e Ar+NO) e os autores observaram que o gás de proteção que mais agregou benefícios ao processo quanto à formação de defeitos nos revestimentos foi a mistura Ar+He, visto que o maior calor do arco proporciona não só uma maior quantidade de material fundido, mas também um metal líquido mais quente que apresenta menor viscosidade e maior fluidez.

Segundo Souza et al (2009), o principal ponto negativo desse modo de transferência é a instabilidade no arco que leva à geração de respingos, que diminui a capacidade de produção, seja devido à perda de material de adição ou à necessidade de dispêndio de recursos para sua retirada. Muitos estudos são voltados para a redução da geração de respingos e baseiam-se na melhoria da estabilidade de curtos-circuitos através da correta regulagem dos parâmetros de soldagem e a estabilidade do processo de soldagem MIG/MAG. Scotti & Ponomarev (2008) defendem que os quatro parâmetros mais importantes dentre as condições de operação são a corrente de soldagem, a extensão do eletrodo, a tensão de soldagem e a velocidade de soldagem, depois de serem selecionados o arame e o gás para a soldagem.

De acordo com Dutra et al (1995), a estabilidade deste modo de operação pode ser explicada como a regularidade na formação e na separação das gotas metálicas, sendo a repetitividade temporal dos valores instantâneos de tensão e corrente as bases para essa avaliação. Dos denominados oscilogramas, pode-se extrair indicativos da regularidade da transferência e através disso extrair comparações quantitativas de soldagens realizadas sob diferentes combinações de parâmetros e variáveis de processo.

O revestimento do aço ASTM A387 Gr.11 com o Inconel 625 pelo processo GMAW utilizando os gases de proteção Ar+25%He e Ar+4%CO2 foi estudado por Cavalcante et al(2016). Os autores verificaram que o tecimento promoveu maior espalhamento do material depositado, promovendo aumento de largura e diminuição do reforço. Em relação ao gás de proteção, com Ar + 4%CO2 a molhabilidade foi menor e a penetração foi significativamente maior, porém em relação ao reforço, os gases não contribuíram de forma significativa na variação de suas dimensões. Os valores de microdureza encontrados ficaram na ordem de 250 HV, sendo que os autores verificaram picos de dureza ao longo do revestimento de até 450 HV.

Quanto a relugaridade do modo de transferência os autores Rezende et al (2010) obtiveram resultados que confirmam a efetividade do "Índice Vilarinho de Regularidade", cujo símbolo é IVcc, como meio de avaliar regulagens de soldagem MIG/MAG visando minimizar respingos e otimizar o acabamento do cordão. Este critério se baseia na premissa de que a estabilidade da transferência por curto-circuito está ligada com a constância dos tempos em curto-circuito e com arco aberto, assim como com o fato de que cada gota ao se destacar tenha um volume apropriado para haver a ação da tensão superficial para se obter a transferência.

Visto isso, observa-se que os parâmetros de soldagem influenciam significativamente os depósitos realizados com Inconel e neste artigo busca-se avaliar como a tensão de soldagem influencia na regularidade da transferência e na qualidade da final da zona fundida depositada por GMAW em substratos de aço carbono.

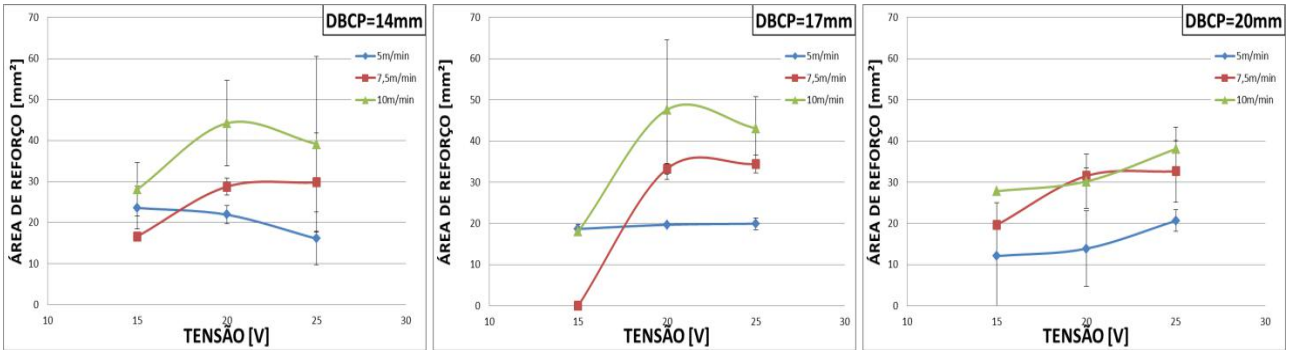
## METODOLOGIA

O procedimento experimental foi realizado buscando avaliar a influência da variação da tensão nas áreas de reforço e penetração, bem como discutir os efeitos dessa variável na microdureza do cordão de solda e analisar visualmente as imagens do cordão de soldas obtidas por microscópio, medindo-se os comprimentos e as áreas transversais do cordão de solda através da análise microscópica das amostras ao variar o parâmetro tensão. O processo de soldagem foi realizado utilizando o Braço Robótico Yaskawa HP-20, já a fonte de soldagem utilizada foi à fonte IMC Digiplus A-7. Foram realizados um total de 27 ensaio sendo que o metal de adição utilizado foi ERNiCrMo– 3, com Ar+25%He como gás de proteção e a velocidade de soldagem de 25cm/min, enquanto que os parâmetros variantes foram: tensão de 15V, 20V, 25V para distância bico-contato-peça variando de 14mm, 17mm e 20mm e velocidade de alimentação de 5m/min, 7,5m/min e 10m/min. Também foram aferidos os valores de micro dureza do material depositado no cordão de solda das amostras para cada valor de tensão. Para poder avaliar o desempenho do processo, o índice escolhido para mensurar a estabilidade de transferência do processo quando operando em curto-circuito foi o Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência por Curto-circuito.

Após realizar os experimentos, três corpos de prova foram retirados de cada cordão soldado utilizando a cortadora de amostras. Para cada amostra foi avaliada, área de reforço, área penetrada, largura do cordão, altura do cordão e penetração e para avaliar essas variáveis foi utilizado o microscópio *ZEISS Stereo V8 e*, as medidas foram realizadas utilizando o *software Axio* da Zeiss.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

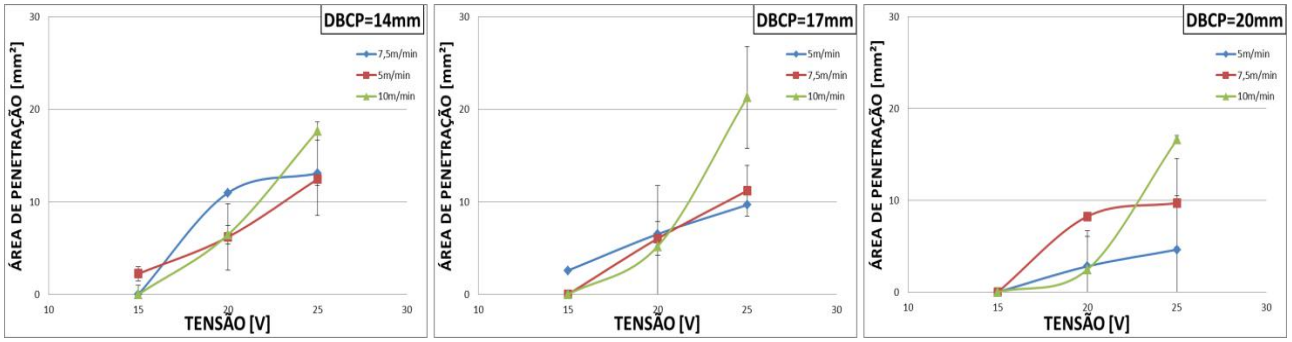
Foram plotados gráficos que apresentam o valor médio de cada variável das imagens obtidas no microscópio, bem como as microdurezas medidas, em função da tensão de operação, e foi construída a linha de tendência para estimar o comportamento dessas variáveis em função da do parâmetro tensão. Os gráficos dos valores médios dessas variáveis(área de reforço, área de penetração, reforço, largura de cordão e altura de penetração) em função dos valores de tensão são apresentados nas Figuras 1, 2 ,3, 4 e 5, respectivamente. Já o gráfico dos valores médios de microdureza em função do parâmetro tensão é apresentado na Figura 6.




**(a)** **(b)** **(c)**

**Figura 1.** Gráfico da área do reforço em função da tensão

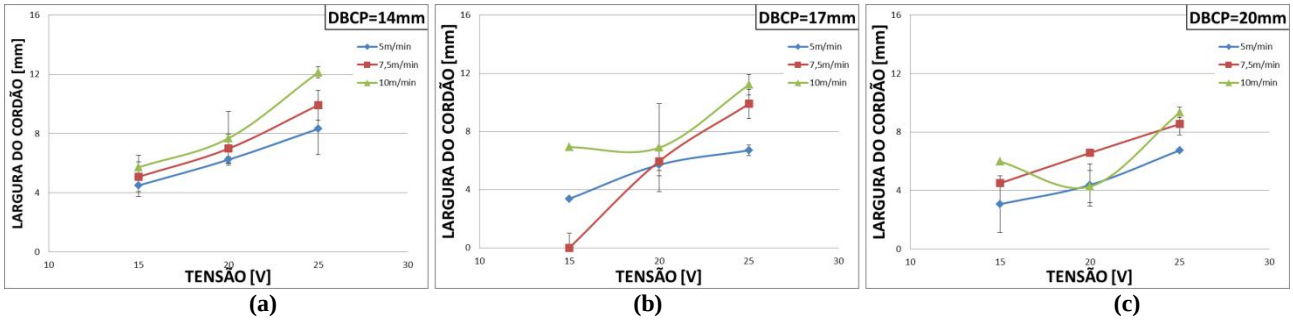
A partir dos gráficos da área do reforço em função da tensão (Fig. 1) pode-se inferir que, existe um ponto ótimo de tensão que maximiza a área de reforço, note que pela linha de tendência a área de reforço tende a diminuir após os 25 V. É preciso dizer ainda que durante os ensaio várias amostras não apresentaram o comportamento adequado, esse ponto será analisado de forma pontual posteriormente. Note que apena dois resultados experimentais diferem da tendência geral, são eles: DBCP-20 mm , Valim= 5m/mim e DBCP-20 mm, Valim= 10 m/mim. A Fig. 2 a seguir apresenta o gráfico da área de penetração em função da tensão.




**(a)** **(b)** **(c)**

**Figura 2.** Gráfico da área de penetração em função da tensão

Ao analisar o comportamento da área de penetração (Fig. 2), nota-se que o comportamento é aproximadamente proporcional, isso é, aumentar a tensão tende a elevar a área de penetração.

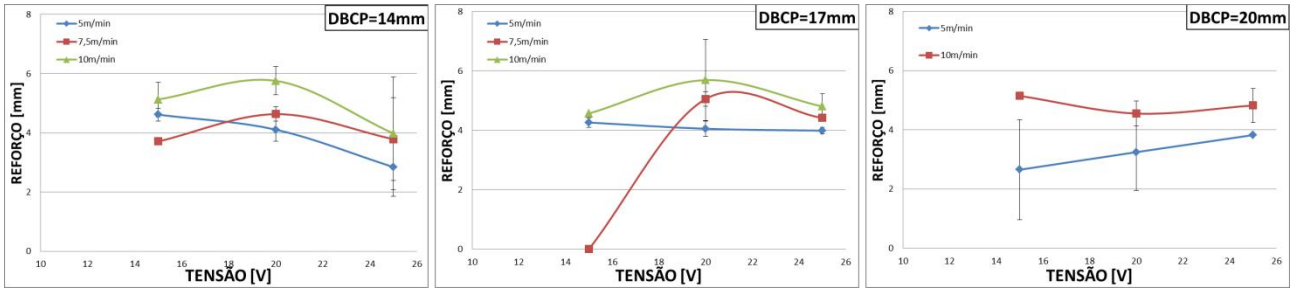



**(a)** **(b)** **(c)**

**Figura 3.** Gráfico da largura do cordão em função da tensão

Nos gráficos da largura do cordão (Fig. 3), o comportamento dos dados indica que ao elevar a tensão, a largura

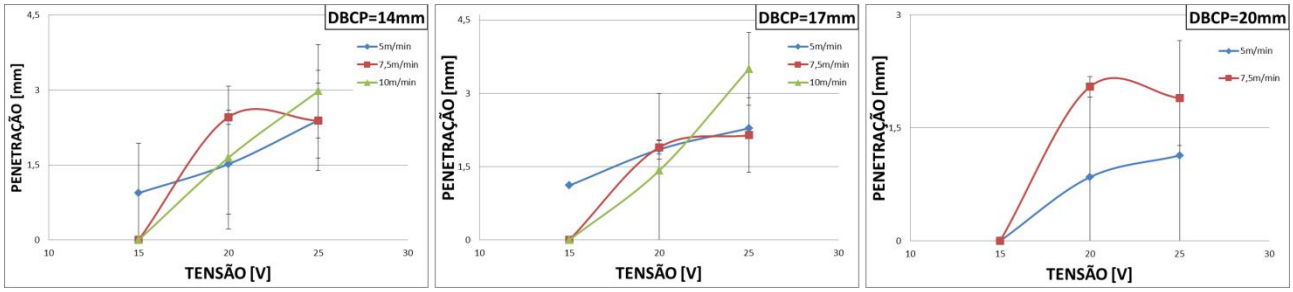
tende a aumentar isso é comprovado pela linha de tendência apresentado na fig. 4. Em Scotti e Ponomarev (2008) tem-se que a tensão de soldagem é usada para controlar a forma do cordão de solda, isto é, quando a tensão do arco (ou o comprimento do arco) aumenta, sua largura aumenta, o que condiz com os resultados obtidos nos ensaios. O resultados apresentam certa divergência da literatura para velocidade de alimentação de 10mm em que há uma queda na variação de tensão de 15V para 20V seguido de um aumento em 25V, sendo que essa curva com concavidade para cima é acentuada com o aumento da distancia bico contato peça.




**(a)** **(b)** **(c)**

**Figura 4.** Gráfico da altura reforço em função da tensão

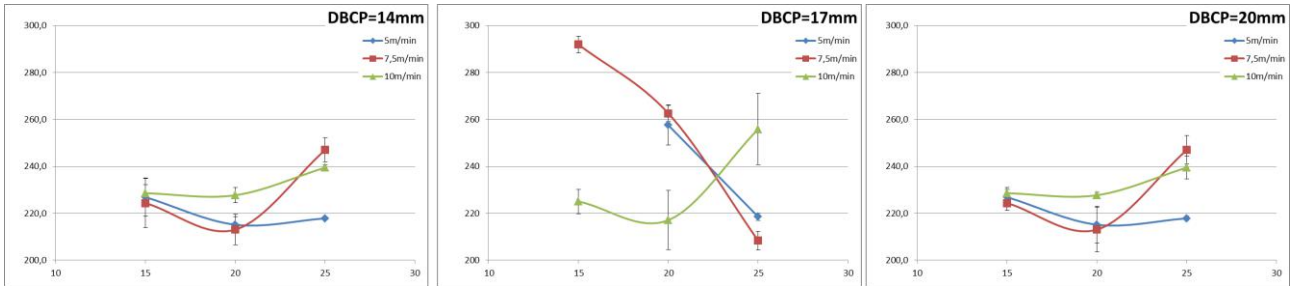
A analise para o reforço (Fig. 3) é semelhante a área de penetração, nesse ponto é importante notar que alguns experimentos apresentaram falhas, isso é, não houve uma penetração adequada, esses pontos de falha são os responsáveis por modificar o comportamento das curvas, note porem que, há uma tendência dos valores de se manterem próximos em geral quando a tensão se aproxima de 20 V.




**(a)** **(b)** **(c)**

**Figura 5.** Gráfico da altura de penetração em função da tensão

A altura de penetração apresentou uma tendência polinomial, porém é possível notar no gráfico (Fig. 5) que a curva começa a apresentar uma tendência a reduzir após os 25 V, esse fato é mais evidente par a DBCP de 17 mm, logo é possível inferir que se ocorrer o aumento da tensão se observara que a penetração ira reduzir após algum valor, porém este se encontra distante da área em que o experimento foi realizado. O resultado obtido condiz com a literatura de Scotti et al (2008) para os valores de velocidade de alimentação de 7,5mm e 5mm, variando apenas para 10mm em que a penetração tende a continuar aumentando e que portanto seu valor ótimo de tensão será em torno de 25V ou acima.




**(a)** **(b)** **(c)**

**Figura 6.** Gráfico de microdureza em função da tensão

Quanto à microdureza pode ser inferir que a microdureza no intervalo de tensão 15V-25V tende a ter um comportamento polinomial com valores mínimos de microdureza localizado à 20V, tendendo a aumentar quando a tensão caminha para valores maiores de tensão como o de 25V e pode-se inferir que a tendência desse parâmetro é continuar a aumentar com o aumento da tensão. Valores mínimos de microdureza foram registrados quando utilizado dbcp 20mm. O menor valor foi de 197,6HV para tensão de 25V e 5m/min. Esse resultados variam apenas para distancia bico contato peça de 17mm, que tem uma tendência a uma queda de microdureza com o aumento da tensão, sendo esse

comportamento mais crítico com a variação de velocidade de alimentação de 5m/min para 7,5m/min.

Uma vez analisados os gráficos deve-se atentar para o fato de que vários experimentos apresentaram falhas no cordão de solda. Os parâmetros tensão, DBCP e Valim em que o aspecto do cordão foi insatisfatório, bem como os defeitos encontrados em cada um desses casos são apresentados na Tabela 2. Aqueles que não são mencionados na tabela, e, portanto não apresentaram defeitos visuais no cordão de solda, supõe-se uma correta combinação de parâmetros, isto é, valores de tensão adequados para os valores de Distancia de bico-contato-peça e Velocidade de alimentação adotada em cada ensaio.

**Tabela 1.** Falhas encontradas nos cordões de solda durante o experimento.

| Falhas encontradas nos cordões de solda | Tensão (V) | DBCP (mm) | Valim (m/mim) |
|---|---|---|---|
| O cordão se soltou. Não ocorreu penetração nem a correta fusão do metal de adição | 15 | 17 | 5 |
| O cordão se soltou. Não ocorreu penetração nem a correta fusão do metal de adição | 15 | 17 | 7,5 |
| O cordão se soltou. Não ocorreu penetração nem a correta fusão do metal de adição | 15 | 17 | 7,5 |
| O cordão se soltou. Não ocorreu penetração nem a correta fusão do metal de adição | 15 | 17 | 7,5 |
| Não houve penetração, não houve a correta fusão do metal de adição, houve uma forte formação de respingos | 15 | 17 | 10 |
| O cordão se soltou. Não ocorreu penetração nem a correta fusão do metal de adição | 15 | 17 | 10 |
| O cordão se soltou. Não ocorreu penetração nem a correta fusão do metal de adição | 15 | 17 | 10 |
| Não houve uma correta deposição de material resultando em um cordão com duas linhas de deposição de material | 15 | 20 | 5 |
| Cordão com aspecto irregular, não houve penetração no material de base. | 15 | 20 | 5 |
| Não ocorreu a correta deposição de material, não houve penetração no material de base e o aspecto do cordão se encontra irregular | 15 | 20 | 7,5 |
| O cordão se soltou. Não ocorreu penetração nem a correta fusão do metal de adição | 15 | 20 | 7,5 |
| O cordão se soltou. Não ocorreu penetração nem a correta fusão do metal de adição | 15 | 20 | 7,5 |
| Não houve penetração no material de base. Aparentemente o metal de adição não se fundiu corretamente | 15 | 20 | 10 |
| O cordão se soltou. Não ocorreu penetração nem a correta fusão do metal de adição | 15 | 20 | 10 |
| O cordão se soltou. Não ocorreu penetração nem a correta fusão do metal de adição | 15 | 20 | 10 |
| Ocorreu formação de bolhas na base do cordão | 15 | 14 | 5 |
| Ocorreu formação de bolhas na base do cordão | 15 | 14 | 5 |
| Não houve penetração, não ocorreu a correta fusão do metal de adição | 15 | 14 | 7,5 |
| O cordão se soltou. Não ocorreu penetração nem a correta fusão do metal de adição | 15 | 14 | 7,5 |
| O cordão se soltou. Não ocorreu penetração nem a correta fusão do metal de adição | 15 | 14 | 7,5 |
| Não ocorreu penetração, o metal de adição não se fundiu corretamente | 15 | 14 | 10 |
| Não houve penetração, nem a correta fundição do metal de adição. Apresentou respingos | 15 | 14 | 10 |
| O cordão se soltou. Não ocorreu penetração nem a correta fusão do metal de adição | 15 | 14 | 10 |
| Ocorreu a formação de bolhas na área de penetração | 20 | 17 | 5 |
| O cordão se soltou. Não ocorreu penetração nem a correta fusão do metal de adição | 20 | 17 | 5 |
| Não houve penetração e ocorreu a mordedura, forte formação de respingos | 20 | 17 | 10 |
| Apresentou uma bolha no meio do cordão | 20 | 20 | 5 |
| Não houve a correta deposição de material, não houve penetração no material de base | 20 | 20 | 5 |
| Apresentou uma bolha no meio do cordão | 20 | 20 | 7,5 |
| Não ocorreu a correta fusão do metal de adição, não houve penetração | 20 | 20 | 10 |
| O aspecto do cordão indica que não houve uma correta fusão do metal de adição | 20 | 20 | 10 |
| Não houve penetração no metal de base | 20 | 20 | 10 |
| Ocorreu a formação de bolha entre a área de H e o reforço | 20 | 14 | 5 |
| Apresentou bolhas e inclusões | 20 | 14 | 5 |
| Apresentou a formação de bolhas na área de penetração | 20 | 14 | 7,5 |
| Não ocorreu a penetração, apresentou respingos | 20 | 14 | 10 |
| Ocorreu uma inclusão na área de penetração | 25 | 17 | 5 |
| Ocorreu uma inclusão na área do reforço, ocorreu formação de bolhas na superfície | 25 | 17 | 5 |
| O cordão se soltou. Não ocorreu penetração nem a correta fusão do metal de adição | 25 | 17 | 5 |
| Houve formação de bolhas na superfície do cordão | 25 | 20 | 5 |
| O cordão se soltou. Não ocorreu penetração nem a correta fusão do metal de adição | 25 | 20 | 5 |
| O cordão apresentou um formato achatado na parte superior | 25 | 20 | 10 |
| Ocorreu a formação de bolhas no reforço e na área de penetração | 25 | 14 | 7,5 |

Os principais defeitos encontrados foram: falta de fusão do cordão de solda, falta de penetração do cordão e formação de respingos. O cordão de solda também se desprendeu da peça de trabalho em consequência dessas falhas no procedimento. Algumas amostras também apresentaram a formação de bolhas no cordão de solda.

Quanto à falta de fusão do eletrodo, podemos inferir que não houve tempo, e energia para o cordão se fundir, a energia do processo é basicamente uma função da corrente, e para o processo MIG/MAG a corrente esta ligada com a velocidade de alimentação, porém é importante ressaltar que velocidades de alimentação mais elevadas sofreram mais com a falta de fusão. Nota-se também que pela análise da tabela, DBCP maiores tendem a gerar mais defeitos, pois ocorre um aumento do arco elétrico, acarretando em um aumento da resistência e isso faz com que a corrente de operação seja reduzida. Isso faz com que uma menor quantidade de energia esteja disponível para fundir o metal de adição.

A partir da análise visual das imagens obtidas dos cordões de solda dos ensaios realizados foi observado que quanto maior os valores do parâmetro tensão, menor foi a incidência de respingos nos cordões de solda analisados, menor foram as falhas na penetração do cordão de solda e melhor foi a fusão do metal de adição. O valor ótimo de tensão obtido com base nos ensaios realizados foi de 25V.

A falta de penetração ocorre também por falta de energia disponível para fundir o metal de base. Note que segundo Emilio Wainer et al (2000) Soldagem e Processos, a energia de soldagem é relacionada com a tensão e corrente pela Equação2.

$$H_a = c.(V_a + \Phi).I \qquad \text{Eq. 2}$$

Em que c=constante, Va=queda de tensão anódica(V), Φ=função trabalho termoiônico do eletrodo nu (eV) e I=corrente de soldagem (A). O aquecimento anódico é gerado principalmente pelo choque elétrico no anodo e pela energia de "condensação" dos elétrons.

Note que para garantir uma correta energia na soldagem é preciso garantir o correto par corrente-tensão. Nos ensaios realizados, os menores valores de tensão apresentaram maior incidência de amostras com pouca penetração e fusão, com desprendimento entre cordão e peça de trabalho na maioria desses casos, mostrando que quanto maior for a tensão adotada, melhor será o resultado final.

Ponomarev & Scotti (2008) também apontam que a falta de fusão também pode ocorrer na forma de uma gota fria e é frequentemente causado por uma tensão de soldagem muito baixa. Como resultado, a molhabilidade do cordão de solda fica ruim, o que condiz com os resultados obtidos nos ensaios. As amostras em que mais houve o desprendimento do cordão de solda do metal de base, provavelmente por falta de fusão do metal de adição, aconteceram, também, em sua maioria para baixos valores de tensão, sendo 13 das 16 amostras.

A formação de respingos está associada ao modo de transferência por curto-circuito, isso porque quando a gota de metal fundido entra em contato com o metal base, a corrente aumenta para aquecer o arame e realizar o ciclo de transferência metálica, e muitas vezes a existência deste pico de corrente, ocasiona a formação dos respingos na soldagem. Nesse experimento foi observado que quanto maior os valores do parâmetro tensão, menor foi a incidência de respingos nos cordões de solda analisados.

A incidência de falha no cordão de solda por presença de bolhas nas áreas de penetração ou na área do cordão foi a menor. No entanto, para esse defeito foi observado que um valor mais alto de tensão apresentou um número de casos com bolha um pouco maior quando comparado com os demais valores inferiores.

Quanto à instabilidade do processo foi utilizado o Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência por Curto-circuito, cujo símbolo é IVcc., que se baseia na premissa de que a estabilidade da transferência por curto-circuito está ligado com a constância dos tempos em curto-circuito e com arco aberto, assim como com o fato de que cada gota ao se destacar tenha um volume apropriado para haver a ação da tensão superficial para se obter a transferência. Os meios para determinar o IVcc é através dos coeficientes de variação dos tempos de curto-circuito ($t_{cc}$) e de arco aberto ($t_{ab}$), como mostra a Eq. (1) a seguir.

$$IV_{cc} = \frac{\sigma_{tcc}}{\sigma_{cc}} + \frac{\sigma_{tab}}{\sigma_{ab}} \qquad \text{Eq. 1}$$

Em que $\sigma_{tcc}$ = desvio padrão da média do tempo de curto-circuito; $\sigma t_{ab}$ = desvio padrão da média do tempo de arco aberto, $t_{cc}$ = média do tempo de curto-circuito; $t_{ab}$ = média do tempo de arco aberto.

A partir disso, os índices de estabilidade e as tensões de curto-circuito(Vcc) obtidos por meio de cálculo computacional são apresentados na Tabela 2, bem como as tensões médias, corrente média e correntes rms obtidas nos ensaios. Já a Figura 7 apresenta o gráfico do índice de estabilidade para variação da tensão.

**Tabela 2.** Índices de estabilidade dos ensaios

| Ensaio | DBCP (mm) | Valim (m/mm) | Tensão (V) | Ivcc | Vcc | Tensão média (V) | Corrente média (A) | Corrente RMS (A) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 17 | 5 | 15 | 2,094 | 10 | 14,5 | 131,981 | 156,085 |
| 2 | 17 | 5 | 20 | 1,798 | 15 | 19,2 | 127,972 | 148,428 |
| 3 | 17 | 5 | 25 | 1,969 | 20 | 24,9 | 121,944 | 136,321 |
| 4 | 17 | 7,5 | 15 | 3,533 | 10 | 20,4 | 127,121 | 192,156 |
| 5 | 17 | 7,5 | 20 | 2,035 | 15 | 19,0 | 160,821 | 184,381 |
| 6 | 17 | 7,5 | 25 | 1,983 | 15 | 24,5 | 170,348 | 181,346 |
| 7 | 17 | 10 | 15 | 2,621 | 10 | 15,0 | 164,399 | 226,411 |
| 8 | 17 | 10 | 20 | 2,980 | 10 | 22,5 | 164,778 | 231,285 |
| 9 | 17 | 10 | 25 | 1,928 | 25 | 24,7 | 227,133 | 245,856 |
| 10 | 20 | 5 | 15 | 5,010 | 40 | 39,7 | 77,42 | 151,741 |
| 11 | 20 | 5 | 20 | 1,889 | 10 | 18,6 | 112,643 | 132,403 |
| 12 | 20 | 5 | 25 | 2,014 | 20 | 23,6 | 113,185 | 130,22 |
| 13 | 20 | 7,5 | 15 | 3,316 | 40 | 33,2 | 112,892 | 181,198 |
| 14 | 20 | 7,5 | 20 | 1,827 | 15 | 19,3 | 151,409 | 171,288 |
| 15 | 20 | 7,5 | 25 | 1,631 | 10 | 24,5 | 157,57 | 167,256 |
| 16 | 20 | 10 | 15 | 3,076 | 40 | 24,4 | 147,063 | 206,67 |
| 17 | 20 | 10 | 20 | - | - | 30,4 | 139,258 | 209,33 |
| 18 | 20 | 10 | 25 | 1,867 | 15 | 24,2 | 182,184 | 204,988 |
| 19 | 14 | 5 | 15 | 2,032 | 15 | 14,3 | 144,737 | 168,614 |
| 20 | 14 | 5 | 20 | 2,022 | 10 | 19,1 | 128,351 | 141,758 |
| 21 | 14 | 5 | 25 | 2,148 | 10 | 23,9 | 142,616 | 155,283 |
| 22 | 14 | 7,5 | 15 | - | - | 22,7 | 145,841 | 218,37 |
| 23 | 14 | 7,5 | 20 | 1,805 | 15 | 19,7 | 184,697 | 203,767 |
| 24 | 14 | 7,5 | 25 | 1,604 | 15 | 24,4 | 180,396 | 195,792 |
| 25 | 14 | 10 | 15 | 2,614 | 5 | 16,2 | 172,593 | 240,989 |
| 26 | 14 | 10 | 20 | 2,735 | 10 | 22,3 | 193,5 | 246,613 |
| 27 | 14 | 10 | 25 | 1,993 | 15 | 24,3 | 217,429 | 241,981 |

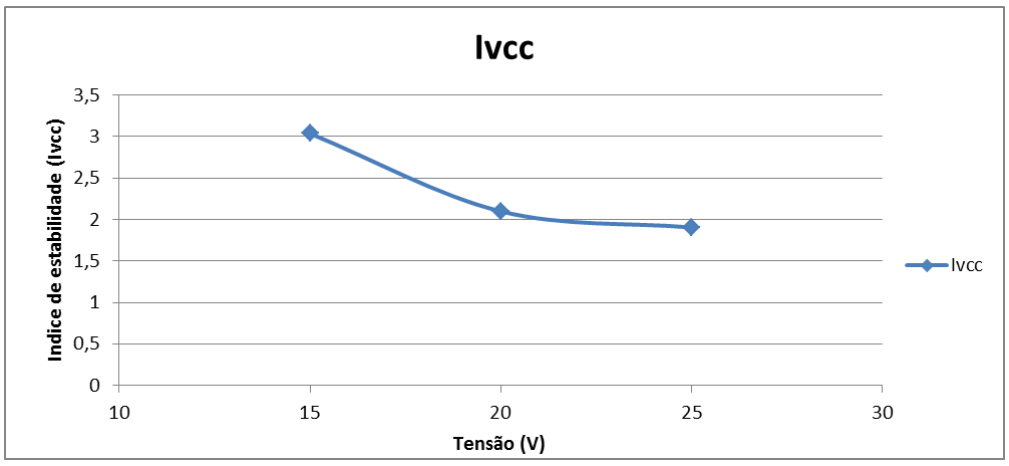



**Figura 7.** Índice de estabilidade médios para as tensões avaliadas

Analisando a Tab. 2, percebe-se que a tensão 25V de soldagem apresenta o menor índice de estabilidade (1,604), obtido quando a soldagem foi feita a soldagem utilizando 7,5m/min de velocidade de alimentação, e distancia de bico contato peça de 14mm. A Tab. 2 mostra também que os ensaios realizados com soldagem de 15V foram os mais tiveram picos e valores de tensão média durante o processo bem maiores que o esperado. Enquanto que o gráfico da Figura 7 mostra que os ensaios realizados com tensão de 20V ou acima foram os que obtiveram menores valores de Ivcc.

## CONCLUSÃO

Com base nos ensaios realizados e nas discussões acima, conclui-se que o aumento da tensão implica:

- Diminuição da área do reforço e altura do reforço e altura de penetração, com valores ótimos encontrados para 20V, devido ao comportamento polinomial de suas curvas.
- Acréscimo da largura do cordão e área de penetração;
- Aumento da microdureza no cordão de solda para valores acima de 20V. Com exceção para dbcp de 17mm, que apresentou uma tendência de queda de microdureza com o aumento da tensão e velocidade de alimentação.
- Menor incidência de respingos nos cordões de solda, menor a ocorrência de falhas na penetração do cordão de solda e melhor fusão do metal de adição;
- Valores menores de índices de estabilidade Ivcc.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Goiás pelo suporte infraestrutural e de consumíveis para a realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

Baixo, C. E. I.; Dutra, J. C., 2009. "Efeito do Gás de Proteção e do Modo de Transferência na Aplicação da Liga 625 em Aço Carbono", Soldagem Insp. São Paulo, Vol. 14, No. 4, p.313-319, Out/Dez 2009.

Egerland, S., 2015 A Contribution to Arc Length Discussion. Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 20, n.3.

Iordachescu, D.; Quintino, L., 2008. "Steps toward a new classification of metal transfer in gas metal arc welding". Journal of Materials Processing Technology, p.391-397

Lancaster, J. F., 1999. "Metallurgy of welding". 6ª edição. George Allen & Unwin. Londres.

Marques, P.V.; Modenesi, P.J.; Bracarense, A.Q. Soldagem – Fundamentos e Tecnologia. 4ª Edição. Elsevier, Rio de Janeiro, 2016

Rezende, G.M.C.; Liskévych, O.; Vilarinho, L. O.; Scotti, A, 2010 "Avaliação de Uma Metodologia para Seleção de Parâmetros em Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito". Em: VI CONEM, 2010, Campina Grande – PB. Anais do VI CONEM, 2010.

Scotti, A.; Ponomarev, V. "Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento, melhor desempenho". 1. ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2008, 284p.

Silva, C. C.; Miranda, E. C.; Silva, C.; Motta, M. F.; Miranda, H. C.; Farias, J. P., 2014. "Minimização de Defeitos em Revestimentos de Superligas de Níquel Depositada Pelo Processo TIG com Alimentação de Arame Frio", Soldagen & Inspeção, São Paulo, Vol. 19, Nº. 04, p.323-332, Out/Dez 2014.

Souza, D.; R, M. L.; Keocheguerians, F.; N, V. C.; Vilarinho, L. O.; Scotti, A, 2009 "Influência dos Parâmetros de Soldagem na Estabilidade do Processo MIG/MAG Operando em Curto-Circuito". Em: XXXV CONSOLDA, 2009, Belo Horizonte - MG. Anais do XXXV CONSOLDA, 2009.

Wainer, E., Brandi. S. D., Mello, F. D. H., 2000. "Processo MIG/MAG", Soldagem – Processos e Metalurgia, Ed. Edgard Blücher, 1ª ed. São Paulo, Brasil.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(veis) pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção 'área de conhecimento do trabalho'.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(X) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 27 à 31 de agosto de 2018 – Brasília, DF

# AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CEMENTANTES ATRAVÉS DA MEDIÇÃO DE MICRODUREZA VICKERS

**Bernardo Rota, Alisson Geovane Silva de Souza, Annemarie Henker, Daniel Amoretti Gonçalves**
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Ibirubá
Rua Nelsi Ribas Fritsch, 1111, Bairro Esperança, CEP: 98200-000, Ibirubá/RS
E-mail para correspondência rotabernardo@gmail.com

**RESUMO:** A cementação é um tratamento termoquímico utilizado pela indústria metalúrgica e empregado principalmente em aços com baixo teor de carbono, que proporciona a um componente dureza e resistência na superfície e tenacidade no núcleo. O objetivo foi comparar a eficiência de três materiais cementantes diferentes: um cementador obtido no mercado destinado a este fim; grafite e grafite com $CaCO_3$. Para isto foi realizado tratamento termoquímico de cementação sólida em caixa, em corpos de prova cilíndricos de aço ABNT 1010 trefilado de 0,5 polegada. Os ensaios foram realizados em diferentes tempos de forno, três, seis e nove horas. As caixas foram confeccionadas e dimensionadas para esse experimento, as quais foram vedadas com argila para manter a concentração de carbono na atmosfera de cementação. Para a avaliação da profundidade da camada cementada foram medidos a dureza e o perfil de dureza, através de ensaios de microdureza Vickers e análise metalográfica. O composto comercial apresentou vantagens, conferindo maior dureza nas camadas próximas da superfície, bem como uma camada cementada maior em todos os tempos de forno, em relação aos outros cementantes.

**Palavras-Chave:** cementação; microdureza Vickers; tratamento termoquímico.

***ABSTRACT:*** *Carburizing is a thermo-chemical treatment used by the metallurgical industry and used mainly in low carbon steels, which provides a hardness and surface strength and core tenacity component. The objective was to compare the efficiency of three different carburizing materials: a commercial carburizing destined for this purpose; graphite and graphite with $CaCO_3$. For this, a thermochemical treatment of pack carburizing was made on an ABNT 1010 steel round workpieces with 0.5 inch of diameter. The tests were performed in different furnace times, three, six and nine hours. The boxes were prepared and sized for this experiment, which were sealed with clay to maintain the carbon concentration in the carburizing atmosphere. For the evaluation of the depth of case, the hardness and the depth hardness were measured by Vickers microhardness tests and metallographic analysis. The commercial carburizing presented advantages, giving greater hardness in the layers near the surface, a greater depth of case in all the times of furnace, in relation to the other carburizing materials.*

***Keywords:*** *carburizing; Vickers microhardness; thermo-chemical treatment.*

## INTRODUÇÃO

A cementação pode ser definida como a introdução de carbono na camada superficial do aço através do processo de difusão (Ogata, 2003). Este processo considerado como um tratamento termoquímico, devido ao seu funcionamento em temperaturas altas, é normalmente aplicado em aços com um baixo teor de carbono (Lamim, 2016). O processo de cementação visa o endurecimento da superfície de aços com a modificação parcial da sua composição química estrutural através da difusão termoquímica de carbono. Neste processo o carbono presente no meio cementante se difunde para o interior da peça, modificando a estrutura até uma certa profundidade (Santos et al, 2017).
A difusão do carbono na superfície do aço faz com que seja criado um gradiente de concentração de carbono entre a superfície e o interior do material, desta forma, segundo Loguercio (2003), três fatores podem controlar a taxa de cementação: a reação de absorção de carbono na superfície, a difusão do carbono no metal e o meio cementante.
Esta difusão pode ser explicada pela segunda lei de Fick, descrevendo a difusão em estado não estacionário, que corresponde à equação diferencial parcial que descreve a taxa com que os átomos são redistribuídos em um material, por difusão. Dessa forma, o gradiente de concentração e o fluxo de difusão no interior do sólido variam conforme o tempo (Callister, 2016).
Após o processo de cementação de um aço, pode ser aplicado um tratamento térmico de têmpera, formando martensita de alto carbono na camada cementada (Giordani, 2012). Após a cementação seguida da têmpera, a camada de difusão promove alta dureza e uma melhora na resistência ao desgaste e à fadiga (Loguercio, 2003). A cementação de um aço com baixo índice de carbono pode fazer com que, após a realização do processo, o metal atinja um percentual máximo de carbono que varia de 0,8% a 1%. (Askeland, 2015; Parrish, 1999). Este processo é aplicado quando se deseja obter

peças que irão sofrer esforços de tração, flexão e torção, efeitos de desgastes e fadiga. Alguns exemplos de peças cementadas são engrenagens, mancais, brocas, eixos de comando de válvulas, etc.

O processo de cementação pode ser dividido em três tipos principais: a cementação em meio sólido, feita em caixa, a cementação em meio gasoso, feita em uma atmosfera rica em gases carburizantes, e a cementação em meio líquido, feita com o metal submerso em um sal fundido com substâncias que irão promover o enriquecimento do teor de carbono do material cementado (Barra, 2013).

A cementação em meio sólido ou em caixa é realizada com a colocação de uma peça dentro de uma caixa construída normalmente de aço. Dentro dessa caixa é depositado, junto à peça, misturas carburizantes compostas basicamente por carvão vegetal e ativadores, podendo ser carbonatos alcalinos ou alcalino-terrosos (Barra, 2013).

As caixas de cementação sólida conforme Metals Handbook (1991), não deve ser maior que o necessário. Se possível, deve ser estreita em pelo menos uma dimensão para promover o aquecimento uniforme do conteúdo. O espaçamento entre a tampa e a caixa deve ser mínimo, tendo um valor suficiente para impedir a entrada de ar e a queima do composto, mas não completamente selada a ponto de evitar a expulsão do excesso de gás gerado na caixa. As tampas que se encaixam muito frouxamente podem ser parcialmente seladas com cimentos à base de argila.

A caixa preparada com o cementante e o corpo de prova é colocada em um forno com uma temperatura entre 815º e 950ºC. Com a alta temperatura, o oxigênio presente no ar combina-se com o carbono, que por sua vez acaba gerando dióxido de carbono ($CO_2$). Este dióxido de carbono se combina com o carbono gerando monóxido de carbono ($CO$), que irá difundir para o ferro, dando origem a cementita ($Fe_3C$) mais dióxido de carbono (Barra, 2013). A quantidade de carbono na camada cementada de uma peça está ligada diretamente a temperatura de trabalho do processo, sendo que para se obter um maior teor de carbono na camada superficial da peça, maior deve ser a temperatura empregada no processo (Pereira, 2011).

Conforme Metals Handbook (1991), a formação de monóxido de carbono é reforçada por energizantes ou catalisadores, tais como carbonato de bário ($BaCO_3$), carbonato de cálcio ($CaCO_3$), carbonato de potássio ($KCO3$) e carbonato de sódio ($NaCO_3$), que estão presentes no composto de cementação. Esses energizadores facilitam a reação do $CO_2$ com carbono para formar $CO$. Assim, em um sistema fechado, a quantidade de energiza dor não muda. A difusão continua enquanto houver carbono suficiente para reagir com o excesso de $CO_2$. Os compostos de cementação comerciais contêm 10 a 20% de carbonatos de metais alcalinos ou alcalino-terrosos ligados a carvão vegetal de madeira dura ou a coque através de óleo, alcatrão ou melaço.

Abaixo as reações químicas do processo de cementação sólida em caixa, conforme Chiaverini (2002). É importante ressaltar que a formação do $Fe_3C$ não se trata de uma reação química, pois não ocorre a ligação química entre os elementos, o que acontece é a difusão do carbono para dentro da estrutura cristalina do ferro, ocupando espaços intersticiais e lacunas, ou seja, há a deposição de carbono na peça cementada.

A temperaturas elevadas, o carbono reage com oxigênio do ar, conforme Eq. (1). O $CO_2$ reage com o carbono do carvão incandescente, Eq. (2). O $CO$ reage com o ferro, Eq. (3), e o $CO_2$ originado reage novamente com o carbono do carvão, continuando o processo.

$$C+O_2 \longrightarrow CO_2 \qquad (1)$$

$$CO_2+C \longrightarrow 2CO \qquad (2)$$

$$2CO+3Fe \longrightarrow Fe_3C+2CO_2 \qquad (3)$$

O gás formador da cementita ($Fe_3C$) é o $CO$, em uma cementação sólida, propiciando a difusão do carbono no aço. Enquanto o $CO_2$ irá retirar o Carbono do aço, fazendo uma descarbonetação, o que é indesejável no processo de cementação pois trata-se do processo contrário ao pretendido.

O oxigênio é fundamental para o processo, pois irá realizar o transporte de carbono até a peça na forma de $CO$, porém se colocado em excesso causará a redução da camada cementada, ocasionando também problemas relacionados a alta temperatura que irá elevar a pressão dentro da caixa de cementação se esta estiver bem vedada, ou em caso de uma vedação deficiente ocasionará a fuga do oxigênio e de outros gases como o $CO$, o que é indesejável para o tratamento de cementação. O ativador ($CaCO_3$), ou outro carbonato alcalino ou alcalino terroso, aumenta o fornecimento de $CO$, Eq. (4).

$$CaCO_3 \longrightarrow CaO+ CO_2 \qquad (4)$$

Segundo Pereira (2013), o processo de cementação pode apresentar algumas vantagens, como por exemplo: a possibilidade de utilizar uma ampla variedade de fornos devido a não exigência de uma atmosfera controlada; os equipamentos para o desenvolvimento do processo possuem um custo relativamente baixo; é eficiente e barato para o processamento de pequenos lotes.

## METODOLOGIA

Foi realizada uma cementação sólida em caixa, utilizando três diferentes cementantes, com três tempos de forno, após o tratamento foi medida a dureza na escala Vickers (HV) e realizados ensaios de metalografia, baseados nos procedimentos descritos em Colpaert (2008), para verificar visualmente o resultado do tratamento.

O material empregado nos corpos de prova (CP) foi o aço ABNT 1010 trefilado com uma geometria cilíndrica com 0,5 polegada de diâmetro e 30mm de comprimento. Para o processo de cementação em caixa foram confeccionadas 9 caixas em aço. De modo a melhorar a vedação, foi empregada argila para isolar o interior das caixas de cementação do contato com a atmosfera.

Para a confecção das caixas, usou-se um tubo quadrado de dimensões 100mm X 64mm X 64mm com uma chapa de dimensões 80mm X 80mm X 5mm soldada em sua base, como mostra a Fig. (1a). A caixa possui um sistema de abertura na forma de gaveta com um rasgo de 5,5mm X 58mm onde é colocado uma chapa de 90mm X 57,5mm X 5mm. Para a vedação da caixa colocou-se argila em todas as frestas da abertura, conforme Fig. (1b). As caixas foram dimensionadas para ser acomodadas no forno, possuírem o mesmo volume de cementante e conter apenas 1 corpo de prova em cada caixa. As caixas foram identificadas e colocadas no forno conforme o tempo de tratamento, com uma caixa para cada cementante. Tal construção possibilita aos CPs um mesmo gradiente de temperatura.

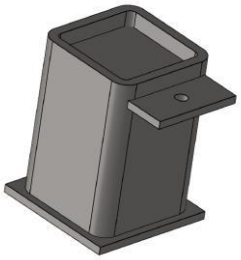


**Figura 1.** a) Desenho da caixa b) Caixas para a cementação

Foi utilizado um forno de resistência elétrica da marca Soldatel modelo INFINIT TT-150. A temperatura de cementação foi de 965°C com uma variação ±5°C. Essa temperatura foi defina de forma a garantir a austenitização do material tendo em vista possível erro do termostato do forno. A variação de ±5°C foi ajustada conforme o recomendado no Metals Handbook (1991).

Para o experimento foram usados três cementantes diferentes: grafite; grafite com 20% de $CaCO_3$; composto comercial destinado à esta finalidade. Estes cementantes foram usados em três tempos de forno diferentes. Com isso os tratamentos foram identificados e organizados conforme Tab.1, onde as letras identificam o cementante e os números o tempo de forno. Aos serem retirados do forno os CPs sofreram uma têmpera em água.

**Tabela 1.** Identificação dos tratamentos

| Identificação | Cementante | Tempo (horas) |
|---|---|---|
| A1 | Composto comercial | 3 |
| B1 | Grafite com 20% de $CaCO_3$ | 3 |
| C1 | Grafite | 3 |
| A2 | Composto comercial | 6 |
| B2 | Grafite com 20% de $CaCO_3$ | 6 |
| C2 | Grafite | 6 |
| A3 | Composto comercial | 9 |
| B3 | Grafite com 20% de $CaCO_3$ | 9 |
| C3 | Grafite | 9 |

O perfil de microdureza foi medido com base na norma ISO 2639 utilizando um microdurômetro da marca DIGIMESS modelo HV-100, na escala Vickers (HV). O perfil de medição teve um espaçamento de 0,20mm entre cada indentação, iniciando sempre a 0,20mm da borda do CP, com uma carga de 0,3Kgf, estendendo-se por 2,00mm em direção ao centro do CP. A profundidade da camada cementada é determinado pela dureza de 550HV, conforme orienta norma ISO 2639. Quando esse valor de dureza ficou entre dois pontos medidos, utilizou-se o método da interpolação para a obtenção da profundidade. Em virtude dos recursos limitados, não foi possível realizar a medição da microdureza em um maior número de pontos com repetição.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos tratamentos realizados com 3h de forno, conforme mostra a Fig. (3), obteve-se uma dureza de 890HV, no tratamento com um composto comercial (A1) na camada a 0,20mm da borda. Este valor representa um aumento de cerca de 456% vezes na dureza em relação ao aço ABNT 1010 sem tratamento. No CP B1 o valor da dureza neste ponto foi de 220HV e no C1 432HV. A camada cementada no CP A1 foi aproximadamente de 0,88mm. No B1 e C1 não houve camada cementada, conforme critério adotado que estabelece o limite da camada cementada no ponto com dureza de 550HV. Pode-se perceber que a partir do ponto de 1,20mm de profundidade a dureza do CP possui tendência de apresentar a mesma dureza por volta da grandeza de 400HV.

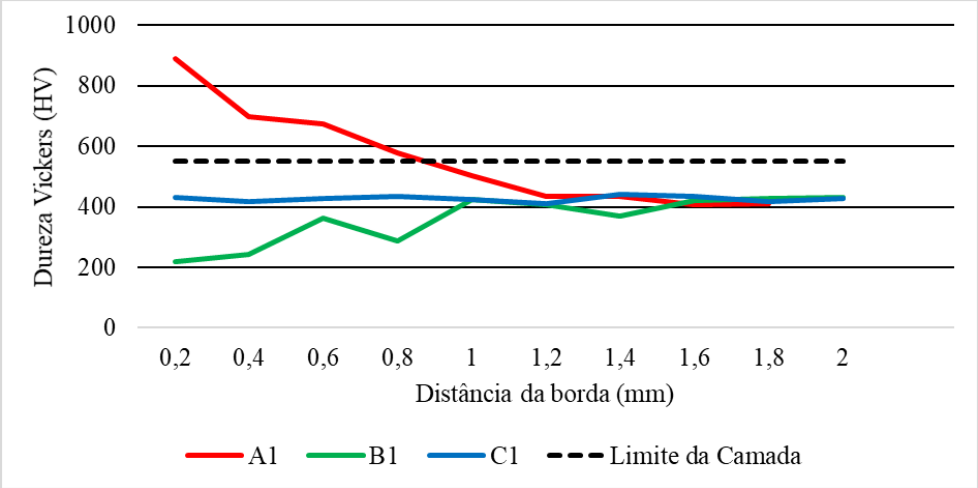



**Figura 3.** Dureza x Distância da borda, Tempo de 3h

Com os tratamentos de 6h, como mostra Fig. (4), a 0,20mm da borda obteve-se uma dureza de 908HV no CP A2, de 673HV no B2 e de 634HV no C2. A profundidade da camada cementada foi de 1,77mm para A2, 0,68mm para B2 e 0,58mm para C2. Entre esses tratamentos houve um aumento de dureza de 235HV do A2 em relação ao B2, 274HV de A2 para C2 e de 39HV de B2 para C2. Os ganhos em relação à camada cementada foi de 1,09mm de A2 para B2, 1,19mm de A2 para C2 e 0,10mm de B2 para C2.

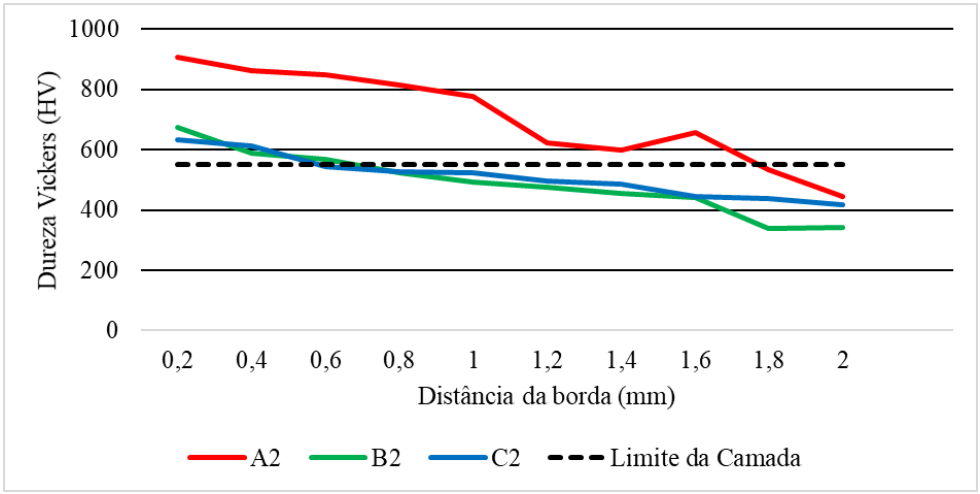



**Figura 4.** Dureza X Profundidade, Tempo de 6h

Nos tratamentos com 9h de forno, Fig. (5), à 0,20mm da borda mediu-se uma dureza de 856HV pra A3 e 763HV tanto para B3 quanto para C3. A camada cementada foi de 1,90mm para A3, 1,14mm para B3 e 1,15mm para C3. Entre esses houve um aumento de dureza, a 0,20mm da superfície, de 92HV tanto de A3 para B3 quanto de A3 para C3. Entre B3 e C3 não houve diferença significativa. O aumento da profundidade da camada cementada foi de 0,75mm tanto de A3 para B3 quanto de A3 para C3, entre B3 e C3 não houve diferença.

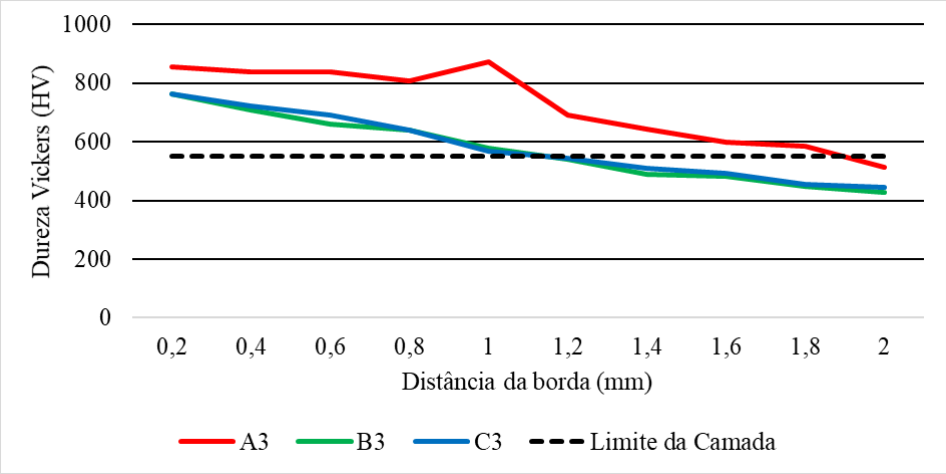



**Figura 5.** Dureza X Profundidade. Tempo de 9h

A Figura 6 mostra a espessura da camada cementada em relação ao tempo de tratamento. Entre o tempo de 6 e 9h a diferença da camada cementada entre os cementantes começa e diminuir. Porém, é evidente a maior eficiência do composto comercial, o qual atingiu um valor de camada com 0,88mm em 3h, 1,77mm em 6h e 1,9mm em 9h. A Figura 7 mostra uma imagem metalográfica do CP A3, ampliada em 5X e atacada com Nital 3% por 10 segundos, onde observa-se nitidamente a camada cementada.

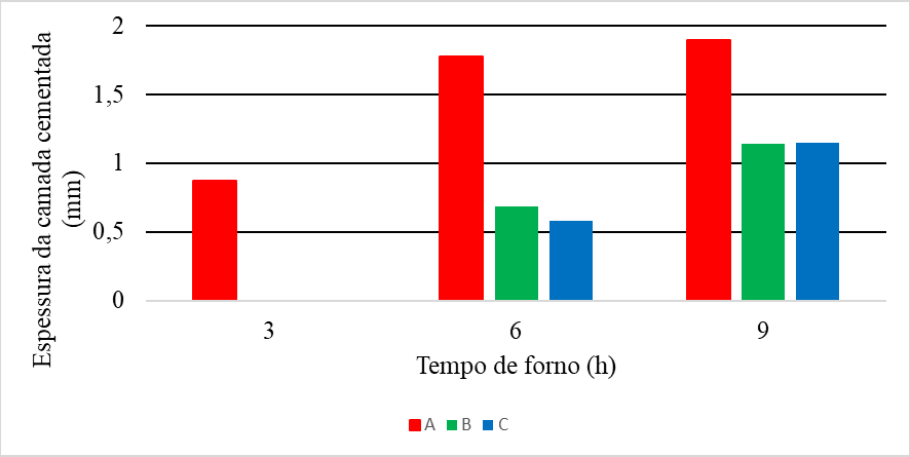



**Figura 6.** Profundidade X Tempo

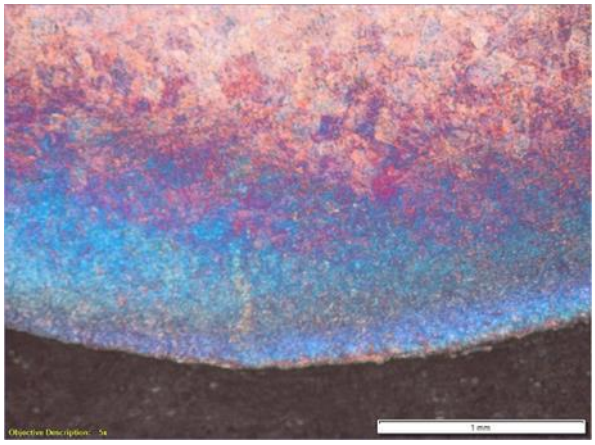


**Figura 7.** CP A3 atacado com Nital 3% por 10s ampliado 5X

## CONCLUSÃO

A cementação efetuada com o composto comercial apresenta vantagens que podem ser observadas nos resultados do experimento, conferindo uma dureza maior nas camadas próximas da superfície, bem como uma camada cementada com maior profundidade em todos os tempos de forno. Outra constatação do experimento é que não foi apresentado diferenças relevantes entre o uso de grafite com ou sem 20% de carbonato de cálcio, como compostos cementadores. A análise da eficiência dos cementantes poderia ser mais completa apresentando dados sobre a variação da camada cementada, assim como uma análise estatística, o que não foi possível realizar em virtude da falta de recursos. A análise estatística evitaria os dados discrepantes do CP B1 que apresentou um aumento de dureza da borda para o centro do CP, fato sobre o qual não foi encontrado hipótese. O experimento também corrobora o uso da cementação sólida em caixa para a finalidade a qual é recomendada conforme a análise apresentada da dureza e profundidade de camada.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos aos professores e técnicos do IFRS – Campus Ibirubá. Agradecimento à empresa Vence Tudo em especial ao coordenador do setor de qualidade o sr. João Chagas.

## REFERÊNCIAS

ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. Ciência e Engenharia dos Materiais. 2 Ed. São Paulo: Cengage CTP, 2014.

ASM International, Metals Handbook, Ninth Edition, Volume 16, Machining.

BARRA, G. C. P. Estudo de viabilidade técnica e econômica de troca de processo de cementação em linha industrial de tratamento térmico. 2013. 69 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica de Troca de Processo de Cementação em Linha Industrial de Tratamento Térmico, 2013.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G.. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 9 ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2016.

VICENTE, Chiaverini. Aços e ferros fundidos. 7 ed. São Paulo: ABM, 2002.

COLPAERT, Hubertus. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 4 ed. São Paulo: Blucher, 2008.

GIORDANI, T. Avaliação metalúrgica e mecânica de aços cementados e temperados de forma convencional e intensiva. 2012. 106f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

LAMIM, T. S. Cementação e nitretação-cementação a plasma em baixa temperatura em ferro puro sinterizado. 2016. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Florianópolis, 2016.

LOGUERCIO, J. F. C. Desenvolvimento de um aço SAE 5115 microligado ao Nióbio para cementação a alta temperatura. 2003. 193 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

OGATA, H. T. S. Determinação da influência das tensões residuais nas propriedades de fadiga em aço sae 8620 processado com diferentes profundidades de camada de cementação. 2003. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa Interdisciplinar de Pós-graduação, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

PARRISH, G. Carburizing. Materials Park, Ohio: ASM International, 1999.

PEREIRA, K. G. Relatório estágio curricular ii. Jaraguá do Sul, 2011. 30 p.

SANTOS, G. P.; CAETANO, V. G.; KIECKOW, F. Cementação sólida no aço sae 8620. Xxviii Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, Ijuí, v. 1, n. 1, p.1-4, nov. 2017.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(X) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos

( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

# AVALIAÇÃO NÃO-DESTRUTIVA POR RAIO-X DE COMPONENTES MECÂNICOS DO PROJETO BAJA SAE

**Nome do(s) autor(es): Yuri Gubert Souza, Edilson Nunes Pollnow , Wagner Da Silveira**
Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD
Rodovia Dourados/Itahum – km 12, MS, Brasil
E-mail para correspondência: yurigubert@gmail.com, wagnersilveira@utfpr.edu.br, edilsonpollnow@ufgd.edu.br

**RESUMO:** O estudo em questão, realizou uma análise de ensaio não destrutiva, utilizando as técnicas de ensaio de Raio - X, em componentes mecânicos presentes em um veículo off-road (BAJA). As peças estudadas, são submetidas a várias condições adversas de operação, como situações em que trabalham com alto torque, e em alguns casos juntamente com a fadiga térmica, como o caso dos discos de freio. Os corpos foram analisados utilizando uma máquina de Raio-X digital. Entre as peças analisadas estão, peças dos sistemas de transmissão de força, freio, parafusos e flanges de fixação. Esse ensaio teve por objetivo verificar a integridade estrutural das peças após uso em condições severas, verificando a existência de trincas, em pontos ou regiões, que concentram muitos esforços. Mesmo com densidade variadas, consegui-se estabelecer um mesmo parâmetro de ensaio, que se mostrou satisfatório para todas as peças.

**Palavras-Chave:** Avaliação não-destrutiva, Raio-X, BAJA SAE

***ABSTRACT:*** *The study in question carried out a non - destructive test analysis, using X - Ray test techniques, on mechanical components present in an off - road vehicle (BAJA). The studied parts are subjected to several adverse operating conditions, such as situations where they work with high torque, and in some cases along with thermal fatigue, as in the case of brake discs. The bodies were analyzed using a digital X-ray machine. Among the analyzed parts are, parts of power transmission systems, brake, bolts and fixing flanges. This study aimed to verify the structural integrity of the parts after use under severe conditions, verifying the existence of cracks, in points or regions, that concentrate a lot of effort. Even with different densities, it was possible to establish the same test parameter, which proved to be satisfactory for all the parts.*

***Keywords:*** *Non-destructive evaluation, X-ray, BAJA SAE*

## INTRODUÇÃO

Na engenharia, as análises de integridade de peças e estruturas sempre foram muito importantes para determinação de falhas em peças mecânicas, e sua consequente avaliação quanto a segurança que as mesmas oferecem quando utilizadas. Entre os diversos métodos de análise, temos os métodos destrutivos e os não destrutivos. Tomando pelo âmbito comercial, os ensaios não destrutivos são mais vantajosos para a indústria, uma vez que caso a peça não esteja com sua integridade comprometida, a mesma pode ser comercializada e utilizada normalmente, visto que após o ensaio não ocorre nenhuma alteração em sua estrutura, integridade ou forma. Entre as vantagens do ensaio não destrutivo, esta a possibilidade de usar novamente a peça para o fim a qual foi destinada, visto que não inutiliza a peça.

Entre um dos mais utilizados ensaios não destrutivos temos os ensaios por Raio-X. Este é um tipo de ensaio que se baseia na absorção diferenciada das radiações emitidas em uma peça. Vários fatores levam a essa variação de absorção, contudo a variação de densidade é o principal fator. Esta variação de densidade é captada através de um filme, tubo de imagem, ou até mesmo por detectores eletrônicos de radiação. A variação de absorção da radiação em peças mecânicas, podem indicar falhas internas ou descontinuidades no material. Os ensaios por Raios-X são aplicados em larga escala na indústria. Hanke (2008) cita que estes são utilizados em indústrias aeroespaciais, automotivas e de components eletrônicos. A indústria aeroespacial utiliza a técnica para estudo da integridade das pás das turbinas do avião, que por sua vez são feitas de fibra de carbono, a procura de pequenos vazios que possam gerar fragilidade na peça. No ramo automotivo a técnica está voltada para a integridade de estruturas que venham a sofrer grande impacto ou esforços.

Segundo Callister (2013), a técnica de Raio-X consiste na difração das estruturas cristalinas. O fenômeno de difração ocorre quando uma onda eletromagnética encontra uma série de espaços vazios regulares, que são capazes de dispersar as ondas eletromagnéticas.

Os espaços são comparáveis ao tamanho das ondas, sendo a técnica muito importante para desenvolvimento de novos materiais. A difração também se relaciona com as fases específicas, estando ligada a dois ou mais comprimentos de ondas, que tenham se dispersado por obstáculos presentes na estrutura. As peças analisadas neste trabalho, foram

submetidas a processos de usinagem, onde foram submetidas a diversos ciclos térmicos. Posteriormente, elas foram submetidas a condição adversas, e assim, foi analisado integridade das mesmas.

## METODOLOGIA

Com o intuito de se estudar melhor a integridade das peças do protótipo desenvolvido no projeto BAJA SAE, optou-se pela realização do ensaio não destrutivo. Segundo Miranda (2011), a radiografia de Raio-X é efetiva para peças com geometrias complexas e difíceis de serem inspecionadas por outro métodos, como ultrassom por exemplo. O ensaio utilizado para essa análise foi o ensaio de Raio - X, uma vez que o mesmo permite estudos internos da peça sem danificá-la, mantendo sua integridade para uso futuro. O referido ensaio foi realizado em um local propício para tal e isolado, de acordo com a norma regulamentadora DIN EN ISO 5579.

Para tal, fez-se uso para a análise da peça, uma caixa de filme de radiodiagnóstico digital. Segundo Hanke (2008), por um lado, dependendo do tamanho do pixel do sensor, o que deve ser adaptado para alcançar a melhor eficiência quântica. Por outro lado, irá ganhar a resolução espacial ótima do sensor. Com o objetivo de se analisar uma gama maior de trincas, entre o intervalo dos ensaios foi variada a intensidade da corrente por segundo (mAs) pela quantidade de radiação produzida , tendo sido também alterado o tempo de exposição da peça à intensidade de radiação (kV), sendo este responsável pelo poder de penetração do Raio-X. Quanto mais intenso a quantidade de radiação , mais escura fica a imagem, determinando o contraste. Por fim, após a obtenção das imagens, foram selecionadas as imagens que possuíam uma melhor definição e riqueza em detalhes. Os respectivos materiais a qual são feitas as peças, estão sendo mostrados na “Tab. 1”.

**Tabela 1.** Informações sobre as peças analisadas

| | | | Dimensões | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Peças | Material | Densidade (kg/m³) | Diâmetro (mm) | Comprimento (mm) | Espessura (mm) |
| Disco de freio Dianteiro | Aço Forjado | 7,86 | 180 | * | 3,5 |
| Disco de freio traseiro | Aço Forjado | 7,86 | 160 | * | 3 |
| Pinhão | Aço SAE 1045 | 7.87 | 25,4 | 25,4 | * |
| Coroa | Aço SAE 1045 | 7.87 | 180 | * | 3 |
| Parafusos | N/D | N/D | 8 | 55 | * |
| Pontas de Eixo | Aço SAE 4130 | 7,85 | 20 | 106 | * |
| Flange da coroa | Aço SAE 1020 | 7,86 | 110 | * | 5 |
| Eixo do CVT | Aço SAE 1045 | 7.87 | 19 | 180 | * |

| Legenda |
|---|
| N/D = Informação não disponível |
| * = Medição não presente |

Foram realizados vários ensaios, variando exposição da peça a intensidade de radiação. Após uma configuração inicial, foi encontrada a configuração que melhor atendia a análise. Consequentemente, foi analisado quais as condições de exposição se mostraram boas para a análise das respectivas imagens.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das imagens obtidas após o ensaio não destrutivo, observou-se que a estrutura de todas as peças analisadas, se mostravam íntegras, sem a presença de nenhuma irregularidade interna, como trincas ou nucleações.

Foi possível notar somente as alterações superficial devido aos desgastes de algumas peças – vide “Fig. (2)” e “Fig. (3)”. Alterações estas que não provocam modificações estruturais que venham a promover a falha das peças através de rupturas, seja devido a esforços mecânicos ou térmicos. As peças que apresentam um desgaste superficial, não foram inicialmente projetadas para serem utilizadas no protótipo e sim em veículos comerciais maiores e mais pesados, tendo um fator de segurança maior empregado, sendo assim superdimensionadas para o protótipo. Sendo assim, foram realizados testes de frenagem e em circuito fechado, e as peças se mostraram aptas a serem utilizadas. O ensaio de Raio-X veio para sedimentar quanto a integridade das peças.

Com a variação de configuração de ensaio, foi notado a formação de “penumbras” no ensaio de Raio-X, devido aos orifícios das próprias peças, que por sua vez geram uma difração maior das ondas de Raio-X empregadas no ensaio.

Devido ao fato de as peças analisadas possuírem densidades semelhantes, notou-se que um mesmo parâmetro de ensaio atendeu a necessidade de todas as peças. Isso facilitou e agilizou a análise das peças. Sendo assim estabeleceu-se para todos os ensaios, uma incidência de 133 Kv, e 50 mAs..Observou-se que as peças parecem estar com sua integridade intacta, com possibilidade de serem utilizadas no protótipo desenvolvido, conforme podemos verificar na "Fig. (1)" a "Fig. (7)". Analisando as imagens obtidas, as mesmas tiveram seus pontos de tensões aproximados, sendo variado o brilho e o contraste das imagens a durante a procura de trincas. A variação de parâmetros de imagem, como o brilho por exemplo, se deve pelo fato da sobreposição dos componentes poder omitir alguma trinca.

Devido as limitações da maquina, quanto a sua resolução, as imagens do pinhão quando aproximadas para análise de possuíeis trincas em pontos de tensão, o mesmo perdeu qualidade de imagem, impossibilitando uma obtenção de uma imagem com uma maior qualidade. Segundo Soares (2004), Raios-X em filmes convencionais proporcionaram ótimo detalhamento de trincas nas juntas mecânicas, enquanto que as imagens geradas pela modalidade digital apresentaram qualidade muito inferior, prejudicando ou até mesmo impedindo a avaliação do grau de integridade estrutural das juntas rebitadas. Devido a disponibilidade dos ensaios serem realizados apenas utilizando maquinas digitais, algumas imagens, ao sofrerem aproximações, perderam qualidade. Tendo esta limitação presente, imagens das regiões de alto torque da "Fig.(1)" não puderam ser obtidas. Os círculos vermelhos presentes em cada imagem, representam as regiões de tensão escolhidos para análise de possíveis nucleações ou trincas.

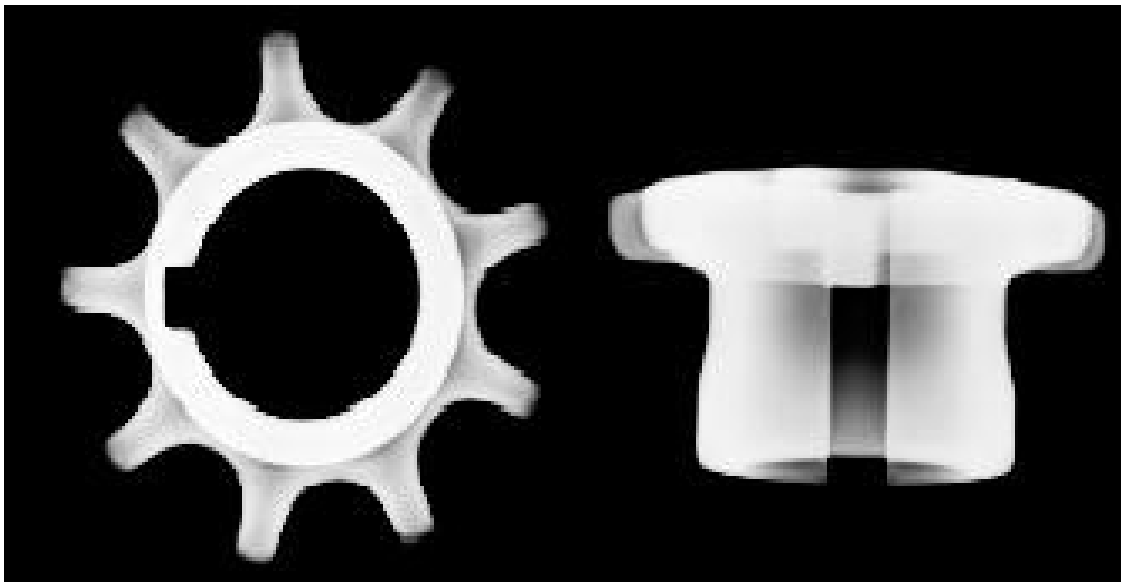


**Figura 1.** Análise do Pinhão

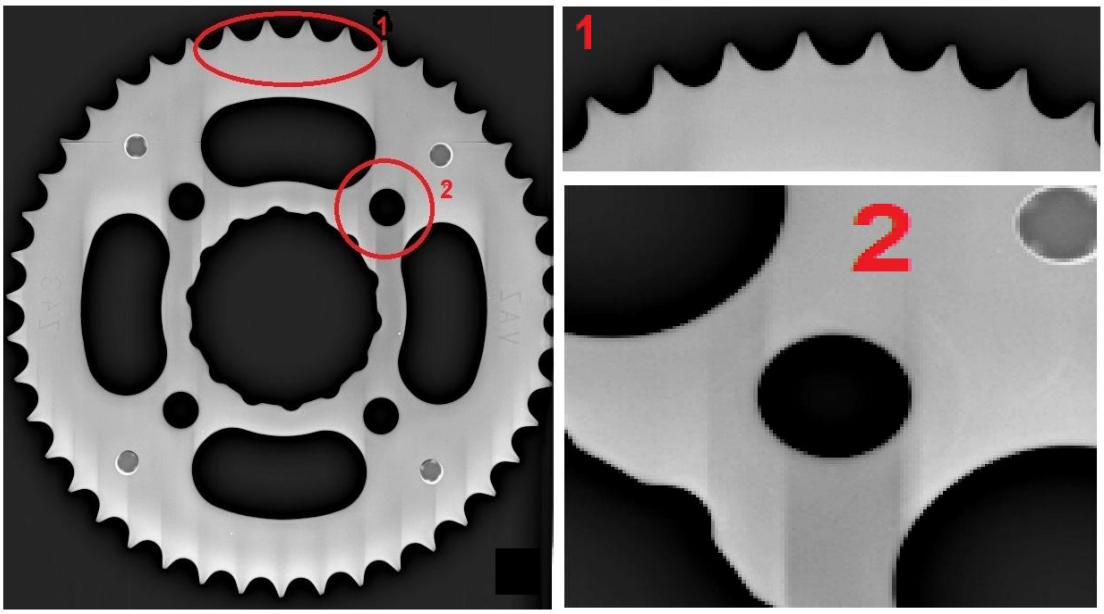


**Figura 2.** Análise da Coroa e seus pontos de tensão

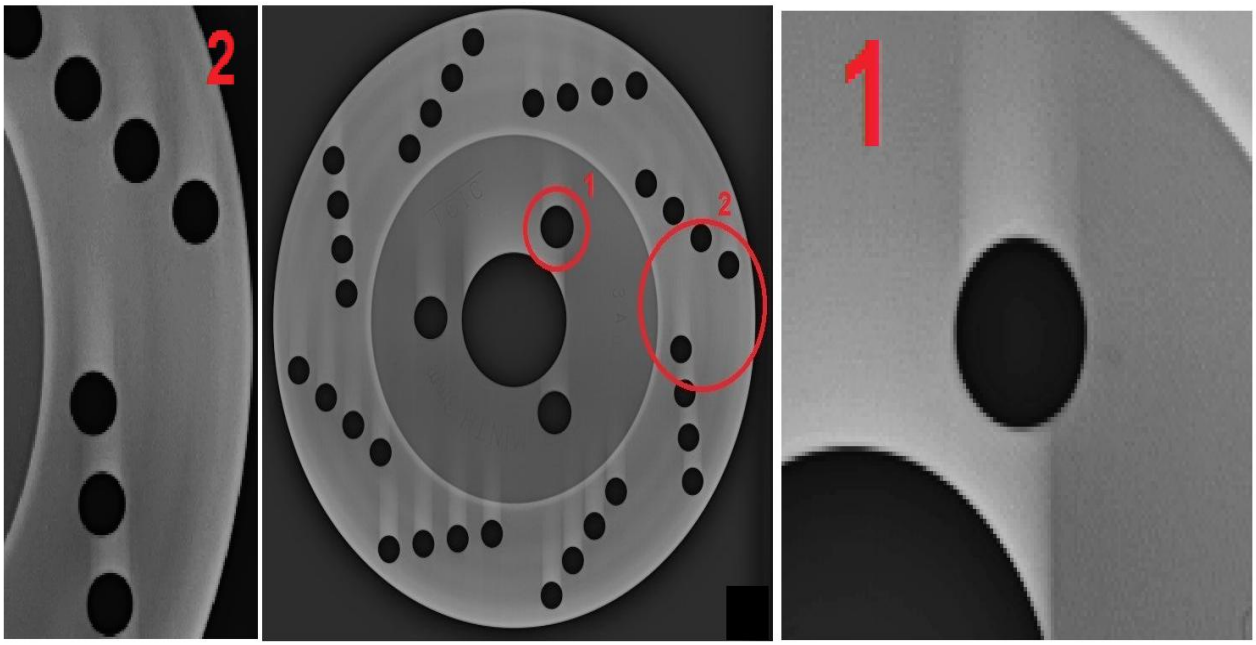



**Figura 3.** Análise dos discos de freio traseiro e seus pontos de tensão analisados

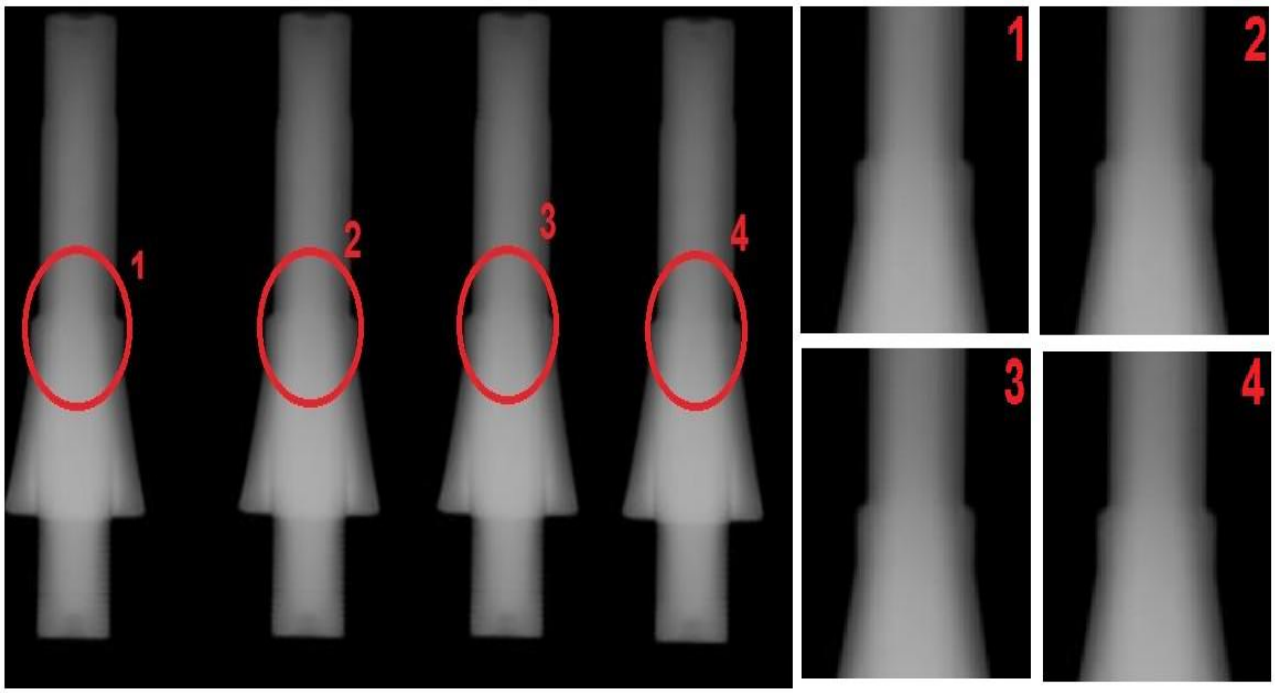



**Figura 4.** Análise das pontas de eixos

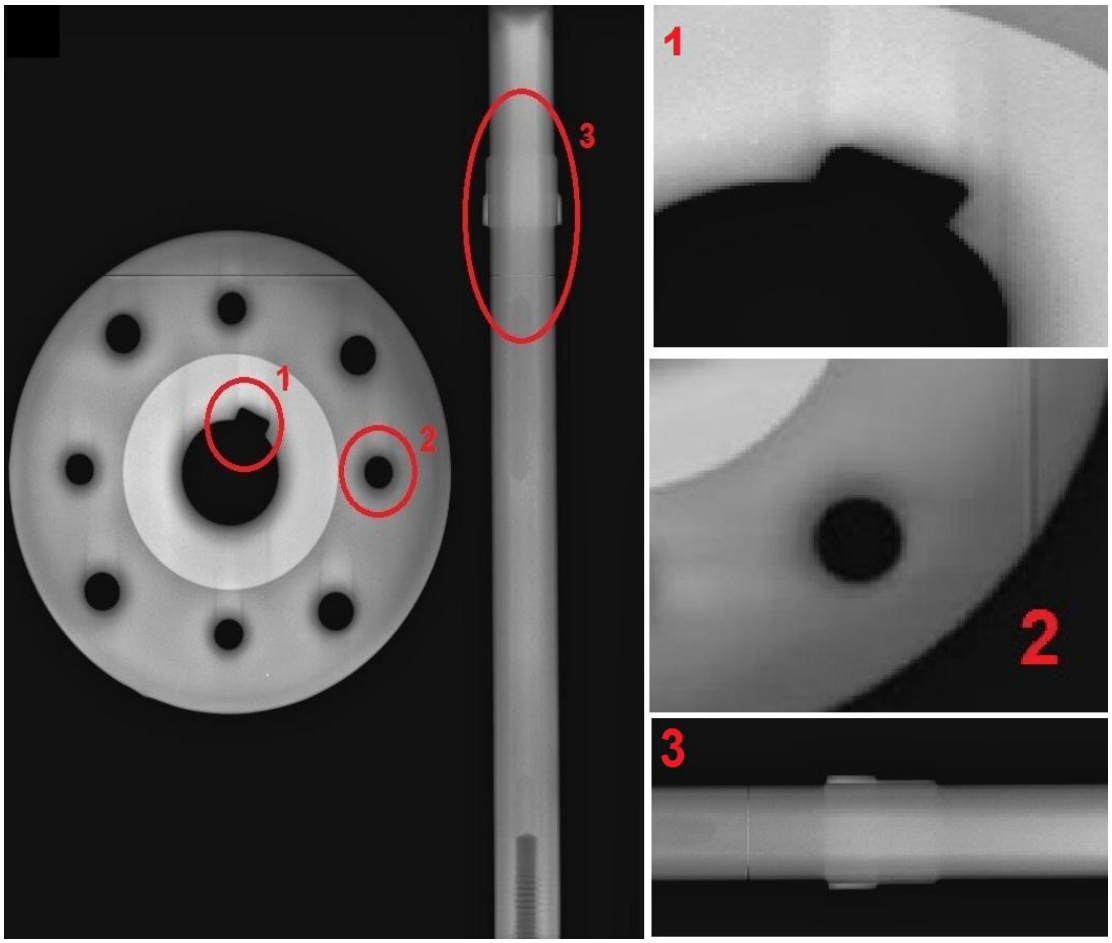



**Figura 5.** Análise da Flange da Coroa e do eixo da CVT e seus pontos de tensão analisados

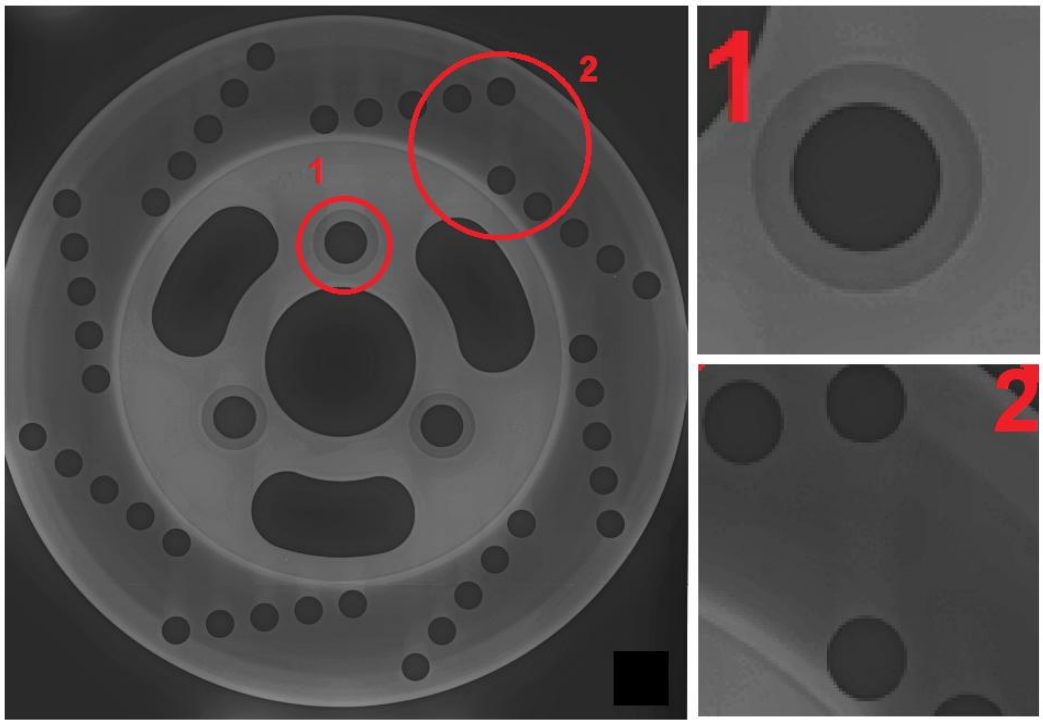



**Figura 6.** Análise dos discos de freio dianteiro e seus pontos de tensão analisados

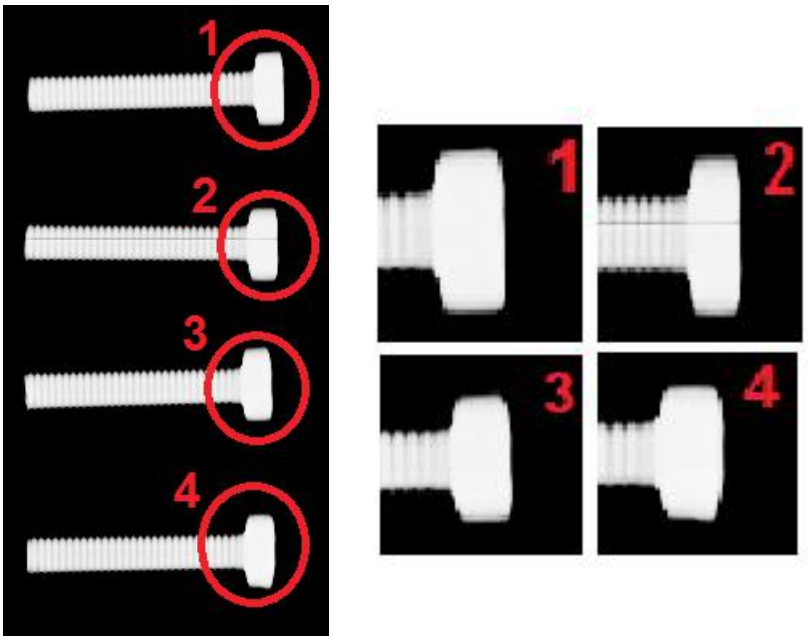



**Figura 7.** Análise dos parafusos da coroa e suas regiões de maiores tensões

## CONCLUSÃO

No trabalho, pode-se notar a integridade das peças. Contudo notou-se que as peças que possuem furos, acabam por difratar as ondas de Raio-X, e por sua vez, acabam por gerar penumbra na imagem obtida. Regiões das peças que possuíam uma menor densidade, também geraram um efeito de difração nas ondas e consequentemente, efeito de "penumbra".

Por meio deste ensaio, podemos concluir que as peças analisadas estão em perfeito estado, além de estarem aptas a serem utilizadas no protótipo. Confirmou-se então que o ensaio realizado se mostrou satisfatório para a análise de possíveis trincas presentes nas peças. Os ensaios de Raios - X não apresentaram nenhuma anormalidade nas peças. A partir disso é possível discorrer que está peças não sofreram danos significativos, como macrotrincas, pois estas certamente seriam indicadas pelo ensaio. Outros ensaios não destrutivos como e exame por ultrassom podem ser realizados para que se possa corroborar com o ensaio por Raios -X e então se possa afirmar a inexistência de trincas em todos os níveis das peças.

## AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece primeiramente a sua mãe, por sempre o terem incentivado a desenvolver seus projetos e trabalhos durante a graduação. Ao técnico Wesley Roberto Ricardino, pela ajuda na execução dos ensaios e ao Prof. Dr Wagner da Silveira e ao Prof. Me. Edilson Nunes Pollnow por disponibilizarem seus tempos para a orientação deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

Callister, W. D., Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. John Wiley & Sons, Inc., 2013.

DEUTSCHES INSTITUR FUR NORMUNG, DIN 74000 .Hydraulic braking systems ; dual circuit brake systems; symbols for brake circuits diagrams;1992

DEUTSCHES INSTITUR FUR NORMUNG, DIN EN ISO 5579.Zerstörungsfreie PrüfungDurchstrahlungsprüfung von metallischenWerkstoffenmit Film um Röntgen – oderGammastrahlen, 2014

Miranda, M. (2011). *Comparação entre métodos de inspeção não-destrutiva aplicados a peças compósitas laminadas sólidas estruturais aeronáuticas*. Dissertação de Mestrado, Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos. doi:10.11606/D.88.2011.tde-16082011-154048. Recuperado em 2018-08-01, de www.teses.usp.br

R. Hanke, T. Wenzel, Image processing for inline digital industrial radiology, J. Nondestruct. Eval., Indian Soc. NDT (India) 20/3 (2001) .

Soares, H. N. (2007). *Detecção por raios-x de trincas de fadiga em juntas rebitadas de Glare®*. Dissertação de Mestrado, Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos. doi:10.11606/D.88.2007.tde-09042008-150513. Recuperado em 2018-08-01, de www.teses.usp.br

T. Wenzel, R. Hanke, Texture analysis for classification of cast defects in X-ray images, Second Workshop on NDT in Progress, Prag, 2003.

**DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE**

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido.

**ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO**

Assinalar aqui, com um X, a seção 'área de conhecimento do trabalho'.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
( X ) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

# AVALIAÇÃO ÓPTICA DA INFLUÊNCIA DA TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL EM AMOSTRAS DE FERRO FUNDIDO CINZENTO

**Erika Michele Damas, Pedro Henrique R. Ribeiro, Washington M. da Silva Júnior**
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
Avenida João Naves de Aliva, 2121 – Santa Mônica, Uberlândia – MG, 38400-902
erikadamas@gmail.com; ribeiro.hr.pedro@gmail.com

**RESUMO:** A texturização superficial é a formação de microcavidades regulares na superfície do corpo. Em sistemas lubrificados, as microcavidades podem potencializar os efeitos hidrodinâmicos auxiliando no atrito e desgaste. Texturas já são utilizadas nas camisas de cilindros de motores a combustão interna e em mancais de deslizamento. Neste trabalho, foi utilizado o método de texturização eletroquímica sem mascaramento (MECT), para a obtenção de textura no formato de Chevron, no ferro fundido cinzento. Para avaliar o desgaste, foi utilizado um Microtribômetro desenvolvido no LTM com o objetivo realizar ensaios de deslizamento com movimento alternado. O contra corpo era esferas de aço 52100 5 mm de diâmetro. Para realização dos experimentos foram padronizados os parâmetros de entrada, os quais são: frequência, carga normal e tempo de ensaio. Para avaliação da eficiência da textura serão realizados ensaios em amostras lisas e texturizadas, com e sem lubrificante.

**Palavras-Chave:** Texturização, deslizamento alternado, lubrificação.

***ABSTRACT:*** *Surface texturization is the formation of micro-cavities on the surfaces according certain shapes and patterns. In lubricate systems, those micro-cavities promote hydrodynamic effects that potentially reduce friction and wear. For example, different texturing techniques are applied in cylinders of internal combustion engines and in sliding bearings. In the present study the maskless elctrochemical texturing (MECT) method is applied in order to obtain different patterns of texture in chevron shape on gray cast iron shape. A microtribometer was used to evaluate the reciprocating wear test. This equipment was specially developed to perform a high sensitive reciprocating sliding wear test. The counter body was a 5 mm sphere of AISI 52100 steel. The input parameters for experiment was frequency, normal load and test time. The efficiency of the presence of texture, tests will be conducted in specimen with and without texture and with and without lubrification.*

***Keywords:*** *Sliding wear, reciprocating wear test, lubrication.*

## INTRODUÇÃO

A texturização superficial apresenta várias características apreciáveis do ponto de vista tribológico segundo Pettersson *et al.* (2004 e 2003). As microcavidades regulares diminuem a área de contato e, consequentemente, o desgaste entre as superfícies do tribossistema. As microcavidades podem reter partículas abrasivas geradas durante o movimento relativo de superfícies em contatos a seco ou lubrificados, além de servir como reservatório de lubrificante, sendo este responsável por auxiliar na formação do filme lubrificante. Nesse contexto, a texturização pode ser empregada para diminuir o desgaste em diversos sistemas, tais como: mancais de deslizamento, motores de combustão interna, dentre outros exemplos.
Portanto, este trabalho tem como objetivo evidenciar o efeito da texturização em amostras de ferro fundido cinzento, com e sem textura, em meio com e sem lubrificação através de ensaios de desgaste por deslizamento lubrificado.

## METODOLOGIA

Para realização dos ensaios lubrificados, elaborou-se o projeto de uma cuba (Figura 1) apropriada para conter a amostra e o fluido lubrificante. Os corpos de prova utilizados foram de ferro fundido cinzento com refino de grafita, confeccionado nas dimensões 35x25x8 mm e o contra corpo foi uma esfera de aço AISI 52100, com 5 mm de diâmetro. O óleo utilizado foi o SAE 68.
As texturas, no formato de chevrons, foram usinadas pelo método de texturização eletroquímica sem mascaramento (MECT), seguindo a metodologia desenvolvida por Parreira; Gallo; Costa, (2012). O tempo de texturização foi de 60 s, com tensão de 7,5 V, de acordo com os ensaios de Silva (2016), que apresentaram o melhor desempenho para o ferro fundido cinzento.

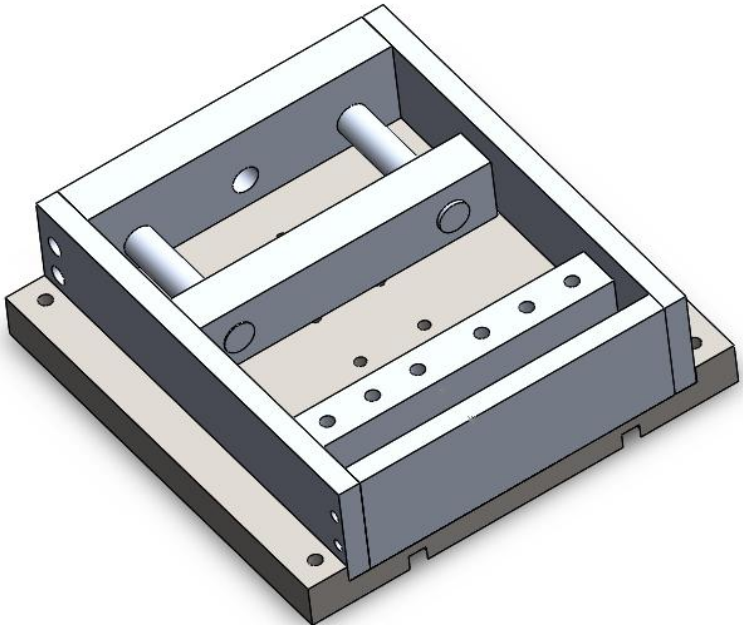


**Figura 1.** Projeto da cuba utilizada no ensaio lubrificado

O MECT utiliza o aparato ilustrado na Figura 2, onde tem uma fonte de voltagem contínua (1) fornece a corrente necessária para a dissolução eletroquímica, sendo o polo negativo conectado à ferramenta (7) e o positivo à peça a ser texturizada (3). O eletrólito (2) é bombeado por uma tubulação (6) através de uma bomba peristáltica, entrando em contato com a peça (3) por meio de furos na ferramenta (7), escoando posteriormente pela distância entre a ferramenta e a peça (DFP) (8). Um circuito eletrônico (4) é utilizado para pulsar a corrente, visando assim durante os pulsos não eletrizados limpar os produtos oriundos da dissolução anódica bem como arrefecer a superfície. Foram obtidos bons resultados para pulsos eletrizados de 3.2 ms intercalados por pulsos de limpeza e arrefecimento por 18.2 ms (Parreira et al., 2012), bem como com o uso de NaNO3 (Costa e Hutchings, 2009) e NaCl (Parreira *et al.*, 2012) como eletrólitos.

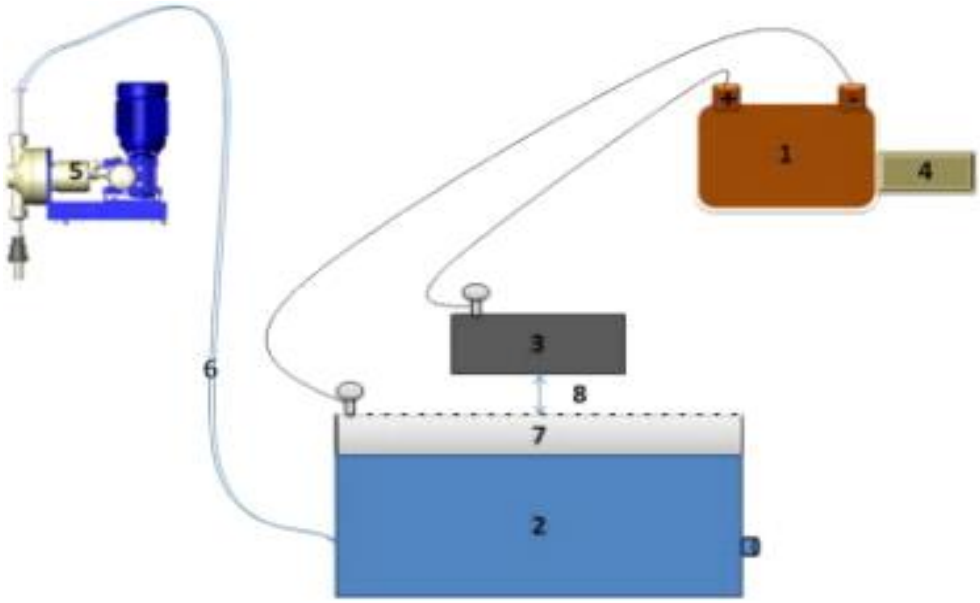
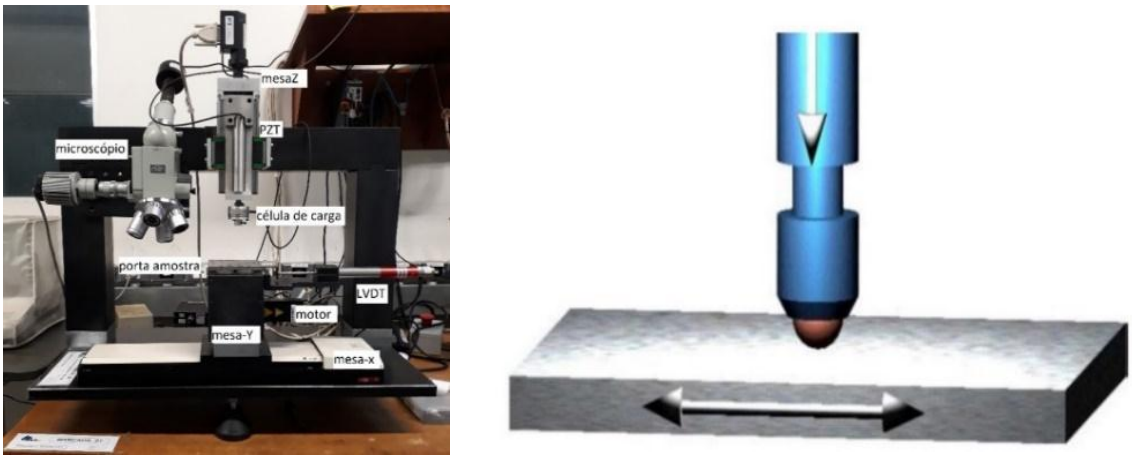



**Figura 2.** Aparato experimental utilizado na MECT (Parreira *et al.*, 2012)

Para realização dos ensaios de deslizamento alternado, foi utilizado o Microtribômetro (Figura 3) desenvolvido no LTM-UFU. O equipamento possui um sistema de mesas coordenadas, um motor conectado a um sistema mecânico que possibilita o movimento alternado. A força de contato é imposta por um atuador piezoeléctrico e mensuradas por uma célula de carga com sensibilidade de 0,020 N.




(a) (b)

**Figura 3.** (a) Microtribômetro e (b) representação do sistema de deslizamento alternado

Foi desenvolvido um programa em LabView® para controlar o microtribômetro, onde os principais parâmetros do ensaio são selecionados, como: força, tempo e frequência. O programa também armazena todos os dados gerados durante o ensaio. Para a realização dos testes, foram utilizados os seguintes parâmetros de entrada: frequência de 0,5 Hz, força normal de 5 N, amplitude de deslizamento de 10 mm, realizando ensaios com duração de 60 min.

**Procedimento experimental**

Foram realizados testes a seco e com lubrificante, e o procedimento experimental para os dois são semelhantes. Primeiro a amostra e a esfera são limpas, os dois são colocados em um béquer e imersos em acetona e o recipiente foi colocado no Ultrassom e deixados por 2 min. Depois a amostra e fixada na cuba, a qual é fixado na mesa Y e mesa X do microtribômetro e a esfera e colocada no porta esfera que é fixado na célula de carga. Caso o experimento for lubrificado a cuba é preenchida com óleo lubrificante.
No programa em LabView® são colocados os parâmetros de entrada e dado o início ao ensaio, quando terminado a esfera é etiquetada e guardada em uma embalagem esterilizada, o mesmo foi feito para a amostra. Para a análise da trilha de desgaste e a marca deixada na esfera utilizou microscópio óptico para tirar micrografias. Foram realizadas 3 repetições para cada regime, os quais são:

- amostra sem textura sem lubrificação;
- amostra com textura e sem lubrificação;
- amostra sem textura e com lubrificação;
- amostra com textura e com lubrificação.

totalizando um total de 12 ensaios.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A Figura 4 apresenta a textura obtida pelo método MECT, qualitativamente, pode-se observar que as texturas não foram bem formadas, porém é necessário medições para que se possa analisar a qualidade das texturas confeccionadas.

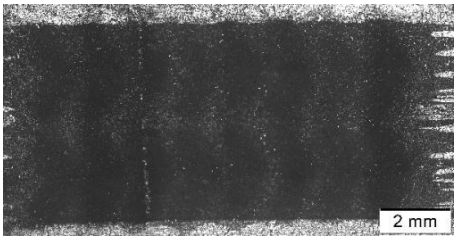
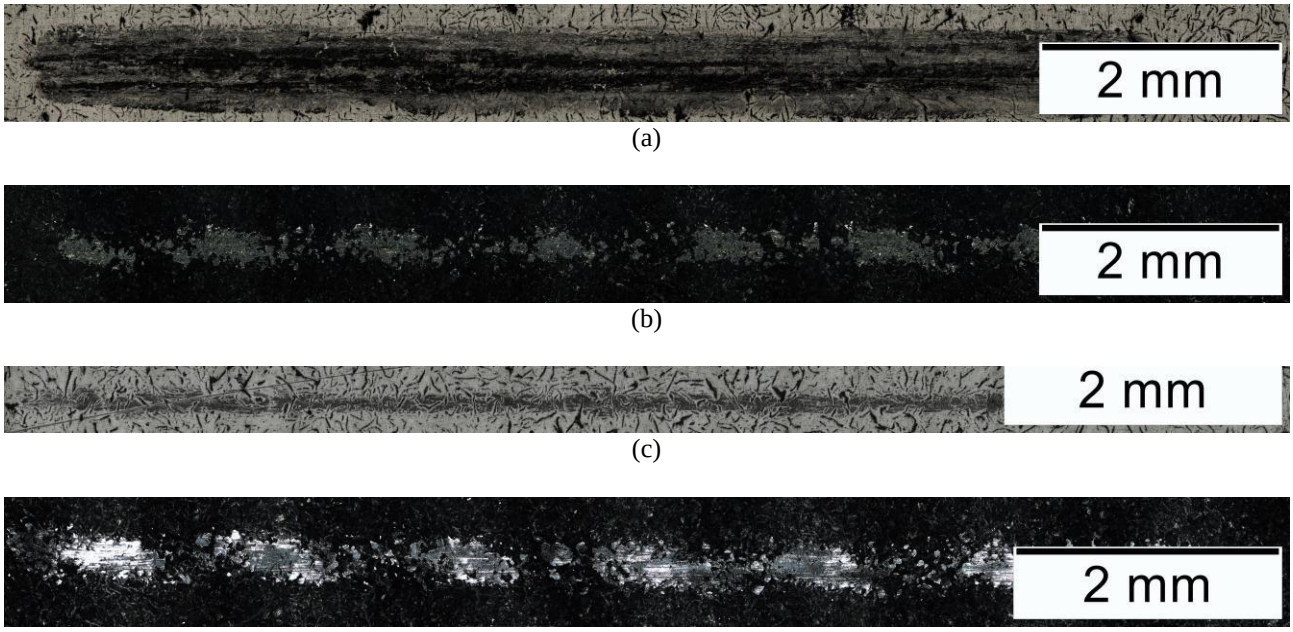



**Figura 4**. Micrografia da textura obtidas por microscopia optica

Na Figura 5 é apresentado as trilhas de desgaste dos ensaio realizados, já a Figura 6 ilustra a marca de desgaste na esfera correspondente a cada regime de ensaio.



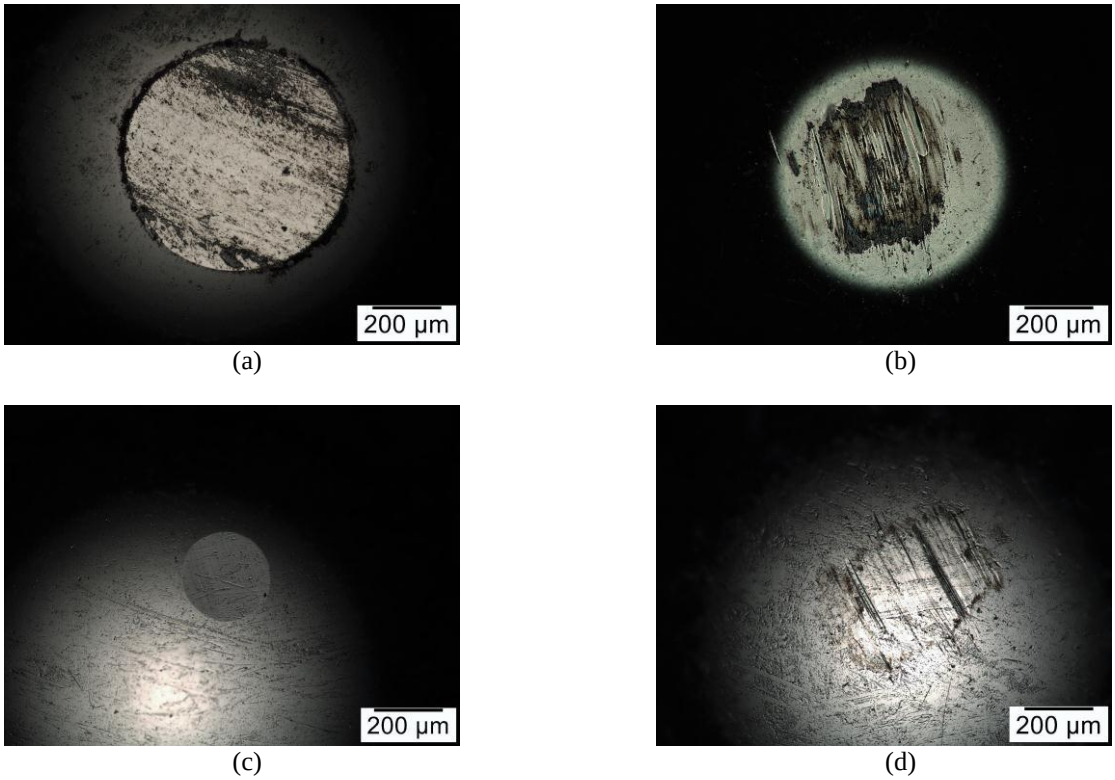

(a)

(b)

(c)

(d)

**Figura 5.** Trilha de desgaste dos testes realizados (a) sem textura e sem lubri., (b) com textura e sem lubri., (c) sem textura e com lubri e (d) com textura e com lubri. .




(a)

(b)

(c)

(d)

**Figura 6.** Marca de desgaste nas esferas (a) sem textura e sem lubri., (b) com textura e sem lubri., (c) sem textura e com lubri e (d) com textura e com lubri. .

Para auxiliar na análise visual do desgaste em cada regime, foi mensurado a largura da trilha de desgaste e o diamtero desgasto na esfera. Que estão exposto na Tabela 1 a seguir.

**Tabela 1.** Largura da trilha de desgaste e diâmetro do desgaste da esfera, * do/ao deslizamento

| | Largura da trilha de desgaste (µm) | Diâmetro/largura do desgaste na esfera (µm) | |
|---|---|---|---|
| Sem textura e sem lubrificante | 652.29 | 661.35 | |
| Com textura e sem lubrificante | 327.07 | No sentido* | Perpendicular* |
| | | 426.97 | 375.78 |
| Sem textura e com lubrificante | 157.23 | 261.50 | |
| Com textura e com lubrificante | 359.40 | No sentido* | Perpendicular* |
| | | 354.21 | 454.38 |

Com a avalição das micrografias e com as medidas é possível observa que para o caso onde a amostra não possuía textura a adição do óleo lubrificante fez com que a trilha diminuísse de largura e o desgaste na esfera ficou também visivelmente menor. O lubrificante cria uma película entre o contato da esfera com a amostra, fazendo com que as micro-asperezas, que antes estavam mais próximas no caso sem lubrificação, estejam separadas e não ocorra a transferência do material da esfera para a amostra ou ao contrário.
Comparando os ensaios onde a amostra sem textura e a amostra sem textura, em um regime sem lubrificação, é possível notar que a largura da trilha caiu pela metade. Esse efeito é possível pois com o MECT faz com que os veios de grafita fiquem mais expostos, atuando assim como lubrificante solido (Sugishita; Fujiyoshi, 1981),, e como o contato esta ao ar é notável ver uma possível formação de tribocamada formada pelos óxidos, facilitando assim o deslizamento alternado.
Agora quando se adicionou óleo lubrificante nas amostras que possuem textura, constata-se que a largura da trilha de desgaste aumentou quanto a marca de desgaste na esfera. O esperado era que, com a adição do lubrificante o desgaste também diminuiria com no caso em textura, mas não foi o ocorrido. Uma possível explicação seria que como o lubrificante, não seria mais provável a formação de tribocamada e a grafita não atuaria tão bem assim como lubrificante sólido.
Para discussões mais profundas em comparação de cada regime são necessários outros meios de análise como a comparação do coeficiente de atrito, a profundidade de desgaste das amostras e a transferência de material do contra-corpo para o corpo através componentes que estão nas tribocamada pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV).

## CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos até o presente momento do fechamento deste artigo, é possível apontar que o se realizar o processo de texturização em regimes que trabalham ao ar e nos paramentos de entrada como nesse trabalho, tem-se um grande ganho quanto o decaimento do desgaste aparente. Já se o regime for lubrificado a amostra sem textura é mais vantajosa.
Porém para discussões mais profundas em comparação de cada regime são necessários outros meios de análise como a comparação do coeficiente de atrito, a profundidade de desgaste da amostra e a transferência de material do contra-corpo para o corpo, através dos componentes que estão na tribocamada pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV). Que serão os próximos passos para finalizar este trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a CAPES, FAPEMIG e ao CNPq pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

Costa, H. L.; Hutchings, I. M. Hydrodynamic lubrication of textured steel surfaces under reciprocating sliding conditions. Tribology International, v. 40, n. 8, p. 1227-1238, 8// 2007. ISSN 0301-679X. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X0700014X >.

Parreira, J. G.; Gallo, C. A.; Costa, H. L. New advances on maskless electrochemical texturing (MECT) for tribological purposes. Surface and Coatings Technology**,** v. 212, n. 0, p. 1-13, 11// 2012. ISSN 0257-8972.

Pettersson, U.; e Jacobson, S. "Influence of surface texture on boundary lubricated sliding contacts". Tribology International. v. 36, p. 857–864, 2003

SILVA, L. R. R., "Texturização superficial de cilindros automotivos", 2016. Uberlândia. Tese de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia.

Sugishita, J.; fujiyoshi, S. The effect of cast iron graphites on friction and wear performance I:Graphite film formation on grey cast iron surfaces. Wear**,** v. 66, n. 2, p. 209-221, 2/2/ 1981. ISSN 0043-1648.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsávelveis pelo material impresso contido neste artigo.

## ÁREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção 'área de conhecimento do trabalho'.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(X) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

# CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS COMPOSITOS DO FORMATO ESTRUUTRAL HONEYCOMB

**Pedro Jorge Soares Correa**, **João Victor da Silva Oliveira, Letícia Santos Lula Barros, Pedro Cunha de Lima Emmanuel Pacheco Rocha Lima**, **Manuel Nascimento Dias Barcelos Júnior**
University of Brasília – Faculdade do Gama
Área Especial de Indústria Projeção A Brasília
ZIP Code: 72.444-240
pedrojorgecs@gmail.com

**RESUMO:** O principal objetivo deste trabalho é caracterizar as propriedades mecânicas de um conjunto de peças de estruturas tipo *Honeycomb* de favo de mel, fabricadas em alumínio, faces e núcleo, aplicando a técnica de excitação por impulso. Este teste não destrutivo permite a medição de propriedades como o módulo de elasticidade e o amortecimento. Essas propriedades são determinadas pela análise de um sinal acústico para capturar a frequência natural da estrutura de vibração. Para este caso específico, o equipamento Sonelastic ® é empregado e os resultados experimentais de rigidez são comparados com resultados analíticos, a fim de compreender se um material compósito pode ser analisado como uniforme, considerando as propriedades mecânicas médias medidas. Este procedimento pode ajudar a acelerar o acesso das propriedades mecânicas das estruturas em favo de mel ao invés de usar testes destrutivos convencionais.

**Palavras-Chave:** Material Compósito, Compósito, *Honeycomb*.

***ABSTRACT:*** *The main goal of this work is to characterize the mechanical properties of a set of pieces of honeycomb sandwich structures, manufactured in aluminum, both faces and core, by applying the impulse excitation technique. This non-destructive test allows the measurement of properties such as the module of elasticity and the damping. These properties are determined by analyzing an acoustic signal to capture the structure natural frequency of vibration. For this specific case, the Sonelastic ® equipment is employed and experimental stiffness results are compared to analytical ones in order to understand if a composite material can be analyzed as uniform by considering average measured mechanical properties. This procedure may help to accelerate the access of the mechanical properties of honeycomb sandwich structures instead of using conventional destructive tests.*

***Keywords:*** *Composite Materials, Composite, Honeycomb*.

## INTRODUÇÃO

O crescente desenvolvimento tecnológico observado nas últimas décadas tem demandado cada vez mais o uso de materiais mais sofisticados, com propriedades específicas, que apenas materiais tradicionais como metais, cerâmicas e polímeros não conseguiram atender. Nesse cenário, cresce o uso de materiais compostos.
Em geral, o material compósito pode ser definido como um material cuja composição apresenta dois ou mais tipos de materiais diferentes. Materiais compósitos são formados pela matriz e pela fase dispersa. O material matricial é o que dá estrutura ao material compósito, ocupando os espaços vazios que ocorrem entre os materiais de reforço e mantendo-os em suas posições relativas. A matriz serve para distribuir as fibras e também para transferir a carga para as fibras. Os materiais da fase dispersa estão produzindo melhorias nas propriedades mecânicas, químicas e eletromagnéticas do produto final. Na maioria dos casos, na produção de materiais compósitos ocorre sinergia entre o material da matriz e o material da nervura, resultando em um novo material com novas propriedades que não existem nos materiais de origem (Akovali, 2001).

O principal objetivo do presente trabalho é a aplicação de metodologias para a caracterização de materiais compósitos do tipo painel sanduíche através de ensaios mecânicos destrutivos de acordo com a norma ASTM C393, bem como a utilização de ensaios não destrutivos utilizando o equipamento *Sonelastic* ®. Tanto para o teste destrutivo como o teste não destrutivo para confirmar os resultados obtidos através da análise das equações para a linha elástica. Com base nos resultados obtidos, apresentam-se as propriedades, vantagens e desvantagens, de forma a ampliar os horizontes de uso.

**Estrutura *honeycomb***

Painéis sanduíche têm sido usados em várias aplicações, onde a relação entre rigidez e peso e força / peso são de extrema importância. As primeiras aplicações de painéis sanduíche foram conectadas principalmente à indústria aeroespacial e, posteriormente, foram estendidas às indústrias automobilística e naval. Mais recentemente, o campo de aplicação dos painéis foi ampliado, devido ao aumento na demanda de mercado (Callister, 2008).

A utilização dos estruturas *honeycomb* surgiram através da necessidade, nas mais diversas aplicações, de um material que possuíssem elementos estruturais leves com alta rigidez e resistência. Um painel tipo sanduíche é um tipo de material compósito que consiste em uma estrutura de três camadas: duas finas, rígidas e resistentes feitas de material denso, separadas por uma camada de material de baixa densidade (núcleo) e que podem ser muito menos rígidas e resistentes Figura 1. Os diferentes tipos e formas de painéis sanduíche estruturais podem ser obtidos através da combinação de diferentes formas do material do núcleo. Apesar da grande diversidade de materiais e configurações existentes para painéis de sanduíche, estão constantemente sendo propostas e usadas novos materiais e novas combinações de materiais existentes (Bitzer, 1997).

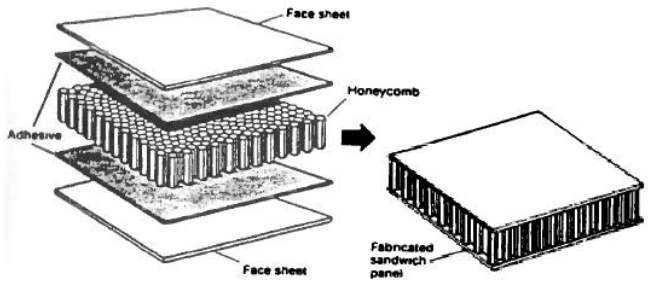



**Figure 1**.Esquemático de um Painel Sanduiche (Bitzer , 1997)

Os painéis sanduíche mais comuns apresentam lâminas planas. No entanto, eles também podem apresentar uma superfície plana, com um corte transversal. Isto deve-se ao fato de que durante muito tempo considerava-se, para efeitos de dimensionamento, que as cargas eram apenas suportadas pelo corte da lâmina. Apenas recentemente começou a considerar-se que as cargas são transmitidas entre as pás e o material do núcleo, auxiliando assim, o Painel como um todo, a resistir suas solicitações (Akovali, 2001).

Os materiais adesivos têm uma importância crucial no comportamento do painel de sanduíche. A ligação entre o núcleo e as lâminas não deve ser o elemento mais fraco do painel porque os materiais adesivos devem ter propriedades mecânicas tão boas ou melhores do que o material do núcleo. Existem vários materiais que podem ser aplicados e que atendem aos requisitos de temperatura e resistência ao fogo. No entanto, alguns materiais adesivos liberam gases ou vapores de solventes durante o processo de cicatrização, que podem interagir com os sistemas de resina de alguns núcleos não metálicos. A conexão deve ser verificada para garantir que não haja redução das propriedades mecânicas devido aos materiais utilizados (Bitzer, 1997).

As lâminas podem ser de diversos materiais que apresentam a rigidez mais utilizada: ligas de alumínio, plásticos reforçados com fibra, titânio, aço ou compensado, que conferem alta rigidez e resistência. A estrutura e devem ser grossos o suficiente para resistir às tensões de tração e compressão, resultante da aplicação de cargas. As lâminas de metal são produzidas através de laminador a frio, que é um processo de formação onde a chapa tem uma redução de até 90% de sua espessura original. As lâminas são produzidas a partir da madeira, por isso têm uma limitação de comprimento (Callister, 2008).

O núcleo tem uma função estrutural fundamental, portanto, fornece um suporte contínuo para as faces. Além disso, ele deve possuir resistência suficiente para suportar esforços de cisalhamento transversal e também ser espessa o suficiente para resistir à flambagem do painel. Um dos tipos mais populares é a estrutura central de uma colmeia, onde as folhas finas que foram moldadas e coladas umas às outras após a cura resultam em células hexagonais interconectadas, tendo seus eixos orientados perpendicularmente aos planos das faces. Geralmente este tipo de núcleo é fabricado em liga de alumínio ou aramida [Callister, 2008].

O material adesivo é escolhido de acordo com o tipo de material de ligação e no processo de fabricação podem ser usados dois tipos de materiais para este fim: adesivos à base de solvente e adesivos formados por dois componentes. O primeiro tipo de adesivo é um solvente aplicado em ambas as superfícies. Após um curto período de secagem, as superfícies são pressionadas juntas. Os materiais adesivos, se apropriado, têm uma boa aderência inicial e seu tempo de endurecimento pode ser reduzido aplicando-se ligeira pressão e temperatura. Este tipo de material adesivo tem a vantagem de ser facilmente manejável, com a desvantagem de que a posição das camadas não pode ser corrigida. O outro tipo de material consiste em adesivos formado por dois componentes à base de epóxi ou poliuretano, sendo

misturados no local de aplicação. Após um certo período de tempo, os componentes reagem e rapidamente endurecem (Strong, 2007).

Para a realização deste trabalho, o painel tipo sanduíche a ser utilizado pode ser visto na Fig.2, abaixo, eles foram fabricados com lâminas de liga de alumínio 2024 T3 e núcleo de alumínio 5056 H191. No entanto, folhas para a fabricação do núcleo foram coladas de forma intercalada e após o período de cicatrização, o núcleo inteiro foi expandido por ação mecânica resultando na colmeia.

**Figure 2**. Vista frontal do Estrutura Honeycomb utilizado

**Teste Não-destrutivo**

Os ensaios não destrutivos (END) são técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos sem danificá-los, sendo realizados nas etapas de fabricação, construção, instalação e manutenção. Os END estão entre as principais ferramentas de controle de qualidade de materiais e produtos e são amplamente utilizados nas áreas de petróleo / petroquímica, química, aeroespacial, siderúrgica, eletromecânica e marinha. O END inclui métodos capazes de fornecer informações sobre o conteúdo de um defeito de determinado produto, características tecnológicas do material, ou da degradação, devido ao uso, através do monitoramento de seus componentes, equipamentos e estruturas, que podem causar danos imperceptíveis. Existem várias técnicas de END a serem utilizadas como emissão acústica, ultrassom, partículas magnéticas, líquido penetrante, raios X e ensaios de corrente parasita. Para o presente texto, utilizar a técnica de emissão acústica realizada utilizando o software Sonelastic ®.

Tecnicamente, o Software Sonelastic ® consiste em um analisador de vibração transitório, que extrai a frequência e taxa de atenuação para o cálculo do amortecimento.

Na aplicação pretendida, o software identifica quais são as frequências de vibração e seu amortecimento, processando a resposta acústica do corpo de prova, essa resposta induzida por uma excitação mecânica por impulso (que produz uma ligeira protuberância na superfície do corpo). Para realizar tal tarefa, o Software Sonelastic ® possui um avançado sistema computacional e de programação que utiliza ferramentas matemáticas nos cálculos dos módulos de amortecimento e elasticidade, de acordo com a norma ASTM E-1876 e correlacionados. [ATCP].

**Início do Teste**

O teste de flexão de três pontos consiste em sujeitar o corpo a provar uma carga que tende a flexioná-lo para deformá-lo plasticamente. Este teste permite obter várias informações sobre o material e sobre o teste realizado, como a carga máxima aplicada, o módulo elástico, a força e o módulo de elasticidade do material. O módulo de elasticidade é uma propriedade específica de cada metal que determina a capacidade do material de se deformar elasticamente.

O resultado corresponde à transição entre a deformação elástica e plástica. Ou seja, o resultado é a tensão máxima durante o período. Uma queda súbita da carga que representa o início da deformação plástica segue essa tensão. Depois disso, a análise da curva e o valor obtido de tensão são equivalentes ao limite inferior do fluxo. Tais resultados não dependem apenas do material, mas também de outros fatores, como a geometria e as condições do corpo de prova.

**Característica do Corpo de Prova**

Neste trabalho foi utilizado o painel de colmeia com as especificações abaixo:

**Table 1.** Mechanical Specifications of the Honeycomb Sandwich Panel. (ALCOA e HexWeb)

| **Properties** | **2024 T3** | **5056 H191** |
|---|---|---|
| **Densidade, g/cm$^3$** | 2.78 | 2.64 |
| ***Tensile Strengt*, MPa** | 483 | 450 |
| ***Yield strength*, MPa** | 345 | 435 |

| | | |
|---|---|---|
| **Modulo de Elasticidade, GPa** | 73.1 | 72 |

## METODOLOGIA

### Análise para a Deflexão

Através das equações para a deflexão do feixe disponível no livro do Bitzer e depois de tomar uma amostra, usando as dimensões desta para ser uma aproximação das propriedades mecânicas usando estas equações para estimar os valores esperados para a deflexão. Com base nessas equações, foram criadas tabelas no Excel para facilitar o cálculo e estimar os valores para cada uma das amostras.

Com a aproximação da viga-R e ASTM C 393 foi possível calcular a flecha máxima (deslocamento). Por cálculos usando o software Digimat® HC do MSC para calcular a deformação do feixe por elementos finitos, obter valores próximos às equações analíticas. Isso foi importante para corroborar a análise analítica.

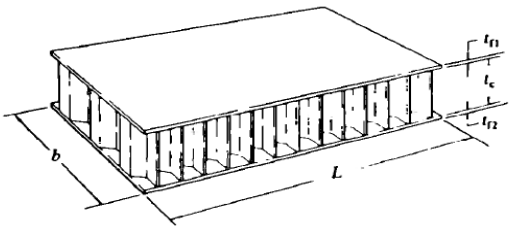



**Figure 3.** Estrutura do Estrutura Honeycomb (Bitzer, 1997)

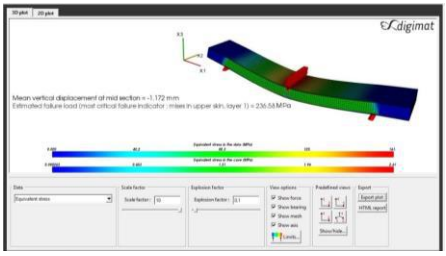



**Figure 4.**Tensão estimada obtida através software Digimat HC por MSC

### Análise *Sonelastic*

A análise utilizando o software Sonelastic ® foi realizada com a seguinte dinâmica, primeiro dividir as 10 amostras para cada espessura (10 mm, 15 mm, 30 mm e 40 mm) a serem digitalizadas, estipulou-se o número de 5 testes para cada amostra.

Os sistemas Sonelastic ® são compostos por:

- Suporte mecânico, com ajustes para diferentes geometrias de amostras (barras, cilindros, placas, discos e anéis);
- Sistema de excitação por impacto Sonelastic FDI;
- Captura Acústica para a aquisição da resposta acústica emitida.
- Software -Sonelastic que é responsável pelo processamento de valores capturados e frequência com base nesses valores e equações pré-programadas para estimar as propriedades mecânicas das amostras.
- Computador com potência de processamento suficiente.

As soluções *Sonelastic*® são adequadas para ambientes industriais e laboratoriais. A faixa de frequência mensurável vai de 100 Hz a 100 kHz, dependendo da versão utilizada e do captador acústico, permitindo a caracterização de qualquer material rígido. (ATCP – Manual)

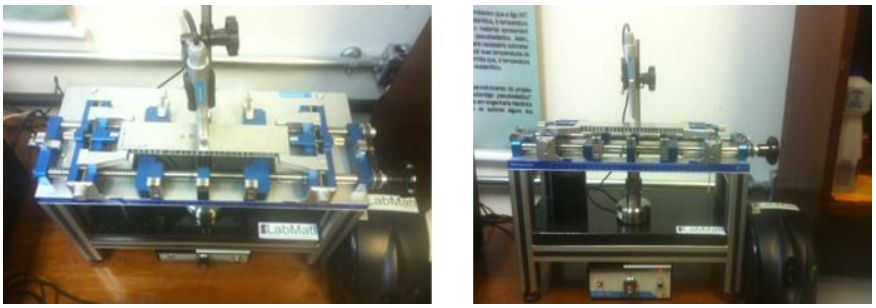


**Figure 5.**a) O corpo de prova repousa sobre o suporte. b) Corpo de prova colocado e excitado, sistema de captação sonora

O procedimento de teste consiste basicamente em 5 passos, inicialização do software, posicionamento do corpo de prova no suporte, teste de amostra de referência (foi utilizado um cilindro de alumínio com propriedades bem definidas para verificar a plausibilidade dos valores obtidos), análise do resultados fornecidos pelo software e, finalmente, exportar os valores obtidos.

Com isto, foram utilizados os valores obtidos com o *Sonelastic*® para avaliar a deflexão. Para o teste das amostras foi da mesma forma, como mencionado anteriormente, neste texto, a fim de condensar os resultados foi escolhido quatro amostras, duas com 10 mm de espessura, e dois foram de 15 mm e com base nessas amostras será feita a análise e comparação de resultados.

**Tabela 2.** Resultados obtidos usando *Sonelastic® system*.

| **Amostras** | **Direção** | **E [GPa]** | **G [GPa]** | **Carga [N]** | **Momento de Inercia [m4]** | **Comprimento[m]** | **Deflecção Δ [mm]** | **± Δ [mm]** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1.10** | L | 10,76 | 3,81 | 400 | 3,22E-09 | 0,15 | 0,81 | 0,04 |
| **2.10** | W | 9,36 | 3,75 | 400 | 3,25E-09 | 0,15 | 0,92 | 0,06 |
| **1.15** | L | 6,27 | 1,71 | 400 | 1,09E-08 | 0,15 | 0,41 | 0,02 |
| **2.15** | W | 7,00 | 2,16 | 400 | 1,09E-08 | 0,15 | 0,37 | 0,02 |

**Início do teste**

O teste foi realizado de acordo com o padrão C393 (Método de Teste Padrão para Propriedades de Cisalhamento da Construção do Núcleo Sanduíche por Flexão de Feixe).

A distância do espaço entre os braços de apoio é de 150 mm, a distância dos suportes até o final do corpo de prova é de 25 mm em cada lado e os suportes têm um diâmetro de 10 mm. A carga crescente foi utilizada com valor inicial de 0 kN e uma taxa de deformação de 1 mm / min.

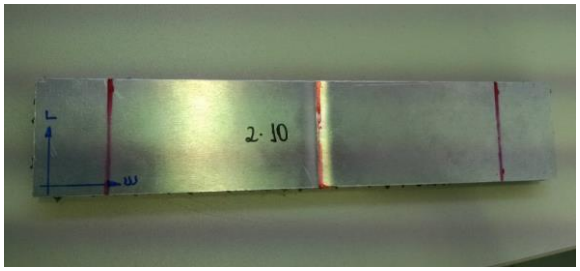



**Figure 6.**Corpo de prova tipo 2

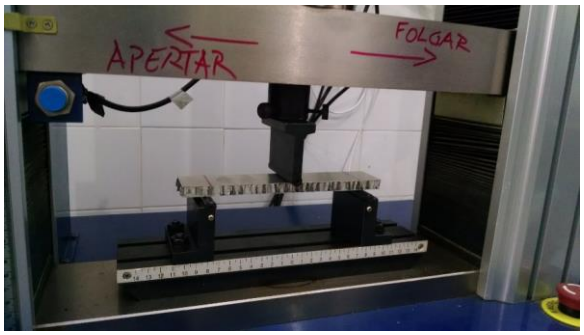



**Figure 7.**Foto do teste realizado

A diferença obtida no módulo de elasticidade e resistência à tensão pode ser atribuída provavelmente à direção da colmeia. Vale ressaltar que os espécimes possuem diferenças mínimas em seu tamanho, minimizando o erro gerado por espécimes com diferenças consideráveis em suas medidas.

Abaixo segue a imagem que ilustra o esquemático do ensaio de três pontos.

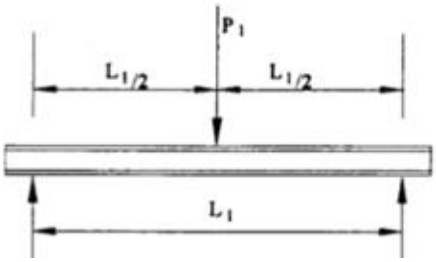



**Figura 8.** Ilustração esquemática do ensaio de três pontos

Abaixo temos a figura que ilustra a formulação matemática que é utilizada como referência para o ensaio à flexão de três pontos (Bitzer, 1997). Onde "D" e "U" representam, respectivamente, a rigidez à flexão do painel e a rigidez ao cisalhamento. E "P" representa a carga que será aplicada, L é a distância máxima entre os apoios, "b" largura, "d" comprimento e "c" espessura.

| | *Tensão de cisalhamento no núcleo honeycomb* | *Tensão normal nas placas inferior e superior* | *Deflexão ao cisalhamento* | *Deflexão à flexão* |
|---|---|---|---|---|
| Ensaio três pontos | $\tau = \frac{P}{(d+c)b}$ | $\sigma = \frac{PL}{2t(d+c)b}$ | $\frac{PL}{4U}$ | $\frac{PL^3}{48D}$ |

**Figura 9.** Formulação matemática para o ensaio de três pontos

**Figure 10.** Como deve ficar o corpo de prova após o teste

## RESULTADOS

Considerando os estudos para realizar este trabalho, bem como através da análise dos testes realizados, a comparação dos valores de flexão entre os tipos de ensaios completamente naturais. De acordo com as tabelas e gráficos a seguir onde estão os valores obtidos para a deflexão através de alguns métodos, que têm seus resultados mostrado a baixo. Os valores apresentados observaram a proximidade dos valores obtidos pelos diversos métodos.

Os resultados no equipamento *Sonelastic* ® da análise que foi realizada com 10 amostras para cada espessura: 10 mm, 15mm, 30mm e 40mm (corpos de prova doados), e como o ensaio é suscetível a interferências de origem acústica, estipulou-se o número de 5 testes para cada amostra com descarte daqueles que apresentassem discrepâncias

| Peças | Direção | Mas. [g] | Esp. [mm] | Comp. [mm] | Larg. [mm] | Em [GPa] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.10 | L | 19.0 | 9.90 | 199.65 | 39.77 | 10.74 |
| 2.10 | W | 18.0 | 9.93 | 199.55 | 39.73 | 9.41 |
| 3.10 | L | 18.0 | 9.93 | 200.00 | 39.78 | 10.10 |
| 4.10 | W | 18.3 | 9.93 | 199.90 | 39.78 | 9.48 |
| 5.10 | L | 19.3 | 9.93 | 199.55 | 39.82 | 10.84 |
| 6.10 | W | 19.0 | 9.88 | 199.90 | 39.80 | 10.19 |
| 7.10 | L | 20.0 | 9.93 | 199.95 | 39.47 | 11.19 |
| 8.10 | W | 19.7 | 9.88 | 199.80 | 39.73 | 10.21 |
| 9.10 | W | 19.0 | 9.87 | 199.75 | 39.78 | 10.18 |
| 10.10 | L | 19.0 | 9.87 | 200.05 | 39.75 | 10.86 |

| Peças | Direção | Mas. [g] | Esp. [mm] | Comp. [mm] | Larg. [mm] | Em [GPa] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.15 | L | 23.3 | 14.83 | 199.75 | 39.90 | 6.26 |
| 2.15 | W | 23.0 | 14.87 | 199.95 | 39.82 | 7.01 |
| 3.15 | L | 23.3 | 14.90 | 200.20 | 39.90 | 6.49 |
| 4.15 | W | 23.0 | 14.80 | 199.95 | 39.87 | 6.21 |
| 5.15 | L | 23.3 | 14.90 | 200.35 | 39.65 | 7.07 |
| 6.15 | W | 23.3 | 14.90 | 200.15 | 39.83 | 6.90 |
| 7.15 | L | 23.3 | 14.90 | 199.88 | 39.88 | 6.03 |
| 8.15 | W | 23.3 | 14.90 | 199.80 | 39.67 | 6.75 |
| 9.15 | W | 23.7 | 14.88 | 199.65 | 39.85 | 6.35 |
| 10.15 | L | 23.0 | 14.93 | 199.78 | 39.77 | 6.81 |

| Peças | Direção | Mas. [g] | Esp. [mm] | Comp. [mm] | Larg. [mm] | Em [GPa] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.30 | L | 37.7 | 30.00 | 200.00 | 59.80 | 2.78 |
| 2.30 | W | 38.3 | 30.00 | 200.20 | 59.80 | 2.54 |
| 3.30 | L | 38.3 | 30.00 | 200.10 | 59.75 | 2.88 |
| 4.30 | W | 38.0 | 29.90 | 200.10 | 59.65 | 2.59 |
| 5.30 | L | 40.0 | 29.95 | 200.00 | 59.80 | 2.99 |
| 6.30 | L | 38.0 | 30.00 | 200.00 | 59.80 | 2.82 |
| 7.30 | W | 38.0 | 30.10 | 199.70 | 59.75 | 2.30 |
| 8.30 | L | 38.7 | 30.00 | 200.30 | 59.80 | 2.91 |
| 9.30 | W | 38.0 | 29.90 | 199.90 | 59.65 | 2.44 |
| 10.30 | W | 38.7 | 29.90 | 200.00 | 59.65 | 2.53 |

| Peças | Direção | Mas. [g] | Esp. [mm] | Comp. [mm] | Larg. [mm] | Em [GPa] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.40 | W | 83.0 | 40.00 | 199.90 | 74.70 | 1.77 |
| 2.40 | L | 83.3 | 40.00 | 199.85 | 74.60 | 3.12 |
| 3.40 | W | 86.0 | 40.00 | 199.80 | 74.55 | 2.46 |
| 4.40 | W | 86.0 | 40.00 | 199.40 | 74.65 | 2.33 |
| 5.40 | W | 85.0 | 40.00 | 199.65 | 74.70 | 2.26 |
| 6.40 | W | 84.7 | 40.00 | 199.75 | 74.65 | 2.27 |
| 7.40 | L | 82.7 | 40.00 | 199.60 | 74.90 | 2.79 |
| 8.40 | L | 82.7 | 40.05 | 199.75 | 74.60 | 3.17 |
| 9.40 | L | 84.7 | 40.00 | 199.65 | 74.40 | 3.35 |
| 10.40 | L | 85.3 | 40.00 | 199.90 | 74.40 | 3.53 |

**Figura 11.** Resultado dos testes no Sonelastic

Resultado do ensaio de Flexão de três pontos colocados no quadro de viga. A figura 7 ilustra a forma que o teste foi realizado.

- Carregamento máximo de 400N (correspondente ao carregamento da prensa)
- Máximo valor de cortante: 200 N
- Máximo valor de momento: (P/2) x ($L_{entre\ apoios}$ /2) = 200 x 0,075 = 15 N.m

**Tabela 3.** Resultado do início dos testes.

| **Amostra** | **Linha** | **Carga máxima (kN)** | **Deformaçã Máxima (mm)** |
|---|---|---|---|
| 1.10L | Vermelha | 150,00 | 1.08 |
| 2.10W | Amarela | 150,00 | 1.48 |

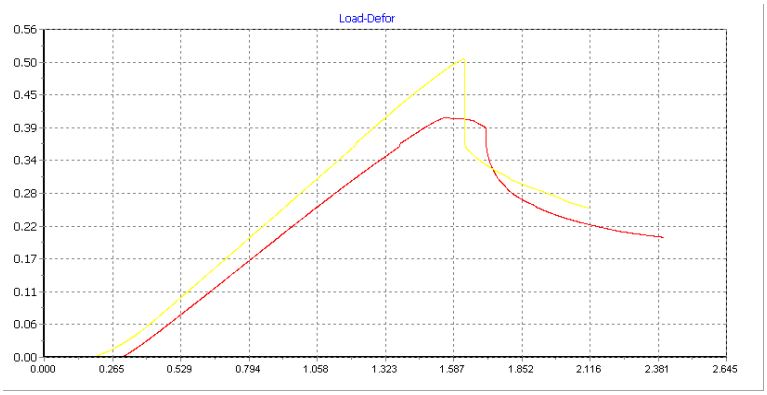



**Figure 12.** Carga[KN] x Deformação[mm] do corpo de prova

| Peças | Direção | Em [GPa] | P [N] | I [m4] | L [m] | delta [mm] | Er. delta [mm] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.10 | L | 10.74 | 400 | 3.22E-09 | 0.150 | 0.81 | 0.04 |
| 2.10 | W | 9.41 | 400 | 3.25E-09 | 0.150 | 0.92 | 0.06 |
| 1.15 | L | 6.26 | 400 | 1.09E-08 | 0.150 | 0.41 | 0.02 |
| 2.15 | W | 7.01 | 400 | 1.09E-08 | 0.150 | 0.37 | 0.02 |

**Figura 13.** Resultado na Viga Uniforme pelo *Sonelastic*

| Peças | Direção | P [N] | L [mm] | D [N mm2] | G [MPa] | U [N] | delta [mm] | t [mm] | Talc [kPa] | Sigf [MPa] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.10 | L | 400 | 150 | 40884316 | 221 | 88341 | 0.86 | 0.3 | 516 | 129 |
| 2.10 | W | 400 | 150 | 40884316 | 103 | 41410 | 1.05 | 0.3 | 516 | 129 |
| 1.15 | L | 400 | 150 | 93879286 | 221 | 132439 | 0.41 | 0.3 | 340 | 85 |
| 2.15 | W | 400 | 150 | 93879286 | 103 | 62081 | 0.54 | 0.3 | 340 | 85 |

**Figura 14.** Resultado pela Norma ASTM C393

| Peças | Direção | D [N m2] | Gc [Pa] | P [N] | L [m] | delta [mm] | M [N m] | V [N] | Talc [kPa] | Sigf [MPa] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.10 | L | 46 | 220640000 | 400 | 0.15 | 0.79 | 15 | 200 | 516 | 129 |
| 2.10 | W | 46 | 103425000 | 400 | 0.15 | 0.99 | 15 | 200 | 516 | 129 |
| 1.15 | L | 105 | 220640000 | 400 | 0.15 | 0.38 | 15 | 200 | 340 | 85 |
| 2.15 | W | 105 | 103425000 | 400 | 0.15 | 0.51 | 15 | 200 | 340 | 85 |

**Figura 15.** Resultado pela aproximação em Viga em I

**Tabela 4.** Tabela com os resultados Comparativos

| **Painéis** | **Deflexão[mm] Viga em I** | **Deflexão [mm] ASTM C393** | **Deflexão [mm] Viga unif. Sonelastic** | **Digimat** |
|---|---|---|---|---|
| **1-10 mm L** | 0.79 | 0.86 | 0.81 | 0.94 |
| **2-10 mm W** | 0.99 | 1.05 | 0.92 | 1.06 |
| **1-15 mm L** | 0.38 | 0.41 | 0.41 | 0.46 |
| **2-15 mm W** | 0.51 | 0.54 | 0.37 | 0.55 |

## CONCLUSÃO

As análises se mostraram satisfatória, pois como já era esperado o material tem sua resistência variando com o sentido da aplicação da carga. Sendo que na maioria dos casos a deflexão é maior quando a carga é aplicada nos painéis com a orientação W, isso tanto para os painéis de 10mm quanto para os de 15mm. Assim, o objetivo do trabalho que era caracterizar as propriedades do painel *honeycomb* quanto a sua deflexão foi atingido.

O estudo apresentado possibilita que a Universidade de Brasília se envolva nessa área de pesquisa academicamente possibilitando o desenvolvimento tecnológico em materiais compósitos do Brasil. Elevando desse modo a consolidar a indústria espacial brasileira.

Novas metodologias podem ser aplicadas para se aprofundar detalhadamente nesses resultados. Por exemplo, desenvolver uma metodologia numérica, utilizando o ANSYS. Outros testes podem ser feitos para comparar os resultados da modelagem da plasticidade após o processo de cura, com os dados do processo de fabricação a serem fornecidos.

**AGRADECIMENTOS**

Os mais sinceros agradecimentos ao Professor Manuel Nascimento Dias Barcelos Júnior pelas contribuições determinantes para o sucesso do trabalho.

**REFERÊNCIAS**

Akovali. G, and N. Uyanik, Handbook of Composite Fabrication, Shawbury, Shrewsbury, Shropshire SY4 4NR, UK, Rapra Technology Limited, (2001).

ALCOA - Alloy 2024 sheet and plate excellent fatigue properties–consistent performance.

Almeida, M. I. A.; Comportamento estrutural de painéis sanduíche compósitos para aplicações na indústria da construção." Outubro de 2009. Disponível em <http://fabricacaodecompositos.blogspot.com.br/> acesso em: 06 de outubro de 2014.

ATCP Engenharia Física – Manual de Instalação e Operação Software Sonelastic.: São Carlos – Brasil: Disponível em <http://www.atcp.com.br>.

ATCP Engenharia Física - Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização: classificação e métodos de determinação - São Carlos – Brasil: Disponível em <http://www.atcp.com.br>.

ASTM C393 – Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Construction by Beam Flexure.

Beer, F.P. e Johnston, E.R.. Resistência dos Materiais, 4.º Ed., Makron Books.

Bitzer. T. Honeycomb Technology: Material, Design, Manufacturing, applications and Tests. 1. Ed., Dublin – CA, USA. 1997. Springer – Science + Business Media Dordrecht.

Callister JR, W. D., 2008, Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução, 5 ed., Rio de Janeiro, LTC.

HexWeb - Honeycomb Attributes and Properties – 1999

Strong. A.B, Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications. Society of Manufacturing Engineers, 2nd edition, 2007.

**DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE**

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

**ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO**

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
( X ) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

**XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 27 à 31 de agosto de 2018**

**– Brasília, DF**

# ANÁLISE MECÂNICA DE ABSORVEDORES DE ENERGIA HÍBRIDOS - AÇO E FIBRA DE CARBONO

**Tulyane Migotto dos Santos; Rita de Cássia Silva; Alessandro Borges de Souza Oliveira**
Universidade de Brasília - Faculdade Gama
St. Leste Projeção A - Gama Leste, Brasília – DF, 7244-240
tulymigotto@gmail.com, ritasilva.fga.unb@gmail.com, abso.faculdadeunbgama@gmail.com

**RESUMO:** Vários trabalhos da literatura científica investigam o comportamento de tubos de seção circular ou quadrada sob a condição de absorvedores de energia cinética. De fato, esses absorvedores são considerados itens de Segurança Passiva, ou seja, equipamentos que minimizam os danos e protegem os ocupantes dos veículos, em caso de acidente. Uma das maneiras de aumentar a eficiência de absorção da energia do impacto é utilizar tubos híbridos, em que o tubo de aço de seção vazada com paredes finas seja revestido de material compósito. Nesse sentido, o presente trabalho tem o intuito de avaliar o laminado de fibra de carbono unidirecional (±90º, 0º, ±90º) instalados em tubos vazados quadrados de paredes finas; esse laminado refere-se ao layout 1T1L1T que, segundo a nomenclatura apresentada, corresponde à direção transversal (T) e longitudinal (L) da fibra de acordo com a carga aplicada ao tubo. Com a realização do trabalho, obteve-se um aumento de 23% na absorção de energia e 20% na força de pico ao utilizar fibra de carbono associada ao aço, tais resultados validam a utilização de material compósito em absorvedores de energia e uma possível redução de área do crash box, sem afetar a capacidade de absorver energia da estrutura.

**Palavras-Chave:** Absorvedor de energia, fibra de carbono, impacto frontal

***ABSTRACT:*** Several papers in the scientific literature investigate the behavior of circular or square section tubes under the condition of kinetic energy absorbers. In fact, these absorbers are considered passive safety items, which are equipment that minimizes damage and protects occupants of vehicles in case of an accident. Several papers in the scientific literature investigate the behavior of circular or square section tubes under the condition of kinetic energy absorbers. In fact, these absorbers are considered passive safety items, ie equipment that minimizes damage and protects occupants of vehicles in case of an accident. One of the ways to increase the impact energy absorption efficiency is to use hybrid tubes, where the thin walled sectioned steel pipe is coated with composite material. In this sense, the present work intends to evaluate the unidirectional carbon fiber laminate (± 90º, 0º, ± 90º) installed in square-walled thin-walled pipes; this laminate refers to the layout 1T1L1T which, according to the nomenclature presented, corresponds to the transverse (T) and longitudinal (L) direction of the fiber according to the load applied to the tube. With the work done, a 23% increase in energy absorption and a 20% increase in peak force were obtained by using carbon fiber associated with steel, these results validate the use of composite material in energy absorbers and a possible reduction of the area of the crash box, without affecting the capacity to absorb energy of the structure. With the accomplishment of the work, we obtained a 23% increase in energy absorption and 20% in the peak of force when using carbon fiber associated to steel; these results validate the use of composite material in energy absorbers and a possible area reduction of the impact box, without affecting the ability to absorb energy from the structure.

***Keywords:*** Energy absorber, carbon fiber, frontal impact

## INTRODUÇÃO

De acordo com o relatório sobre a segurança rodoviária feito pela Organização Mundial da Saúde – OMS (2015) cerca de 3.400 pessoas morre nas estradas do mundo todos os dias e outras dezenas de milhões são feridas ou adquirem uma deficiência física todo ano.

Para promover uma redução no número de vítimas de acidentes de trânsito em até 50% até o ano de 2020 a OMS (2010), em parceria com a Organização das Nações Unidas (ONU), lançou o plano de ação global "A Década de Ação pela Segurança no Trânsito 2011-2020", que define as etapas de melhoria da segurança veicular, com incentivos para implementação e regulamentação de tecnologias de proteção para os ocupantes, pedestres e ciclistas, execução e ampliação dos programas de avaliação dos automóveis e rigor na legislação veicular.

Os veículos são projetados para que sua estrutura seja capaz de absorver a máxima energia de impacto, transformando energia cinética em energia de deformação plástica, para que a energia dissipada até a cabine não

comprometa a integridade dos ocupantes. Em determinadas colisões, no entanto, essa absorção proveniente da estrutura não é satisfatória, visto que a consequência é o óbito ou lesões à vida dos seus ocupantes.

Para atender as exigências dos consumidores e as necessidades do mercado, seja em respeito às normas legislativas veiculares, à integridade dos ocupantes ou ao meio ambiente, a Indústria Automotiva tem se empenhado em se manter competitiva, gerar novas tecnologias e fazer uso de materiais mais leves e eficientes, sem abrir mão da segurança veicular. Com isso foram desenvolvidos dispositivos de proteção passiva, como o *crash box*, que vem a ser um absorvedor de energia responsável por garantir a integridade física dos ocupantes em colisão.

O *crash box* é um dispositivo inserido na parte frontal do veículo, entre o chassi e o para-choque, em que a sua função é absorver o máximo da energia de impacto, de forma controlada e local, para que a energia dissipada para a estrutura do veículo seja minimizada e não atinja os ocupantes.

Diante do plano de ação global da OMS e ONU referenciado e a iminência em tornar o *crash box* um dispositivo veicular obrigatório, os estudos acerca da geometria, materiais e modelos para implementação em sua estrutura possibilita o desenvolvimento de componentes mais resistentes ao impacto. A possível diminuição da área reservada a esse dispositivo nos veículos, devido a inserção da proteção para pedestre (Global NCAP, 2015), torna necessário uma nova proposta para o *design* do *crash box* para garantir que o redimensionamento da estrutura não afete a capacidade e eficiência de absorção de energia da mesma.

Estruturas tubulares de paredes finas, sujeitas a carregamento compressivo axial, são projetadas para apresentarem modo de deformação por flambagem progressiva, que se caracteriza pela formação de lóbulos subsequentes, o qual define a capacidade de absorção de energia da estrutura. Os estudos se concentraram em utilizar ligas metálicas na sua fabricação, entretanto, materiais compósitos se tornaram uma nova opção na fabricação desses componentes devido a sua vantagem em relação à força/peso em comparação com as ligas metálicas.

Abramowicz e Jones (1984a, 1984b, 1986) e Abramowicz et al. (1992) apresentaram importantes contribuições para a área de absorvedores de energia a partir de extensos estudos em tubos de paredes finas de ligas metálicas sob esmagamento axial em condições estática e dinâmica, com seções quadradas e circulares, em que classificaram os modos de colapso e definiram, por modelagem matemática, os parâmetros de absorção de energia, sendo citados com recorrência em estudos referentes a absorvedores de energia.

Tarigopula et al (2005) define os parâmetros para análise da capacidade de absorção de energia de uma estrutura, sendo eles o material, a espessura e a velocidade do teste. O autor avaliou o desempenho de seções quadradas de aço submetidas a carregamento compressivo axial, em teste quase-estático, com diferentes espessuras e observou um aumento na força média e absorção de energia devido a um número maior de lóbulos formados, o que causou uma deformação maior.

Teles (2018) investiga a influência da espessura da parede da seção transversal nos indicadores de desempenho analisados em ensaio de esmagamento quase-estático, em que o absorvedor de energia que obteve melhor desempenho geral nos parâmetros avaliados em ensaio à compressão foi o de aço, com t = 1,6 mm, em que o aumento de 0,35 mm (28%) na espessura resultou em um aumento de 28% na energia absorvida, 24% na força máxima e 28% na força média, em comparação ao aço com espessura t = 1,25 mm.

Feraboli (2008) define os indicadores de desempenho necessários para analisar o comportamento de absorção de energia de uma estrutura sendo a força de pico, força média de esmagamento, eficiência de esmagamento e energia absorvida. Em Feraboli e Wade (2016), a força de pico é o ponto de carga máxima no diagrama força-deslocamento e representa o momento em que a falha se apresenta progressivamente na estrutura; em Zhu et al. (2017), é dito que a absorção de energia (EA) mede a energia de deformação total absorvida pela estrutura durante o processo de esmagamento e pode ser calculada pela área abaixo da curva força-deslocamento.

Os tubos compostos de polímero reforçado com fibra de carbono (CFRP) e metal combinam os benefícios da alta relação resistência/peso do compósito de fibra/resina e do mecanismo de colapso do metal, para formar um tubo composto com alta resistência e capacidade de absorção de energia (Bambach, 2010b).

Bambach e Elchalakani (2007) estudam os efeitos da adição do CFRP ao aço, a capacidade de absorção de energia e a influência da esbeltes e dos cantos como sendo iniciadores de colapso a partir de resultados obtidos experimentalmente e numericamente; analisam o comportamento à compressão axial de tubos compostos de metal e CFRP, utilizando dois layouts de matrizes diferentes de fibra de carbono, sendo uma camada colocada transversalmente com uma camada longitudinalmente, denominado 1T1L, e duas camadas transversalmente com duas camadas longitudinalmente denominadas 2T2L, em que a força de pico, força média e absorção de energia aumentaram consideravelmente após a inserção da fibra de carbono ao metal, assim como o layout 2T2T apresentou melhores resultados comparados ao 1T1L.

Bambach e Elchalakani (2007) e Kim et al. (2014) analisaram o efeito da adição de camadas de fibra de carbono aos absorvedores de energia, em que os indicadores de desempenho ao impacto foram melhorados diante do aumento da espessura e da presença de camada transversal no laminado

Kim et al. (2014) investigaram diversas combinações de laminado para avaliar os indicadores de desempenho e avaliaram que a adição de camadas na direção axial do carregamento resultou em um aumento na força de pico, assim como as amostras contendo as orientações transversal e longitudinal obtiveram maiores valores de energia específica e eficiência de esmagamento devido a existência de reforço nas duas direções.

A literatura referente à cerca de absorvedores de energia confeccionados com aço ou alumínio é vasta e possui trabalhos de pelo menos três décadas, entretanto, os trabalhos que utilizam material compósito na sua estrutura são mais recentes e ainda caminham para obter uma convergência de resultados, visto que muitos trabalhos apresentam formulações empíricas e adequadas apenas a casos específicos.

Todavia, é notório o avanço na Engenharia para desenvolver e buscar cada vez mais componentes de alta *performance* a partir de arranjos de novos materiais, dessa forma, Bambach e Elchalakani (2007), Bambach, Elchalakani e Zhao, (2009), Bambach, Elchalakani e Jama (2009a e 2009b) e Bambach (2010a e 2010b) apresentaram estudos referentes a adição de CFRP ao aço e obtiveram bons resultados na avaliação dos indicadores de desempenho. Utilizando-se dos trabalhos de Tarigopula et al. (2005) e Teles (2018), é proposto uma verificação dos resultados dos ensaios dos absorvedores de energia em aço em contrapartida aos que receberam reforço em fibra de carbono com o objetivo de avaliar a influência do material compósito nessas estruturas sujeitas a impacto.

Deste modo, o objeto de estudo deste trabalho é uma estrutura tubular de seção quadrada e paredes finas, reforçada externamente por um material compósito de matriz epóxi e reforço em fibra de carbono, sujeito à carga compressiva axial, com orientação de laminado de fibra de carbono unidirecional (±90º, 0º, ±90º), esse laminado refere- se ao layout 1T1L1T que, segundo a nomenclatura apresentada, corresponde à direção transversal (T) e longitudinal (L) da fibra de acordo com a carga aplicada ao tubo.

O objetivo em utilizar material híbrido (aço e fibra de carbono) em absorvedores de energia é obter melhores resultados nos indicadores de desempenhos estudados para que seja possível validar a proposta de redução das dimensões do crash box sem alterar sua capacidade de absorção, garantindo que a aplicação de material compósito a esse dispositivo seja relevante.

A partir das investigações literárias realizadas acerca do assunto, o layout de estudo é definido e uma análise é realizada a respeito do comportamento mecânico desse laminado.

## METODOLOGIA

### Confecção dos absorvedores de energia

Os absorvedores de energia (AEs) utilizados no trabalho foram confeccionadas em tubos de aço 1010, soldados e de seção quadrada, com comprimento inicial de 400mm, largura de 50mm e espessura de 1,6mm, fornecido pela empresa Pinheiro Ferragens e material compósito, sendo fibra de carbono e resina epóxi, com espessura do CFRP de 1mm, fornecido pela Barracuda Advanced Composites; as propriedades mecânicas do aço foram obtidas por ensaio à tração realizado por Teles (2018), em que a tensão de escoamento equivale a 150,2 MPa e o módulo de elasticidade a 171 GPa; os módulos de elasticidade da fibra de carbono (280 GPa) e da resina epóxi (3,7 GPa) foram obtidos pelo fabricante.

Os AEs foram fabricados por laminação manual, apresentando três camadas de tecido de fibra de carbono unidirecional revestindo externamente o aço, seguindo orientação (±90º, 0º, ±90º), que é denominada 1T1L1T. Cada camada de fibra de carbono possui uma sobreposição de 20 mm para evitar fraturas prematuras. Foram confeccionados três AEs para ensaio à compressão.

As amostras foram envolvidas por tecido peel-ply, filme perfurado e tecido absorvedor antes de serem colocados em bolsa de vácuo (fig. 1); o tempo em que a mostra permaneceu em bolsa de vácuo foi de 04h20m, o equivalente a duas vezes o tempo de gel time (tab. 1); aplicou-se o ciclo de cura recomendado pelo fabricante para que o laminado obtivesse os valores máximos de suas propriedades.

Figura 1: Corpo de prova em bolsa de vácuo

Tabela 1: Propriedades de trabalho da resina

| | |
|---|---|
| Gel time | 02h10min |
| Pós-cura | 24h: 21°C + 5h: 80°C |
| Pressão de vácuo | < 0,8 bar |

A relação de fibra-resina foi determinada pela análise da curva tensão-deformação de diversos materiais, em que a proporção 60/40 foi escolhida pelas propriedades serem compatíveis as do aço (Romariz, 2008), entretanto, obteve-se amostras com valores entre 57-60% de fibra de carbono para 43-40 % de resina. Os AEs confeccionados e pós-curados podem ser vistos na Fig. 2.

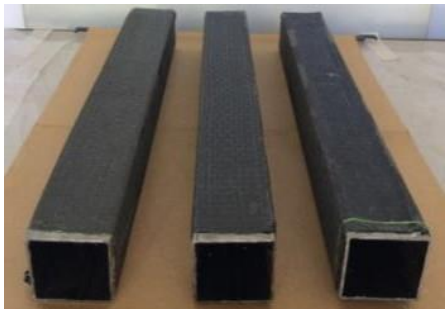


Figura 2: Corpo de prova finalizado

**Ensaios mecânicos**

Os ensaios de tração e compressão servem para caracterizar e definir o comportamento do material, para que os dados obtidos nos ensaios sejam processados e tais análises sejam efetivadas.

O ensaio à tração foi realizado por corpos de prova obtidos dos AEs confeccionados, recortados a jato d'água para evitar os efeitos de borda e testados em máquina universal de ensaios, INSTRON (modelo 8801), com velocidade teste de 2mm/min e de acordo com as normas ASTM E08 e D638. Definiu-se a tensão de escoamento e o módulo de elasticidade do CFRP sendo 199,9 MPa e 34,9 GPa, respectivamente.

Os resultados obtidos em ensaios à compressão, que serviram para análise do presente trabalho, também foram realizados na máquina de ensaios universal (Instron), com capacidade de 100 kN de força e o deslocamento máximo fixado em 150m (fig. 3 – a); devido a restrição da célula de carga, foi utilizado para teste uma máquina de ensaio desenvolvida na Universidade de Brasília, entretanto a mesma não obteve resultado satisfatório para o presente trabalho (fig. 3 – b), dessa forma, os dados foram obtidos preferencialmente pela máquina Instron e referem-se à força por deslocamento (FxD), os quais foram trabalhados posteriormente no software Matllab.

a) b)

Figura 3: AEs em ensaio à compressão
a) AE ensaiado em máquina universal – Instron; b) AE ensaiado sem sucesso

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos no teste à compressão são derivados de dois AEs com configuração 1T1L1T, os quais foram realizados com sucesso na INSTRON (8801), entretanto, o AE testado noutra máquina de ensaio (fig. 3 – b) não obteve sucesso devido a parâmetros de teste não controlados, no qual apresentou resultados irregulares e formação de lóbulos no confinamento apesar das restrições impostas externamente (do suporte de fixação) e internamente (tarugo de madeira).

Os resultados apresentados do absorvedor denominado AC-16 referem-se ao AE de aço, espessura t= 1,6mm, obtidos pelo trabalho de Teles (2018). As Figuras 4, 5 e 6 apresentam as curvas de FxD e as imagens dos absorvedores AE – 1, AE – 2 e AC – 16 após ensaio; após o processamento dos dados, uma comparação entre os AEs que utilizam material compósito (AE – 1 e 2) e o AE que utiliza apenas aço (AC – 16) foi realizada (Fig. 7).

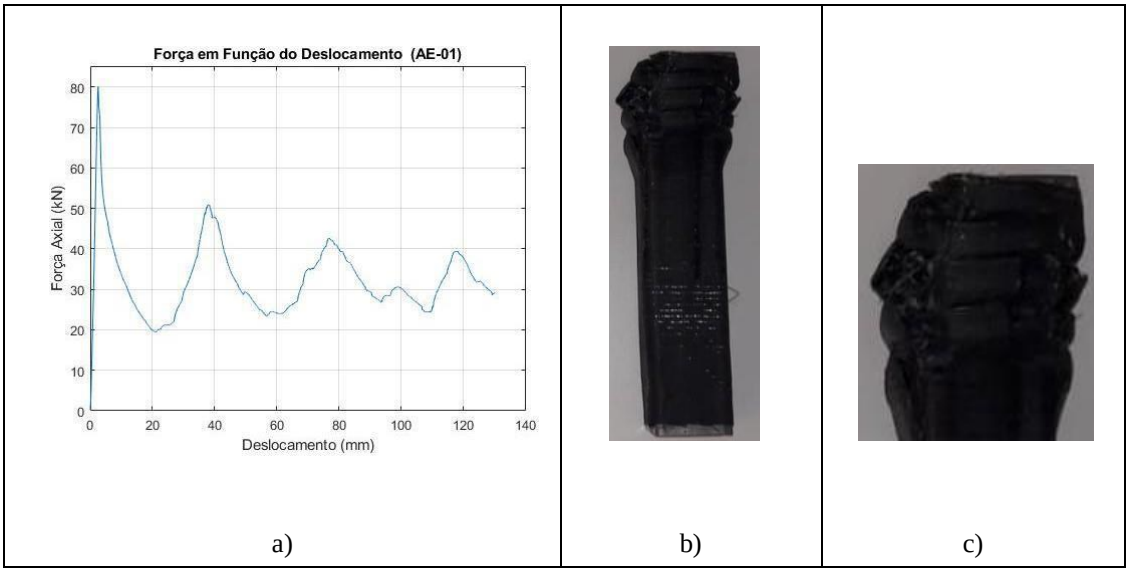



Figura 4: Resultado do ensaio de esmagamento do AE – 1.
a) Curva FxD, b) Absorvedor AE - 2 e c) Lóbulos formados

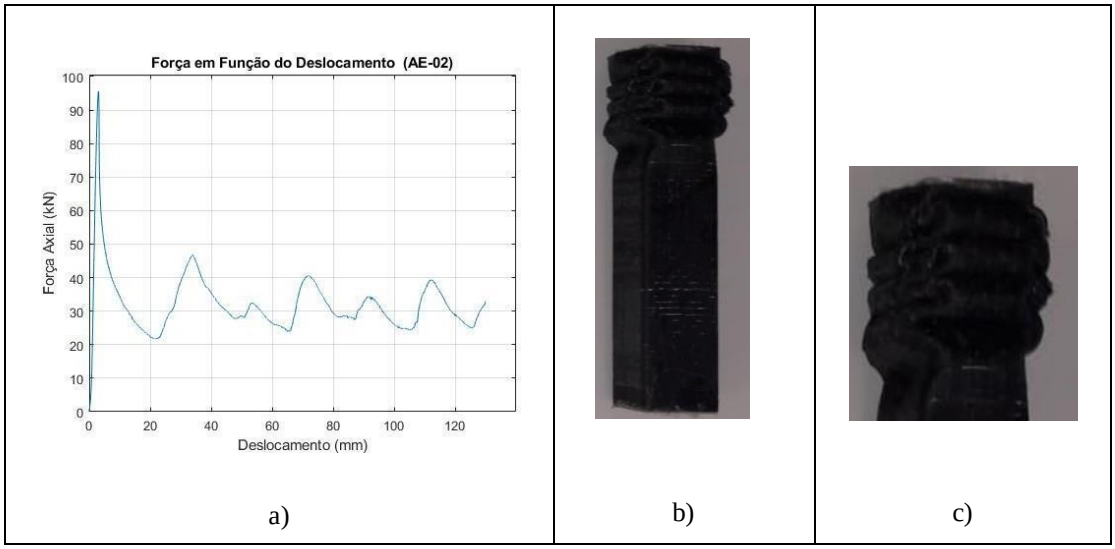



Figura 5: Resultado do ensaio de esmagamento do AE – 2.
a) Curva FxD, b) Absorvedor AE - 2 e c) Lóbulos formados

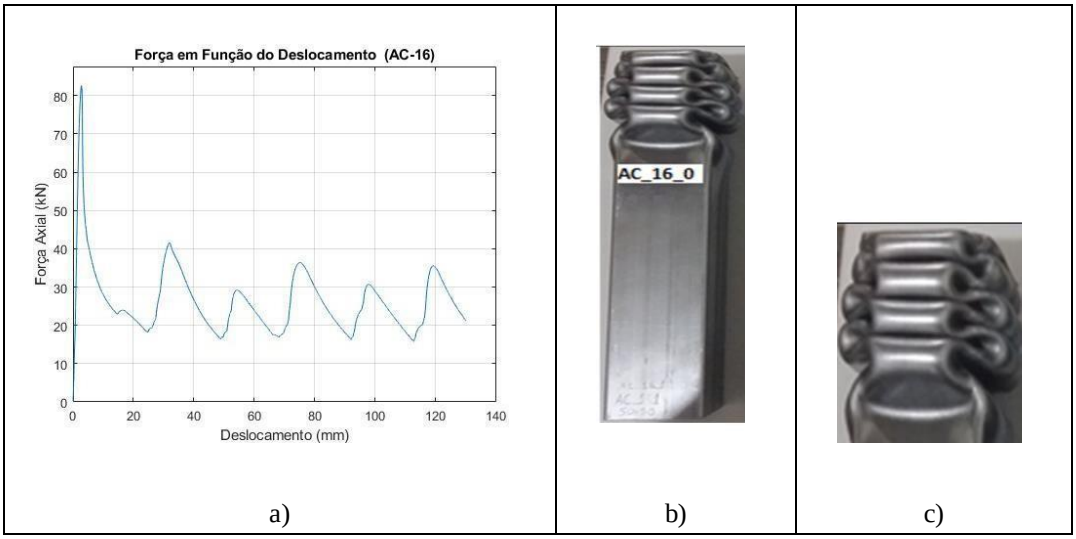



Figura 6: Resultado do ensaio de esmagamento do AC – 16.
a) Curva FxD, b) Absorvedor AC – 16 e c) Lóbulos formados

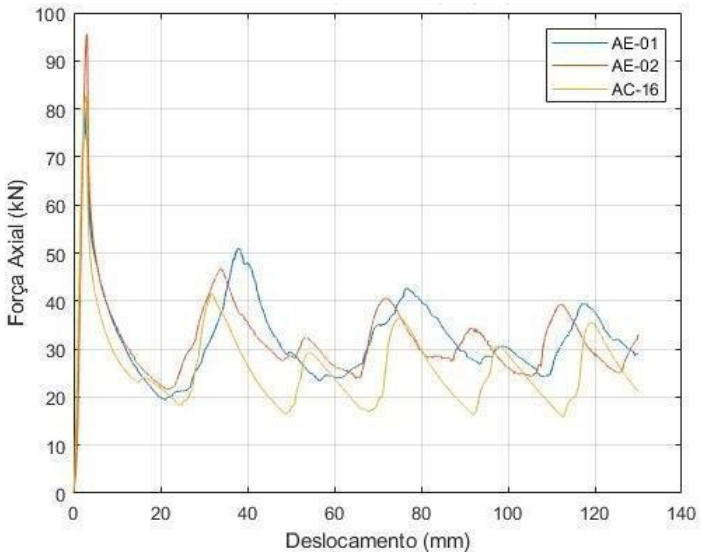



Figura 7: Comparativo entre os ensaios dos AEs

Na Figura 7, as curvas de força axial em função do deslocamento axial dos AEs foram sobrepostas para validar a utilização do material compósito associado ao aço, visto que as curvas de FxD dos AE -1 e 2 obtiveram valores superiores ao absorvedor AC – 16.

A partir do processamento dos dados determinou-se os valores para os indicadores de desempenho, sendo a absorção de energia (EA), absorção específica de energia (SEA), força de pico (PCF), força média (Pm) e eficiência de esmagamento (CFE). Os resultados se encontram na Tab. 2.

Tabela 2: Indicadores de desempenho de absorvedores de energia

| **Autor** | **CP** | **Layout** | **Espessura t (mm)** | **EA (kJ)** | **m (kg)** | **SEA (kJ/Kg)** | **PCF (kN)** | **Pm (kN)** | **CFE** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Autoria própria | AE - 1 | 1T1L1T | 0,84 | 4,19 | 1 | 4,19 | 80,21 | 32,23 | 2,49 |
| | AE - 2 | 1T1L1T | 0,9 | 4,12 | 1 | 4,12 | 95,6 | 32,01 | 2,99 |
| Teles (2018) | Aço_16 | --- | 1,6 | 3,41 | 0.907 | 3,76 | 82,6 | 26,2 | 3,14 |

O AE- 1 apresentou os maiores resultados para EA, SEA e Pm em comparação com o AE – 2 e o AC - 16; nota-se que a orientação na transversal se comporta como uma cinta, envolvendo as outras camadas e apresentando resistência a flexão. Por fim, houve um aumento de 20% na força de pico (PCF) e de 23% na absorção de energia com a adição de material compósito aos AEs.

## CONCLUSÃO

Por meio das análises apresentados nesse trabalho foi possível avaliar a nova configuração proposta (1T1L1T) e afirmar que a utilização de material compósito associado ao aço promove um aumento significante na capacidade de absorção de energia dessa estrutura, assim como valores superiores de força axial, a qual está relacionada com a formação dos lóbulos, que por sua vez determinam a absorção de energia, uma vez que a EA é medida pela área a baixo do gráfico FxD.

A respeito dos valores encontrados para força de pico, avalia-se a necessidade em projetar mecanismos para reduzir esses valores, uma vez que a PCF é a primeira força sentida pelo ocupante de um veículo em impacto, sendo fundamental que essa energia que é direcionada a cabine do veículo se transforme em energia de deformação antes de atingir os ocupantes, a fim de evitar danos à saúde ou o óbito; os mecanismos existentes para tal função são conhecidos como *tiggers* (janelas, furos ou ranhuras), que agem como facilitadores de esmagamento.

Todavia, o objetivo do presente trabalho foi concluído, sendo possível promover uma diminuição das dimensões do crash box ao adicionar material compósito a sua estrutura garantindo que a sua capacidade de absorção de energia não seja afetada, uma vez que o trabalho obteve bons resultados para os indicadores de desempenho; assim, verifica-se que a área de estudo está em crescente desenvolvimento, o que colabora para que novos trabalhos possam ser realizados a partir desse, visando novos materiais e geometria, para obtenção de melhores resultados.

## REFERÊNCIAS

Abramowicz, W; Jones, Norman. Dynamic axial crushing of square tubes. Int. J. Impact Engng. 2, 179-208 (1984-a).

Abramowicz, W; Jones, Norman. Dynamic axial crushing of circular tubes. Int. J. Impact Engng.2, Vol.2, 263-281, (1984-b).

Abramowicz W, Jones N. Dynamic progressive buckling of circular and square tubes. Int J Impact Eng 4, 243–70, (1986).

Abramowicz, W., Wierzbicki, T., Bhat, S.U. and Brodkin, D. (1992) Alexander revisited – a two folding elements model for progressive crushing of tubes.

Bambach M.R, Elchalakani M. Plastic mechanism analysis of steel SHS strengthened with CFRP underlarge axial deformation.Thin-WalledStruct 2007; 45(2):159–70.

Bambach, M.R., M. Elchalakani , X.L. Zhao. Composite steel–CFRP SHS tubes under axial impact. Composite Structures 87 (2009) 282–292.

Bambach, M.M; Jama H.H, Elchalakani, M. Static and dynamic axial crushing of spot-welded thin-walled composite steel–CFRP square tubes. International Journal of Impact Engineering 36 (2009) 1083–1094

Bambach, M.M; Jama H.H, Elchalakani, M. Axial capacity and design of thin-walled steel SHS strengthened with CFRP.Thin-Walled Struct. 2009; 47(10):1112–21.

Bambach, M.R. Axial capacity and crushing of thin-walled metal, fibre–epoxy and composite metal–fibre tubes. Thin-Walled Structures 48 (2010-a) 440–452.Bambach. M.R. Axial capacity and crushing behavior of metal–fiber square tubes – Steel, stainless steel and aluminum with CFRP. Composites: Part B 41 (2010) 550 -559.

Feraboli, Paolo. Development of a Corrugated Test Specimen for Composite Materials Energy Absorption. 2008

Feraboli, Paolo; Wade, Bonnie. Crushing Behavior of Laminated Composite Structural Elements: Experiment and LS-DYNA Simulation. 2016

Global NCAP. TRL - The potential for vehicle safety standards to prevent road deaths and injuries in Brazil. Richard Cuerden, Louise Lloyd, Caroline Wallbank and Matthias Seidl. 2015. Disponível em: http://www.globalncap.org/wp-content/uploads/2015/11/TRL_report.pdf. Acessado em: 05/09/2017

Kim, Hee Chul; Lee, Jung Ju; Shin, Dong Kil; Kwon, Jun Beom. Crashworthiness of aluminum/CFRP square hollow section beam under axial impact loading for crash box application. Composite Structures 112 (2014) 1–10

OMS. 2010 Global Plan for the Decade of Action for Road Safety 2011-2020 – OMS. Disponível em: http://www.who.int/roadsafety/decade_of_action/plan/en/. Acessado em: 16/09/2017.

OMS. 2015 Global Status Report On Road Safety 2015. Disponível em: http://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2015/en/. Acessado em: 15/09/2017.

Romariz, Luiz André. Dano em placas laminadas devido ao impacto a baixas velocidades. Dissertaçã ode Mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

Tarigopula. V, Langseth, M, O.S. Hopperstad, A.H. Clausen, Axial crushing of thin-walled high-strength steel sections, International. Journal of Impact Engineering, Volume 32, Issue 5, May 2006, Pages. 847-882, ISSN 0734-743X

Teles, José Carlos. Estudo do Desempenho de Absorvedores de Energia de Seção Quadrada: Análise Experimental e

Numérica. Dissertação (Mestrado). Departamento de Mecânica, Universidade de Brasília, 2018.
Zhu, Guohua; Sun, Guangyong; Yu, Hang, Li, Shunfeng; Li Qing. Energy absorption of metal, composite and metal/composite hybrid structures under oblique crushing loading. International Journal of Mechanical Sciences. 2017

**DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE**

Os autores são os únicos responsávelveis pelo material impresso contido neste artigo.

**ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO**

Assinalar aqui, com um X, a seção 'área de conhecimento do trabalho'.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(x) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 27 à 31 de agosto de 2018 – Brasília, DF

# Caracterização Mecânica de Materiais Utilizados em Prototipagem Rápida por Deposição de Material Fundido para Aplicação Aeroespacial

**Marcus Vinicius Barros da Silva, Manuel Nascimento Dias Barcelos Júnior**
Universidade de Brasília – Campus Gama
St. Leste Projeção A - Gama Leste, Brasília - DF, 72444-240
marcus.mvbs@gmail.com

**RESUMO:** A prototipagem rápida através da deposição de material fundido teve larga expansão com dispositivos que replicam grande parte de suas próprias peças, ampliando o uso e estudos em volta de projetos tridimensionais realizados a partir de modelagem em softwares de desenho assistido por computador. A construção do protótipo e caracterização mecânica são desenvolvidas neste trabalho visando agregar mais conhecimento sobre os materiais para aplicações em experimentos futuros. A caracterização mecânica determina as propriedades de um material no intuito de delimitar seu uso em certas aplicações. Os filamentos adotados para a prototipagem descritos neste estudo são o Ácido Polilático, Acrilonitrila Butadieno Estireno e o Politereftalato de Etileno Glicol. Os ensaios realizados na Universidade de Brasília foram os seguintes: tração, pêndulo de impacto izod, excitação por impulso e flexão, baseados na normatização ASTM e descritos no estudo com a finalidade de definir propriedades para o uso aeroespacial.

**Palavras-Chave:** Prototipagem Rápida, Deposição de Material Fundido, Caracterização Mecânica

***ABSTRACT:*** *Rapid prototyping through the fused deposition modeling has expanded rapidly with devices that replicate much of their own parts, expanding the use and studies around three-dimensional designs utilizing computer aided design software. The construction of the prototype and the mechanical characterization are developed in this work aiming to generate more knowledge about the materials for applications in future experiments. The mechanical characterization determines the properties of a material in order to delimit its use in certain applications. The filaments adopted for prototyping are Polylactic Acid, Acrylonitrile Butadiene Styrene and Ethylene Glycol Polyethylene Terephthalate. The tests carried out at the University of Brasilia were: traction, izod impact pendulum, impulse excitation and flexion, based on ASTM standardization and described in the study for the purpose of defining properties for aerospace use.*

***Keywords:*** *Rapid Prototyping, Fused Deposition Modeling, Mechanical Characterization*

## INTRODUÇÃO

A Prototipagem Rápida (PR), popularmente conhecida como impressão 3D, baseia-se na construção de um objeto a partir da modelagem virtual em três dimensões via programa de Desenho Computadorizado (ANTAS, 2007; KONZEN, 2015). A aplicação da prototipagem teve um foco inicial aplicado às indústrias aeronáutica e automobilística, entretanto a prototipagem tem se expandido para áreas diversas, como a biomedicina (ANTAS, 2007; LINO, 2003). Os processos de prototipagem rápida elaboram protótipos através da deposição de material em camadas, sendo este material com características específicas para atender os requisitos através das propriedades inerentes ao material. Dentre estes materiais são utilizados aços, cerâmicas, plásticos, papéis e outros (LAFRATTA & FERREIRA, 1998).

A aplicação de materiais plásticos na área aeroespacial agrega qualidade no produto desenvolvido como baixa massa e sua resistência ao fogo. Quando usado material plástico ao invés de outros materiais, há diversos quesitos que enfatizam o motivo do uso (ENSINGER, 2014):

- Redução de até 60% no peso quando comparado ao alumínio;
- Maior versatilidade de processos para plásticos em relação aos demais materiais;
- Maior liberdade no design dos componentes o que resulta na redução da produção e instalação;

A prototipagem rápida adotada para este trabalho é realizada em um equipamento de tecnologia FDM – *Fused Deposition Modeling*, que significa deposição de material fundido, consiste na deposição de material plástico camada por camada. Uma aplicação relevante, tendo em vista este procedimento, é relacionada a missões da NASA como o Mars Rover, apresentado na Fig. (1), que possui em torno de 70 peças de construção complexa por este método. Algumas das peças são integralmente de material Acrilonitrila Butadieno Estireno - ABS (YAGNIK, 2014).

Figura 1: Mars Rover

Ainda sobre o procedimento, a concepção das camadas no processo FDM inicia-se com a demarcação do contorno da seção transversal do protótipo. Este delineamento deve ser fechado fazendo com que os pontos de começo e conclusão do processo sejam simultâneos. Tendo esta etapa realizada, o preenchimento interno da peça inicia-se (LIMA, 2009).

Um material compósito de fibras possui uma estrutura que aparenta um modelo fabricado por FDM, pois como as fibras que se encontram em compósitos, os filamentos dispõem de alta resistência na direção axial, porém com uma menor firmeza nas regiões de junção entre filamentos e entre camadas. Os modelos construídos possuem característica anisotrópica (BELLINI & GÜÇERI, 2003). A anisotropia apresenta a particularidade de ter propriedades mecânicas distintas para cada eixo de construção, sendo este um dos aspectos mais relevantes no sistema de manufatura aditiva. Percebe-se com maior clareza a anisotropia no eixo de construção vertical, onde a estruturação do material agregado é mais frágil que nos outros dois eixos na mesma camada (VOLPATO *et al.*, 2007). Estes eixos de construção serão constatados na metodologia deste artigo.

Os filamentos plásticos, utilizados no procedimento FDM, possuem algumas características que devem ser compreendidas, como a relevância da união entre filamentos, pois esta pode ocorrer de duas maneiras, dentro das camadas, ocorrendo como adesão lateral entre filamentos e junção entre camadas, ou seja, conjunção entre camadas (GURRALA & REGALLA, 2014). A qualidade da adesão entre os filamentos é uma condição relevante quanto a integridade dos modelos a serem projetados, afetando diretamente as propriedades mecânicas do material (BELLEHUMEUR *et al.*, 2004). A aglutinação ocorre devido a energia térmica do material. A qualidade da união é aferida analisando o "pescoço" formado entre os filamentos com junção lateral e a propagação em escala molecular. A figura 2 enfatiza: (a) O contato superficial; (b) crescimento do pescoço; (c) Propagação em escala molecular (SUN *et al.*, 2008).

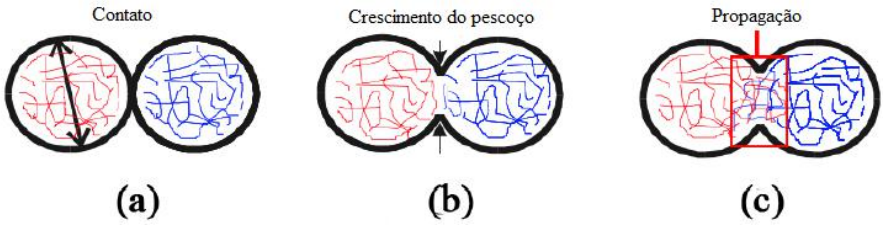



Figura 2: Forma de constituição na adesão de dois filamentos

Na deposição dos filamentos a temperatura na superfície está além da temperatura de transição vítrea, o que corrobora a eficiência de adesão entre filamentos. Portanto após a ejeção do material da extrusora, verifica-se o melhor momento de aglutinação do material (BELLEHUMEUR *et al.*, 2004).

Todos os materiais que são utilizados neste trabalho necessitam de um ambiente de estocagem selado com sílica gel, tendo em vista a higroscopia presente nos materiais. Esta propriedade se resume na característica de absorção de umidade pelo material.

No que se refere aos materiais adotados, o PLA, ou Ácido Poliláctico, é um polímero sintético que tem características consideráveis como excelentes propriedades mecânicas, possuindo biocompatibilidade e por ser um material biodegradável, assim como o fato deste material apresentar boa processabilidade térmica e não toxicidade (REZWAN *et al.*, 2006).

O ABS, ou Acrilonitrila Butadieno Estireno, são os três monômeros que formam o polímero ABS, sendo este um termoplástico derivado de petróleo com formação amorfo. Por este material possuir boas propriedades mecânicas,

ficou popular o uso na área industrial e doméstica (ALBUQUERQUE, 2014). O ABS porta uma peculiaridade de emitir gases nocivos, monóxido de carbono e cianeto de hidrogênio, quando aquecido para a impressão, porém devido à abundância do material, sua utilização se estende a várias áreas (AZIMI, 2016).

Por fim o PETG, Politereftalato de Etileno Glicol, é uma combinação durável de copolímeros, esta combinação do PET, já bem conhecido, é aglomerada com Glicol para uma durabilidade extra ao material. Este polímero possui a característica de ser mais flexível que o PLA e ABS, e mais macio. PETG para diversas aplicações terá uma característica, supostamente inquebrável, devido a sua flexibilidade e resistência. Este material possui a característica de baixo encolhimento resultando em baixo empenamento da peça, boa resistência a elementos químicos, a ácidos e também resistente a água, além de não emitir odor durante a impressão, diferentemente do ABS (3DLAB, 2018).

A *American Society for Testing and Materials* (ASTM *International*) padroniza ensaios destrutivos e não destrutivos, com a finalidade de uniformizar os testes para diferentes tipos de materiais evitando resultados incoerentes de medições para quem a adota, sendo todos os ensaios para determinação de propriedades mecânicas dos materiais embasados nesta padronização. Foram viabilizados para este estudo o uso das normas para caracterizações mecânicas de ensaio de excitação por impulso, ensaio de tração, ensaio através do pêndulo de impacto Izod e ensaio de flexão.

## METODOLOGIA

Os filamentos PLA, ABS e PETG foram adquiridos da fabricante 3D LAB para os testes de excitação por impulso, flexão, tração e impacto izod. Todos os filamentos possuem diâmetro de 1,75 mm e o bico extrusor de 0,4 mm. Para o experimento são utilizados os seguintes parâmetros da Tab. (1), para todos os testes, seguindo a recomendação da fabricante.

Tabela 1: Parâmetros seguidos na prototipagem

| **PARÂMETROS ADOTADOS PARA PROTOTIPAGEM** | | | |
|---|---|---|---|
| **Filamentos** | Temperatura de impressão | Velocidade de impressão | Temperatura da mesa |
| **PLA** | 220°C | 50 mm/s | 60°C |
| **ABS** | 240°C | 50 mm/s | 100°C |
| **PETG** | 245°C | 50 mm/s | 60°C |

O critério adotado no software Repetier foi de cem por cento de preenchimento com padrão de varredura 45° e -45°, por ser a configuração usual de referência encontrada nos softwares como padrão.

A taxa de fluxo teve como referência multiplicador igual a um, altura da camada de 0,25 milímetros da primeira e 0,20 milímetros para as camadas subsequentes até a última camada, concha perimetral de duas voltas por camada, o padrão de preenchimento retilíneo no preenchimento interno e externo, na superfície inferior e superior, tendo camada por camada o ponto de início alinhado, assim sendo cada camada é iniciada na mesma posição. Foram usadas quatro voltas nas peças na primeira camada, para dar mais adesão a mesa e evitar empenamento, sendo posteriormente retirada manualmente por estilete.

Os suportes sugeridos no software não foram usados, quando necessário suporte, como no caso das peças de construção vertical, foi construído suporte no software CAD junto a peça.

As peças possuem orientação, para facilitar a compreensão, como Y, X e Z, como foi realizado por (BAGSIK, SCHÖPPNER e KLEMP, 2010), referente as peças elaboradas no sentido chapado, horizontal e vertical, como abordado na Fig. (3).

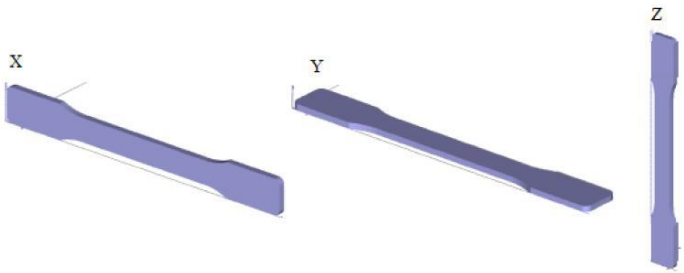



Figura 3: Orientações de impressão

As velocidades são diversas para cada situação na impressão, sendo a de 50 mm/s mencionada anteriormente como a velocidade principal, pois esta é utilizada como velocidade perimetral, e de preenchimento. A velocidade para

pequenos perímetros é de 40 mm/s, a volta mais externa do perímetro de setenta por cento da velocidade perimetral, preenchimento do topo nas últimas três camadas de 40 mm/s, pontes de 60 mm/s e velocidade para movimentos de deslocamento, onde não há impressão, de 120 mm/s. A primeira camada é inserida a 30 mm/s para gerar maior adesão do filamento a mesa, e evitar possíveis erros na impressão na parte mais crítica da fabricação.

A fabricante disponibiliza de uma tabela com valores referentes a um ensaio de tração realizada por ela, com os materiais PLA, ABS e PETG que são amplamente mencionadas posteriormente. Esta tabela da fabricante 3D LAB segue abaixo na Tab. (2).

Tabela 2: Propriedades dos materiais fornecidos pela fabricante 3D LAB

| **Propriedades da matéria prima - Grãos** | | | |
|---|---|---|---|
| **Propriedades** | **PLA** | **ABS** | **PETG** |
| Tensão de Escoamento | 66 [Mpa] | 38 [Mpa] | 51 [Mpa] |
| Módulo de Elasticidade | 4350 [Mpa] | 2200 [Mpa] | 2120 [Mpa] |
| **Resultados para ensaio de tração de corpos de prova impressos seguindo a norma D638** | | | |
| **Propriedades** | **PLA** | **ABS** | **PETG** |
| Tensão de Escoamento | 24,8 [Mpa] | 14,7 [Mpa] | 18,6 [Mpa] |
| Módulo de Elasticidade | 1896,0 [Mpa] | 1335,9 [Mpa] | 1067,9 [Mpa] |
| Tensão de Ruptura | 46 [Mpa] | 29 [Mpa] | 32,6 [Mpa] |

Todas as peças para os ensaios foram feitas em um software CAD, denominado CATIA, que então foram exportadas para outro software chamado Repetier como arquivo STL, que realizou o fatiamento da modelagem em pequenas porções geométricas para a leitura da impressora. Para a construção das peças a impressora escolhida foi a Graber i3, devido a maior facilidade e acessibilidade do equipamento no mercado.

**Procedimento experimental**

**Ensaio de excitação por impulso**

Para os ensaios de excitação por impulso, foram consideradas peças de PLA obedecendo o mínimo exigido pela norma de cinco corpos de prova para cada direção. As peças são mensuradas três vezes em comprimento, largura e espessura para cada peça em cada direção de impressão, sendo um paquímetro que possui resolução de 0,10 mm. Além disto, foram feitas três aferições de massa para cada peça, totalizando quarenta e cinco medições. Os módulos de elasticidade são obtidos de acordo com a vibração capitada e então é feita uma comparação entre os módulos das diferentes orientações. O equipamento é conectado a um coputador, que possui seu funcionamento atrelado a um *software* chamado Sonelastic.

As peças verticais demandaram de um apoio para não descolar da mesa durante a impressão, portanto quando impresso se tornava necessário retirar o suporte com estilete. Este suporte possui 0,6 mm de espessura e está presente na base e nas laterais da peça. Este mesmo padrão de suporte foi desenvolvido para as caracterizações de flexão, excitação por impulso, assim como para impacto Izod. Para a confecção das peças na impressora 3D, foi mantida a fabricante de filamentos 3D LAB. A seguir a Fig. (4) enaltece o procedimento do ensaio de excitação por impulso.

Figura 4: Metodologia simplificada de excitação por impulso

**Ensaio de tração**

Seguindo as normas da ASTM, foram fabricadas dez peças de PLA, ABS e PETG na direção vertical, horizontal e chapado, totalizando noventa peças, sendo aplicado o extensômetro na longitudinal e na transversal do corpo de prova, para obtenção do coeficiente de Poisson. Isto se dá ao fato de ser possível utilizar somente um extensômetro seguindo o mínimo exigido pela norma. Estas peças foram feitas com concentrador de tensão na região central, induzido com o uso de estilete com um arranhão simples feito no meio da peça, levando a uma provável ruptura na região. Foi necessário utilizar esta técnica nos corpos de prova, pois nos ensaios houve a aplicação de um extensômetro, equipamento que verifica a variação da extensão da peça com maior precisão, e desta maneira se torna necessário a fratura do material na região de avaliação do extensômetro.

Cada peça teve uma marcação com caneta a trinta milímetros da extremidade para facilitar a inserção na máquina e ter uma boa área de fixação com a garra no equipamento. Além desta marcação as peças verticais, devido a um padrão um pouco mais arredondado da extremidade, demandava um risco de leve na região de contato do extensômetro, devido a possíveis deslizes constatando assim erros na leitura da deformação específica.

O procedimento para ligar todo o equipamento é composto de diversas etapas, primeiramente é necessário ligar a torneira que arrefece a máquina, é girado uma alavanca desta máquina deixando-a em modo de espera, caso os botões de parada emergencial estejam acionados, destravá-las, ligar o computador e o gabinete de processamento do maquinário, com o computador ligado, abrir o programa de controle e por fim acionar o botão de iniciação. O extensômetro aplicado a peça pode ser visto na Fig. (5).

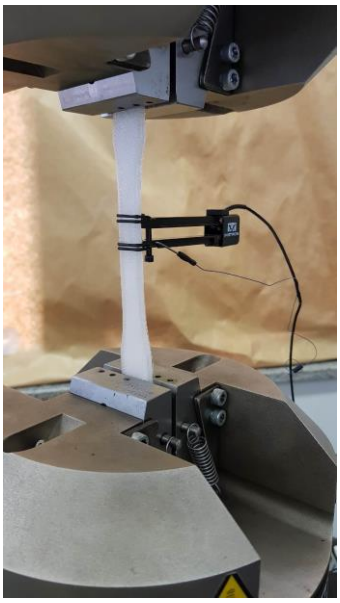


Figura 5: Extensômetro no corpos de prova

No programa do maquinário acessado pelo computador do laboratório, chamado BlueHill, todos os dados de dimensionamento dos corpos de prova, taxa de carga, resultados a serem obtidos como a carga, extensão, deformação específica, são adicionados a um arquivo e assim utilizado em todos os ensaios. Além da calibração da máquina em si, era necessário a calibração do extensômetro, que este tem por definição 12,5 mm como o marco zero, as variações obtidas a partir deste valor são registradas em uma tabela como deformação adimensional (mm/mm).

O procedimento segue de forma similar a metodologia simplificada de excitação por impulso, diferenciando que do quinto ao sétimo bloco, se torna relevante a marcação das peças para as garras e concentrador de tensão, calibração da deformação específica da máquina e do extensômetro, para obtenção do gráfico tensão-deformação até a ruptura, tendo em vista a necessidade da retirada do extensômetro antes da ruptura para evitar danos ao equipamento e por fim a média e desvio padrão do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, para então realizar a comparação das orientações buscando constatar anisotropia do material.

**Ensaio de flexão**

O ensaio de flexão é realizado no mesmo equipamento onde foram realizados os ensaios de tração, contudo para realizá-lo foi instalado um equipamento do professor orientador deste trabalho, onde este equipamento segue as

padronizações da norma ASTM para ensaios de 3 apoios. As configurações do software para esta caracterização mecânica visou flexionar o corpo de prova através da compressão do material. A extensão máxima configurada no BlueHill foi de 20 mm, satisfazendo a extensão máxima até obter falhas no material para todos os filamentos utilizados.

O mínimo de corpos de prova exigido pela norma para ter dados de forma significativa são de cinco peças. Por isso foram feitas cinco peças em cada orientação de cada material, totalizando quarenta e cinco peças ensaiadas neste método.

A norma prevê formulações para o posicionamento adequado dos apoios, assim como para obtenção do módulo de elasticidade a partir dos valores da carga que causa flexão no material.

**Ensaio de impacto Izod**

O ensaio por Izod é o procedimento mais simples em relação aos demais. Primeiramente o pêndulo é fixado a um ângulo de 90° em relação ao posicionamento do corpo de prova. A peça é posta na base fixado através de parafusos Allen, que seguram uma placa que pressiona a peça na base do dispositivo. A peça é posicionada verticalmente com metade do seu comprimento exposto ao impacto do pêndulo. O lado que apresenta entalhe na peça é posicionado contra o lado do ponto de impacto do pêndulo, seguindo assim o método "E" da norma.

Depois de posicionado corretamente o corpo de prova é zerado manualmente o ponteiro na escala em Joules. A intenção deste ensaio é constatar a absorção de energia da peça tendo em vista a possibilidade de variação na trajetória do pêndulo. Caso este não se eleve no fim do curso até a marca zero, este material ensaiado inibiu o movimento completo resultando em uma dada energia absorvida.

A norma prevê no mínimo cinco ensaios como resultado significativo, assim como o dimensionamento dos corpos de prova. Ainda sobre a quantidade mínima de ensaios, foram feitas cinco peças em cada orientação para cada material, resultando em quarenta e cinco amostras ensaiadas.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos ensaios de excitação por impulso, o intuito era fornecer o módulo de elasticidade para uma amostra significativa para a norma, foram feitas quinze peças de PLA, cinco em cada direção para desta forma estar de acordo com a quantidade mínima de peças ensaiadas pela ASTM. A tabela 3 expressa o resultado obtido das peças.

Tabela 3: Resultados do ensaio de excitação por impulso

| Peça | Frequência Flexional (Hz) | Amplitude Flexional (Vpp) | Frequência Torcional (Hz) | Amplitude Torcional (Vpp) | Módulo de Elasticidade (E) em GPa |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | PLA CHAPADO - Y | | |
| 1 | 703,780 | 0,001145 | 1920,837 | 0,001098 | 3,21 ± 0,23 |
| 2 | 702,851 | 0,000944 | 1926,675 | 0,000753 | 3,10 ± 0,21 |
| 3 | 703,343 | 0,000934 | 1928,978 | 0,000871 | 3,21 ± 0,20 |
| 4 | 722,069 | 0,000790 | 1963,183 | 0,000675 | 2,99 ± 0,18 |
| 5 | 714,698 | 0,000710 | 1948,228 | 0,000673 | 2,95 ± 0,25 |
| | | | PLA HORIZONTAL - X | | |
| 1 | 760,195 | 0,000907 | 2061,146 | 0,000826 | 3,44 ± 0,21 |
| 2 | 761,067 | 0,001031 | 2077,387 | 0,000944 | 3,49 ± 0,21 |
| 3 | 766,379 | 0,000989 | 2091,117 | 0,001330 | 3,68 ± 0,22 |
| 4 | 773,793 | 0,000880 | 2103,871 | 0,001256 | 3,58 ± 0,44 |
| 5 | 763,802 | 0,000890 | 2084,291 | 0,001138 | 3,69 ± 0,22 |
| | | | PLA VERTICAL - Z | | |
| 1 | 711,557 | 0,000892 | 1944,269 | 0,001119 | 2,51 ± 0,16 |
| 2 | 717,232 | 0,000653 | 1960,428 | 0,000933 | 2,77 ± 0,23 |
| 3 | 722,112 | 0,000880 | 1957,307 | 0,001149 | 2,22 ± 0,20 |
| 4 | 711,612 | 0,000866 | 1925,121 | 0,001312 | 2,18 ± 0,16 |
| 5 | 734,298 | 0,000915 | 1969,888 | 0,001126 | 2,44 ± 0,22 |

O resultado médio dos valores obtidos para peças em PLA de construção chapado, considerando módulo de Elasticidade E como 3,09 GPa. Já a resultante dos valores médios obtidos para peças de construção horizontal, considerando E como 3,58 Gpa, e por fim o resultado médio obtido para os corpos de prova de construção vertical, sendo o módulo E analisado obtendo-se 2,42 GPa. Segundo a fabricante o módulo de elasticidade para corpos de prova

de PLA impresso resulta em 1,896 GPa em média, já o módulo de elasticidade do material granulado, antes de ser utilizado como material de impressão possui 4,35 GPa.

O módulo de elasticidade para as três direções de construção estiveram entre os valores mencionados pela fabricante 3D LAB, porém há uma proximidade das peças horizontais de 3,58 GPa ao módulo do grão de 4,35 GPa. Isso mostra que os resultados foram mais satisfatórios que os próprios desenvolvidos pela empresa, apesar de não haver informações sobre as configurações utilizadas no fateador. São dados mais satisfatórios do que o esperado tendo em vista os resultados apresentados pelo próprio fabricante.

Quanto aos ensaios de tração, os resultados foram compilados em uma planilha no excel facilitando assim as manipulações em busca dos resultados de tensão por deformação, resultando no módulo de elasticidade, desvio padrão e coeficiente de Poisson. Tendo em vista os resultados a serem alcançados, utilizou-se o extensômetro para obter a deformação enquanto o gráfico carga por extensão se manteve linear. Durante o ensaio era preciso retirar o extensômetro da peça, tendo em vista que a tração exercida no ponto de ruptura da peça poderia danificar o extensômetro. Desta maneira é feita uma razão da coluna obtida de tensão com a deformação específica longitudinal, resultando no módulo de elasticidade E ponto a ponto, assim é feita uma média de todos os valores, na região linear do gráfico para as cinco peças. Os valores encontrados estão descritos na Tab. (4).

Tabela 4: Média do Módulo de Elasticidade, Desvio e Coeficiente de Poisson de todos os ensaios

| Direção de construção | Média do Módulo de Elasticidade (E) - MPa | Média do Desvio Padrão do Módulo (E) | Coeficiente de Poisson Médio |
|---|---|---|---|
| PLA | | | |
| Chapado | 3499,98 | ± 5,32 | +0,33 |
| Horizontal | 3841,16 | ± 6,64 | +0,33 |
| Vertical | 3515,69 | ± 4,95 | +0,16 |
| ABS | | | |
| Chapado | 2336,13 | ± 3,01 | +0,25 |
| Horizontal | 2231,11 | ± 2,42 | +0,26 |
| Vertical | 2236,33 | ± 8,73 | +0,24 |
| PETG | | | |
| Chapado | 1446,98 | ± 1,51 | +0,35 |
| Horizontal | 1679,83 | ± 2,50 | +0,29 |
| Vertical | 1666,33 | ± 3,94 | +0,18 |

Os gráficos 1 a 3 retratam a curva tensão x deformação dos materiais ensaiados.

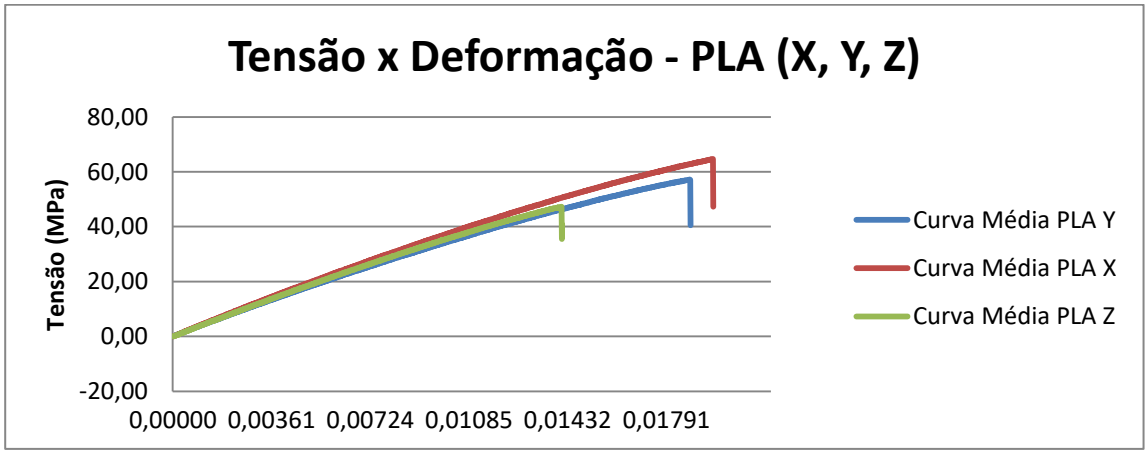



Gráfico 1: Tensão x Deformação de peças em PLA nas três direções

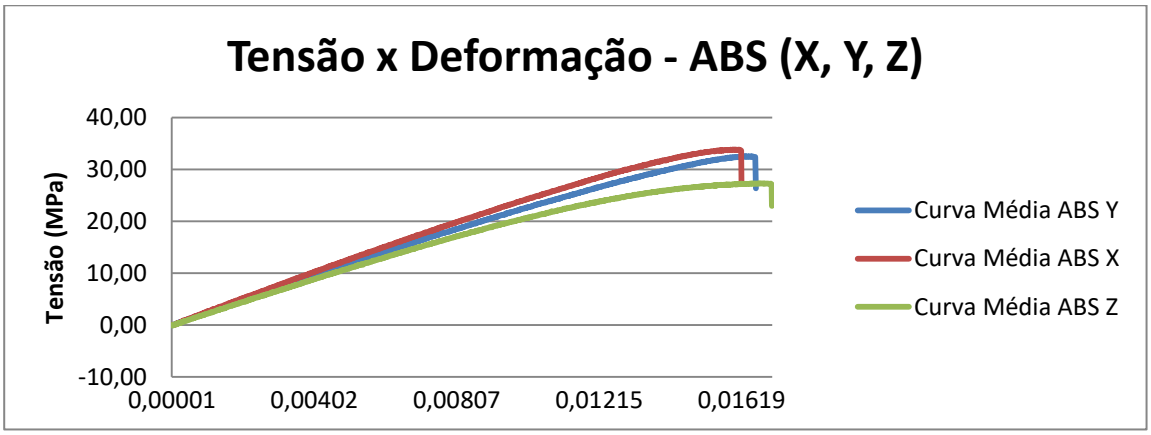



Gráfico 2: Tensão x Deformação de peças em ABS nas três direções

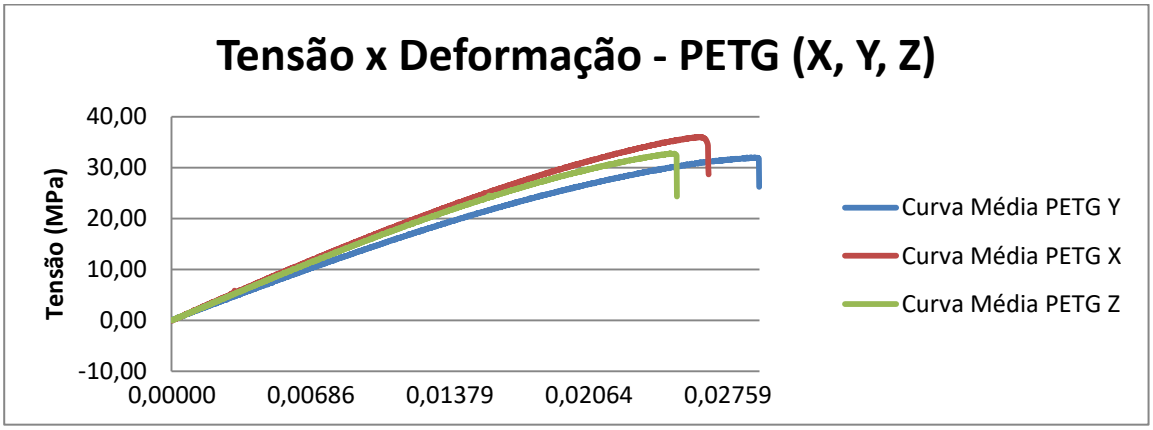



Gráfico 3: Tensão x Deformação de peças em ABS nas três direções

Quanto a flexão, os resultados obtidos quanto ao módulo de elasticidade e ao desvio padrão, teve os primeiros 10% dos valores ignorados tendo em vista a variação na tensão de compressão da peça que resultava em valores negativos, desta maneira as resultantes do módulo e do desvio estão detalhadas na Tab. (5) a baixo.

Tabela 5: Dados obtidos do ensaio de flexão

| Direção de construção | Módulo de Elasticidade (E) MPa | Desvio Padrão |
|---|---|---|
| PLA | | |
| Chapado | 1075,31 | ± 7,44 |
| Horizontal | 1592,27 | ± 7,96 |
| Vertical | 1224,03 | ± 10,04 |
| ABS | | |
| Chapado | 998,30 | ± 4,46 |
| Horizontal | 1017,56 | ± 5,54 |
| Vertical | 669,25 | ± 4,81 |
| PETG | | |
| Chapado | 1030,32 | ± 6,08 |
| Horizontal | 1377,32 | ± 6,16 |
| Vertical | 1059,76 | ± 5,18 |

Os dados do resultado de PETG segue o padrão de resultados obtidos pela fabricante para peças impressas no ensaio de tração, diferentemente do ABS e PLA que tiveram resultados a baixo do esperado. O que trouxe discussão foi o fato dos módulos de elasticidade pelo ensaio de flexão ter variado consideravelmente em relação aos ensaios de tração e excitação por impulso. Isso se deve ao fato de que a variação da deformação específica obtida pelo extensômetro é

registrada ao longo do tempo, ocasionando valores mais precisos que os de flexão, tendo em vista que a anisotropia da peça corrobora uma maior variação neste tipo de ensaio do que nos ensaios de tração.

Por fim, nos ensaios de impacto Izod, foram confeccionadas quarenta e cinco peças para esta caracterização mecânica, sendo quinze peças para cada material sendo estes PLA, ABS e PETG. Todas as peças de PLA sendo cinco para cada direção, nenhuma delas deram resultado diferente de zero, ou seja, na escala do equipamento utilizado, não foi possível perceber absorção de energia da peça.

O mesmo procedimento foi feito para os demais materiais. PETG foi um dos materiais que havia expectativa, porém não houve absorção de energia perceptível para análise.

Quando ensaiado o ABS, houve resultados positivos para os corpos de prova que tiveram construção chapado e horizontal, como pode ser visto nas Tab. (6) e (7). Já as peças verticais, assim como todas as peças de PETG e PLA, não tiveram absorção perceptível na escala do dispositivo.

Tabela 6: Energia absorvida pelo ABS chapado por impacto Izod

| ABS - Chapado | | |
|---|---|---|
| Peça | Energia absorvida (J) | Resistência ao Impacto $\left(\frac{kJ}{m^2}\right)$ |
| 1 | 5,0 | 55,923 |
| 2 | 4,0 | 44,738 |
| 3 | 3,0 | 33,554 |
| 4 | 2,0 | 22,369 |
| 5 | 3,5 | 55,923 |

Tabela 7: Energia absorvida pelo ABS horizontal por impacto Izod

| ABS - Horizontal | | |
|---|---|---|
| Peça | Energia absorvida (J) | Resistência ao Impacto $\left(\frac{kJ}{m^2}\right)$ |
| 1 | 2,5 | 27,961 |
| 2 | 2,5 | 27,961 |
| 3 | 1,5 | 16,777 |
| 4 | 2,0 | 22,369 |
| 5 | 2,0 | 22,369 |

A ficha técnica do ABS dada pela empresa Ultimaker, demonstra resistência ao impacto izod com entalhe de 10,5 kJ/m² para um material impresso. Já a empresa Elix Polimers, possui valores de 30 kJ/m² e 23 kJ/m² para plásticos injetados em ABS de alto e médio impacto respectivamente. É importante ressaltar que os ensaios foram feitos com peças de PLA, ABS e PETG, porém com a carga presente no equipamento, só foi possível perceber absorção de energia das peças de ABS de construção horizontal e chapado, como mencionado nas tabelas acima.

## CONCLUSÃO

Pode se dizer que uma das barreiras enfrentadas no decorrer do trabalho foi o entupimento do bocal com o filamento de ABS, que prejudicou o andamento do trabalho devido a interrupção da impressão e retirada do equipamento para a limpeza do sistema nas primeiras peças de excitação por impulso, e a necessidade de refazer algumas peças principalmente no ensaio de tração devido a fratura em local indevido para avaliação. Outro empecilho foi o empenamento de peças devido à temperatura da mesa aquecida e a taxa de resfriamento tendo leves distorções no material. Ainda houve obstáculos quanto à construção dos corpos de prova devido a necessidade de apoio para as peças verticais, que tiveram algumas quedas durante a impressão, para isso foram feitos novos modelos para os testes, sendo por fim padronizado para todos os corpos de prova verticais a construção do suporte na peça.

Os objetivos do trabalho foram alcançados, tendo como uma das metas principais, a discussão sobre a relevância da anisotropia. Esta característica foi relevante principalmente para peças de construção vertical, onde esta direção de construção resultou em módulos de elasticidade inferiores aos chapado e horizontal nos ensaios de excitação por impulso e no ensaio de flexão das peças em ABS.

Os resultados de excitação por impulso refeitas na segunda parte do trabalho, focando somente em PLA seguindo a norma, surpreendeu com valores acima do obtido pela fabricante em ensaios de tração, assim como os próprios resultados deste trabalho de ensaio de tração, que deram valores similares aos do grão, onde não há extrusão do material, para formar rolos de filamento. O trabalho tem caráter exploratório para analisar as características dos

materiais, desta forma vários testes visaram a obtenção do módulo de elasticidade, e dentre estes o ensaio de flexão resultou em valores abaixo dos encontrados em tração e excitação por impulso devido a supostas tensões de contato dos suportes, tensão cisalhante de atrito, que pode causar alteração no momento fletor e deslocar a linha neutra da peça, diferentemente da tração onde esta é presa a garras e a deformação é obtida por extensômetro.

Este trabalho possui perspectivas futuras interessantes, como comparar estes resultados com peças construídas com um padrão de preenchimento 90° e -90° ou preenchimento 0°, pois desta maneira as fibras seriam puramente em uma direção. Analisar as diferenças do módulo de elasticidade para peças com 20% de preenchimento (honeycomb) e 100%. Outro exemplo intrigante seria constatar se há mudança nas propriedades para peças com taxa de fluxo de multiplicador 0.9 para 1.0 ou 1.1.

## REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A. J. Optimización y Caracterización de Piezas de PLA Fabricadas Mediante Técnicas Aditivas. Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química. Espanha, 2014.

ANTAS, A. F. F. Utilização das tecnologias de prototipagem rápida na área médica. Portugal, 2007.

ASTM. Standard Test Method for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. EUA, 2004.

ASTM. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. EUA, 2003.

ASTM. Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. EUA, 2015.

ASTM. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. EUA, 2002.

AZIMI, P. *el al.* Emissions of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds from Commercially Available Desktop Three-Dimensional Printers with Multiple Filaments. EUA, 2016.

BAGSIK, A.; SCHÖPPNER, V.; KLEMP, E. FDM Part Quality Manufactured With Ultem*9085. Polymeric Materials Journal, 2010.

BELLEHUMEUR, C. T. *et al.* Modeling of Bond Formation Between Polymer Filaments in the Fused Deposition Modeling Process. Journal of Manufacturing Processes, v.6, n.2, 2004.

BELLINI, A.; GÜÇERI, S. Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling. Rapid Prototyping Journal, 2003.

ENSINGER, 2004. "Plastics used in aerospace technology". 12 Jul 2018. <https://www.ensingerplastics.com/pt-br/downloads>

FERREIRA, A. C.; LAFRATTA, F.H. Conheça alguns meios para a obtenção de protótipos de peças injetadas. Santa Catarina, Brasil, 1998.

GURRALA, P. K.; REGALLA, S. P. Part strength evolution with bonding between filaments in fused deposition modelling: This paper studies how coalescence of filaments contributes to the strength of final FDM part, 2014.

KONZEN, A. L. Avaliação da resistência mecânica à tração de peças produzidas por prototipagem rápida via modelagem por deposição de material fundido (FDM). Brasil, 2015.

LAFRATTA, F. H. Uso de Fluido Refrigerante, Temporariamente Confinado, em ferramental Rápido para Injeção de Termoplástico. Santa Catarina, Brasil, 2003.

LIMA, M. V. A. Modelo de Fatiamento Adaptativo para Prototipagem Rápida - Implementação no Processo de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM). Dissertação Mestrado – Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

REZWAN, K. *et al.* Biodegradable and Bioactive Porous Polymer/Inorganic Composite Scaffolds for Bone Tissue Engineering. Reino Unido, 2006.

SUN, Q. *et al.* Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. Rapid Prototyping Journal, Vol. 14. 2008.

VOLPATO, N. *et al.* Prototipagem Rápida Tecnologias e Aplicações. Ed. Blucher. São Paulo, Brasil, 2007. ISBN: 9788521203889.

YAGNIK, D. Fused Deposition Modeling – A Rapid Prototyping technique for Product Cycle Time Reduction cost effectively in Aerospace Applications. Journal of Mechanical and Civil Engineering. India, 2014.

3DLAB, 2018. "Conheça as propriedades técnicas dos materiais para impressora 3D". 20 Jun 2018. <http://www.3dlab.com.br/propriedades-dos-materiais-para-impressora-3d/>

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção 'área de conhecimento do trabalho'.

(X) Fabricação Mecânica e Materiais

XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 27 à 31 de agosto de 2018 – Brasília, DF

# CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E DOS EFEITOS DO TRATAMENTO TÉRMICO NO AÇO SAE 4340

**Nome do autor Victor Santana da Rocha**
Instituição Universidade do Distrito Federal
Endereço Completo da Instituição SEP/SUL EQ 704/904 Conj. A Brasília - DF
E-mail para correspondência victor88.srocha@gmail.com

**RESUMO:** Foi realizada a tipificação dos efeitos do tratamento térmico no aço SAE 4340, para avaliar as propriedades mecânicas. A metodologia utilizada foi, ensaios de tração, dureza e metalografia, onde foram testados 12 corpos de prova, divididos em 6 grupos no qual foram utilizados diferentes tratamentos térmicos; no grupo A, 2 corpos de prova foram testados como recebido da metalúrgica. Grupo B, 2 corpos de prova foram normalizado. Grupo C, 2 corpos de prova foram temperados a 850°C, resfriado em óleo 10w40 e revenido a 200°C. Grupo D, 2 corpos de prova foram temperados a 850°C, resfriado em óleo 20w50 e revenido a 200°C. Grupo E, 2 corpos de prova foram temperados a 850°C, resfriado em óleo 10w40 e revenido a 300°C. Grupo F, 2 corpos de prova foram temperados a 850°C, resfriado em óleo 20w50 e revenido a 300°C. Após o tratamento térmico, foi realizado o ensaio de tração e dureza e micrografia. A micrografia mostrou a alteração dos constituintes do aço. Referente à o ensaio de dureza o material ensaiado apresentou o aumento da dureza após o processo de têmpera. No ensaio de tração foi alcançado o aumento da resistência a tração.

**Palavras-Chave:** Aço SAE 4340. Tratamento térmico. Ensaio de dureza. Ensaio de tração. Ensaio metalográfico.

***ABSTRACT:*** The effects of the heat treatment on the SAE 4340 steel were evaluated in order to evaluate the mechanical properties. The methodology used was tensile tests, hardness and metallography, where 12 test specimens were tested, divided into 6 groups in which different thermal treatments were used; in group A, 2 specimens were tested as received from metallurgical. Group B, 2 specimens were normalized. Group C, 2 specimens were annealed at 850 ° C, cooled in 10w40 oil and tempered at 200 ° C. Group D, 2 specimens were annealed at 850 ° C, cooled in 20w 50% oil and tempered at 200 ° C. Group E, 2 specimens were annealed at 850 ° C, cooled in 10w40 oil and tempered at 300 ° C. Group F, 2 specimens were annealed at 850 ° C, cooled in 20w 50% oil and tempered at 300 ° C. After the heat treatment, the traction and hardness and micrograph tests were performed. The micrograph showed the change in the constituents of the steel. Regarding the hardness test, the tested material showed an increase in hardness after the tempering process. In the tensile test, the tensile strength was reached.

***Keywords:*** SAE 4340 steel. Heat treatment. Hardness test. Stress test. Metallographic test.

## INTRODUÇÃO

Ao longo da história humana, os metais foram de grande influência no curso da nossa civilização. Sua fácil modelagem e versatilidade possibilitaram uma ampla utilização desses materiais. Algumas dessas exigiram que os mesmos tivessem suas propriedades mecânicas modificadas, objetivando a elevação de sua resistência mecânica, situação que só foi possível após a descoberta do tratamento térmico.

Devido a sua grande versatilidade, o aço se mantém como o mais bem-sucedido material, com mais de um bilhão de toneladas consumidas anualmente, contribuindo para uma melhor qualidade de vida (BHADESHIA, 2004). Por este motivo, o ferro e suas ligas estão constantemente no foco de estudos da ciência dos materiais e são normalmente tomados como referencial de comparação para os materiais estruturais emergentes.

O aço 4340, por se tratar de um material de alta resistência tem sido utilizado largamente em componentes mecânicos, principalmente componentes estruturais. Suas principais áreas de aplicação são: aeroespacial, aeronáutica, automobilística, petrolífera, construções. Este aço é um material de elevada temperabilidade.

O fato é que se torna cada vez mais iminente a necessidade de obtenção de materiais com características e propriedades mecânicas mais específicas. Este estudo foi proposto para a obtenção das propriedades do aço SAE 4340 após o processo de normalização e têmpera. A pesquisa em questão tem seu foco na compreensão e compartilhamento de dados obtidos por meio de ensaios laboratoriais, tudo na razão de ampliar o entendimento da modificação das propriedades físicas do aço durante os tratamentos térmicos. O foco é avaliar as propriedades de dureza, tração e micrografia de corpos de prova do aço SAE 4340, em 3 condições: da maneira que é fornecido, após normalização e após o processo de têmpera.

O aço SAE 4340 recebe concentrações de elementos químicos para aumentar sua qualidade mecânica. Essa alteração que ocorre no aço, pode ser visualizada na tabela 1. Em sua composição, estão presentes dez elementos químicos, em diferentes proporções, que auxiliam na sua melhora de qualidades mecânicas.

Tabela 1 - Características alteradas pela adição dos elementos (KONIG, 2002).

| | **ELEMENTOS QUÍMICOS** | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **INFLUÊNCIA NA PROPRIEDADE** | **C** | **Si** | **Mn** | **P** | **S** | **Cr** | **Mo** | **Ni** | **Al** | **Cu** |
| Aumento da resistência | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | ■ |
| Aumento do limite de escoamento | | | | | | | | | | ■ |
| Redução de elasticidade | | | | | | | | | | ■ |
| Aumento da dureza | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | |
| Aumento da resistência ao impacto | | | | | | | | ■ | | |
| Redução da ductibilidade | ■ | | | ■ | ■ | | | | | |
| Resistência em altas temperaturas | | | | | | | ■ | | | |
| Aumento da temperabilidade | | | | | | ■ | ■ | | | |
| Ação desoxidante | | ■ | ■ | | | | | | ■ | |
| Aumento da resistência à corrosão | | | | | | ■ | | | | |
| Aumento da resistência à abrasão | | | | | | ■ | | | | |
| Redução da soldabilidade | ■ | | | | | | | | | |

Para que possamos modificar sua resistência mecânica o aço passa pelo tratamento térmico onde as operações de tratamento térmico demandam um fornecimento direto ou indireto de energia. No tratamento de peças e sua posterior remoção (mediante aquecimento ou resfriamento), consideraremos apenas os problemas derivados da transferência de calor. Dito isso, sejam aquecidas ou arrefecidas, as peças tratadas desenvolvem campos de temperatura em que a distribuição de temperatura muda com o decorrer do tempo (TOTTEN, 2006).

O processo de tempera é o método utilizado para se obter dureza nos aços. A temperatura da liga é elevada até que atinjam níveis que superam o ponto de austerização, ou seja, a partir 800 °C. O tempo de aquecimento é calculado pela espessura da peça a ser tratada. Para cada 25 mm de material estima-se a permanência de uma hora ao forno. Após o aquecimento, deve-se sujeitar a peça a um resfriamento rápido mediante a utilização de água, óleo, ar ou polímeros.

A capacidade do aço de transformar sua austenita em martensita, durante o temperamento, depende diretamente de sua composição química. Do processo descrito anteriormente é que avalia-se sua capacidade de endurecimento. E a obteção de aços martensíticos chega a ser um objeto de desejo face sua elevada dureza. Contudo, quando se eleva tal característica do aço ao extremo, ele se torna frágil e pouco dúctil, haja vista as altas tensões internas presentes. Contudo, esse é um problema facilmente contornável através de tratamentos como, por exemplo, o recozimento, que promove o alívio das tensões internas (AKSTENS, 2005).

O revenimento é o tratamento térmico que segue a têmpera, em alguns aços. O revenimento consiste em aquecer a peça a certa temperatura e variar a mesma de acordo com o resultado/dureza desejada. O revenimento é igualmente capaz de reduzir os estresses internos do aço martensítico (de alta dureza). Como se vê, sacrifica-se um pouco de sua dureza em detrimento da obteção de um aço menos frágil (SANTOS, 2006).

O processo de normalização reduz e refina a granulação e estrutura do aço, dando propriedades melhores que aquelas adquiridas no processo de recozimento. Esse processo pode ser feito ao final ou no momento intermediário do tratamento térmico. É realizado em duas etapas, sempre relacionando o tempo de aquecimento com a espessura da peça (um cálculo simples, a considerar que para cada 25 mm de espessura adiciona-se uma hora no forno, com posterior resfriamento à temperatura). A peça deve ser austenizada a mais ou menos 800°C e o resfriamento em até 600°C. É nesse ambiente de variação de temperatura que ocorre a transformação da austenita em perlita e ferrita. O processo de normalização facilita a usinagem da peça por reduzir drasticamente sua dureza (CHIAVERINI, 2008).

Os ensaios possibilitam a verificação das propriedades dos materiais facilitando sua escolha para finalidades especificas. Hoje em dia, sabe-se que o controle de qualidade é acompanhado desde a matéria prima até finalização de uma peça (prima-se pelo máximo e total controle de qualidade após sua finalização). Conhecer as propriedades mecânicas do material a ser trabalhado é uma busca incessante, compreender o comportamento de uma amostra quando sujeita a

esforços é vital. E é essa maneira de pensar que justifica o conhecimento de quaisquer valores obtidos a partir de tensões e deformações, daí se extrai a relevância do tema.

O ensaio mecânico de tensão x deformação consiste na aplicação gradativa de força de tração uniaxial nas extremidades de um corpo de prova especificado e o mesmo só termina quando o corpo de prova se rompe. Após o ensaio e imediata análise da deformação da área útil extrai-se importantes dados para a caracterização do material. Visando reduzir as diferenças entre as dimensões de diferentes corpos de prova (RODRIGUES, 2012).

Segundo Rodrigues (2012) existem várias definições envolvendo o termo dureza e podem ser listadas como resistência ao desgaste, comportamento durante deformação, resistência à tração e módulo de elasticidade. Com isso, conclui-se que a dureza não é uma qualidade física, e sim, um parâmetro. Atualmente existem diferentes maneiras e escalas, que relacionam a profundidade de penetração a um valor numérico de dureza. Alguns dos métodos mais utilizados são: Brinell, Vickers e Rockwell.

A escala Rockwell (HR) foi a escolhida para os ensaios de dureza desse trabalho. Com ela, a medição é calculada pela penetração de uma ponta de diamante no material. Essa escala possui 7 variações, cada qual diferenciada pela utilização de uma letra: Rockwell “A”, “B”, “C”, “D”, “E”, “F” e “G”. Nesse trabalho, em particular, contamos com a utilização da escala “C” por se tratar de um aço temperado como manda no manual do equipamento.

O ensaio metalográfico nada mais é que o estudo das características estruturais ou da formação dos metais e suas ligas, com a finalidade de facilitar a obtenção de uma relação extraída de suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. Para conseguirmos essa relação é feito um processo de lixamento e polimento da área a ser ensaiada, seguido imediatamente por um ataque de ácido para que, só assim, os constituintes do aço possam ser observados com maior facilidade. O ensaio, portanto, não é algo aleatório, necessita de toda uma metodologia para a sua realização (AKSTENS, 2005).

## METODOLOGIA

O estudo, inicialmente, se deu pelo levantamento de informações acerca do aço comercial SAE 4340, adquirido na metalúrgica Cerpal, localizada em Goiânia – GO. Esse material é laminado e em sua composição estão presentes dez elementos químicos que fornecem características diferentes para o aço (Carbono, Silício, Manganês, Fosforo, Enxofre, Cromo, Molibdênio, Alumínio e Cobre).

Foram usinados, tratados e analisados nas dependências da Universidade do Distrito Federal (UDF), um total de 12 corpos de prova, divididos em 6 grupos, como pode ser visualizado na tabela 2, onde receberam diferentes tratamentos térmicos como pode ser visualizado na tabela 2. No processo de usinagem foi deixado um milímetro a mais em suas dimensões para que, após o tratamento térmico, o óxido resultante não venha a comprometer as dimensões desejadas dos corpos de prova. O tratamento foi realizado com o auxílio de forno mufla modelo Q318M e estufa microprocessada de secagem modelo Q317M, ambas fabricadas pela Quimis (vitais para o processo de tratamento térmico).

O grupo A é composto por 2 corpos de prova no estado tal qual foram recebidos da metalúrgica não passaram por qualquer tratamento térmico ou aquecimento.

No grupo B, 10 corpos de prova normalizados em um forno pré-aquecido a 850 °C por um período de 20 minutos, esses contados após a estabilização da temperatura desejada. Após esse tempo, foram retirados do forno e resfriados em temperatura ambiente. 2 corpos de prova dos 10 foram separados para análise enquanto os demais seguiram para o processo de têmpera.

No grupo C, 2 corpos de prova foram colocados no forno pré-aquecido a 850 °C por um período de 20 minutos, minuciosamente contados após estabilizar à temperatura desejada. Na sequência, foram resfriados em 8 litros de óleo 10w40 em temperatura ambiente (seguindo imediatamente para o revenimento, onde foram colocados em forno pré-aquecido a 200 °C por um período de 2 horas e, após a estabilização da temperatura desejada, foram por fim resfriados em temperatura ambiente).

No grupo D, 2 corpos de prova foram colocados em forno pré-aquecido a 850 °C por um período de 20 minutos, contados após estabilizar à temperatura desejada. Na sequência, foram resfriados em 8 litros de óleo 10w40 em temperatura ambiente (seguindo imediatamente para o revenimento, onde foram colocados em forno pré-aquecido a 300 °C por um período de 2 horas e, após a estabilização da temperatura desejada, foram por fim resfriados em temperatura ambiente).

No grupo E, 2 corpos de prova foram colocados em forno pré-aquecido a 850 °C por um período de 20 minutos, minuciosamente contados após estabilizar à temperatura desejada. Na sequência, foram resfriados em 8 litros de óleo 20w50 em temperatura ambiente (seguindo imediatamente para o revenimento, onde foram colocados em forno pré-aquecido a 200 °C por um período de 2 horas e, após a estabilização da temperatura desejada, foram por fim resfriados em temperatura ambiente).

No grupo F, 2 corpos de prova foram colocados em forno pré-aquecido a 850 °C por um período de 20 minutos, minuciosamente contados após estabilizar à temperatura desejada. Na sequência, foram resfriados em 8 litros de óleo 20w50 em temperatura ambiente (seguindo imediatamente para o revenimento, onde foram colocados no forno pré-aquecido a 300 °C por um período de 2 horas e, após a estabilização da temperatura, foram por fim resfriados em

temperatura ambiente). Após o término dos tratamentos térmicos, os corpos de prova passaram por uma usinagem final visando retirar 1 milímetro de material. Com isso, se obteve as dimensões finais e ideais para o ensaio de tração.

Tabela 2 Tratamentos térmicos utilizados.

| GRUPO | CP | TIPO DE TRATAMENTO |
|---|---|---|
| A | 01 | TESTADO DA MANEIRA COMO FOI FORNECIDO |
| A | 02 | TESTADO DA MANEIRA COMO FOI FORNECIDO |
| B | 03 | NORMALIZADO A 850°C |
| B | 04 | NORMALIZADO A 850°C |
| C | 05 | TEMPERADO A 850°C REVENIDO 200° ÓLEO 10W40 |
| C | 06 | TEMPERADO A 850°C REVENIDO 200° ÓLEO 10W40 |
| D | 07 | TEMPERADO A 850°C REVENIDO 200° ÓLEO 20W50 |
| D | 08 | TEMPERADO A 850°C REVENIDO 200° ÓLEO 20W50 |
| E | 09 | TEMPERADO A 850°C REVENIDO 300° ÓLEO 10W40 |
| E | 10 | TEMPERADO A 850°C REVENIDO 300° ÓLEO 10W40 |
| F | 11 | TEMPERADO A 850°C REVENIDO 300° ÓLEO 20W50 |
| F | 12 | TEMPERADO A 850°C REVENIDO 300° ÓLEO 20W50 |

**Procedimento experimental**

O ensaio de tração foi realizado nas dependências da Universidade de Brasília (UnB). O equipamento de ensaio foi fabricado pela MTS e tem como número/modelo 810 material test system.

O cabeçote de fixação utilizou no corpo de prova uma calibragem que proporcionou um aperto de 8 MPa para o material natural e normalizado. No caso dos corpos de prova temperados foi utilizado um aperto de 10 Mpa, haja vista que esse material oferece maior dureza, circunstância que talvez fizesse com que os corpos de prova escorregassem da garra. Tal possibilidade foi confirmada durante o teste (não é sem razão que tais corpos de prova vieram a ser descartados).

O material destinado ao ensaio metalográfico passou pelo devido tratamento térmico e, após a conclusão do processo, foram iniciadas as preparações para o respectivo ensaio. Esse material nada mais é que um pedaço extraído de cada corpo de prova. O preparo de cada um deles se deu nas dependências da Universidade de Brasília (UnB), onde foram lixados e com o auxílio de equipamento apropriado (politriz metalográfica) para que fossem removidas quaisquer ranhuras presentes em sua face. Para tanto, foram utilizadas lixas d'água das seguintes granulações: 180, 220, 320, 400, 600, 800, 1200 e 2500. Findo o lixamento, iniciou-se a etapa do polimento com pasta de diamante com granulação de 1µ. Finalizado o processo de polimento, imediatamente se atacou o material com Ácido Nital ($HNO_3$) a 5%. Tal procedimento converge com a imersão dos pedaços na solução e, em seguida, a área foi lavada e seca com jato de ar antes de ser ensaiado. A microscopia e as consequentes imagens produzidas foram obtidas com o auxílio do microscópio Olympus modelo BX-51 com objetivas de 200x, 500x e 1000x.

O ensaio de dureza na escala Rockwell C (HR), foi executado conforme planejado com o auxílio de maquinário fabricado pela Mitutoyo modelo HR-210R e técnico experiente nas dependências da Universidade de Brasília (UnB). Primeiramente, testamos a calibração do equipamento a ser utilizado durante todos os procedimentos do ensaio. Com o auxílio de metal de teste, desprezamos a primeira medição – conforme recomendação do fabricante do maquinário – para, só assim, se obter a correta calibração e perfeito funcionamento do equipamento. Foram realizadas três medições em cada amostra para a obtenção de uma média quanto a dureza. Por se tratar de um aço de elevada dureza foi utilizada uma carga de ensaio de 150 Kgf. Essa carga é a indicada pelo fabricante para aço temperado, cementado e ferro fundido. Foi utilizado um *preload* de 10 Kgf conforme instruções igualmente recomendadas pelo fabricante.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

**Ensaio metalográfico**

Com o auxílio da microscopia óptica pode-se visualizar na figura 1, o aço em seu estado de fornecimento, ou seja, da maneira que veio da metalúrgica, onde a microestrutura do aço 4340 atacada com Ácido Nital a 5%. Nesse exemplo, é evidente a complexidade das microestruturas com seus diversos microconstituintes. A microestrutura heterogênea, composta por bainita (destacada pelo círculo vermelho) em formato de agulhas, ferrita (visualizada dentro do círculo azul) que é o material de cor clara e regiões martensita não revenida e possivelmente austenita retida (destacada pelo círculo amarelo).

Como apresentado na figura 2 (cujo material está normalizado), as microestruturas que contém bainita (visualizadas dentro do círculo vermelho) apresentam-se em formato de agulha, a ferrita (destacadas pelo círculo azul) que é o material de cor clara e as regiões com aparência de martensita e perlita fina podem ser visualizadas com o destaque do círculo amarelo. A constatação que a coloração assumiu uma tonalidade mais clara evidencia o aumento da ferrita. A

normalização, como se observa, reduz a dureza do metal (evidenciada na figura que tal fenômeno é aparente nas regiões onde as microestruturas têm tonalidade mais clara).

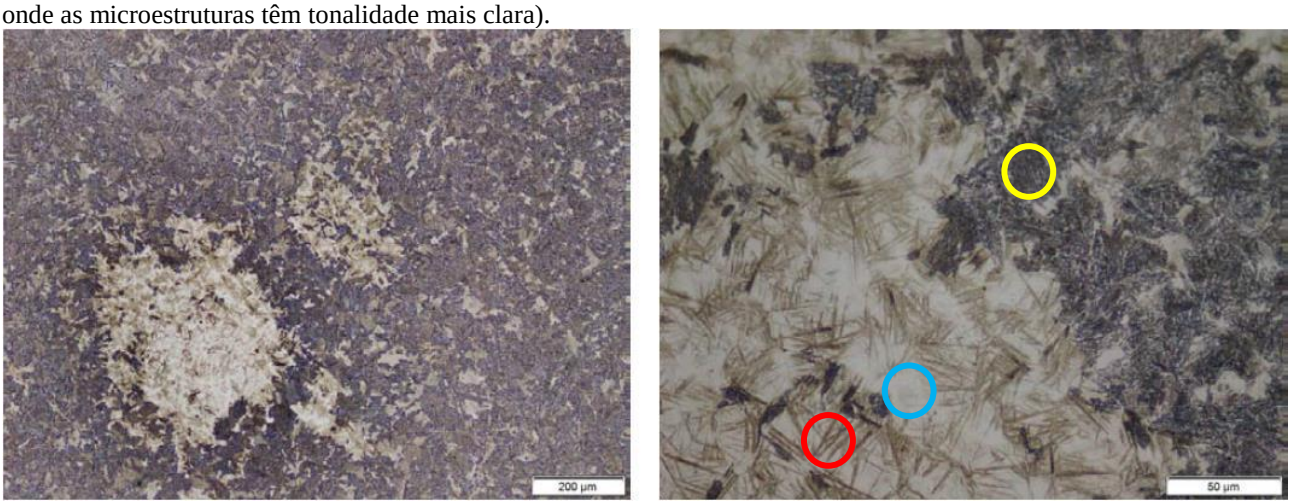



Figura 1 - Estado de fornecimento natural.

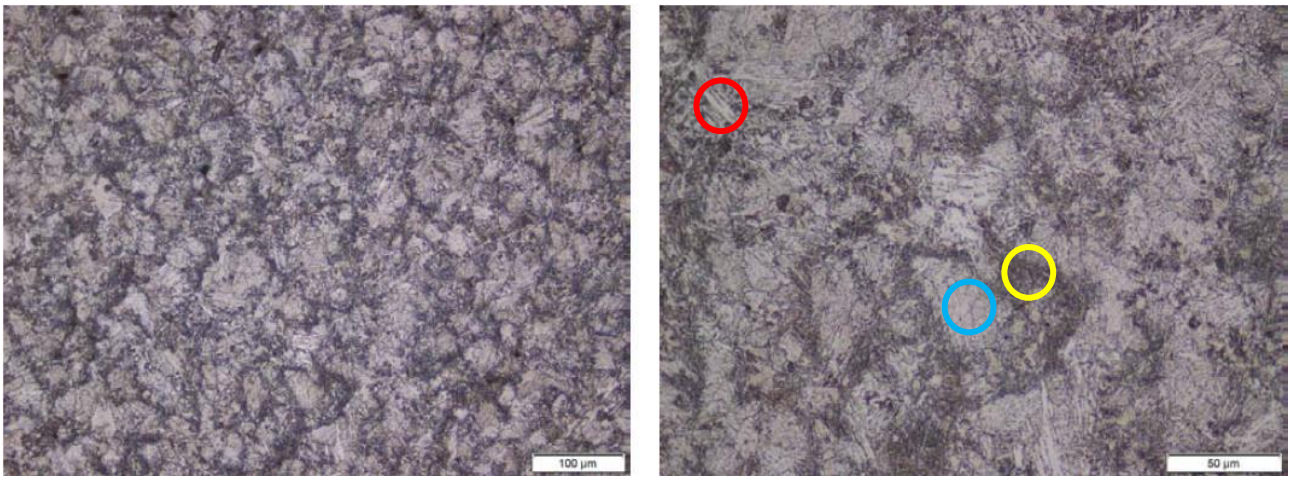
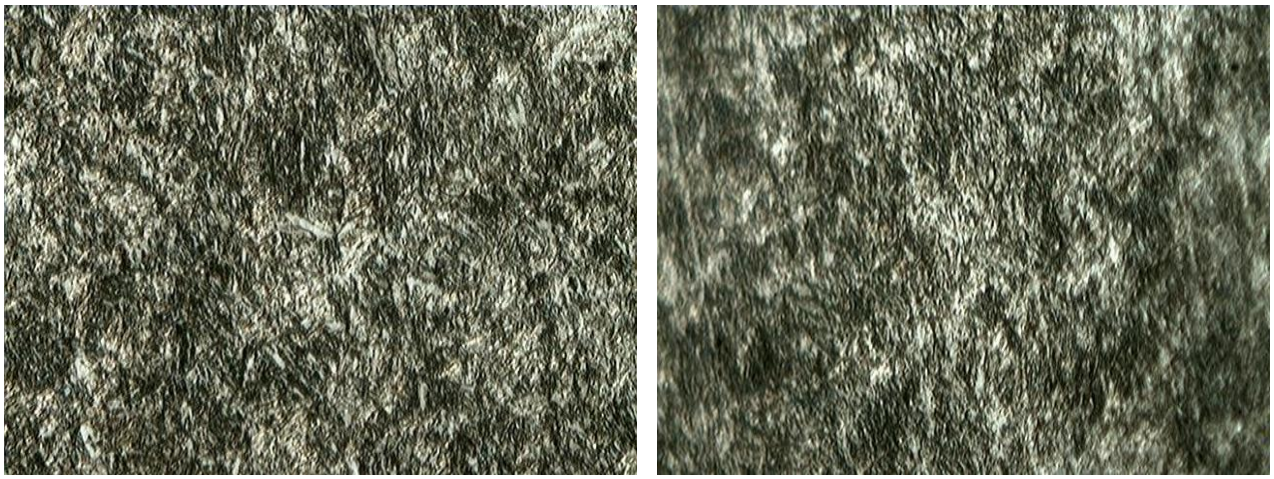


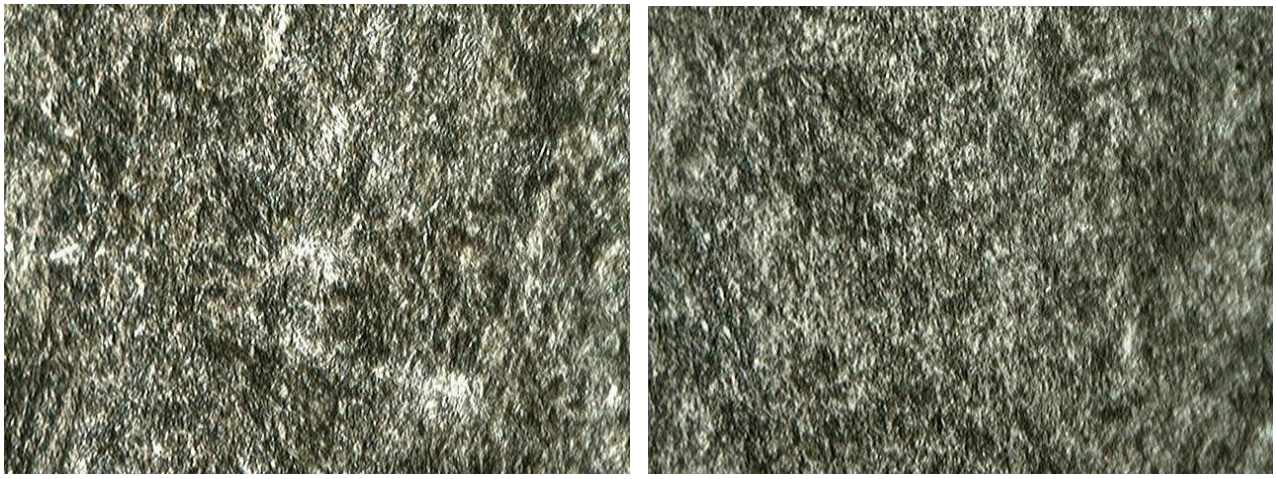

Figura 2 - Estado normalizado a 850°C.

Observando os metais que passaram pelo processo térmico de têmpera e revenimento, conforme figuras 3 (a) e (b) e a 4 (a) e (b), fica clara a alteração de suas microestruturas. Podemos ver que nas microestruturas heterogêneas constata-se visualmente que a ferrita presente nas figuras 1 e 2 desapareceu e, no lugar dela, surgiu um material que é típico dos materiais temperados e revenidos. Tal constatação corrobora o surgimento da martensita revenida, identificada pelo formato de agulhas escuras. Isso evidencia o aumento da resistência mecânica, algo que pode ser comprovado facilmente durante o ensaio de dureza e tração.



(a) (b)

Figura 3 – (a) Estado temperado resfriado em óleo 10w40 e revenido a 200°C, imagem com 500X de aumento. (b) Estado temperado resfriado em óleo 10w40 e revenido a 300°C, imagem com 500X de aumento.



(a) (b)

Figura 4 – (a) Estado temperado resfriado em óleo 20w50 e revenido a 200°C, imagem com 500X de aumento. (b) Estado temperado resfriado em óleo 20w50 e revenido a 300°C, imagem com 500X de aumento.

**Ensaio de dureza**

O ensaio de dureza foi realizado na escala Rockwell C, que é medido na unidade HR. Com o auxílio do durômetro fabricado pela Mitutoyo modelo HR-210MR, foram realizados os devidos ensaios e os seguintes valores que podem ser visualizados na figura 7.

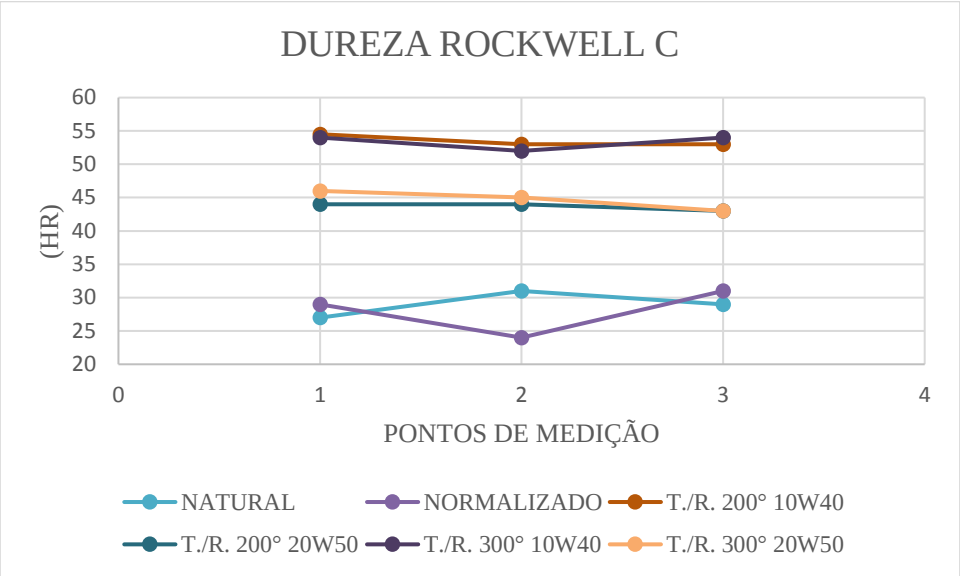


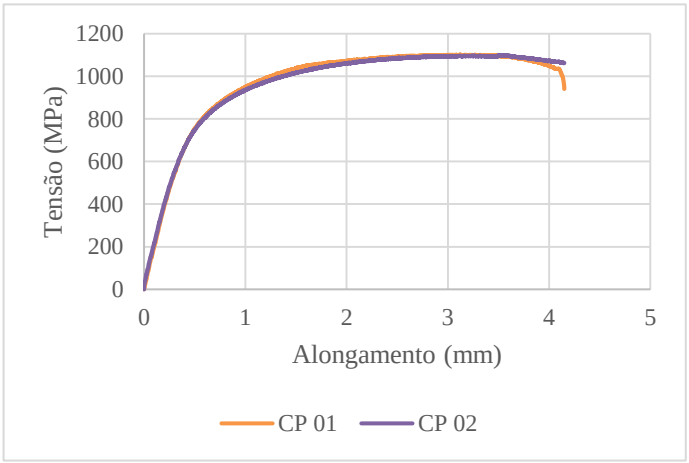

Figura 7 – Resultados do ensaio de dureza.

Pode-se observar que mudança quanto a viscosidade do óleo aparentemente teve influência direta nos resultados da dureza do material. Essa constatação é facilmente visualizada na figura supracitada. Deve-se reforçar que a metodologia de tratamento foi a mesma e que a única diferença consiste na diferença de viscosidade cinemática do óleo para o resfriamento.

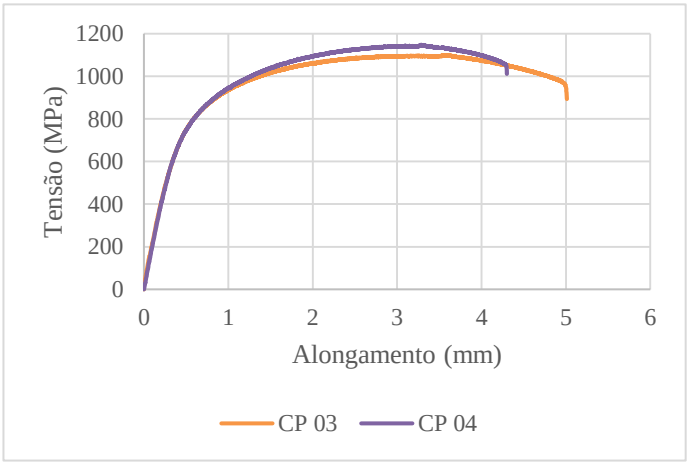
**Ensaio de tração**

A pressão utilizada no cabeçote de fixação dos corpos de prova na máquina de ensaio de tração foi de 8 Mpa para os corpos de prova natural e normalizado, já para os corpos de prova temperados foi utilizado uma pressão no cabeçote de fixação de 10 Mpa. Essa pressão impede que o corpo de prova escorregue e prejudique o referido teste, situação que inutilizaria os dados do ensaio. A decisão de elevar a pressão da pinça foi tomada após o primeiro teste do corpo de prova temperado, cujo escorregar da pinça nos levou ao consequente inutilização dos dados.

As figuras a seguir demonstram o comportamento dos grupos descritos e separados (conforme método anteriormente citado). A subdivisão em tabelas menores serve como elemento facilitador de leitura. Assim sendo, na figura (A) temos a análise do grupo A (natural, conforme recebido do fornecedor do material). Na figura (B) temos o resultado do grupo B (normalizado). A leitura da mesma denota que o processo de normalização não apresentou uma redução em sua resistência à tração.




Grupo (a)



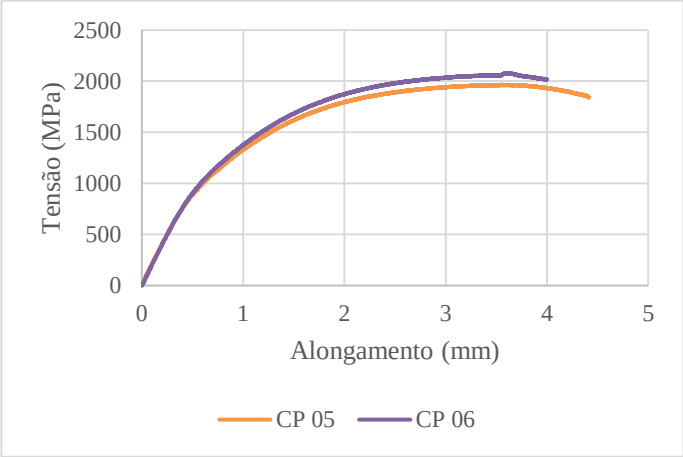

Grupo (b)

Figura 8 – Resultados do ensaio de tração.

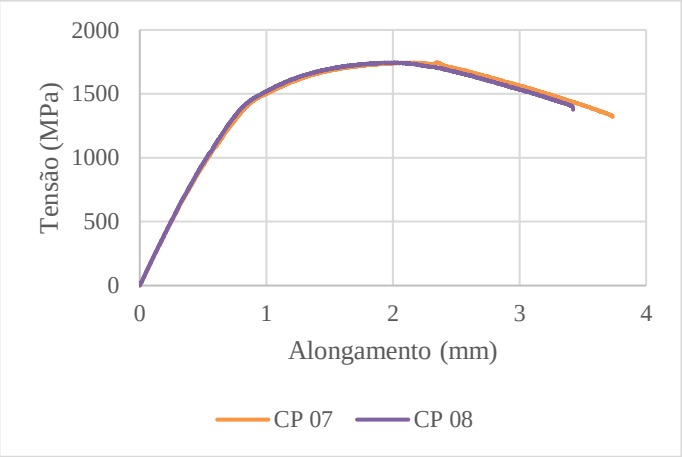
Ao analisar os dados referentes aos corpos de prova temperados podemos concluir de imediato o aumento de sua resistência a tração como pode ser visualizado na tabela 3, onde quando comparados com os corpos de prova em estado

natural podemos observar que os corpos de prova 5 e 6 aumentaram em média 83,60%, 7 e 8 aumentaram em média 58,21%, 9 e 10 aumentaram em média 81,72% e 11 e 12 aumentaram em média 55,80%. O aquecimento à temperatura elevada e conseguinte resfriamento em óleo geraram um aumento de resistência à tração. É notável a diferença de resistência à tração apresentada entre os corpos de prova temperados em óleo 10w40 e 20w50. Tal afirmação é de fácil leitura quando comparados os a figura 8 (condizentes com comportamento dos corpos de prova de 05 a 12).

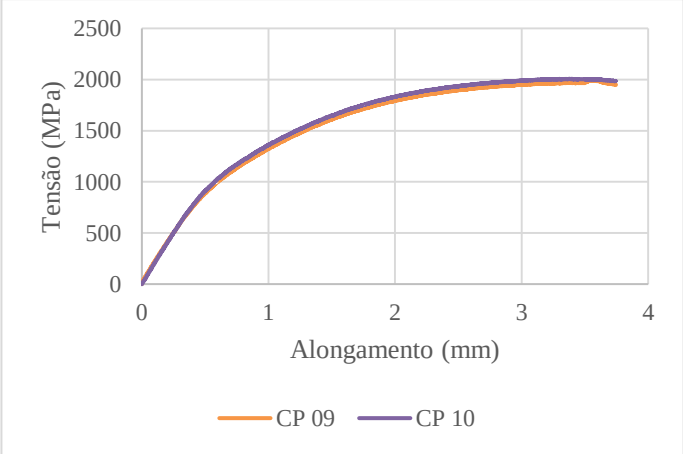
Um fator merece destaque: o óleo 10w40 é mais fino que o 20w50. Vemos que tal característica aparentemente culminou em uma significativa diferença no momento da têmpera. Durante o resfriamento ocorreu uma melhor troca de calor entre o óleo e o corpo de prova, situação, esta, que terminou por gerar uma maior resistência a tração.



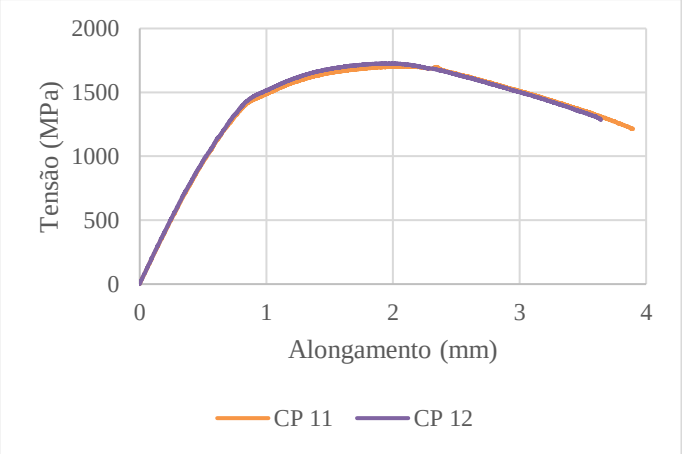

Grupo (c)




Grupo (d)




Grupo (e)




Grupo (f)

Figura 9 – Resultados do ensaio de tração.

Após iniciar a análise dos gráficos gerados pelo equipamento de ensaio de tração podemos observar que cada grupo segue o mesmo padrão de resposta a tração, esse padrão é referente ao comportamento as forças atuantes. Ao analisarmos os resultados fica evidente que a diferença de temperatura no revenimento gerou uma pequena diferença na resistência a tração entre os corpos de prova revenidos 200°C e os revenidos a 300°C entretanto para ser possível a caracterização desta diferença seria necessário uma análise com um número maior de corpos de prova.

Tabela 3 - Valores calculados de acordo com o ensaio de tração.

| GRUPO | CP | Tensão máxima | Alongamento | Tensão de ruptura |
|---|---|---|---|---|
| | | $\sigma = \frac{F}{A}(MPa)$ | $\Delta l = Lf - Lo$ (mm) | $\sigma_{RUP}$ (MPa) |
| A | 01 | 1099,58 | 4,14 | 940,43 |
| A | 02 | 1099,94 | 4,11 | 1070,22 |
| B | 03 | 1074,83 | 5,01 | 893,38 |
| B | 04 | 1147,68 | 4,29 | 1011,52 |
| C | 05 | 2077,50 | 4,04 | 2014,19 |
| C | 06 | 1960,78 | 4,41 | 1836,65 |
| D | 07 | 1735,14 | 3,73 | 1318,86 |
| D | 08 | 1744,69 | 3,39 | 1375,45 |
| E | 09 | 1992,97 | 3,74 | 1982,71 |
| E | 10 | 2003,94 | 3,69 | 1986,96 |
| F | 11 | 1702,96 | 3,89 | 1212,41 |
| F | 12 | 1723,82 | 3,61 | 1283,14 |

## CONCLUSÃO

Após a análise dos resultados podemos concluir que os experimentos realizados com o objetivo de se alterar as microestruturas, aumento da dureza e aumento da resistência a tração foram alcançados com êxitos. A revisão bibliográfica apresentada tem a finalidade de validar os experimentos realizados.

As alterações apresentadas pelo ensaio metalográfico são alterações características dos tratamentos de normalização e têmpera. Os tratamentos evidenciaram alguns dentes microconstituintes tais como, bainita, ferrita, perlita, martensita e martensita revenida.

O processo de têmpera atingiu seu objetivo aumentando a dureza e resistência a tração. A diferença de dureza e resistência a tração provavelmente se deu pela diferença da viscosidade entre os óleos 10w40 e 20w50. No óleo 10w40 se obteve uma maior dureza e resistência a tração por ser um óleo que tem sua viscosidade cinemática menor o que gerou uma troca mais rápida de calor entre o corpo de prova aquecido e o óleo usado no processo de têmpera. A diferença da temperatura usada no revenimento de 200° e 300° não gerou uma redução de dureza e resistência a tração significativa, porem para podermos caracterizar se houve ou não está redução, seria necessário um estudo com uma maior quantidade de corpos de prova.

## AGRADECIMENTOS

**GOSTARIA DE AGRADECER A UNIVERSIDADE DO DISTRITO FEDERAL POR TODOS O SUPORTE NO DESENVOLVIMENTO DESTE TRABALHO. UM AGRADECIMENTO EM ESPECIAL PARA A UNB POR ME AUXILIAR NOS ENSAIOS DESTE TRABALHO ONDE ME FORNECERAM O LOCAL E TÉCNICO EXPERIENTE PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS. UM AGRADECIMENTO EM ESPECIAL PARA O PROFESSOR TIAGO DE MELO POR ME ORIENTAR NO DECORRER DO SEMESTRE.**

## REFERÊNCIAS

AKSTENS, Frank. ASM Handbook. 10ª ed. Massachusetts: Staff, 2005.
BHADESHIA, Harshad. Current Opinion in Solid State and Materials. 2ª ed. Londres: IOM communications, 2004.
BRAMFITT, Bruce, Structure/property relationships in irons and steel. 2ª ed. J.R. Davis, 1998.
CALLISTER, William. Ciência e engenharia de materiais uma introdução. 7ª ed. São Paulo: LTC, 2007.
CARDOSO, Andréia. Caracterização mecânica e microestrutural dos aços SAE 4340 e 300M após soldagem a laser e tratamento superficial de nitretação a plasma. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, USP, 2011. 112p: il.
CHIAVERINI, Vicente. Aços e Ferros Fundidos. 7ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1998.
COLPAERT, Hubertus, Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 3ª ed. Edgard Blucher LTDA, 1974.
CONTTRELL, Alan. An Introduction to Metallurgy. 4ª ed. Houston: Cooper Cameron Corporation, 2002.

COSTA, André, Aços e ligas especiais. 2ª ed. São Paulo: Edgard blucher, 2006.
KLOCKE, Fritz. Tecnologia da usinagem com ferramentas de corte de geometria definida. Florianópolis: s.n, 2002.
LEE, Woei-shyan. Mechanical properties and microestrutural features of AISI 4340 high-strength alloy steel under quenched and tempered conditions. Journal of Materials Processing Technology. 87 ed. Taiwan: Department of Mechanical Engineering, 1999.
REBECHI, João. Correlações Numéricas entre taxas de resfriamento, microestruturas e propriedades mecânicas para o tratamento térmico do aço AISI/SAE 4140. Rio Grande do Sul, Dissertação Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
RIOS, Carlos. influência de tratamentos térmicos na microestrutura e propriedades mecânicas do aço sae 4140. Natal: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2016
RODRIGUES, Luiz. Ensaios mecânicos de materiais. São Paulo: Instituto federal de Brasília, 2012.
SEVALE, Lucas, Avaliação das Propriedades Das Propriedades Mecânicas e dos Constituintes do Aço SAE 4340. Rio de Janeiro: Congresso Regional de Estudante de Engenharia Mecânica-CREEM, 2014.
TEÓFILO, Jorge. Ensaios Mecânicos em Materiais Metálicos. São Paulo: 2013.
TOTTEN, George. Steel Heat Treatment. 2ª Ed. Portland: Taylor & Francis, 2006.
REISNER, George. Modelagem Micromecânica da Transformação Martensítica em Microestruturas Aleatórias. vol. 35, EA Werner e FD Fischer: Issue 1998.

**DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE**

O AUTOR VICTOR SANTANA DA ROCHA É O ÚNICO RESPONSÁVEL PELO MATERIAL IMPRESSO CONTIDO NESTE ARTIGO.

**ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO**

Assinalar aqui, com um X, a seção ‘área de conhecimento do trabalho’.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(x) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

# CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL EM AÇOS DE BAIXO CARBONO UTILIZADOS EM PLANTAS DE PAPEL E CELULOSE

**Bruno de Oliveira Schneider**[1]
brunoschneidernv@gmail.com

**Matheus Alves Lima**[1]
matheus13.limma@gmail.com

**Guilherme Agues Emerick**[1]
guilherme.aguese@gmail.com

**Bruno Azeredo Passigatti**
bruno.passigatti@ifes.edu.br
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – campus Guarapari
Alameda Francisco Vieria Simoes, 720 - Aeroporto, Guarapari - ES, 29216-795

**Davi Pereira Garcia**[1]
davi.garcia@ifes.edu.br

[1]Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – campus São Mateus
Rodovia BR 101 Norte, Km 58, Bairro Litorâneo - CEP 29.932-540, São Mateus – ES

**RESUMO:** Devido à alta aplicabilidade dos aços nos diversos componentes de uma indústria, o estudo das suas propriedades torna-se fundamental para que ocorra a seleção do material adequado para cada função correspondente. As análises da microestrutura e da microdureza apresentam-se como ferramentas de grande importância para o estudo do comportamento de materiais metálicos quando submetidos a diversas situações. A amostra analisada provém de um radiador utilizado para trocas de calor envolvendo ar úmido e quente em uma indústria de papel e celulose. Este componente foi substituído após não conseguir exercer mais suas atividades técnicas. As caracterizações microestruturais foram realizadas por microscópio óptico (MO), a composição química foi obtida através de aplicação do Sistema de Energia Dispersiva (EDS) acoplado com o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e sua dureza medida por um microdurômetro. Os resultados da metalografia estão de acordo com o da microdureza e da análise química. Percebeu-se que a amostra apresentava alguns pites provenientes de uma corrosão galvânica.

**Palavras-Chave:** Aço, metalografia, microdureza

***ABSTRACT:*** *Due to the high applicability of steels in the various components of an industry, the study of their properties becomes essential for selection of the appropriate material for each corresponding function. Microstructure and microhardness analyzes are presented as tools of great importance for the study of the behavior of metallic materials when subjected to different situations. The sample analyzed comes from a radiator used for heat exchanges involving hot and humid air in a pulp and paper industry. This component was replaced after failing to perform its technical activities further. The microstructural characterizations were performed by optical microscope (MO). The chemical composition was obtained by applying the Dispersive Energy System (EDS) coupled with the Scanning Electron Microscope (SEM) and its hardness was measured by a micro durometer. The results of metallography are in accordance with micro hardness and chemical analysis. It was noticed that the sample had some pites coming from a galvanic corrosion.*

***Keywords:*** *steel, metallography, micro hardness*

## INTRODUÇÃO

A combinação entre composição química e estrutura é responsável pela definição das propriedades de um aço. A caracterização da composição química pode ser realizada por meio de diversos métodos e técnicas de análise química. As técnicas metalográficas (micrográficas e macrográficas) aplicam-se para a caracterização da estrutura (Colpaert, 2008). A revelação da microestrutura acontece devido ao processo de oxidação da superfície da amostra metalográfica, resultante da ação do agente oxidante na solução de ataque. O potencial de oxidação será de acordo com a concentração do agente oxidante (De Aguiar *et al*, 2008 apud Silva e Rossi, 1977).

Microscópios ópticos e de varredura são geralmente utilizados em microscopia, pois auxiliam nas investigações das características microestruturais de todos os tipos de materiais, tornando-se uma ferramenta extremamente útil no estudo e na caracterização dos materiais (Callister, 2008).

Por meio desses procedimentos, é possível analisar os efeitos de tratamentos termoquímicos, processos de conformação mecânica e de parâmetros que afetam a usinabilidade. Rodrigues *et al* (2014) estudou a influência da concentração de carbono em aços 1020 e 1060. Duda (2016) realizou uma caracterização microestrutural em aços inoxidáveis aplicados em matrizes injetoras do setor têxtil. De Freitas *et al* (2016) estudou o comportamento do aço SAE 1020 em diferentes tratamentos térmicos. Da Silva (2008) utilizou a metalografia para observação das influências na formação do cavaco formado por diversos parâmetros de corte.

Segundo De Aguiar *et al* (2008), a metalografia apresenta-se como um recurso poderoso no desenvolvimento de pesquisas e no controle industrial. A correta caracterização da microestrutura possibilita uma correta modelagem e previsão da microestrutura final ao longo do processo, permitindo-se consequentemente verificar as propriedades requeridas.

Ao se realizar uma análise de falhas de um equipamento, o estudo metalográfico e de microdureza aparece como ferramenta fundamental, pois possibilita avaliar se o material apresentava propriedades desejáveis à aplicação ou a identificação dos pontos que levaram à falha, como a identificação de trincas, marcas de fadiga e detecção de corrosão.

Aços que possuem teores de carbono abaixo do limite de solubilidade da cementita na fase CCC são chamados de ferrita na temperatura ambiente. Esse tipo de material geralmente apresenta dureza baixa. Os aços carbono que possuem teores de carbono abaixo de 0,77% são denominados hipoeutetóides e os aços com teores acima são os hipereutetóides (Colpaert, 2008).

Quanto maior a concentração de carbono, uma maior área de perlita (definida pelo seu caráter lamelar facilmente observado) e poucas áreas de ferrita. Isso nos leva a um material de elevada dureza, alta resistência mecânica e com resistência ao desgaste, resistência à fadiga e tenacidade bastante razoáveis (Colpaert, 2008).

Uma das maneiras de se encontrar o valor da dureza dos aços se dá pelo ensaio de dureza Vickers, que relaciona a carga aplicada à área superficial de impressão. O penetrador padronizado é uma pirâmide de diamante de base quadrada e com ângulo de 136º entre as faces opostas. O ensaio pode ser aplicado em materiais metálicos de qualquer dureza, em corpos de prova muito finos, pequenos e irregulares (Garcia, Santos e Spim, 2012).

Corrosão pode ser definida como a deterioração de um material, geralmente metálico, através de uma ação química ou eletroquímica do meio ambiente, sendo associada ou não a esforços mecânicos. A deterioração causada representa alterações prejudiciais indesejáveis, sofridas pelo material, como o desgaste, variações químicas ou modificações estruturais. Isto pode prejudicar a integridade dos equipamentos e instalações, tendo impacto direto na confiabilidade (Gentil, 2011).

As pilhas ou células de corrosão eletroquímica são responsáveis pela deterioração do material metálico em regiões anódicas (onde há desgaste). O aparecimento destas pilhas é consequência dos potenciais de eletrodo diferentes em pontos da superfície metálica. As reações de corrosão eletrolítica sempre envolvem reações de oxirredução (Nunes, 2007).

De acordo com Nunes (2007) e Gentil (2011), entre os principais tipos de pilha está a de eletrodos metálicos diferentes (galvânica). Esta pilha surge quando dois metais ou ligas metálicas diferentes são colocadas em contato e imersos em um mesmo eletrólito. O metal mais ativo em relação ao potencial de eletrodo funciona como o anodo da pilha, cedendo elétrons e sendo corroído.

A caracterização da corrosão segundo a morfologia pode auxiliar bastante no esclarecimento do mecanismo e na aplicação das medidas adequadas para proteção. Entre os principais tipos de corrosão localizada, temos: por placas, alveolar, puntiforme ou por pite (Gentil, 2011).

O presente estudo teve como objetivo realizar a caracterização de um aço de baixo carbono aplicado a um componente utilizado em plantas de papel e celulose, através de uma análise química, metalográfica e de microdureza, buscando-se estabelecer a causa raiz para a falha do equipamento através do o material analisado.

## METODOLOGIA

O radiador analisado funciona como trocador de calor que transfere energia para o ar de insuflamento do secador de celulose, conforme Fig. (1). Este componente é composto por um tubo na sua região central, cercado por aletas. O estudo foi realizado tanto para o tubo como para as aletas.

**Figura 1.** Amostra do radiador

**Procedimento experimental**

Todos os procedimentos de preparação das amostras para análise metalográfica seguiram a metodologia de Rohde (2010). Com auxílio de serras, cortaram-se amostras com tamanhos em cerca de 1,5 x 1,5 cm de modo que pudesse ser realizada uma análise química e metalográfica, conforme Fig. (2). Para a análise química foram cortadas três amostras e duas para a análise metalográfica.

**Figura 2.** Amostras do tubo (à esquerda) e das aletas (à direita) do radiador

As amostras com o destino de análise metalográfica foram levadas para o embutimento a quente, com a utilização de baquelite para a confecção dos corpos de prova e utilizando a embutidora Risitec RS 30.

Após o embutimento, os corpos de prova passaram para o processo de lixamento utilizando-se lixas de menor granulometria até a maior (120, 220, 400, 600, 800, 1200) com o auxílio da lixadeira e politriz para metalografia Fortel modelo PLF, a uma velocidade de 125 rpm, conforme Fig. (3).

**Figura 3.** Corpos de prova após embutimento e lixamento inicial.

Em seguida, os corpos de prova passaram pelo processo de polimento no qual se utilizou pasta de alumina de 1 µm e 0,3 µm com o auxílio da mesma politriz.

Após o polimento, realizou-se o ataque químico de modo que pudesse visualizar os contornos de grão e as diferentes fases da microestrutura.

Para um aço carbono, um dos reagentes indicados segundo Colpaert (2008) é o Nital 2%. Sua composição é de 5% de $HNO_3$ (ácido nítrico) e 95% de etanol. Este foi utilizado para o ataque químico.

O ataque químico é por meio de imersão, em Colpaert (2008) aconselha-se um tempo de imersão entre 5 a 15 segundos. Realizou-se ataques químicos utilizando tempos de 5, 10, 15, 18 e 20 segundos.

A visualização da microestrutura foi realizada utilizando um microscópio óptico Olympus BX51M.

Após a análise metalográfica, os corpos de prova foram levados para o ensaio de microdureza Vickers, utilizando-se o microdurômetro Microhardness Tester HV – 1000. A carga utilizada foi de 9,8 N e tempo de 15 segundos, de acordo com a norma NBR NM-188-1. Foram realizados três ensaios para cada corpo de prova.

A análise química foi realizada através no Ifes campus Vitória, por meio da aplicação do EDS (Sistema de Energia Dispersiva) acoplado com o MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura. Apenas foi possível realizar a análise química do tubo do radiador pois ocorreram problemas técnicos associados a restrições da geometria que impossibilitaram a análise química da aleta.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados os resultados dos ensaios realizados para o tubo e para aleta do radiador.

### Tubo do radiador

O resultado da análise química apresenta a composição do material analisado (em %), conforme Tab. 1.

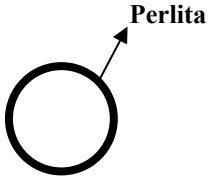
**Tabela 1.** Composição química da amostra do tubo do radiador

| Elemento químico | Amostra 1 | Amostra 2 | Amostra 3 | Média |
|---|---|---|---|---|
| Fe | 98.3 | 96.4 | 96.6 | 97.1 |
| C | 0.0847 | 0.0745 | 0.0050 | 0.0530 |
| Si | 0,0050 | 0,0050 | 0,0050 | 0,0050 |
| Mn | 0,354 | 0,298 | 0,297 | 0,316 |
| P | 0,0050 | 0,0050 | 0,0050 | 0,0050 |
| S | 0,0050 | 0,0050 | 0,0050 | 0,0050 |
| Cr | 0,114 | 0,0414 | 0,0324 | 0,0627 |
| Mo | 0,0054 | 0,0063 | 0,0107 | 0,0075 |
| Ni | 0,0427 | 0,0250 | 0,0349 | 0,0342 |
| Al | 0,0302 | 0,0200 | 0,0194 | 0,0232 |
| Co | 0,0050 | 0,0050 | 0,0050 | 0,0050 |
| Cu | 0,0050 | 1,52 | 1,55 | 1.02 |
| Nb | 0,0241 | 0,0208 | 0,0097 | 0,0182 |
| Ti | 0,0050 | 0,0050 | 0,0050 | 0,0050 |
| V | 0,0050 | 0,0050 | 0,0050 | 0,0050 |
| W | 0,0522 | 0,0965 | 0,106 | 0,0849 |
| Pb | 0,200 | 0,200 | 0,200 | 0,200 |

Percebe-se de fato que o tubo do radiador se trata de um aço carbono devido a sua alta concentração de ferro e baixa concentração de cromo. Uma vez que sua concentração de carbono é menor que 0,77%, classifica-se como um hipoeutetóide.

Através da apostila Guia do Aço – Arcelor Mittal (2013), é possível comparar a composição química dos aços tabelados com o resultado da análise química. Segundo a norma da SAE J403: 2001, o aço que mais se apresenta semelhante é o aço SAE 1006.

Em relação à análise metalográfica, os melhores resultados obtidos ficaram nos tempos de 15 e 18 segundos de ataque. Em 10 segundos, as amostras não estavam atacadas o suficiente para visualização dos contornos de grãos e em 20 segundos já se encontravam queimadas, conforme Fig. (4-a).



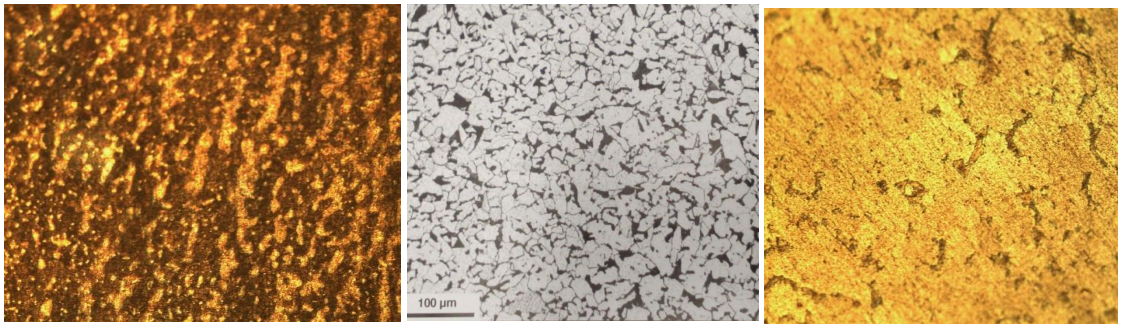



**Figura 4. a)** Amostra com superfície queimada. Ampliação: 50 x **b)** Aço AISI 1010 normalizado. Ataque: Nital 2% (Colpaert, 2008) **c)** Amostra Tubo do radiador. Ampliação: 200 x

Ao comparar com Colpaert (2008), as imagens obtidas com o ataque de 15 segundos mostraram-se semelhantes à microestrutura de um aço de baixa liga hipoeutetóide, Fig. (4-b) e Fig. (4-c), confirmando-se juntamente ao resultado obtido na análise química. Em sua microestrutura, observa-se uma matriz austenítica com a formação da perlita (grãos mais escuros). O resultado foi semelhante ao encontrado por Rodrigues *et al* (2014).

Percebe-se pela Fig. (4-c) que a concentração de perlita é bem menor quando comparada com Fig. (4-b). Isto se deve ao fato de sua concentração de carbono ser menor do que de um aço 1010 ou 1020. Aumentando-se o tempo de imersão para 18 segundos, é possível observar também o aparecimento de algumas inclusões, conforme Fig. (4-b), provenientes dos elementos de ligas presentes no material. Estes não puderam ser identificados quanto ao tipo de elemento utilizando este tipo de análise.

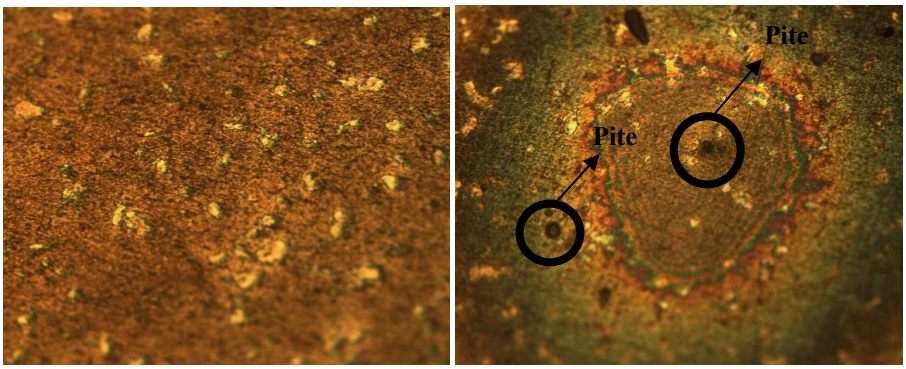



**Figura 5. a)** Identificação das inclusões. Ampliação: 200 x **b)** Identificação de pites. Ampliação: 200 x

Em algumas imagens, pode-se ser observado a existência de alguns pontos de corrosão como na Fig. (5-b). Estes pelo seu formato são identificados como corrosão por pites.

No ensaio de microdureza, calculou-se uma média dos valores obtidos, conforme Tab. 2. Foi necessário realizar mais de um ensaio porque os valores de dureza estavam dispersos. Isto ocorreu devido às diferenças das propriedades de cada região da amostra. Alguns locais apresentam pites, encruamento ou inclusões, considerando que a impressão deixada pelo penetrador é muito pequena em relação à amostra.

**Tabela 2.** Resultado da microdureza – Tubo do radiador

| Amostras | Dureza 1 [HV] | Dureza 2 [HV] | Dureza 3 [HV] |
|---|---|---|---|
| Tub Rad 1 | 125,40 | 106,50 | 118,40 |
| Tub Rad 2 | 97,50 | 128,30 | 105,40 |
| Média | | | 113,08 ±11,61 |

Assim, a dureza estimada do tubo do radiador é de 113,58 HV, com um desvio padrão de 11,61 HV. Comparando os resultados com os valores disponíveis no Guia do Aço – Arcelor Mittal (2013), percebe-se que para o aço SAE 1006 (composição química semelhante à do tubo de radiador) a dureza é de 90 HV para laminados e 100 HV para trefilados. Comparando-se com a dureza apresentada por aços 1020 em Freitas (2016) e Rodrigues *et a*l (2014), a dureza

apresentada pela amostra se mostrou menor. Esta resposta era esperada, uma vez que apresenta menor concentração de carbono. Logo, a dureza do tubo do radiador apresenta um resultado equivalente à sua composição química.

**Aleta do radiador**

Mesmo sem ter realizado a análise química das amostras da aleta do radiador, apenas comparando as imagens obtidas pela metalografia pode-se observar que os materiais são diferentes. Isso pode ser observado devido ao comportamento que cada amostra teve quando submetida ao mesmo ataque químico.

A amostra da aleta do radiador, ilustrada na Fig. (6-b), aparenta ter uma maior concentração de carbono do que do tubo do radiador. Não se assemelham ainda a um aço de baixo carbono hipereutetóide segundo Fig. (6-a), assim deve-se ter uma concentração de carbono abaixo de 0,77 %. O melhor tempo de imersão para as amostras foi de 18 segundos.

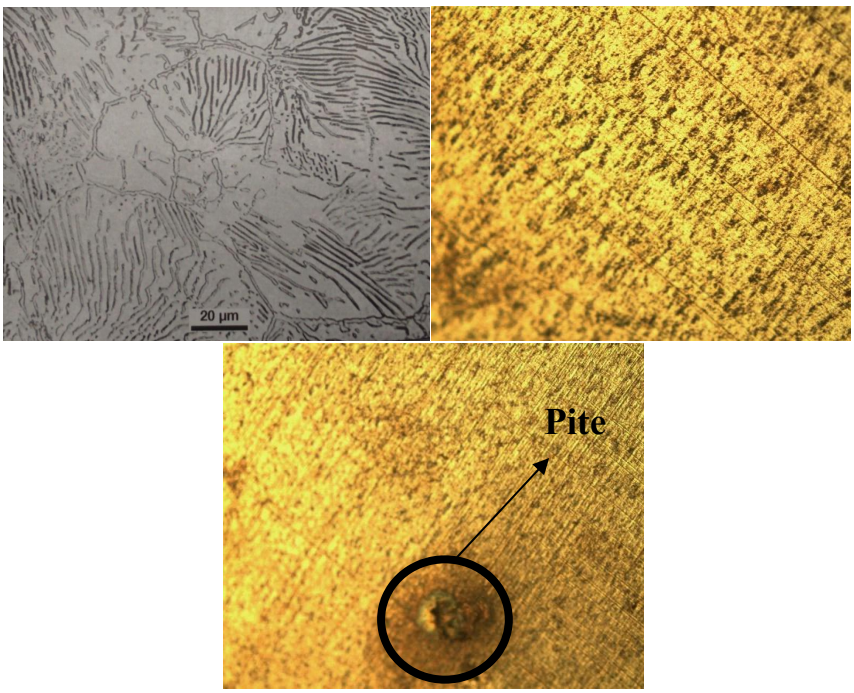



**Figura 6. a)** Aço hipereutetóide. Cementita em rede. Ataque: Nital 2% (Colpaert, 2008). **b)** Amostra Aleta do radiador. Ampliação: 200 x. **c)** Identificação de corrosão por pite. Ampliação: 100 x

Pode ser observado também que o material apresenta alguns pontos de corrosão por pite, conforme Fig. (6-b).
Foi realizado o ensaio de microdureza para a aleta e os resultados podem ser observados na Tab. 3.

**Tabela 3.** Resultado da microdureza – Aleta do radiador

| Amostras | Dureza 1 [HV] | Dureza 2 [HV] | Dureza 3 [HV] |
|---|---|---|---|
| Alet Rad 1 | 126,8 | 141,3 | 170,2 |
| Alet Rad 2 | 134,6 | 136,9 | 133,6 |
| Média | | | 140,57 ± 15,27 |

Logo, a dureza estimada da aleta do radiador é de 140,57 HV, com um desvio padrão de 15,27 HV. Comparando o resultado da dureza com os valores disponíveis no Guia do Aço – Arcelor Mittal (2013), aços com dureza semelhante são o SAE 1021 e o SAE 1022, ambos com concentração de carbono na faixa de 0,18-0,23%C.

## CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos da análise química do tubo do radiador e da análise metalográfica tanto da aleta como do tubo, pode-se concluir que os materiais se tratam de um aço de baixa concentração de carbono, do tipo hipoeutetóide. As análises mostraram que as amostras são de materiais diferentes ao comparar as suas microestruturas.

Quanto maior o teor de carbono, mais duro e resistente é o material. Os ensaios de dureza comprovaram os resultados da metalografia, uma vez que a aleta do radiador apresentou em suas imagens maiores concentrações de carbono e uma maior dureza quando comparada ao tubo do radiador.

Nos dois tipos de amostras foram identificados pontos de corrosão e, de acordo com sua morfologia, foram classificados como pontos de corrosão por pite.

Analisando-se o material das amostras nas suas respectivas funções, pertencentes ao radiador aletado, a ocorrência da falha do equipamento devido à corrosão pode ser explicada pela diferença da composição dos materiais da aleta e do tubo. Essa diferença pode proporcionar a formação de uma pilha galvânica (quando dois tipos de materiais diferentes estão em contato em um mesmo eletrólito), responsável pela deterioração do material metálico nas regiões em que ocorrem desgaste (regiões anódicas).

Logo, uma possível solução para este problema é colocar um radiador que possui o mesmo tipo de material tanto na aleta como no tubo.

Uma outra alternativa, em acordo com Carbó (2008), pode ser a utilização de aços inoxidáveis austeníticos (da série 300), pois apresentam boa soldabilidade, excelente resistência à corrosão e ductilidade.

## AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal do Espírito Santo Campus São Mateus pelo apoio à pesquisa.

## REFERÊNCIAS

Aguiar, M. A. S. de; Rodrigues, F. L. S.; Silva, M. C. A.; Mei, P. R.; Sobral, M. D. C., 2008, " Metalografia qualitativa e quantitativa de grãos de austenita prévia de aços de alta resistência e baixa liga", CONEM, V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Salvador, Brasil.

Carbó, H. M., 2008, "Aços inoxidáveis: aplicações e especificações", Arcelor Mittal, Brasil.

Colpaert, H., 2008, "Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns", 4 ed., Ed. Edgard Blücher, São Paulo, Brasil.

Duda, B. C. C., 2016, "Caracterização de propriedades mecânicas em aços de baixa, média e alta liga", 22º CBECiMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Natal, Brasil.

Freitas, B de. M.; Neto, J. C. De M.; Da Silva, R. De S.; Gusmão, A. R. B.; Freitas, L. B., 2016, "Microestrutura e microdureza do aço SAE 1020 em diferentes tratamentos térmicos", CONTECC, Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, Foz do Iguaçu, Brasil.

Garcia, A., Santos, C. A., Spim, J. A., 2012, "Ensaios dos Materiais", 2 ed., Ed. LTC, Rio de Janeiro, Brasil.

Gentil, V., 2011, "Corrosão", 6 ed., Editora LTC, Rio de Janeiro, Brasil.

Guia do Aço, Arcelor Mittal, 2013, Brasil.

Nunes, L. P., 2007, "Fundamentos de resistência à corrosão". 1 ed. Ed. Interciência: IBP: ABRACO, Rio de Janeiro, Brasil.

Rohde, R. A., 2010, "Metalografia e preparação de amostras: uma abordagem prática", Brasil.

Rodrigues, L. M.; Dos Santos, C. H. R.; Veloso, R. R.; Lemos, M. V.; Dos santos, C.; Cabral, R. F., 2014, "Estudo da microestrutura e da microdureza dos aços 1020 e 1060", UniFOA – Centro Universitário de Volta Redonda, Edição especial do Curso de Mestrado Profissional em Materiais, Volta Redonda-RJ, Brasil.

Silva, M. A. de, 2008, "Investigação experimental da formação do cavaco na usinagem do aço ABNT 1045 e do ferro fundido nodular", Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, Brasil.

Silva, U. M. C.; Rossi, I., 1977, "Técnicas e Procedimentos na Metalografia Prática", São Bernardo do Campo, Brasil.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção 'área de conhecimento do trabalho'.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(X) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas

( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

**XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 27 à 31 de agosto de 2018 – Brasília, DF**

# DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA LIVRE PARA PLANEJAMENTO COMPOSTO CENTRAL

**Silane Neves da Silva**
Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás – Campus Goiânia
R. 75 - St. Central, Goiânia - GO, 74055-110
silanesns@gmail.com

**Paulo Vinícius da Silva Resende**
Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás – Campus Goiânia
R. 75 - St. Central, Goiânia - GO, 74055-110
paulo.vinicius@ifg.edu.br

**Ildeu Lúcio de Oliveira**
Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás – Campus Goiânia
R. 75 - St. Central, Goiânia - GO, 74055-110
ildeu.siqueira@gmail.com

**Anselmo Elcana de Oliveira**
Universidade Federal de Goiás – Instituto de Química – Campus Goiânia
Av. Esperança, s/n - Chácaras de Recreio Samambaia, Goiânia - GO, 74690-900
elcana.iqufg@gmail.com

**RESUMO:** O presente trabalho apresenta uma ferramenta gratuita para Planejamento Composto Central (CCD). Ela foi desenvolvida sob a plataforma *open source* LibreOffice Calc®. A ferramenta realiza planejamentos CCD com dois níveis e duas variáveis. A interpretação dos resultados é feita através da Análise de Variância (ANOVA), dos efeitos calculados e graficamente. A matriz ANOVA e a matriz de efeitos fornecem resultados numéricos para uma análise quantitativa, enquanto que os gráficos de barras e os de linhas apresentam os resultados de forma qualitativa. Além disso, para melhor compreensão e avaliação dos resultados, são gerados gráficos de superfície com o software GNU Plot®.

**Palavras-Chave:** Planejamento Experimental, Planejamento Composto Central, Ferramenta Livre

***ABSTRACT:*** *This paper presents a free tool for Central Composite Design (CCD). It was developed on open source software LibreOffice Calc®.* This tool makes CCD designs for two levels and two variables. The results' interpretation is made through Variance Analysis (ANOVA), calculated effects and graphically. ANOVA and effects matrices give numerical results for quantitative analysis. Meanwhile, bars and lines graphs shows qualitative results. Furthermore, Surface graphs are generated on GNU Plot® software for better comprehension and results analysis.

***Keywords:*** *Design of Experiments, Central Composite Design, Free Tool*

## INTRODUÇÃO

Segundo Montgomery (2013), experimento é um teste ou uma série de testes cujas mudanças propostas são feitas com entrada de variáveis em um processo ou sistema para observação e identificação das razões para mudanças observadas nos resultados. O mesmo autor cita a relevância da metodologia de Planejamento de Experimentos quando se pretende investigar a relevância das variáveis envolvidas no processo, com destaque no desenvolvimento de experimentos com grande quantidade de variáveis.

Barros Neto et al. (2010) citam que a premissa de planejar um experimento é detalhar os fatores e respostas quantitativos ou qualitativos e os objetivos a alcançar com os experimentos para então escolher a técnica adequada de planejamento. Além disso, o experimento faz jus às estratégias baseadas no número de parâmetros, iterações, réplicas, dentre outros.

Dentre os vários tipos de planejamentos experimentais destacam-se os Planejamentos Fatoriais, que, de acordo com Montgomery & Runger (2016), são utilizados com frequência em experimentos envolvendo vários fatores em que é necssário estudar o efeito de determinados fatores sobre uma variável resposta (MONTGOMERY e RUNGER, 2016).

Bôsso (2013) orienta que a realização de réplicas pode ser inconveniente pelo aspecto temporal e financeiro, ao passo que é crucial para obter a estimativa dos erros. Para contornar as limitações, inclui-se um experimento no centro do planejamento, de modo a estimar o seu erro. Ao utilizar o Planejamento Fatorial com adição de ponto central para um modelo linear e houver significância estatística a partir do ponto central de referência, justifica-se a escolha do modelo quadrático com a construção do Planejamento Composto Central (Central Composite Design, CCD).

Planejamentos Experimentais são amplamente aplicados em Engenharia, especialmente em processos de fabricação, no estudo de quimioterapia e em qualquer aplicação em que se deseje conhecer os efeitos de interações entre as variáveis de entrada.

Atualmente, encontram-se diversos programas computacionais que disponibilizam as ferramentas de cálculo, análise e esboço gráfico de planejamentos experimentais. Ramos e Álvarez-Coque (2014, *apud* Novaes *et al*, 2017) os classificam em quatro grupos, sendo:

(a) Pacotes estatísticos de aplicação geral, como Statistica®, SAS® (Statistical Analysis System), Statigraphics®, Minitab®, entre outros. São *softwares* dedicados, com a finalidade de englobar as ferramentas estatísticas programadas para fins diversos.

(b) Pacotes de Quimiometria, especialmente desenvolvidos para os tratamentos de dados químicos como, por exemplo, The Unscrambler®. Em geral, esses programas não contemplam todas as ferramentas estatísticas e centram sua atenção nas ferramentas mais utilizadas nas áreas de conhecimento da Química, perdendo seu enfoque geral em detrimento da simplicidade, rapidez e comodidade.

(c) Os ambientes assistidos para o desenvolvimento de ferramentas estatísticas, como MATLAB®, Scilab® e Octave®. Neste caso, se disponibilizam opções de ferramentas básicas (como vetores e matrizes) para que o usuário crie seu próprio programa (rotina de programação) para tratar os dados. Há diversas bibliotecas e funções já desenvolvidas e compartilhadas para implementação, mas exige-se habilidade específica do usuário para operá-los.

(d) Planilhas de cálculo, aplicáveis à programas como Excel®, Calc®, Quattro Pro®, Origin®, entre outros. Os três primeiros são encontrados em pacotes básicos como no Microsoft Office, no LibreOffice e no Corel Office respectivamente. Eles possuem uma extensa relação de ferramentas estatísticas e podem servir de plataforma para entrada de dados e equações, realização de cálculos necessários para aplicação dos planejamentos experimentais, além de proporcionarem excelente visualização gráfica dos resultados.

No entanto, os *softwares* existentes ou não possuem interface amigável que favoreça o uso ou possuem preço elevado, não sendo acessíveis para todos. Visando atender a necessidade dos experimentalistas de uma ferramenta aplicável e gratuita, este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta para Planejamento Composto Central baseada em planilhas utilizando o software livre LibreOffice Calc®.

## METODOLOGIA

A ferramenta tem capacidade para efetuar Planejamento Composto Central em dois níveis, de dois a cinco pontos centrais, com dois fatores, para até 7 réplicas, e foi desenvolvida conforme apresentado no diagrama da Figura 1. O *software* LibreOffice Calc® não possui suporte para obtenção de gráficos de funções de mais de uma variável. A fim de auxiliar a obtenção do gráfico da superfície resposta, desenvolveu-se um *script* no *software* livre GNU Plot® versão 5.0. A validação da ferramenta foi executada por meio de comparação com resultados anteriormente publicados.

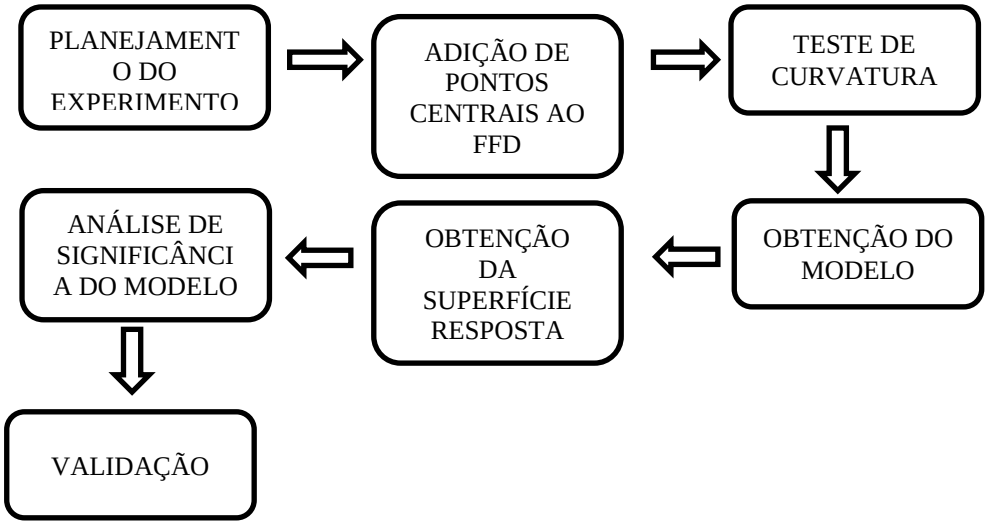


**Figura 1.** Fluxograma de Desenvolvimento da Ferramenta

De acordo com Resende & Silva (2017), A significância do ponto central acrescentado pode ser calculada de duas maneiras: comparando-se a variância conjunta V dos dados nesse ponto à magnitude de sua diferença média, $\bar{y}_C - \bar{y}_F$ ou através da tabela de ANOVA. Da primeira forma, a variância conjunta é obtida pela soma das variâncias individuais, obedecendo ao princípio da superposição. Para as corridas totais NF no planejamento fatorial, produto das réplicas fatorias nF pelo número de experimentos 2k, e as corridas no ponto central nc, estima-se um desvio σ, através da Eq. (1). Da segunda forma, a tabela de ANOVA projeta o valor de teste estatístico $F_0$ com base no cálculo da soma dos quadrados SQ, do número de graus de liberdade GDL e da média quadrática MQ, na região de curvatura e no erro, conforme Eq. (2) e (3). A média quadrática MQ de cada fonte de variação é a razão entre a soma dos quadrados SQ supracitados e o respectivo valor de grau de liberdade GDL, como mostrado na Tab. 1.

$$V(\bar{y}_F - \bar{y}_C) = S^2(\bar{y}_F - \bar{y}_C) = \frac{\sigma^2}{N_F} + \frac{\sigma^2}{n_c} \quad (1)$$

$$SQ_{curv} = \sum_{Pontos\ Centrais}(y_i - \bar{y}_C)^2 \quad (2)$$

$$SQ_{erro} = \frac{n_F n_C (\bar{y}_F - \bar{y}_C)^2}{n_F + n_C} \quad (3)$$

**Tabela 1.** Tabela ANOVA

| Fonte de Variação | Soma dos Quadrados | GDL | Média Quadrática | $F_0$ |
|---|---|---|---|---|
| A | $SQ_A$ | 1 | $MQ_A$ | $\frac{MQ_A}{MQ_{erro}}$ |
| B | $SQ_B$ | 1 | $MQ_B$ | $\frac{MQ_B}{MQ_{erro}}$ |
| AB | $SQ_{AB}$ | 1 | $MQ_A$ | $\frac{MQ_{AB}}{MQ_{erro}}$ |
| Curvatura | $SQ_{curv}$ | 1 | $MQ_{curv}$ | $\frac{MQ_{curv}}{MQ_{erro}}$ |
| Erro | $SQ_{erro}$ | $n_c - 1$ | $MQ_{erro}$ | |
| Total | $SQ_T$ | $n_c + n_f$ | | |

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 1. Desenvolvimento da Planilha

As definições de entrada da planilha foram criadas para simplificar o trabalho do usuário, conforme mostra a Tab. 2. O usuário deve entrar com a faixa quantitativa do fator a ser analisado nos níveis alto e baixo, selecionar o número de réplicas das corridas fatoriais (de um a sete) e o número de testes no ponto central (de dois à cinco).

**Tabela 2.** Definições de Entrada

| Definição do Experimento | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Fator | Nomenclatura | Nível Baixo (-) | Ponto Central | Nível Alto (+) |
| A | tempo | 30 | 35 | 40 |
| B | temperatura | 150 | 155 | 160 |
| nº de Réplicas | | | 1 | |
| nº de Pontos Centrais | | | 5 | |

A Tabela 3 apresenta a seção da planilha dedicada à inserção das réplicas com n de um a sete, conforme definido na Tab. 2, que devem ser colocadas na ordem de execução definida pelos fatores. O experimento será realizado na ordem aleatória sorteada pela planilha.

**Tabela 3.** Inserção dos Resultados Experimentais

| | | Fatores | | Réplicas | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| nº do Experimento | Ordem Execução | A | B | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | y |
| 1 | 4 | 30 | 150 | 39,3 | | | | | | | 39,30 |
| 2 | 1 | 40 | 150 | 40,9 | | | | | | | 40,90 |
| 3 | 2 | 30 | 160 | 40 | | | | | | | 40,00 |
| 4 | 3 | 40 | 160 | 41,5 | | | | | | | 41,50 |
| 5 | 5 | 35 | 155 | 40,3 | | | | | | | 40,46 |
| 6 | 6 | 35 | 155 | 40,5 | | | | | | | |
| 7 | 7 | 35 | 155 | 40,7 | | | | | | | |
| 8 | 8 | 35 | 155 | 40,2 | | | | | | | |
| 9 | 9 | 35 | 155 | 40,6 | | | | | | | |

O teste de curvatura, mostrado na Tab. 4, compara o resultado obtido pela diferença entre as médias dos pontos fatoriais e centrais para a variância conjunta. A informação é apresentada sequencialmente na planilha e, imediatamente o experimentalista pode tomar a decisão se continua o refinamento do modelo ou se permanece restrito ao modelo linear de primeira ordem, mostrado na Tab. 5, em caso de ausência de curvatura. Entretanto, para mensurar significância da curvatura faz-se necessário aplicar o modelo proposto para a tabela ANOVA, apresentada na Tab. 6.

**Tabela 4.** Teste de Curvatura

| Teste de Curvatura | | |
|---|---|---|
| yf -yc | S(yf -yc) | Modelo |
| -0,04 | 1,01 | Não há Curvatura |

**Tabela 5.** Coeficientes do Modelo de Primeira Ordem

| Termo | Coef. (β) | Variável Codificada |
|---|---|---|
| (1) | 40,425 | - |
| a | 0,775 | $x_1$ |
| b | 0,325 | $x_2$ |
| ab | -0,025 | $x_1 * x_2$ |

**Tabela 6.** Matriz ANOVA

| Matriz ANOVA | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Fatores** | **GL** | **SQ** | **MQ** | **Fo** | **P** |
| (1) | 1 | 6536,7225 | 6536,7225 | 152016,8023 | 0,0000 |
| a | 1 | 2,4025 | 2,4025 | 55,8721 | 0,0017 |
| b | 1 | 0,4225 | 0,4225 | 9,8256 | 0,0350 |
| ab | 1 | 0,0025 | 0,0025 | 0,0581 | 0,8213 |
| Curvatura | 1 | 0,0027 | 0,0027 | 0,0633 | 0,8137 |
| **Erro** | 4 | 0,1720 | 0,0430 | 0,0430 | |
| **Total** | 8 | 3,0022 | | | |

Após completado a primeira fase de testes, o próximo passo consiste num planejamento CCD de fato, a fim de obter os coeficientes do modelo quadrático. O usuário deve utilizar esta parte da ferramenta após o teste de curvatura, pois se não houver curvatura, o modelo quadrático não apresentará significância e será redutível ao linear. A inserção dos dados é realizada através da na Tab. 7.

**Tabela 7.** Definição de Variáveis para CCD

| Definição do Experimento | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Fator** | **Nomenclatura** | **-α** | **Nível Baixo (-)** | **Ponto Central** | **Nível Alto (+)** | **α** |
| **A** | tempo | 77,9 | 80 | 85 | 90 | 92,1 |
| **B** | temperatura | 167,9 | 170 | 175 | 180 | 182,1 |
| **Tipo** | Circunscrito | | | | | |
| **nº Pontos Centrais** | 3 | | | | | |

O Planejamento do Experimento é apresentado na Tab. 8. Os campos de Fatores da planilha mostram ao usuário o caminho para a obtenção da resposta em determinada execução com o nível de entrada estipulado. Y é a resposta para cada corrida do planejamento nos campos da coluna "Resposta". A Tabela 9 mostra ao usuário o cálculo dos coeficientes do modelo quadrático.

**Tabela 8.** Planejamento do Experimento e Inserção das Respostas

| nº do Exp. | Fatores | | Matriz Contraste | | | | | | Resposta |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | B | I | x1 | x2 | x1^2 | x2^2 | x1*x2 | y |
| 1 | 80 | 170 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 29,33 |
| 2 | 90 | 170 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 31,96 |
| 3 | 80 | 180 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 44,33 |
| 4 | 90 | 180 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 40,29 |
| 5 | 85 | 175 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 38,93 |
| 6 | 85 | 175 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 43,35 |
| 7 | 85 | 175 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 36,72 |
| 8 | 85 | 175 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - |
| 9 | 85 | 175 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - |
| 10 | 92 | 175 | 1 | -1,41 | 0 | 2 | 0 | 0 | 40,42 |
| 11 | 78 | 175 | 1 | 1,41 | 0 | 2 | 0 | 0 | 32,98 |
| 12 | 175 | 182 | 1 | 0 | -1,41 | 0 | 2 | 0 | 27,30 |
| 13 | 175 | 168 | 1 | 0 | 1,41 | 0 | 2 | 0 | 56,87 |

**Tabela 9.** Coeficientes do Modelo Quadrático

| Termo | Coef. | Variável Codificada |
|---|---|---|
| (1) | 39,667 | - |
| x1 | -1,491 | $x_1$ |
| x2 | 8,144 | $x_2$ |
| x1 ^2 | -2,212 | $x_1$^2 |
| x2 ^2 | 0,480 | $x_2$^2 |
| X1 * x2 | -1,668 | $x_1$ * $x_2$ |

A Tabela 10 mostra a matriz ANOVA para o modelo quadrático. Para p-valor menor que 0,05 entende-se que ao menos uma das variáveis contribui significantemente para a resposta.

**Tabela 10.** Matriz ANOVA para modelo quadrático

| Matriz ANOVA para a Regressão | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Fonte** | **GL** | **SQ** | **MQ** | **Fo** | **P** |
| Regressão | 5 | 12136,7582 | 2427,3516 | 173,1360 | 1,35E-05 |
| Erro | 5 | 70,0996 | 14,0199 | | |
| Total | 10 | 12206,8577 | | | |

Complementarmente ao *software* utilizado no desenvolvimento das planilhas, aplicou-se o software GNU Plot® para esboçar a superfície resposta. A Fig. 2 apresenta um exemplo gerado com os dados experimentais simbólicos para fim exemplificativo.

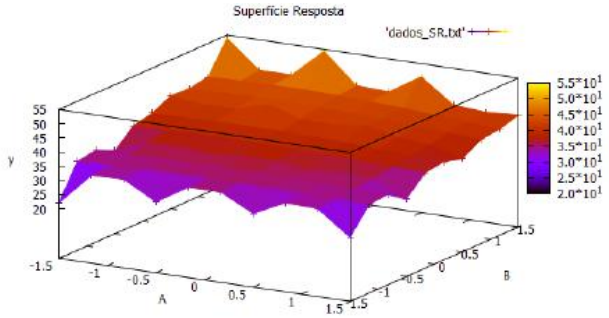



**Figura 2.** Exemplo de Superfície Resposta

## 2. Validação

Ferreira et al (2005) apud Bôsso (2012) analisaram o efeito das fontes de nutrientes sobre a produção de vinagre. Inicialmente havia a intenção de avaliar o efeito de três variáveis independentes: a concentração de etanol, de fontes de fósforo e de nitrogênio. Para tanto, os autores formularam um planejamento $2^3$. Ao interpretar o resultado, decidiu-se por refinar o modelo ao planejamento $2^2$ para ampliar a investigação das variáveis de maior influência no processo: a concentração de fósforo e de nitrogênio. Com isso, adicionou-se o planejamento estrela e os testes no ponto central para formar o planejamento CCD circunscrito. O tempo de reação, definido entre os níveis baixo e alto foi de 80 e 90 s, enquanto a temperatura de 170 e 180 ºC, na qual as variáveis naturais α e do ponto central foram codificadas. A Tabela 11 apresenta resumidamente dos dados utilizados para esse teste.

**Tabela 11.** Variáveis inseridas para o CCD

| Definição do Experimento | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Fator** | **Nomenclatura** | **-α** | **Nível Baixo (-)** | **Ponto Central** | **Nível Alto (+)** | **α** |
| **A** | tempo | 77,9 | 80 | 85 | 90 | 92,1 |
| **B** | temperatura | 167,9 | 170 | 175 | 180 | 182,1 |
| **Tipo** | Circunscrito | | | | | |
| **nº Pontos Centrais** | 3 | | | | | |

Com os dados devidamente inseridos na Tab. 11, a planilha executou os cálculos previamente programados e apresentou os resultados mostrados na Tab. 12.

**Tabela 12.** Respostas do Planejamento

| nº do Exp. | Fatores | | Matriz Contraste | | | | | | Resposta |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | B | I | x1 | x2 | x1^2 | x2^2 | x1*x2 | y |
| 1 | 80 | 170 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 29,33 |
| 2 | 90 | 170 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 31,96 |
| 3 | 80 | 180 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 44,33 |
| 4 | 90 | 180 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 40,29 |
| 5 | 85 | 175 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 38,93 |
| 6 | 85 | 175 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 43,35 |
| 7 | 85 | 175 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 36,72 |
| 8 | 85 | 175 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - |
| 9 | 85 | 175 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - |
| 10 | 92 | 175 | 1 | -1,41 | 0 | 2 | 0 | 0 | 40,42 |
| 11 | 78 | 175 | 1 | 1,41 | 0 | 2 | 0 | 0 | 32,98 |
| 12 | 175 | 182 | 1 | 0 | -1,41 | 0 | 2 | 0 | 27,30 |
| 13 | 175 | 168 | 1 | 0 | 1,41 | 0 | 2 | 0 | 56,87 |

Como resultados, obteve-se seis coeficientes para o modelo quadrático que descrevem o sistema. Comparando-se os resultados dos autores com os resultados encontrados, percebe-se que não houveram diferenças significativas. A Tabela 13 mostra os resultados obtidos na planilha.

**Tabela 13.** Coeficientes do Modelo Quadrático

| Termo | Coef. | Variável Codificada |
|---|---|---|
| (1) | 39,667 | - |
| x1 | -1,491 | $x_1$ |
| x2 | 8,144 | $x_2$ |
| x1 ^2 | -2,212 | $x_1$^2 |
| x2 ^2 | 0,480 | $x_2$^2 |
| X1 * x2 | -1,668 | $x_1$ * $x_2$ |

A Análise de Variância é apresentada na Tab. 14. Como é perceptível, o valor p menor que 0,05 indica que ao menos uma das variáveis analisadas é significantes para a resposta.

**Tabela 14.** Matriz ANOVA

| Matriz ANOVA para a Regressão | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Fonte | GL | SQ | MQ | Fo | P |
| Regressão | 5 | 12136,7582 | 2427,3516 | 173,1360 | 1,35E-05 |
| Erro | 5 | 70,0996 | 14,0199 | | |
| Total | 10 | 12206,8577 | | | |

A superfície gerada no software GNU Plot® para os dados de entrada fornecidos é apresentada na Figura 3.

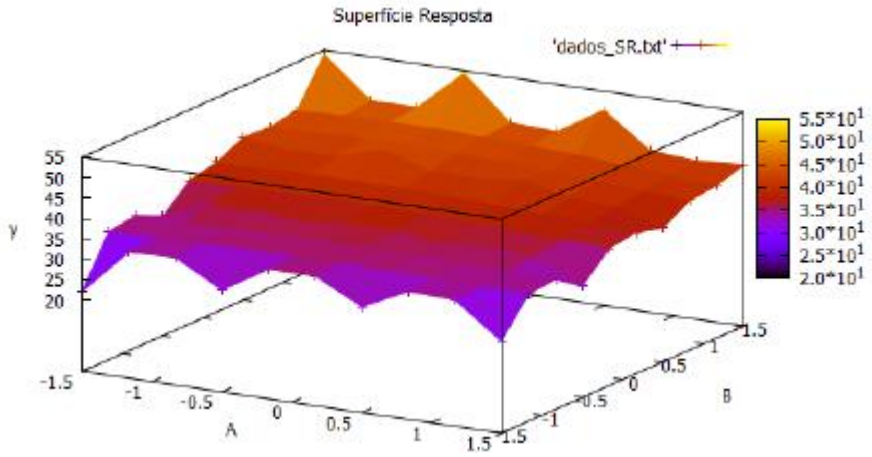



**Figura 3.** Superfície Resposta para os Dados Analisados

Comparando-se os resultados obtidos na ferramenta desenvolvida com aqueles encontrados nos resultados anteriormente publicados, verifica-se que não existem diferenças significativas que afetem a confiabilidade dos cálculos realizados na planilha. Portanto, a ferramenta desenvolvida apresenta-se como uma excelente alternativa para execução de planejamentos composto central que estejam dentro dos limites de operação da mesma.

## CONCLUSÃO

Planejamentos Experimentais são poderosas ferramentas que auxiliam fortemente o desenvolvimento tecnológico e científico quando o problema em foco exige análise de muitas variáveis simultâneas. Entretanto, os *softwares* existentes ou não são financeiramente acessíveis ou possuem grande complexidade para o usuário trabalhar. A ferramenta aqui desenvolvida, mostra-se como uma alternativa confiável e gratuita para execução de planejamento composto central para até cinco pontos centrais. Com o uso da ferramenta o usuário pode analisar a curvatura das variáveis em questão e, caso necessário, aplicar o planejamento CCD para obtenção da superfície Resposta.

## REFERÊNCIAS

BARROS NETO, B. de; SCARMINO, I. S.; BRUNS, R. E. "Como Fazer Experimentos: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria". 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

BÔSSO, A. R. de S. A. "Desenvolvimento do Software PlanEx de Planejamento de Experimentos Online e sua Aplicação Didática na Pós Graduação". 172 f. Tese de Doutorado - Instituto de Química, Universidade Federal de Goiás, 2012.

MONTGOMERY, C. D.; RUNGER, G. C. "Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros". 2ª.ed. São Paulo: LTC, 2003.

NOVAES, C. G., *et al*. "Otimização de métodos analíticos usando metodologia de superfícies de resposta-parte i: variáveis de processo." Rev. Virtual Quim 9 (2017): 1184-1215.

MONTGOMERY, D. C. "Design and Analysis of Experiments". John Wiley & Sons, 2013.

RAMOS, G. R.; ÁLVAREZ-COQUE. M. C. G. Quimiometría, Editorial Sintesis: Madri, 2014.

RESENDE, P. V. S.; DA SILVA, S. N. "Desenvolvimento de Ferramenta Livre para Planejamento Experimental: Fatorial Completo e Composto Central". Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento IV, Coordenação de Mecânica, Instituto Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, 2017.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores é são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção 'área de conhecimento do trabalho'.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(X) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 27 à 31 de agosto de 2018 – Brasília, DF

# DESGASTE POR DESLIZAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 430 A UTILIZANDO CONTRA-CORPOS ESFÉRICOS DE ZIRCÔNIA E ALUMINA

**Pedro Henrique R. Ribeiro, Vinícius R. Caixeta, Demian Abreu, Washington M. da Silva Junior**
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
Avenida João Naves de Ávila, 2121 – Santa Mônica, Uberlândia – MG, 38400-902
ribeiro.hr.pedro@gmail.com

**RESUMO:** Alguns dos sistemas tribológicos existentes nas indústrias se configuram com o deslizamento entre um corpo e um contra-corpo. A depender das condições do tribossistema e das propriedades dos materiais envolvidos, o desgaste resultante dos compenentes (corpo e contra-corpo) pode ser significativamente alterado. Portanto, o estudo detalhado desse processo é de extrema importância para a análise e escolha dos materiais em sistemas onde ocorrem esse fenômeno. O objetivo deste trabalho é a avaliação da influência na taxa de desgaste de aço inoxidável ferrítico variando a porosidade do contra-corpo, em um ensaio por deslizamento com movimento alternado. Utilizou-se o tribômetro Plint Phoenix TE67 para a realização dos testes com as seguintes configurações de entrada: amotra de aço inoxidável ferrítico AISI 430A, esferas de zircônia e alumina de 5 mm de diâmetro, carga normal de 9,81 N e frequência de 1 Hz. O desgaste observado foi avaliado através da pesagem dos componentes em uma balança de precisão antes e após os ensaios. Os resultados mostraram que o desgaste utilizando a esfera de zircônia, tanto no aço inoxidável ferrítico quanto na esfera, foi significativamente maior do que com a esfera de alumina. Além disso, notou-se que tanto o running in como o coeficiente de atrito médio do tribossistema são alterados.

**Palavras-Chave:** desgaste por deslizamento, zircônia, alumina, running in.

***ABSTRACT:*** *Some of the existing tribological systems in industries are configured by sliding between a body and a counter-body. Depending on the conditions of the tribosystem and the properties of the materials involved, the resulting wear of the components (body and counter-body) can be significantly altered. Therefore, the detailed study of this process is extremely important for the analysis and choice of materials in systems where this phenomenon occurs. The objective of this work is the evaluation of the influence on the wear rate of ferritic stainless steel by varying the porosity of the counter-body in an alternating motion sliding test. The Plint Phoenix TE67 tribometer was used to perform the tests with the following input configurations: AISI 430A ferritic stainless steel specimen, 5 mm diameter zirconia and alumina balls, normal load of 9.81 N and a frequency of 1 Hz. The observed wear was evaluated by weighing the components on a precision scale before and after the tests. The results showed that the wear on the zirconia ball and the ferritic stainless steel was significantly higher than with the alumina sphere. In addition, it was noted that both the running in and the coefficient of friction of the tribosystem are changed.*

***Keywords:*** *sliding wear, zirconia, alumina, running in.*

## INTRODUÇÃO

A taxa de desgaste e o coeficiente de atrito são, de um modo geral, criticamente dependentes das condições as quais a amostra é submetida em ensaios de deslizamento; aparentemente, até mesmo pequenas mudanças nas condições dos ensaios podem levar a alterações radicais no mecanismo dominante da taxa de desgaste (Hutchings, 2017). Em ensaios por deslizamento, aspectos importantes como, por exemplo, os materiais do par corpo e contra-corpo, velocidade de ensaio, carga aplicada, pressão de contato e a temperatura do ambiente do ensaio precisam ser levados em conta.
Outro parâmetro de grande importância na tribologia é o *running in*. Este parâmetro indica o quão rápido o coeficiente de atrito se estabiliza quando o tribossistema é submetido à condição de desgaste. Segundo Blau (2005), as mudanças do atrito e desgaste que ocorrem durante o *running in* são mais do que uma consequência das alterações isoladas da rugosidade superficial. Dependendo do tribossistema, essas mudanças também podem ocorrer devido a mudanças na composição superficial, bem como, na microestrutura e também na distribuição de partículas de terceiro corpo.
A Figura 1 ilustra um exemplo onde ocorre o *running in*, mostrado em um gráfico do coeficiente de atrito médio em função do número de ciclos. É possível notar que, a partir de 1000 ciclos aproximadamente, o coeficiente de atrito se estabiliza, sendo os ciclos anteriores a duração do *running in*. Desse modo, no presente artigo, pretende-se avaliar a influência da porosidade do material do contra-corpo em ensaios por deslizamento, mantendo-se as demais variáveis

(força, velocidade de deslizamento, material da amostra e condições ambientes do teste) constantes. Para tanto, foram utilizadas esferas de alumina (elevada porosidade) e de zircônia (baixa porosidade) como contra-corpos.

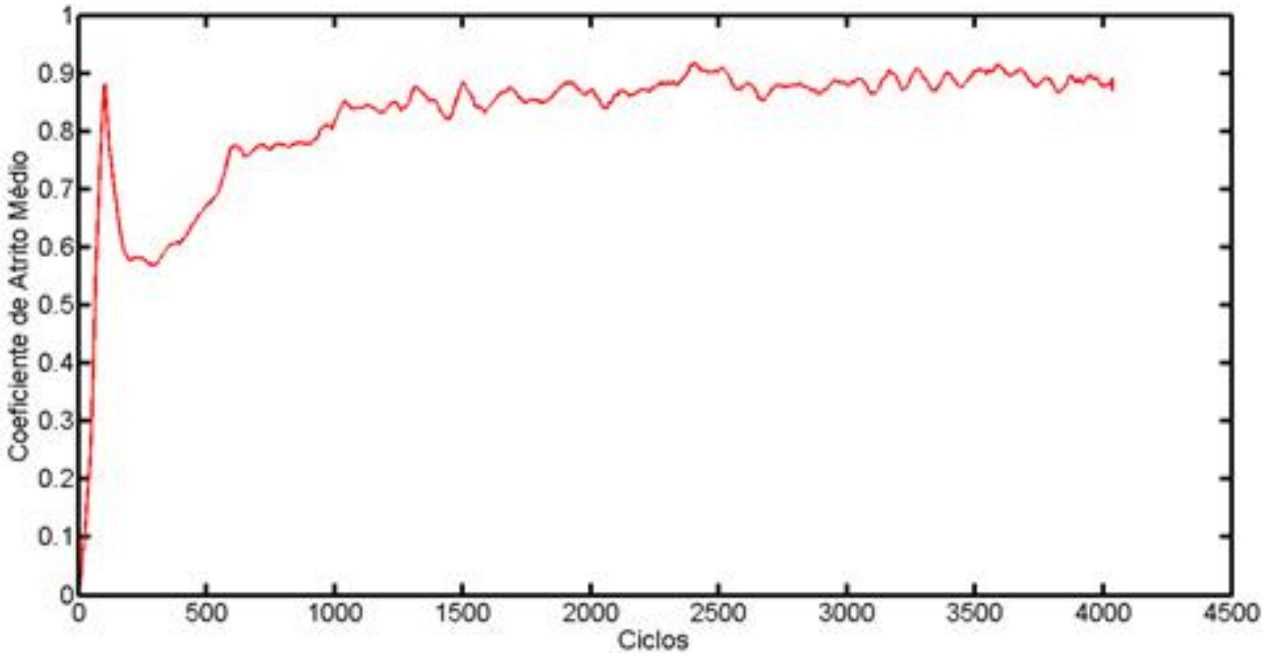



**Figura 1.** Gráfico do coeficiente de atrito médio em função do número de ciclos.

## METODOLOGIA

Para a realização dos experimentos, utilizou-se uma amostra de aço AISI 430 A (12% C e 16% Cr), que é um aço inoxidável ferrítico. Esta amostra possui boas propriedades de resistência à corrosão, devido ao considerável teor de cromo, baixa tenacidade, baixo teor de carbono e uma temperatura de transição ductil-frágil próxima à ambiente (Lula, 1989). Foram usadas esferas de zircônia e de alumina, ambas com 5 mm de diâmetro. A esfera de zircônia possui uma densidade $\rho_z$ = 5,98 g/cm³ enquanto que a de alumina possui uma densidade $\rho_a$ = 3,94 g/cm³ e porosidade significativamente maior que a primeira.
Todos os ensaios foram realizados o tribômetro Plint Phoenix TE67 (Figura 2), com uma carga de 9,81 N no suporte da esfera aplicada sobre a amostra do aço 430 A e uma frequência de oscilação de 1 Hz. Ao todo, foram feitos cinco ensaios com cada esfera (Tabela 1) e em diferentes posições sob a superfície da amostra. Desse modo, obteve-se todos os detalhes relacionados ao comportamento dos elementos ensaiados, sendo o coeficiente de atrito, o desgaste da amostra e o running in os parâmetros analisados.

### Procedimento experimental

Inicialmente preparou-se as amostras através do lixamento. Utilizou-se lixas d'água com granulometria variando de #80 a #600, dimuindo gradativamente o tamanho de grão de cada lixa. Isso elimina algumas imperfeições como óxidos presentes na superfície da amostra, condicionando a mesma para os ensaios. Posteriormente, limpou-se o aço com acetona e, em seguida, colocou-se a amostra no aparelho mini-som por cerca de 10 minutos. Isto foi feito para retirar o restante do debri que porventura tenha ficado aderido no aço.
Após a limpeza, mediu-se a massa das amostras em uma balança de precisão com o objetivo de determinar a massa antes dos ensaios. Isto deve ser feito para comparar a massa inicial e o final após cada teste, possibilitando a determinação da quantidade de material perdido pela amostra durante cada experimento. Dessa forma, a taxa de desgaste pode ser encontrada para cada tribossistema analisado.
Os ensaios no tribômetro Plint foram programados para uma duração de 2000 segundos, tempo utilizado para efeito de comparação com diversas referências analisadas. A triboscopia, uma técnica que consiste na produção de imagens numéricas de sinais adquiridos, foi utilizada e os dados foram obtidos através de um software de controle e aquisição de dados desenvolvido pelo próprio Laboratório de Tribologia e Materiais da Universidade Federal de Uberlândia (LTM – UFU).

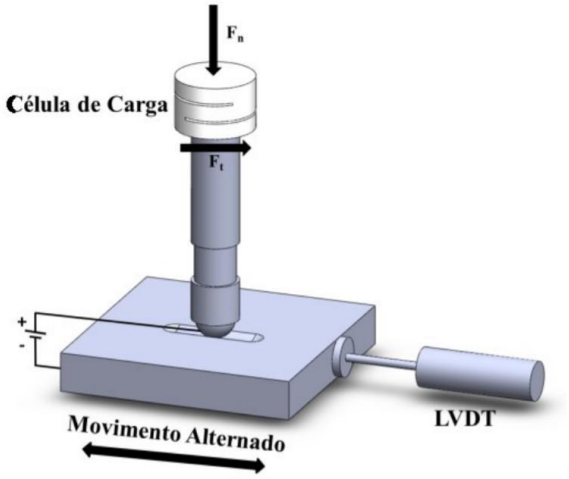



**Figura 2**. Ilustração da máquina Plint Phoenix TE67 (Oliveira Júnior, 2013).

**Tabela 1.** Condições dos ensaios realizados nos testes com esferas de alumina e zircônia.

| Ensaio | Lubrificado | Não lubrificado | Carga [N] | Frequência [ Hz] | Tempo de ensaio [s] |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | X | 9,81 | 1 | 2000 |
| 2 | | X | 9,81 | 1 | 2000 |
| 3 | | X | 9,81 | 1 | 2000 |
| 4 | | X | 9,81 | 1 | 2000 |
| 5 | | X | 9,81 | 1 | 2000 |

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização de todos os ensaios com o tribossistema composto pela amostra de aço e pela esfera de zircônia, obteve-se as seguintes variações de massa após cada ensaio, ilustradas na Figura 3.

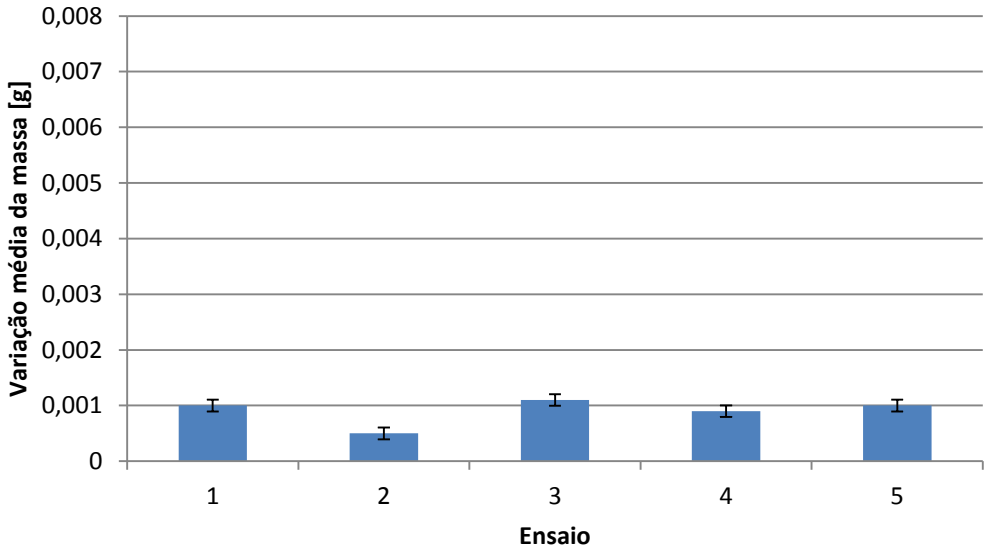



**Figura 3.** Variação de massa da amostra de aço inoxidável AISI 430 A em função do tempo de ensaio utilizando esferas de zircônia com densidade $\rho_z$ = 5,98 g/cm³.

A variação de massa da amostra de aço após os ensaios utilizando como contra-corpo esferas de alumina é mostrada pela Figura 4.

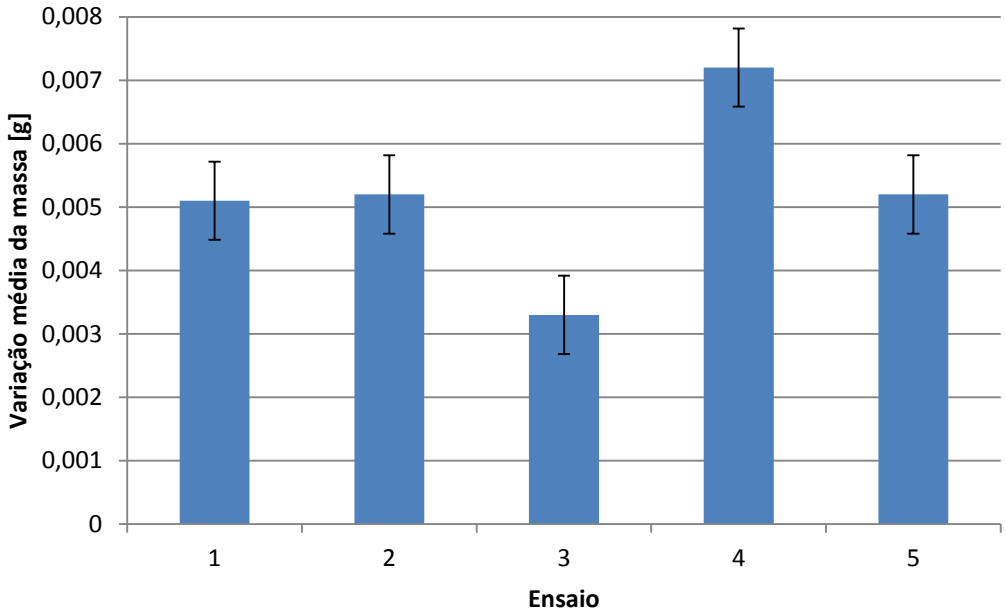



**Figura 4.** Variação da massa da amostra de aço inoxidável AISI 430 A em função do tempo de ensaio utilizando como contra-corpo uma esfera de alumina com densidade $\rho_a$ = 3,94 g/cm³.

Como é possível notar através dos dados fornecidos pelos gráficos acima, a perda de massa sofrida pela amostra quando submetida ao desgaste por deslizamento utilizando a esfera de alumina foi acentuado. A maior perda de material presente na Figura 3 foi de 0,0011 gramas enquanto que, na Figura 4, a maior perda foi de 0,0072 gramas.
Uma observação a ser feita é a de que não se pode avaliar o desgaste de um contra-corpo poroso simplesmente pela da pesagem antes e depois do ensaio. Isso se deve pelo fato de que o debri gerado durante o experimento pode preencher os poros do contra-corpo, alterando o massa real do mesmo na pesagem após o ensaio. Dessa forma, apesar de ser claro o maior desgaste no contra-corpo de alumina, em relação ao de zircônia, não se pode definir, com os métodos utilizados nesse estudo, o desgaste exato sofrido por estas esferas.
As Figuras 5 e 6 mostram a diferença de rugosidade das esferas utilizadas nos experimentos.

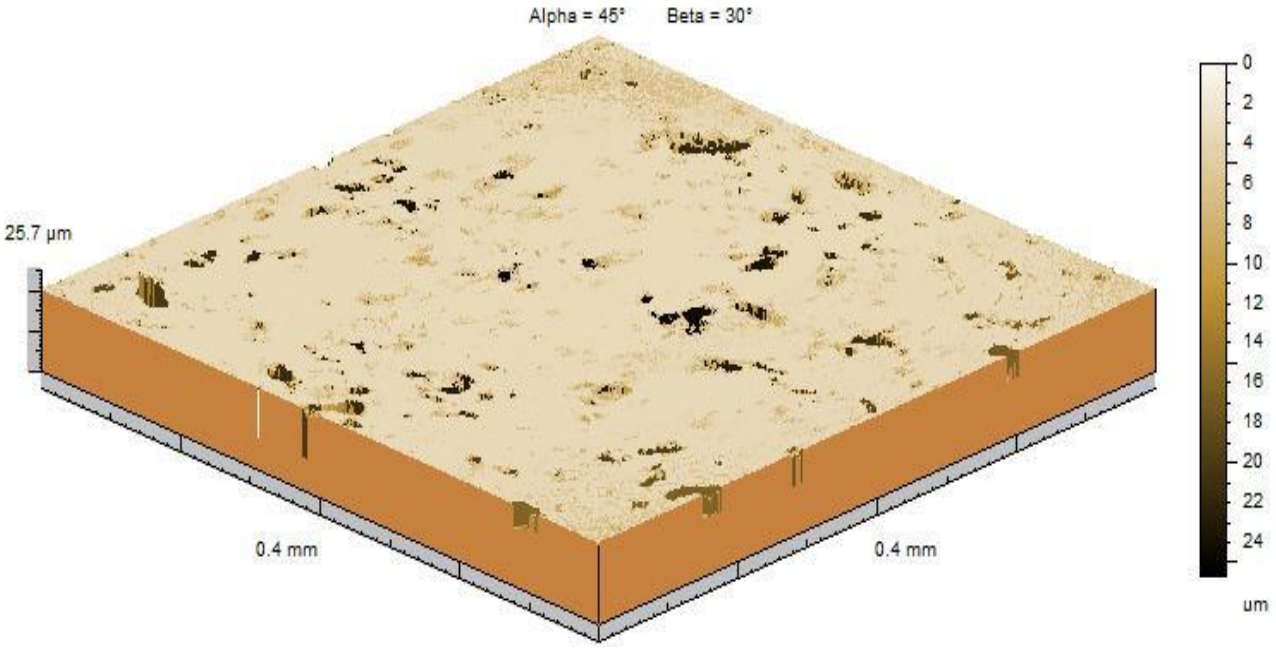



**Figura 5.** Topografia da superfície da esfera de alumina ($S_q$ = 2,43 µm).

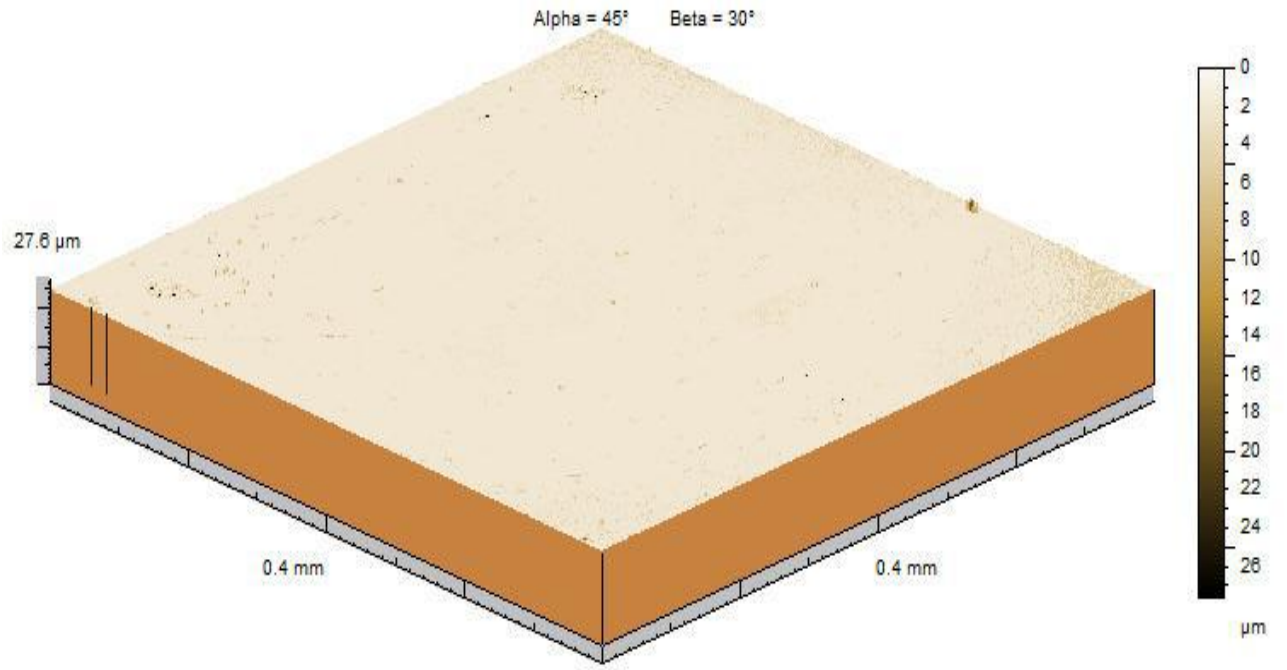



**Figura 6.** Topografia da superfície da esfera de zircônia ($S_q$ = 0,23 µm).

Com relação aos coeficientes de atrito médio, a Figura 7 ilustra os resultados para o tribossistema onde utilizou-se as esferas de zircônia, enquanto que a Figura 8 mostra os dados obtidos para o uso das esferas de alumina.

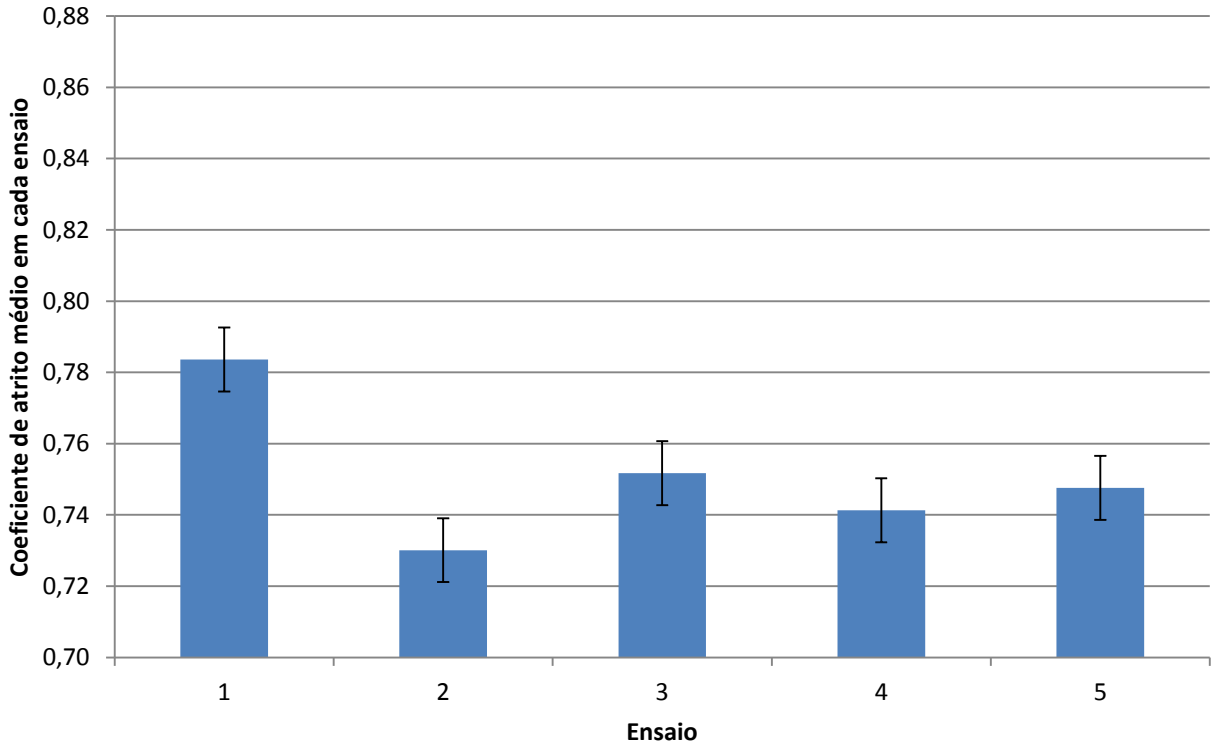



**Figura 7.** Coeficientes de atrito médio obtidos utilizando-se esferas de zircônia como contra-corpo.

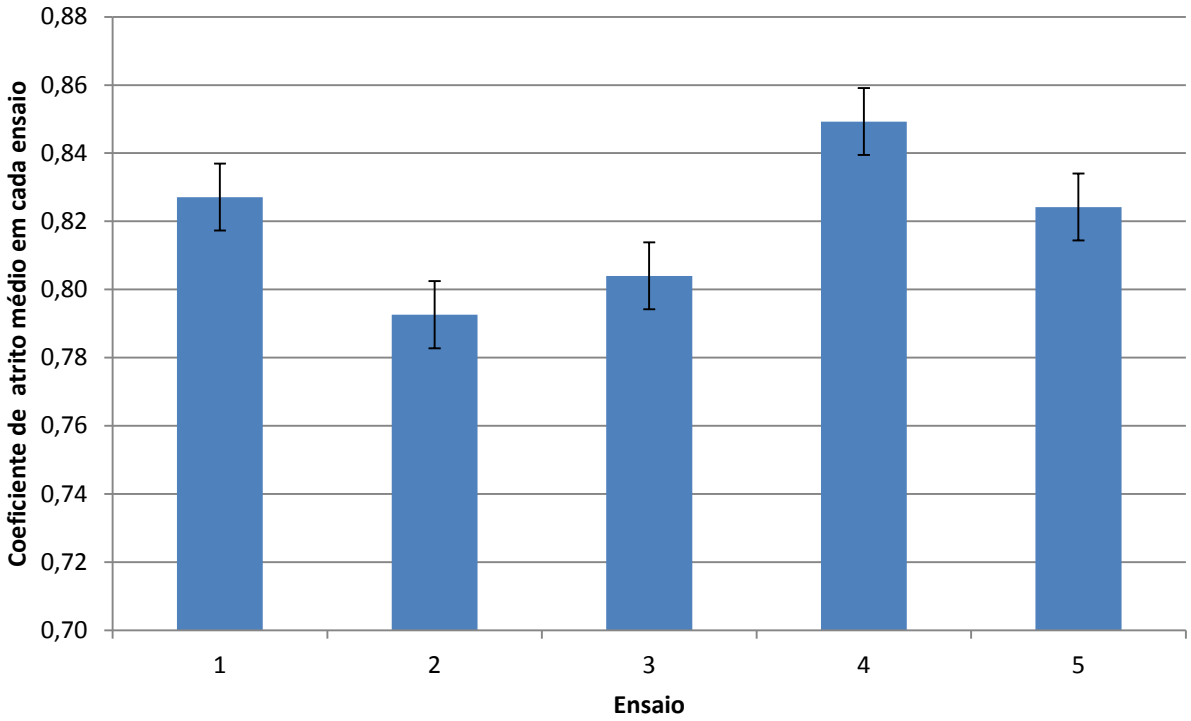



**Figura 8.** Coeficientes de atrito médio obtidos utilizando-se esferas de alumina como contra-corpo.

A esfera de alumina, que possuí maior rugosidade superficial (Figuras 5 e 6), por ser mais porosa que a esfera de zircônia (ou seja, menor densidade), tem menor resistência mecânica. Por isso, no decorrer do ensaio, gera mais partículas terceiro corpo na interface atuando como abrasivos (maior quantidade de debris) e isso gera maior desgaste da amostra e, bem como, maior coeficiente de atrito médio, quando comparado com os ensaios realizados com a esfera de zircônia. Tal comportamento é comprovado pela triboscopia dos ensaios (Figuras 9 e 11) e os gráficos do coeficiente de atrito médio (Figuras 10 e 12).

A Figura 9 ilustra a triboscopia, coeficiente de atrito em função da posição na amostra e do número de ciclos, de um ensaio com esfera de zircônia, enquanto que a Figura 10 mostra o gráfico do coeficiente de atrito médio em função do número de ciclos da mesma esfera. Do mesmo modo para um ensaio na amostra de aço com a esfera de alumina, a Figura 11 ilustra a triboscopia do coeficiente de atrito em função da posição na amostra e do número de ciclos e a Figura 12 mostra o gráfico do coeficiente de atrito médio em função do número de ciclos do mesmo.

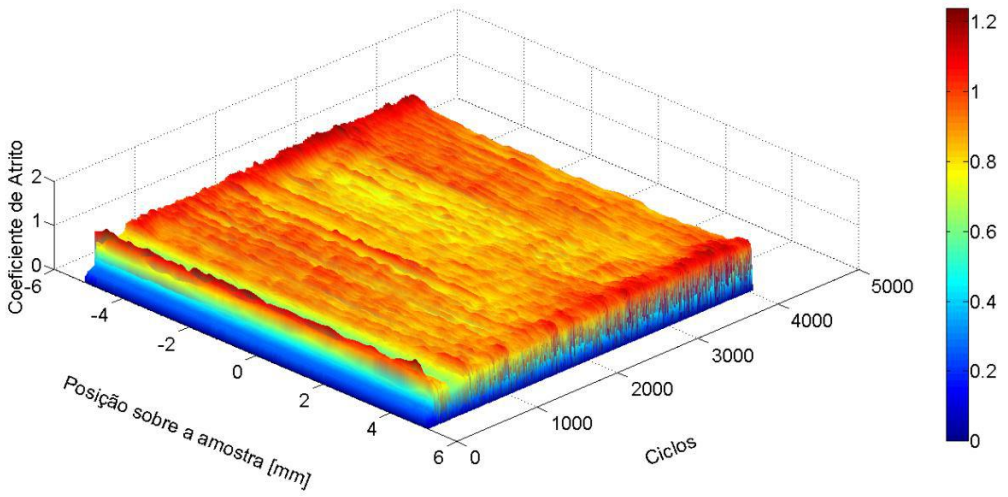



**Figura 9**. Coeficiente de atrito em função da posição sobre a amostra e do número de ciclos, utilizando a esfera de zircônia.

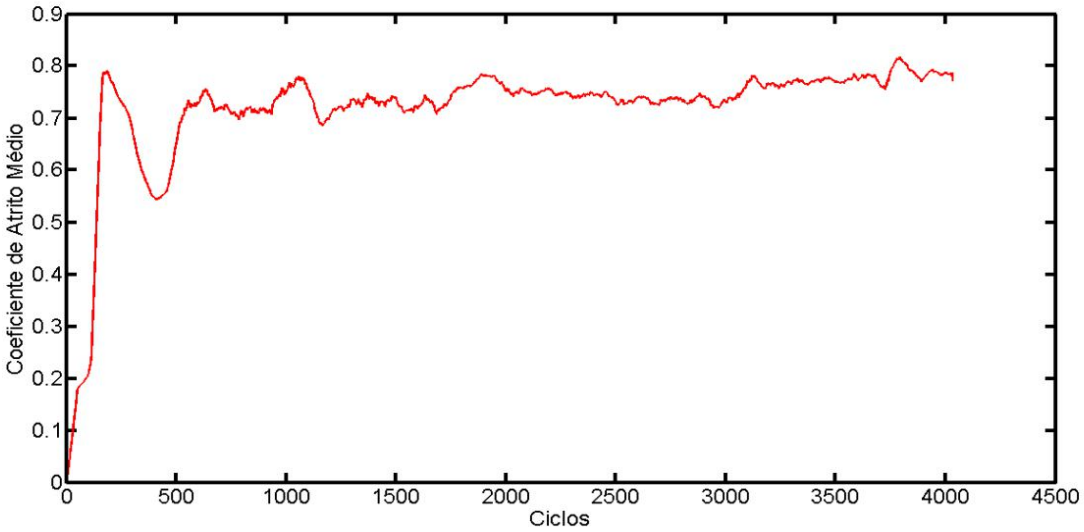



**Figura 10**. Gráfico do coeficiente de atrito médio em função do número de ciclos utilizando a esfera de zircônia.

Fica evidente, analisando as triboscopias (Figura 9 e Figura 11), que o coeficiente de atrito é consideravelmente maior nas regiões de bordas do gráfico (ponto morto). Isso ocorre devido ao acúmulo de debris nas extremidades da interface de deslizamento que, somado ao atrito estático que surge no fim de cada movimento alternado, causam uma maior resistência ao deslizamento da esfera. Outro fator importante é a existência de mais irregularidades na triboscopia do sistema com a esfera de alumina, esse fenômeno se explica pelo fato da porosidade atrasar a formação da tribocamada na interface, o que adia a estabilização do coeficiente de atrito, aumentando a duração do *running in*.

Através das Figuras 10 e 12, pode-se perceber que o *running in* obtido nos ensaios utilizando as esferas de alumina foi menor do que o obtido nos ensaios com esfera de zircônia. Desse modo, fica evidente que a alta rugosidade e, bem como, a porosidade da esfera de alumina (Figuras 5 e 6) influenciam diretamente no running in.

Nos ensaios com a esfera de zircônia a geração de debris é menor. Desse modo, como o número de partículas de terceiro corpo é inferior ao ensaio com esfera de alumina, a tribocamada para esse tribossistema é formada por volta de 1000 ciclos. Por isso a transferência para um regime permanente do coeficiente atrito é retardada em relação ao ensaio com esfera de alumina.

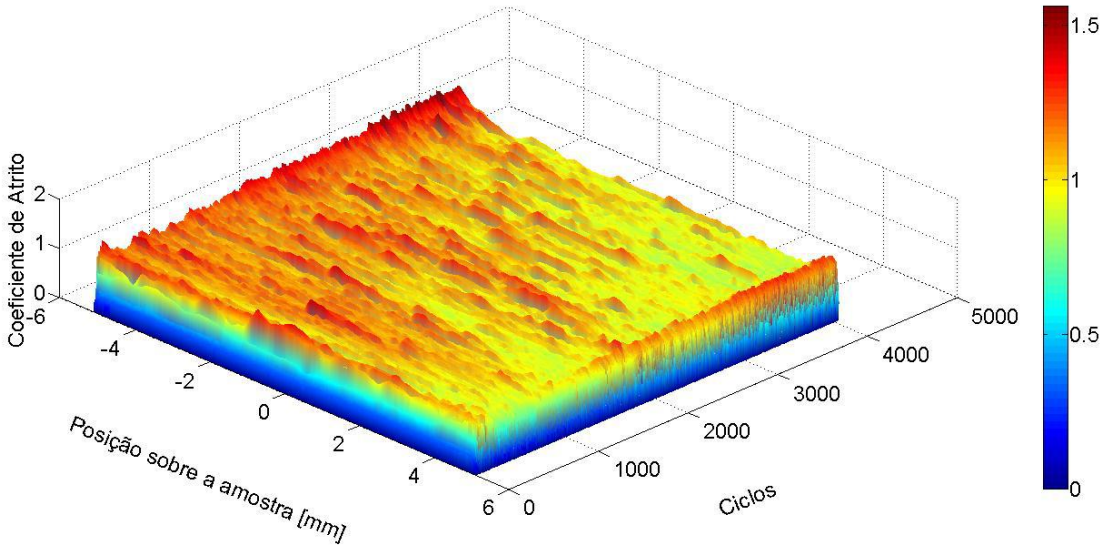



**Figura 11.** Coeficiente de atrito em função da posição sobre a amostra e do número de ciclos, utilizando a esfera de alumina.

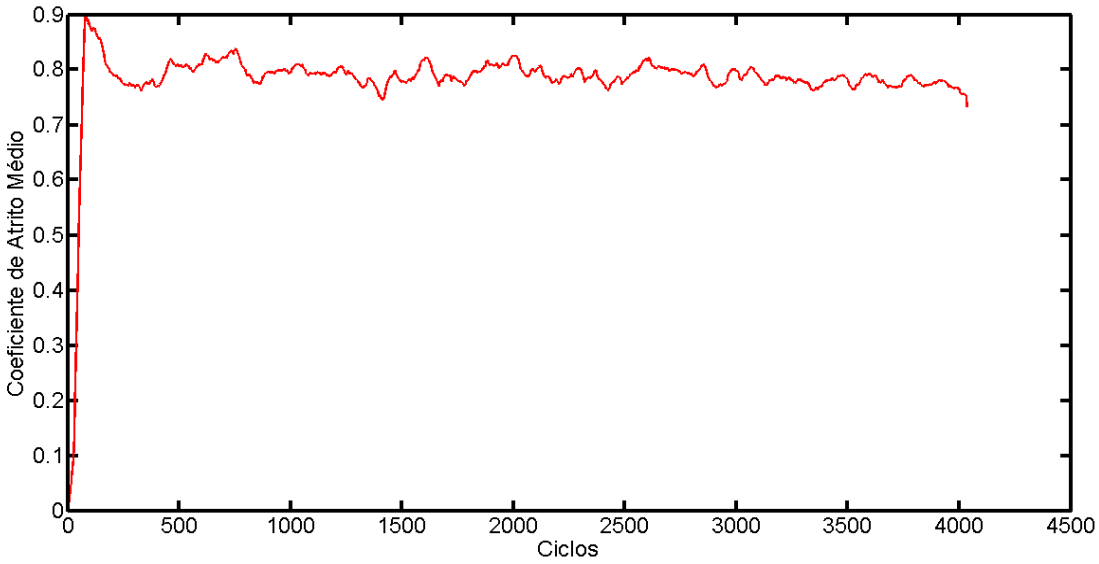



**Figura 12**. Gráfico do coeficiente de atrito médio em função do número de ciclos utilizando a esfera de alumina.

Já nos ensaios com a esfera de alumina, por ser mais porosa, a geração de debris é maior e, por isso, a transferência para um regime permanente do coeficiente de atrito ocorre por volta de 500 ciclos.
Embora a taxa de desgaste da amostra e o coeficiente de atrito médio dos ensaios sejam maiores com a esfera de alumina, que é porosa e possuí menor resistência mecânica que a esfera de zircônia, o running in é significativamente menor. Ou seja, a quantidade de debris gerados na interface do tribossistema afetou a duração do running in.

## CONCLUSÃO

Com base nos resultados encontrados, notou-se que a porosidade do contra-corpo influenciou tanto no coeficiente de atrito, no desgaste das amostras e, bem como, na duração do running in.
No caso do coeficiente de atrito, a maior porosidade da alumina resultou em maior coeficiente de atrito médio, pois o número de partículas abrasivas na interface entre o corpo e o contra-corpo é maior.
O desgaste das amostras foi maior nos ensaios com a esfera de alumina do que com a esfera de zircônia. Isso é mostrado pela maior variação de massa das amostras nos testes com a esfera de alumina.
A duração do running in é menor quanto maior a porosidade da esfera, ou seja, a maior a geração de partículas de terceiro corpo que atuam na interface entre corpo e contra-corpo diminuí o tempo de running in.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimento à CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo suporte financeiro dado a esse projeto.

## REFERÊNCIAS

Adachi, K.; Hutchings, I. M. Wear-mode mapping for the micro-scale abrasion teste. Wear, v. 255, p. 23-29, 2003.
Blau, P. J. On the nature of running-in. Tribology International 38, 1007–1012, ttps://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.07.020 (2005).
Hutchings, I.; Shipway, P. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. Elsevier Science, 2017. ISBN 9780081009512.
Oliveira Júnior, M. M. Lubrificação sólida em meio fluido. 2013. 94f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.
Teles, V. C. Desgaste abrasivo de revestimentos CrAlSiN multicamadas/gradiente. 2014. 88f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.
Telles, P. S. Materiais e equipamentos de processo. 6 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.
Zum Gahr, K. H. Microestruture and wear of materials. Amsterdã: Elsevier, 1987.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores Demian Abreu, Pedro Henrique Resende Ribeiro, Vinícius Resende Caixeta e Washinton Martins da Silva Júnior são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção 'área de conhecimento do trabalho'.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(X) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 27 à 31 de agosto de 2018 – Brasília, DF

# DIMENSIONAMENTO, SIMULAÇÃO E TESTE DE UM CHASSI PARA UM TRICICLO MOTORIZADO DEDICADO PESSOAS COM DEFICIÊNCIA FÍSICA

**Rayanne de Jesus Pereira Braga**
**Paulo de Melo Silva**
**Simone Cristina Ferreira Neves**
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA
Cidade Universitaria Paulo VI - Tiririca/Cidade Operária, São Luís - MA - CEP 65055-310
Rayannebraga1@gmail.com

**RESUMO:** Esta pesquisa tem como objetivo o desenvolvimento de um chassi para um protótipo de um triciclo motorizado para deficientes físicos, incluindo dimensionamento, simulação e construção. O chassi é a parte essencial do veículo, a estrutura servirá de base para a ligação de todas as outras partes do veículo, assim como alojará o motor. Com base em estudos teóricos e métodos apoiados na engenharia de projetos, este trabalho iniciou-se na análise de tensão e deformação e de pontos críticos sujeitos a falha registrados após a simulação no software Cad SolidWorks, que também gerou as dimensões ao longo da estrutura e desenhos técnicos. Para isso, foi feito o estudo bibliográfico relacionado ao projeto, contando com livros, artigos científicos e também modelos disponíveis no mercado e em outras universidades. Dessa forma, foi possível realizar a escolha do material a ser utilizado, que apresentou desejada resistência assim como respondeu a outros requisitos do projeto. Com a escolha do material e o design do chassi pronto foi possível realizar a fabricação e posteriormente a montagem do triciclo por completo. O trabalho resultou em um chassi leve, seguro e confortável para o usuário. Também foi realizada uma comparação entre o total gasto para a fabricação do triciclo e o preço dos triciclos disponíveis no mercado, comprovando que o triciclo possui um custo inferior em relação aos já existentes.

**Palavras-Chave:** Triciclo Motorizado, Chassi, Veículo

***ABSTRACT:*** *This research aims to develop a chassis for a prototype of a motorized tricycle for the disabled, including design, simulation and construction. The chassis is the essential part of the vehicle, the structure will serve as the basis for connecting all other parts of the vehicle as well as housing the engine. Based on theoretical studies and methods supported in the design engineering, this work began in the analysis of tension and deformation and fault points registered after the simulation in the software Cad SolidWorks, that also generated the dimensions throughout the structure and tecnical draws. For this, the bibliographic study related to the project was done, counting on magazines books, scientific articles and also models available in the market and in other universities. In this way, it was possible to make the choice of the material to be used, which presented desired resistance as well as answered other project requirements. With the choice of material and the design of the ready chassis it was possible to carry out the manufacture and later the assembly of the tricycle completely. The work has resulted in a light, safe and comfortable chassis for the user. A comparison was also made between the total cost of the tricycle and the price of the tricycles available on the market, proving that the tricycle has a lower cost than the existing ones.*

***Keywords:*** *Motorcycle Tricycle, Chassis, Vehicle.*

## INTRODUÇÃO

É grande o número de pessoas que apresentam algum tipo deficiência física, segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS) e a Organização das Nações Unidas (ONU), uma em cada 10 pessoas ou 10% da população de países em desenvolvimento, dos quais se encontra o Brasil. Pesquisas de censo comum apontam que são cerca de 45 milhões de brasileiros, ou seja, 24% da população. É diante de estimativas como essas que surge a dúvida se o pais oferece uma boa qualidade de vida para esses habitantes, e percebe-se que a limitação destes se torna maior tendo em vista a grande dificuldade de mobilidade e desafios de acessibilidade como por exemplo adaptações das cidades e transporte público.

A deficiência física vem sendo assistida de forma não satisfatória no que se refere a grandes descolamentos. Para descolamentos sem auxílio de terceiros, a pessoa que possui deficiência parcial nos membros inferiores conta com muletas, próteses e cadeira de rodas, o que permite sua locomoção precária apenas em pequenos percursos. Já para aqueles que sofrem da completa deficiência nos membros inferiores e que dependem do uso integral da cadeira de rodas, a dificuldade encontrada para se locomover é muito maior, ainda mais quando precisam utilizar-se do transporte público,

visto que os ônibus são elaborados para atender de forma generalizada aos usuários, não oferecendo conforto para os portadores de necessidades especiais, além de outros problemas mais comuns. (NOGUEIRA, 2007).

Um fator também preocupante é quanto aos veículos para esses deficientes, tais como triciclos e quadriciclos. A disponibilidade no mercado se torna restrita a um pequeno grupo, uma vez que o valor é incompatível com a renda mensal destes. Dessa forma, faz-se necessário pensar em maneiras de mudar a realidade e apresentar uma vida digna para estes brasileiros, oferecendo formas de locomoção acessível e de boa qualidade, que possam vir a promover a inclusão social e este trabalho visa projetar, fabricar e testar um veículo de baixo custo, utilizando conhecimentos teóricos e práticos oferecidos pela engenharia mecânica, que esteja disponível para todos, de fácil aceso, comandos simplificados e seguro.

O desenvolvimento de um veículo parte de estudos bibliográficos, tomando com referências algumas outras pesquisas já existentes na área. O chassi é o suporte do veículo. É sobre ele que se montam outras partes do veículo e se prendem as rodas, assim como aloja o motor. Dessa forma, é dito como a própria estrutura do veículo, sendo assim o primórdio dos estudos. É necessário que este tenha a estrutura e seja do material adequado para responder de forma eficiente aos esforços exigidos, oferecendo segurança e comodidade ao veículo.

## METODOLOGIA

O projeto foi iniciado com a preparação do projeto, seguido por pesquisas bibliográficos na área. Os estudos foram feitos em trabalhos científicos, livros, artigos e resumos, e triciclos para deficientes encontrados no mercado, além de pesquisas realizadas em outras universidades, tudo estando ligado a triciclo para deficientes. Dessa forma, foi possível definir os parâmetros do projeto e organizar as ideias surgidas para pensar no veículo e definir o modelo do chassi a ser construído por inteiro. Após a montagem do triciclo e a definição de outros componentes, assim como a simulação utilizando o software SolidWorks, foi possível realizar a construção do chassi, que teve como base a utilização de processos de fabricação mecânica.

### Definição de parâmetros

A definição de parâmetros é dita como o processo que servirá de base para o início do projeto de definição do chassi. Essa etapa do processo inclui dimensões, ângulos e outros estudos que manterão o bem estar e o conforto do usuário.As dimensões do chassi foram baseadas em dimensões de cadeiras de roda, assim como medidas antropométricas, que segundo ARAUJO, 2018 , **‘’**É a verificação do peso corporal, de altura e circunferência abdominal’’. Para isso, foi usado como base o brasileiro, com uma altura média de 1,85 m. Na tabela 1, é possível verificar as medidas dos membros utilizados no projeto.

**Tabela 1.** Medidas antropométricas

| Segmento | Dimensão (m) |
|---|---|
| Cabeça e pescoço | 0,198 |
| Tronco | 0,555 |
| Braço | 0,318 |
| Antebraço | 0,290 |
| Mão | 0,160 |
| Coxa | 0,429 |
| Perna | 0,456 |
| Pé | 0,078 |

Outro parâmetro importante são os ângulos de conforto,que segundo TILLEY, 2005, necessários para manter o conforto do usuário, assim como não causar problemas relacionados ao mal posicionamento. Além do chassi, esses ângulos são utilizados também na produção do assento do triciclo. A imagem 1 foi utilizada como base para esta etapa, indicando quais os ângulos necessários do veiculo.

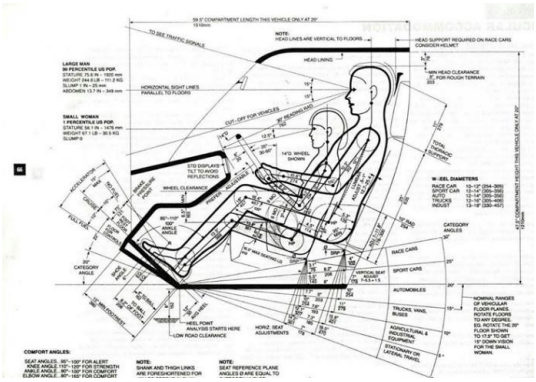


**Figura 1.** Ângulos de conforto

**Definição do modelo do chassi**

Tendo já realizado estudos sobre triciclos, assim como definidos os parâmetros de montagem, iniciou-se as pesquisas somente sobre chassis para triciclos para que pudesse pensar-se numa estrutura adequada, que atendesse as necessidades do veículo. Sendo o chassi a estrutura que dará suporte a outras partes do veículo, de grande importância, é primordial que todo estudo seja detalhado, e que se possa buscar-se fontes também em outros tipos de veículo, como foi feito. O modelo foi desenhado no software Cad SolidWorks. As dimensões do chassi foram baseadas em dimensões padrão para cadeiras de rodas para deficientes, que atendem as necessidades de locomoção do usuário. Na figura 2 demostra a estrutura final, que será utilizada para a simulação.

**Figura 2.** Estrutura do chassi na vista Isométrica do SolidWorks

**Definição do material**

Com uma estrutura de chassi já pré-definida, deu-se início ao estudo do material a ser escolhido, que deve ter todas as propriedades mecânicas exigidas. Este deve ser leve, simples e disponível no mercado com preço acessível. O material escolhido foi o Metalon de aço galvanizado e as dimensões do tudo quadrado são 20x20, com espessura de 1,25 mm.

**Simulação das cargas aplicadas**

Nesta etapa, foi realizada a simulação das cargas aplicadas na estrutura, ou seja, as simulações de tensão, figura 4 e deformação ao longo da estrutura do chassi, figura 5. Para isso, foram definidos pontos de apoio, ou pontos em contato com o solo e pontos onde estão submetidas as cargas e depois definida a carga, que será o peso máximo do usuário. Foi aplicado uma carga de 100kg que é equivalente a 1000N para análise de carga estática do material da estrutura. Toda a simulação gerada pelo software Cad SolidWorks é definida como análise estática (tensão/deformação/deslocamento). A simulação mostrou que a máxima tensão de trabalho aplicada não ultrapassa a tensão admissível do material, sendo assim, a estrutura não está sujeita a possíveis falhas repentinas.

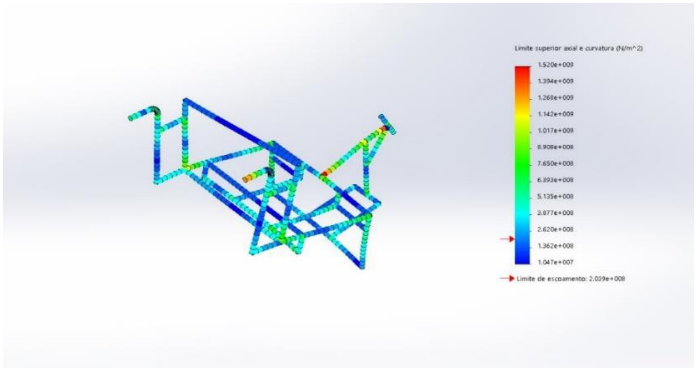


**Figura 3**. Análise estática

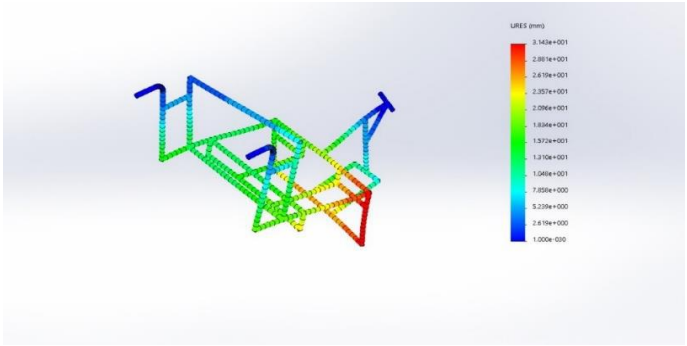


**Figura 4**. Análise de deformação

**Produção do chassi**

Com o projeto pronto, incluindo croqui, desenhos técnicos, dimensões e simulações, partiu-se para a produção do chassi. Antes de tudo foi necessário adquirir o material escolhido, que é de fácil disponibilidade no mercado, assim como de baixo custo, atendendo as necessidades do projeto. Para a construção do projeto foi utilizado uma máquina de policorte, para cortar os tubos, e solda com eletrodo revestido. Juntamente com a produção do chassi, já foram acopladas outras partes do triciclo, para um processo mais produtivo. Pintura e acabamentos superficiais também foram realizados como uma das etapas finais do projeto. A figura 5 mostra o processo de soldagem do chassi, assim como outros componentes. A figura 6 mostra o chassi já fabricado, após os processos de produção, partindo assim para a etapa de montagem do triciclo.

**Figura 5.** Processo de soldagem

**Figura 6.** Chassi fabricado

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O chassi construído, figura 7, alcançou resultados almejados pelo trabalho. O material escolhido além de ser de boa disponibilidade no mercado e baixo preço, atende aos padrões de leveza do projeto, é de fácil usinabilidade, o que facilitou processo de fabricação. O design da estrutura não teve grandes dificuldades de construção, e dessa forma, foi curto o processo de fabricação. A simulação de tensão e deformação realizada no software SolidWorks mostrou que a estrutura não está sujeita a grandes deformações e o limite de escoamento do material não foi ultrapassado, garantindo a segurança do usuário, assim como o estudo ergonômico garante o conforto do mesmo.

**Figura 7**. Triciclo construído

## CONCLUSÃO

O desenvolvimento do projeto seguiu o cronograma proposto, assim como alcançou os resultados esperados. O estudo ergonômico garante o conforto do usuário, o material escolhido é de baixo custo, de fácil disponibilidade no mercado e possui as propriedades mecânicas necessárias para o chassi e o design do chassi também facilitou o processo de fabricação.

As dimensões do chassi seguem medidas antropométricas, ângulos de conforto, dimensões de cadeiras de rodas e também são baseadas em outros componentes, para que não haja grandes dificuldades no processo de montagem. Com o triciclo montado por completo foi possível realizar um estudo de custo, e em comparação aos triciclos já disponíveis no mercado, foi possível comprovar que é um veículo de baixo custo, estando assim disponível também para pessoas de baixa renda .

## AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos são dedicados á Deus, família e amigos, Universidade Estadual do Maranhão e a Prof. Simone Cristina Ferreira Neves.

## REFERÊNCIAS

Araújo, Fábio. Automóveis Adaptados para Deficientes Físicos. [online], Brasil. Disponível: http://www.alessandra.eduardo.nom.br/html/adaptacao.htm

Nogueira, Elio Gustavo - Desenvolvimento de triciclo para portadores de necessidades especiais – Curitiba 2007

Tilley, Alvin R.; The Measure Of Men And Woman: Human Factors In Design. 3. Ed. Editora Bookman, 2005.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores Rayanne de Jesus Pereira Braga, Paulo de Melo Silva e Simone Cristina Ferreira Neves, são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção ‘área de conhecimento do trabalho’.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
( X ) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 27 à 31 de agosto de 2018 – Brasília, DF

# ESCADA RETRÁTIL PARA AUTOMÓVEL

**João Paulo Marchi Benachio, Matheus Vinicius da Silva Mazuquiel, Bruno R. de Paula, Daniel J. Laporte, Fernando M. Barbosa, Fabiano P. Branco**
Universidade Católica Dom Bosco - UCDB
Av. Tamandaré, 6000 - Jardim seminário, Campo Grande - MS, 79117-010
joaopaulobenachio@gmail.com, engvini2018@gmail.com

**RESUMO:** Este projeto tem como finalidade auxiliar pessoas que possuem ou não dificuldades para subirem em seus automóveis com altura considerável em relação ao chão a exemplo de carrocerias e trailers, pois o objetivo do mesmo é projetar uma escada que apresente maior comodidade e facilidade de acesso, salientando também uma fácil instalação, remoção e transporte, uma vez que a mesma ao fechar ocupará um espaço extremamente reduzido por ser um mecanismo totalmente retrátil. Fabricada em Aço SAE 1020 (0,2% de carbono) e com degraus antiderrapantes, a mesma proporciona segurança e conforto para os seus usuários, onde pelo desenvolver do projeto obtivemos total satisfação no resultado final.

**Palavras-Chave:** Escada retrátil, Mecanismo, Simulação

***ABSTRACT:*** *The purpose of this project is to help people with or without difficulties to get into their cars with considerable height in relation to the ground, such as bodies and trailers, as the purpose of this project is to design a ladder that is more comfortable and easy to access, also an easy installation, removal and transport, since the same when closing will occupy an extremely small space because it is a totally retractable mechanism. Made of SAE 1020 steel (0.2% carbon) and with non-slip steps, it provides safety and comfort for its users, where by developing the project we obtained total satisfaction in the final result.*

***Keywords:*** *Retractable ladder, Mechanism, Simulation*

## INTRODUÇÃO

"Segundo alguns historiadores, a origem da escada é datada em cerca de 2.000 anos antes de Cristo. De acordo com estudos, os inventores foram os Egípcios e os Hebreus, sendo eles os pioneiros em sua construção. A princípio, os indícios das primeiras escadas modernas foram datadas por volta do século X antes de Cristo em Atenas e em Roma" (Adriana Ferreira, 2010, p. 1). "As escadas constituem meio de circulação vertical não mecânico que permite a ligação entre planos de níveis diferentes" (Neto et al., 2014, p. 1).

Sendo de extrema importância serem projetadas e construídas conforme as normas técnicas, o projeto abordará a ABNT NBR 9050 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos) e ABNT NBR 9077 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, Saídas de emergência em edifícios), onde ambas fazem citações de como elaborar projetos de escada, e segundo a ABNT NBR 9077 (2001, p. 9) "a mesma deve conter pisos em condições antiderrapantes, e que permaneçam antiderrapantes com o uso", apresentando assim um ponto importante para elaboração deste projeto que é oferecer maior segurança aos seus usuários, sendo escolhida assim chapa do tipo xadrez, considerada antiderrapante e que deverá compor a superfície do degrau.

No intuito de facilitar e ajudar as pessoas a embarcarem e desembarcarem da carroceria de seu automóvel ou trailer, a mesma oferece facilidade de instalação e remoção, acessibilidade, conforto, segurança e também garante que os usuários utilizem o produto com satisfação quando forem realizar atividades como camping, pesca, trabalhos e entre outras possíveis com o produto.

De acordo com ABNT NBR 9050 (2015, p. 2), escada pode ser definida como

> acessibilidade, possibilidade e condição de alcance, percepção e entendimento para utilização, com segurança e autonomia, de espaços, mobiliários, equipamentos urbanos, edificações, transportes, informação e comunicação, inclusive seus sistemas e tecnologias, bem como outros serviços e instalações abertos ao público, de uso público ou privado de uso coletivo, tanto na zona urbana como na rural, por pessoa com deficiência ou mobilidade reduzida.

## METODOLOGIA

A princípio, levando em conta um projeto visando uma maior facilidade de transporte, instalação e remoção, tornou-se por objetivo principal projetar uma escada retrátil que na forma de mecanismo atenderia a essas especificações. Dessa forma, esse tipo de mecanismo será responsável pelo movimento de translação da escada em uma única direção, o que resultará no seu abrimento e fechamento.

A escolha do tipo de material que será projetado a escada também foi de importante valia antes mesmo de iniciar do projeto, uma vez que poderíamos propor um produto mais leve em alumínio devido a densidade desse material ser extremamente baixa comparada a outros tipos de materiais ou um produto mais robusto e resistente, nesse caso em aço. Tal escolha baseou-se na segurança e praticidade de fabricação, pois a medida que o alumínio fornece um produto extremamente leve, o mesmo por propriedades químicas nao possui alta resistência mecânica em virtude do material ser extremamente dúctil e maleável, o que não adequaria ao nosso projeto no quesito segurança. Importante também salientar que o processo de fabricação do produto em alumínio seria inviável comparado ao do aço em virtude do produto possuir uniões soldadas, acarretando assim dificuldade no processo de solda e tornando-o mais caro.

A estrutura foi projetada em barra chata, cantoneira, rebites e chapa xadrez, todas em aço SAE 1020, atendendo todas as especificações da ABNT NBR 9050 e ABNT NBR 9077 . Foi ainda utilizado o software SolidWorks para realizar o desenho do projeto e simulações a fim de coletar algumas propriedades de grande importância na engenharia.

### Procedimento experimental

A partir da definição do processo de escolha do material e seu modelo retrátil, foi-se consultado normas regulamentadoras que regem as mais variadas formas de projetar um modelo de escada. Segundo o site da ABNT, a norma mais condizente e adequada ao nosso projeto está vinculada a ABNT NBR 9077 e ABNT NBR 9050 (2015, p. 62) que afirma em,

> As dimensões dos pisos e espelhos devem ser constantes em toda a escada ou degraus isolados. Para o dimensionamento, devem ser atendidas as seguintes condições:
> a) $0{,}63\ \text{m} \leq p + 2e \leq 0{,}65\ \text{m}$,
> b) pisos (p): $0{,}28\ \text{m} \leq p \leq 0{,}32\ \text{m}$ e
> c) espelhos (e): $0{,}16\ \text{m} \leq e \leq 0{,}18\ \text{m}$;

A mesma sintetiza ainda acessibilidade a edificações, mobiliários, espaços e equipamentos urbanos e especifica todos os parâmetros que compõem um projeto de escada, como suas respectivas larguras, pisos e espelhos. Sendo assim, o projeto do modelo em software CAD seguiu todas as dimensões especificadas na norma quanto aos seus intervalos de valores e pode-se conferir na Fig. (1).

**Figura 1.** Vista perspectiva 3D do projeto renderizado

**Equações governantes**

Com o projeto pronto, viu-se necessário calcular o número de parâmetros dependentes para se definir a posição de um corpo em relação a um espaço qualquer, ou seja, calcular o valor dos graus de liberdade (GDL) do sistema e isso será extremamente necessário para provar que o tipo de sistema é classificado como um mecanismo, uma vez que desde o início do projeto dizemos que ele é um mecanismo em virtude do mesmo se transladar em uma única direção, além de ser estruturado por um conjunto de diversas barras e pinos de fixação.

Segundo Grillo (2012, p. 18),

> O Grau de Liberdade pode ser definido também como o número de movimentos de acionamento que um determinado mecanismo necessita, para que a localização de suas peças seja completamente conhecida em relação a um referencial pré-definido. O número de graus de liberdades, de uma maneira geral, para um mecanismo fechado, pode ser determinado pelo critério de Gruebler.

O critério de Grubler baseia-se nas seguintes equações:

$$GDL = [\, 3(N-1) - (2Pi+Ps)] \quad (1)$$

$$Pi = (\ \Sigma P1 + 2\Sigma P2) \quad (2)$$

$$Ps = (\, \Sigma Pe - \Sigma Pc) \quad (3)$$

a qual,

N = Número de elementos (peças)
Pi = Pares Inferiores
Ps = Pares superiores
P1 = Pares simples
P2 = Pares duplos
Pe = Par de engrenagem
Pc = Par de came

Também será necessário a utilização da Eq. (4) para o cálculo da Carga axial máxima de flambagem mediante o uso do fator de carga obtido na simulação, que segundo Hibbeler, R.C. (2004, p. 510), "A carga axial máxima que uma coluna pode suportar quando está no limite de flambagem é chamada carga crítica (Pcr)".

$$Pcr = Fcr.F \quad (4)$$

sendo, Fcr = Fator de carga
F = Força atuante na estrutura (N)

**Materiais utilizados**

Estruturalmente, a escada será sustentada por barras em aço SAE 1020, conforme a especificação da (Tab. 1).

**Tabela 1.** Barra chata (Gerdau)

| Tamanho Nominal | | Peso aprox. |
|---|---|---|
| Pol. | mm | Kg/m |
| 1.¼" x ⅛" | 31,75 x 3,18 | 0,79 |

Os degraus projetado em chapa xadrez com 3,0 mm de espessura em aço SAE 1020 (Tab. 2) e sua fixação na barra chata realizado através do processo de solda por eletrodo revestido.

**Tabela 2.** Chapas para pisos xadrez (Gerdau)

| Espessura | | Peso aprox. |
|---|---|---|
| Pol. | mm | Kg/m² |
| ⅛" | 3,0 | 25,7 |

A utilização de pinos/rebites em aço (Tab. 3) será importante, em virtude da necessidade de fixação das barras chata umas às outras para que permitisse assim a movimentação de todo o mecanismo.

**Tabela 3.** Porcas rebites para fixação (Rivkle)

| d (mm) | L (mm) | B (mm) | e (mm) | d broca (mm) | Código do produto |
|---|---|---|---|---|---|
| M6 | 18,3 | 11,0 | 5,0 - 6,0 | 9,0 | 233 36 060 060 |

Foi também projetado um sistema do tipo trava para que pudesse fixar a escada com segurança no automóvel, sendo assim utilizado um perfil em forma de cantoneira com 38,1 mm de largura em aço SAE 1020 (Tab. 4), onde acoplado no mesmo é utilizado dois pedaços de barra chata dobradas e soldadas para fazer um sistema de encaixe para a escada, permitindo assim que seja retirada e inserida com facilidade e sem a necessidade de retirar o fixador.

**Tabela 4.** Perfis Laminados Cantoneira (Gerdau)

| bf | | tf | | Peso |
|---|---|---|---|---|
| Pol. | mm | Pol. | cm | Kg/m |
| 1.½” | 38,100 | 3/16” | 0,467 | 2,68 |

Para acoplamento do fixador será utilizado quatro parafusos sextvados, conforme as especificações da Tab. 5.

**Tabela 5.** Aço SAE 1020 - Parafuso sextavado - Rosca Inteira (Ciser)

| Dimensão nominal | Passo | Chave | Altura da Cabeça | Comprimento | Referência |
|---|---|---|---|---|---|
| M8 | 1,25 | 13 | 5,45 | 40 | 363 00 0,5 |

Para o acoplamento do fixador junto ao automóvel, também será utilizado quatro porcas sextvados, conforme as especificações da Tab. 6.

**Tabela 6.** Aço SAE 1020 - Porca sextavada (Ciser)

| Dimensão nominal | Passo | Chave | Altura | Referência |
|---|---|---|---|---|
| M8 | 1,25 | 13 | 6,14 | 359 00 01 |

E por fim, será utilizado oito arruelas lisas, conforme as especificações da Tab. 7.

**Tabela 7.** Aço SAE 1020 - Arruela lisa (Ciser)

| Dimensão nominal | d1 (interno) | d2 (externo) | h (espessura) | Referência |
|---|---|---|---|---|
| 8 | 8,4 | 16 | 1,6 | 351 00 1 |

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a definição dos conceitos, podemos calcular o grau de liberdade a partir da Eq. (1). Julgando o conjunto, temos que a quantidade N de elementos presentes no sistema é quantificado na Fig. (2), sendo a mesma extremamente importante para análise e coleta de todos os dados para solucionar as equações. O conjunto não possui pares superiores (Ps=0), pois não há par de engrenagens e par de cames. Em relação aos pares inferiores, podemos afirmar que o conjunto possui pares simples, ou seja pares que ligam dois elementos, nesse caso Pi=22 (pinos de fixação). Também pode-se afirmar que o mesmo não possui pares duplos (P2=0), que por definição são pares que ligam três ou mais elementos, não apresentados na Fig. (2).

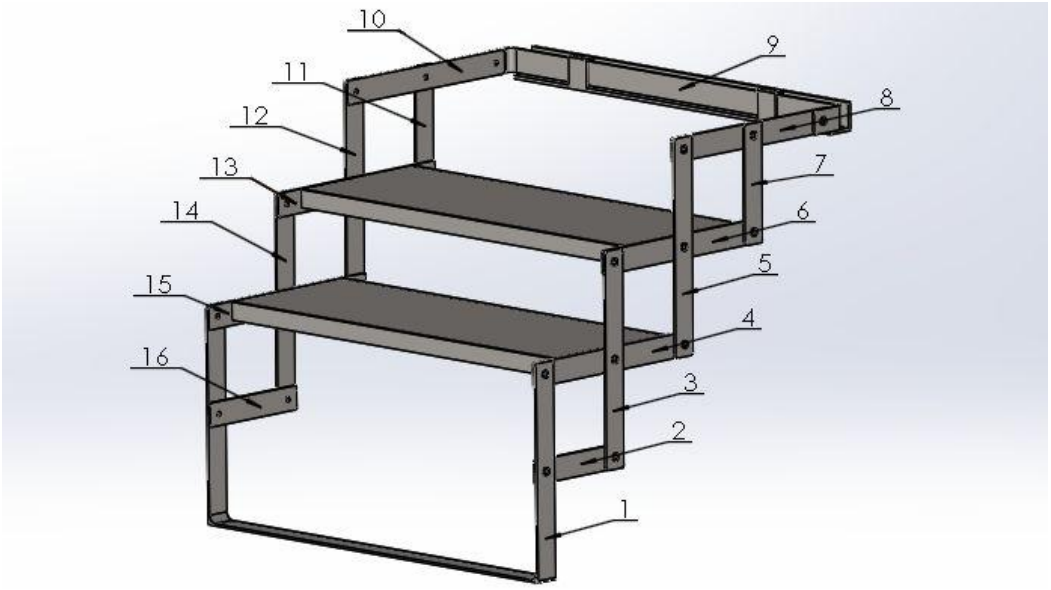



**Figura 2.** Vista perspectiva 3D da quantidade de elementos do conjunto

Com isso, pode-se solucionar a Eq. (1);

GDL = [ 3(N-1) - (2Pi + Ps) ]
GDL = [ 3(16-1) - (2(22) + 0) ]
GDL = [ 45 - 44 ]
GDL = 1

A partir do grau de liberdade, podemos assim classificar o sistema seguindo o critério de Gruebler. Segundo Norton (2010), podemos reescrever a classificação para melhor entendimento como,

Se GDL < 0, o sistema é uma estrutura estaticamente indeterminada;
Se GDL = 0, o sistema é uma estrutura estaticamente determinada;
Se GDL > 0, o sistema é um mecanismo com GDL graus de liberdade.

Dessa forma, pode-se concluir definitivamente que o sistema é do tipo MECANISMO, uma vez que o grau de liberdade do conjunto resultou em um número maior que zero, adequando assim ao critério de Gruebler.

Após o projeto da modelagem do desenho 3D, viu-se também a necessidade de analisar e realizar estudos em relação a diversos tipos de fenômenos que podem acontecer em uma dada estrutura, seja ela dinâmica ou estática. Tais fenômenos podem ser das mais variadas formas de aplicação da engenharia, sendo os que mais acarretam problemas que podem ser prejudiciais caso não tenha sido estudado, analisado e resolvido com antecedência. Trata-se de flambagem e possíveis falhas, uma vez que qualquer tipo de estrutura está sujeita a esses fenômenos. Com a utilização do software de engenharia CAD 3D SolidWorks 2017, foi possível realizar estudos com base em análises de simulação tanto estática como por análise de flambagem.

**Simulação Estática**

A simulação por análise estática pressupõe que na superfície do degrau esteja atuando uma carga devido ao peso de uma pessoa a qual esteja subindo nos degraus com massa de 200 kg, o que acarretaria em uma força de atuação com módulo F=2000 N, considerando a gravidade local igual a g=10 m/s². A massa da pessoa (pior situação possível) foi proposta no intuito de analisar o fenômeno para obtenção de resultados em uma forma difícil e inesperada de acontecer. É importante também salientar que para efeito de simulação no software, considerou-se a força de atuação como uma carga pontual centrada na superfície do degrau de módulo apresentado anteriormente. Como resultado, obteve-se o módulo de deformação equivalente, onde Hibbeler, R.C, (2004, p. 51) afirma “Quando uma força é aplicada a um corpo, tende a mudar a forma e o tamanho dele. Tais mudanças são denominadas deformação”, e está apresentado na Fig. (3).

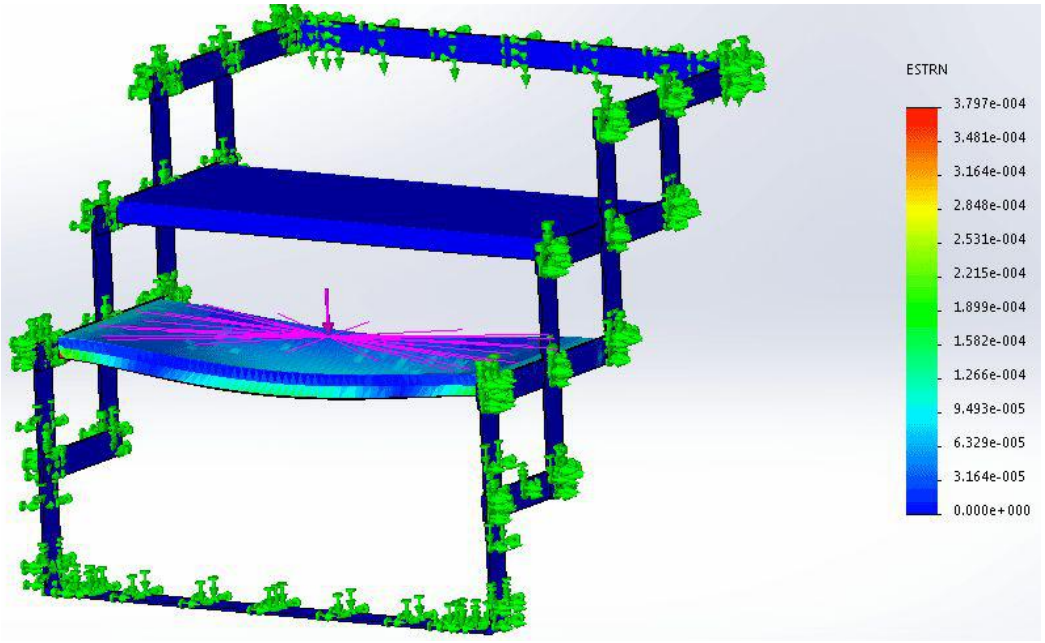



**Figura 3.** Simulação por análise estática - Deformação máxima

Através da análise e obtenção dos resultados, é possível afirmar que a deformação na superfície do degrau será praticamente nula em virtude do valor ser pequeno, cerca de aproximadamente 0,0003797 m. Isso sem mencionar que a deformação será de caráter elástico, ou seja um processo reversível que não há deslocamento permanente de átomos, a qual após o fim do carregamento, o material volta ao estado inicial. Dessa forma, é possível concluir que apesar de executar a simulação do mecanismo com a pior hipótese possível, o mesmo não será afetado pela força externa.

A mesma análise também foi capaz de fornecer suporte para realização de um processo que é usualmente aplicado na engenharia: o superdimensionamento de estruturas. Esse tipo de processo é obtido mediante a aplicação de um fator de segurança nos cálculos estruturais. Com isso, a estrutura fica dimensionada para suportar esforços muito superiores em comparação aos que realmente será submetida, tornando assim um projeto com segurança máxima. A Fig. (4) trata-se da simulação visando falhas mediante a tensão de cisalhamento máxima (Critério de Tresca), a qual "é o deslizamento que ocorre ao longo dos planos de contato dos cristais que, aleatoriamente ordenados, formam o próprio material." (Hibbeler, R.C, 2004, p. 413), utilizando um fator de segurança igual a 1,5.

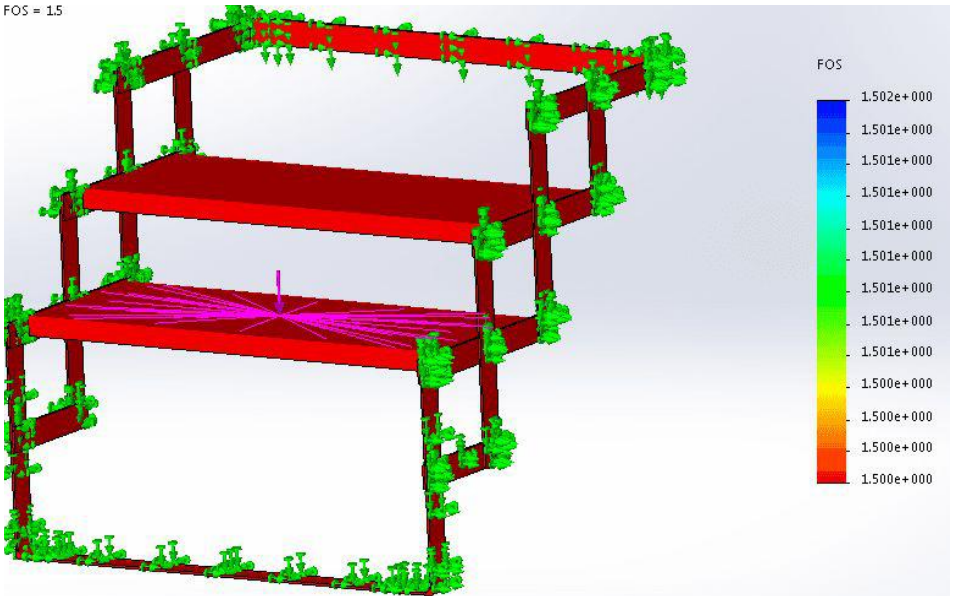



**Figura 4.** Simulação com aplicação do fator de segurança

Após a simulação com o valor do fator de segurança, pode-se observar através da Fig. (4) que a estrutura não sofre nenhum tipo de deformação em virtude do fator de segurança superdimensionar a mesma, o que consequentemente acarretará mudanças em sua geometria como o aumento da espessura dos elementos para satisfazer tal situação.

**Simulação por Flambagem**

A simulação por análise de flambagem pressupõe a mesma ação do carregamento externo da simulação anterior, ou seja a aplicação de uma força de intensidade F= 2000 N centrada sobre a superfície do degrau da escada, levando em consideração a retirada da haste menor situada na horizontal, uma vez que a mesma dá sustentação para toda estrutura do mecanismos e serve como um empecilho para que não ocorra o fenômeno propriamente dito, pois as barras estão conectadas por pinos de alta resistência mecânica à tração e compressão. A Fig. (5) representa tal consideração.

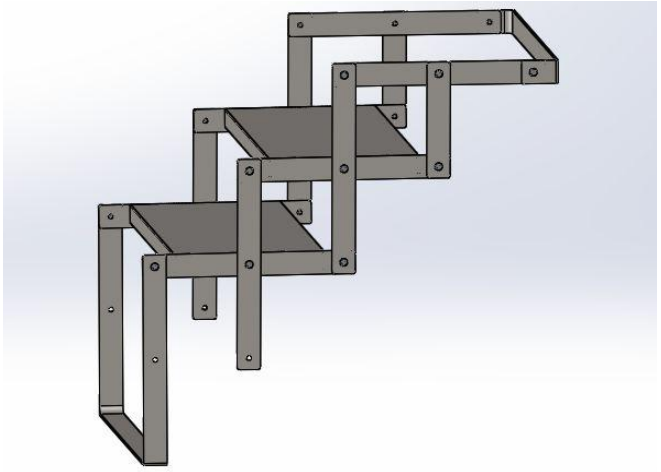


**Figura 5.** Vista perspectiva 3D da estrutura com a retirada da haste menor

Com a execução da simulação, obteve-se como resultado o módulo das amplitudes de flambagem, apresentadas na Fig. (6) abaixo.

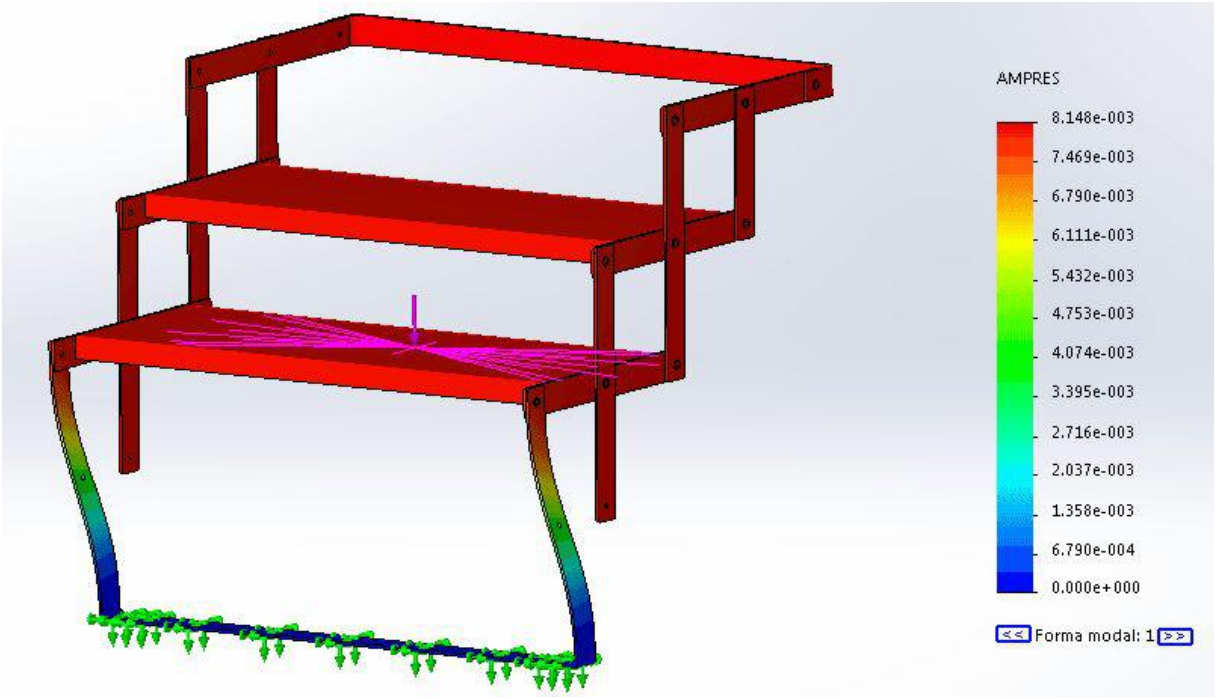



**Figura 6.** Simulação por análise de flambagem - Vista em perspectiva 3D

A obtenção dos resultados da simulação forneceu o valor da amplitude em que ocorre a flambagem, um valor com amplitude máxima de $8{,}148.10^{-3}$ m ou 8,148 mm. Além disso, obteve-se como resultado após a simulação o valor do fator de carga, a qual por facilidade de nomenclatura e visualização iremos definir como Fcr, sendo um valor adimensional. Tal coeficiente é simplesmente a razão entre as cargas de flambagem e as cargas aplicadas e está demonstrado na Tab. 8.

**Tabela 8.** Fator de carga em flambagem

| Modos de Flambagem | Fator de carga |
|---|---|
| 1 | 1,6789 |

Como pode-se perceber através da Fig. (6), só existe um modo de ocorrer flambagem na estrutura como um todo mediante a retirada da haste que dá sustentação e movimentação para o mecanismo, autenticando assim a Tab. 8 quanto ao número de modo a ocorrer o fenômeno. Tal fator de carga é utilizado para o cálculo da carga máxima crítica de flambagem atuante na estrutura, de modo que ao utilizar a Eq. (4), temos que

Pcr = Fcr.F
Pcr = 1,6789(2000)
Pcr = 3357,8 N

e tal valor de carga máxima crítica pode ser usada no dimensionamento de estruturas para que não ocorra a flambagem mediante aplicação de um fator de segurança. Com a simulação, pode-se evidenciar a importância da haste retirada durante o início da análise, pois além da mesma ser de fundamental importância para todo o mecanismo dando suporte para sustentação e sequência ao movimento de translação, ela também impede que ocorra flambagem na estrutura ou seja, impede que aconteça a encurvadura da barra chata visível na Fig. (6), pois as mesmas estão conectadas por pinos de alta resistência a tração, mediante ao carregamento externo na face da estrutura.

Como medida de comprovação de segurança no projeto, pode-se utilizar o Critério de Tensão máxima de von Mises, pois essa teoria afirma que um material dúctil começa a escoar em um local onde a tensão de von Mises se torna igual ao limite de escoamento de seu material, sendo o limite de tensão ou Von Mises igual ao limite de escoamento do material. Na Fig. (7), a simulação para obtenção de von Mises.

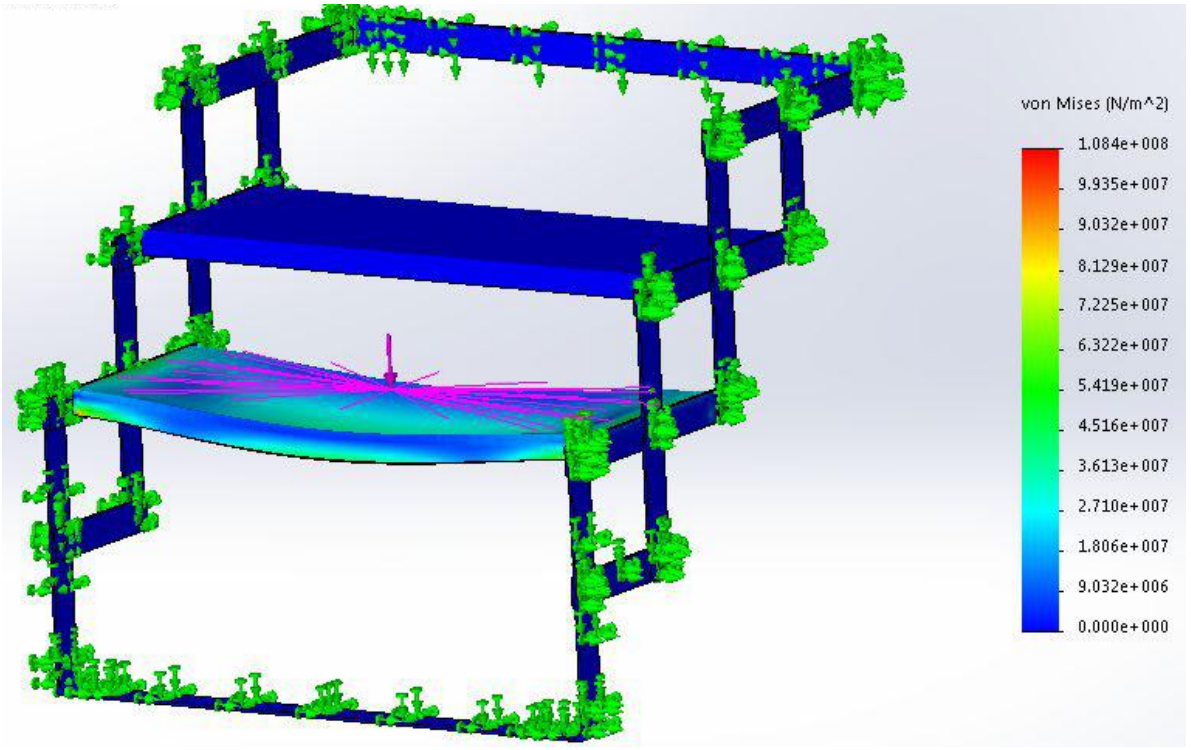



**Figura 7.** Simulação por análise estática

Dessa forma, pode-se afirmar que o material não irá escoar em nenhum ponto da estrutura, uma vez que a tensão máxima de von Mises atuante na mesma é um valor aproximado de 108,4 MPa, que comparado ao valor de limite de escoamento do Aço SAE 1020 fornecido pelo software com um valor predeterminado de 350,6 MPa, é inferior, o que confirma total segurança quanto a falhas estruturais, satisfazendo então o critério de tensão máxima de von Mises.

**Aplicação objetiva**

O projeto da escada retrátil pode ser aplicado diretamente em carrocerias e trailers, a exemplo da Fig. (8), pois além de cumprir seu importante papel em elevar pessoas a diferentes níveis de altura, o mesmo pode ser facilmente instalado, removido e transportado em qualquer situação.

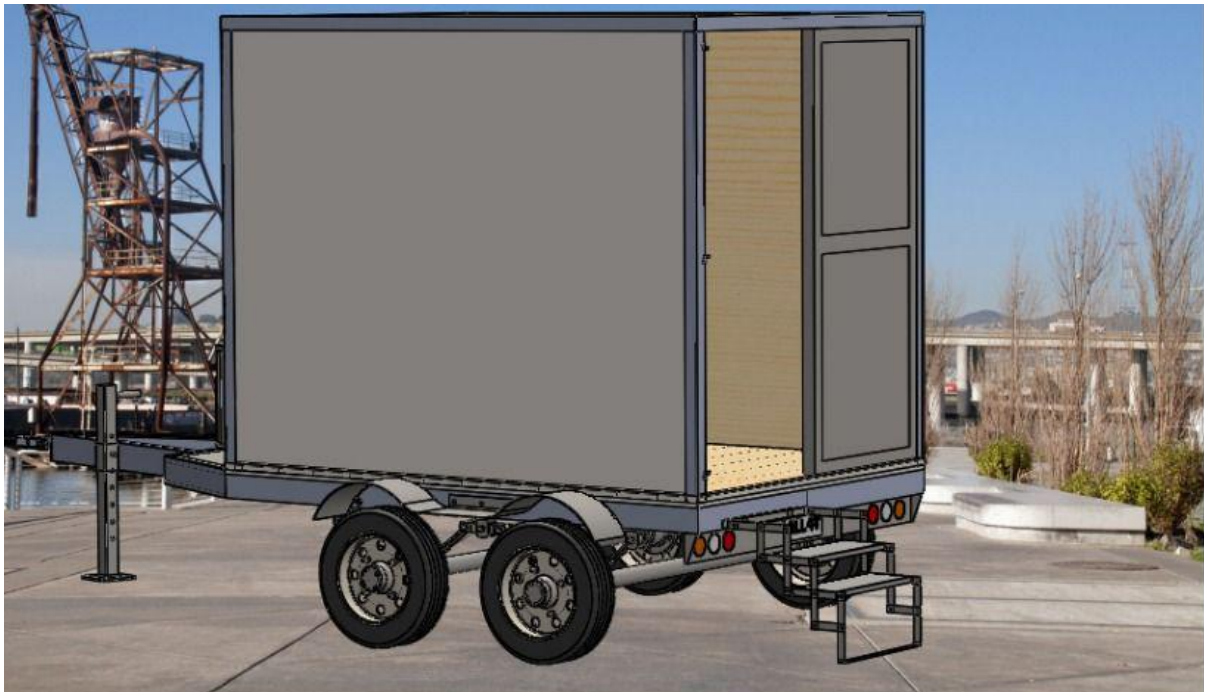


**Figura 8.** Uma das aplicações do produto projetado

## CONCLUSÃO

Com base na hipótese de se realizar a fabricação de uma escada que apresente vantagens como maior comodidade, facilidade em instalação e transporte, foi realizado um estudo visando o aspecto construtivo de um novo produto. Logo em sua fase de projeto, utilizamos as normas que regem os aspectos dimensionais da estrutura, a qual as mesmas especificam a necessidade de conter pisos antiderrapantes em seus degraus para evitar qualquer deslize favorecendo o aspecto segurança e com base nos resultados das simulações, conclui-se que a estrutura não falha por nenhum tipo de carregamento externo submetido.

Com massa de aproximadamente 12,8 kg fornecida pelo software, a escada é um produto robusto, resistente, de fácil instalação e oferece segurança aos seus usuários. Dessa forma, após as simulações e cálculos, obtivemos resultados satisfatórios do projeto com um produto que oferece diversas aplicabilidades para sociedade como um todo.

## AGRADECIMENTOS

Aos professores da universidade Bruno Rosa, Daniel Laporte, Fernando Montanare e Fabiano Branco pela atenção, compreensão, sabedoria, ideias e orientação dispensadas a nós durante o período de elaboração deste projeto.

A Universidade Católica Dom Bosco - UCDB pelo ensino de qualidade e pela estrutura concedida para elaboração do projeto.

A todos de maneira geral, que acabaram contribuindo com pensamentos, opiniões, ideias e soluções para chegarmos até aqui.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9050: Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9077: Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos**.** Rio de Janeiro, 2001.

CISER. "Catálogo de Produtos". Disponivel em: <http://www.ciser.com.br/htcms/media/pdf/destaques/br/catalogo-geral-de-produtos.pdf>. Acesso em 21 de maio 2018.

FERREIRA, Adriana., 2010. "A Origem da Escada". Disponivel em: <https://www.sitedecuriosidades.com/curiosidade/a-origem-da-escada.html> . Acesso em 16 de maio 2018.

GERDAU. "Catálogo de Produtos". Disponivel em: <https://www.gerdau.com/br/pt/produtos/barra-chata-gerdau#ad-image-0>. Acesso em: 21 de maio de 2018.

GERDAU. "Catálogo de Produtos". Disponivel em: <https://www.comercialgerdau.com.br/pt/produtos/chapa-piso#ad-image-0> . Acesso em: 21 de maio de 2018.

GERDAU. "Catálogo de Produtos". Disponivel em: <https://www.gerdau.com/br/pt/produtos/cantoneira-gerdau#ad-image-0>. Acesso em: 21 de maio de 2018.

GRILLO, N. L. . Elementos de Cinemática e Dinâmica de Mecanismos. 2012.

HIBBELER, R.C Resistência dos materiais / R.C. Hibbeler - São Paulo: Prentice Hall, 2004 "Mechanics of materials"

NETO, J; AOKI,S; TAKARA,E. Calcular Escadas. Centro Universitário UNICAPITAL e Faculdades Integradas Paulista FIP, São Paulo, 2014.

NORTON, Robert L. Cinemática e dinâmica dos mecanismos. 1 ed. Porto Alegre: AMGH, 2010.

Rivkle. "Porcas e Pinos de rebite cego". Disponivel em: <http://www.bollhoff.com.br/pt/br/elementos-de-fixacao/elementos-de-fixacao-especiais/tecnologia-de-rebitagem/porca-rebite-e-prisioneiros.php>. Acesso em: 21 de maio de 2018.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores João Paulo Marchi Benachio e Matheus Vinicius da Silva Mazuquiel são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

( )Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
( X ) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( )Termociências e Mecânica dos Fluidos

# ESTUDO DE DIFERENTES REVESTIMENTOS DE FERRAMENTAS DE USINAGEM PELO MÉTODO DA ESCLEROMETRIA LINEAR DE CARGA PROGRESSIVA

**Thiago França Reges,Luiz Eduardo Rodrigues Vieira,Guilherme de Oliveira Castanheira , Leonardo Rosa Ribeiro da Silva,Wisley Falco Sales**
Universidade Federal de Uberlândia, Laboratório de Ensino e Pesquisa em Materiais - LEPU
Av. João Naves de Ávila, 2121 - Santa Mônica, Uberlândia - MG, 38400-902
thiagofranca1999@hotmail.com

**RESUMO:** A utilização de revestimentos permite um aumento na vida útil das ferramentas de corte na usinagem, sendo este fator influenciado pela velocidade de corte, a dureza do material usinado, a composição química do revestimento e a adesividade. Nesse artigo é abordado o fator da adesividade do revestimento em diferentes ferramentas. A adesividade do revestimento é crucial para o desempenho da ferramenta no corte e na vida sua útil , pois uma vez desprendido da ferramenta este revestimento não apenas deixa de cumprir sua função como também pode acelerar o desgaste da ferramenta, pois as condições colocadas na usinagem foram feitas com o intuito da boa performance do revestimento, sendo geralmente realizado em materiais de maior dureza que o substrato foi feito para usinar. O objetivo deste trabalho é o de investigar a adesividade de revestimentos de nitreto de titânio (TiN) e nitreto de titânio e alumínio (TiNAl) em ferramentas de metal duro (WC-Co). Como método de avaliação foram utilizados testes de esclerometria linear com carga progressiva, sendo utilizado como indentador um cone de diamante utilizado em ensaios de dureza Rockwell C. Os corpos de prova foram riscados com carga variando entre 5-40 N, por uma distância de 3.5 mm, sendo observado que o revestimento de TiN apresentou uma adesividade mais baixa enquanto que a ferramenta revestida por TiNAl teve melhor aderência performance.

**Palavras-Chave:** Revestimentos, esclerometria, adesividade

***ABSTRACT:*** *The use of coatings allows an increase in the life of the cutting tools in the machining, being this factor influenced by the cutting speed, the hardness of the machined material, the chemical composition of the coating and the adhesiveness. In this paper the adhesion factor of the coating in different tools is discussed. The adhesiveness of the coating is crucial for the performance of the tool in the cut and in its useful life, once detached from the tool this coating not only fails to fulfill its function but also can accelerate the wear of the tool, since the conditions placed in the machining were made for the purpose of the good performance of the coating, being generally carried out in materials of greater hardness than the substrate was made for machining. The objective of this work is to investigate the adhesiveness of titanium nitride (TiN) and titanium and aluminum nitride (TiNAl) coatings in carbide tools (WC-Co). As a method of evaluation, linear sclerometry tests with progressive load were used, and a diamond cone used in Rockwell C hardness tests was used as an indenter. The test specimens were scratched with a load ranging from 5-40 N, for a distance of 3.5 mm, with the TiN coating being observed to have a lower tackiness, whereas the TiNAl coated tool had better performace adhesion.*

***Keywords:*** *Coatings, scratch test, adhesion*

## INTRODUÇÃO

Os revestimentos em ferramentas de usinagem, vem sendo utilizados cada vez mais, pois aumentam a vida útil da ferramenta, possibilitam a usinagem de materiais mais duros, melhoram a estabilidade química do substrato e dependendo do revestimento possuem um alto custo-benefício. Por aumentarem a dureza superficial da ferramenta, geram um atrito reduzido na interface ferramenta/cavaco.

O teste de Esclerometria (Scratch-test) é um teste que consiste na aplicação de uma carga constante/variável em uma curta distância com uma ponta de diamante na superfície da ferramenta com o propósito de verificar o atrito e a adesividade do revestimento na ferramenta.

P.A.Steinmann, Y.Tardy e H.E.Hintermann (1987) fizeram teste de esclerometria para avaliar a a confiabilidade deste tipo de teste na avaliação de revestimentos. Através dos seus experimentos em revestimentos de TiC, Ti(C,N), e carbonetos, eles comprovaram que esse tipo de experimento consegue prever fatores que influenciam na adesividade do

revestimento, como a espessura do revestimento e do atrito e comprovaram que esse tipo de teste é valido para a avaliação da adesividade de revestimentos.

Teles (2014) utilizou testes de esclerometria com carga progressiva para avaliar revestimentos de CrAlSiN. O comprimento dos riscos foram de 5mm e uma carga progressiva de 0 a 13N. Através destes ensaios foi possível avaliar a carga crítica para o aparecimento de trincas nos revestimentos, tendo assim uma ideia da tenacidade a fratura dos mesmos.

LU P. Et al (2011) realizou a investigação de materiais revestidos com diamante quanto à sua adesividade. O material utilizado foi carboneto de tungstênio revestido com diamante os teste foram feitos através de 5 cinco riscos com com variação de cargas distintas sendo de 0 a10,de 0 a 15, de 0 a 20, de 0 a 25 e de 0 a 30N com o comprimento de 5mm, através dos testes pode-se observar aumento na acústica com a delaminação do revestimento no ponto de 4,3N e pode avaliar a adesividade do diamante em peças.

O objetivo deste trabalho é o de utilizar o teste de esclerometria com carga progressiva para investigar, comparativamente, a adesividade de insertos de metal duro destinados ao fresamento de ferros fundidos (classe K) revestidos com nitreto de titânio (TiN) e com nitreto de titânio e alumíno (TiNAl). Os resultados dos ensaios foram avaliados quanto as forças resultantes e também através de microscopia eletrônica de varredura.

## METODOLOGIA

No experimento foi utilizado a ferramentas ilustradas na Fig(1), sendo a Fig(1.a)revestida com TiNal(nitreto de titânio e alumínio)e a Fig(1.b)revestida com TiN (nitreto de titânio).

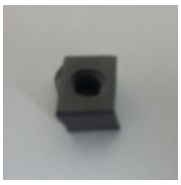


**Figura 1.a.** Ferramenta 1 revestida de TiAlN

**Figura 1.b.** Ferramenta 2 revestida de TiN

O equipamento utilizado para fazer o teste de esclerometria foi realizado através de um tribômetro universal Figura (2) que possui as especificações na Tab (1).

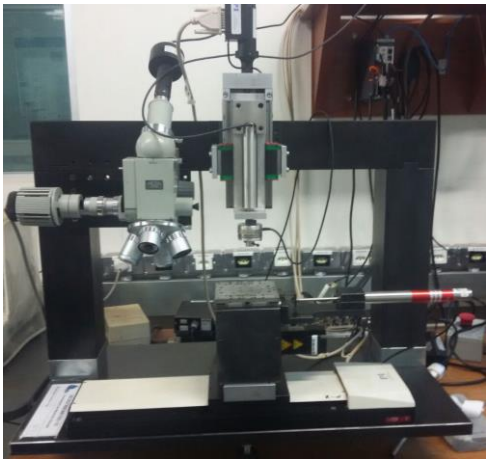


**Figura 2.** Tribômetro universal

**Tabela 1.** Especificações do tribômetro universal

| Propriedades | Especificação |
|---|---|
| **Mesas X, Y e Z** | **0.1 µm** |
| **Atuador piezelétrico** | **120 µm de curso e precisão de 2.4 ρm** |
| **Sensor de posição LVDT** | **resolução 7.87 mV/m** |
| **Célula de carga** | **amplitude 0,02-120N** |

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) utilizado foi o ZeissEVO|MA 10 Fig(3).

**Figura 3.** Microscópio Eletrônico de Varredura

**Procedimento experimental**

O teste de esclerometria foi realizado através de um indentador cônico de diamante modelo Rockwell C, com cargas variando de 5-40 N em uma distância de 3.5 mm, sendo esse teste realizado 3 vezes em cada ferramenta, para aumentar confiança nos testes. Após os testes, as amostras foram levadas para o microscópio eletrônico para retirada de fotos no MEV. Além disso, utilizamos as duas amostras para fazer um corte nelas por eletroerosão, após isso, elas foram levadas para serem polidas com pasta de diamante, com os seguintes tamanhos médios de partículas: 25 µm, 10 µm, 5 µm, 1µm e 0.25 µm. Após o polimento, as amostras foram levadas ao MEV e colocadas em uma posição, que através dela pode-se medir a espessura do revestimento na ferramenta com as fotos

**RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os resultados das forças aplicadas em X, Y e Z por distância percorrida dos riscos, são mostrados na Fig(4). O gráfico da Fig(4.a) representa a ferramenta revestida de TiNAl e apresenta ser constante sem oscilações na força em Z. A Fig(4.b) representa a ferramenta revestida por TiN e apresenta oscilações na força em Z.

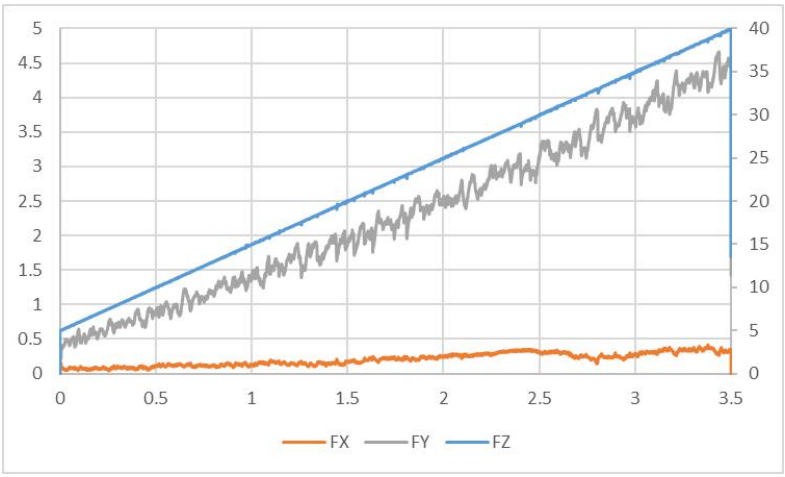



**Figura 4.a.** Resultado da ferramenta TiNAl

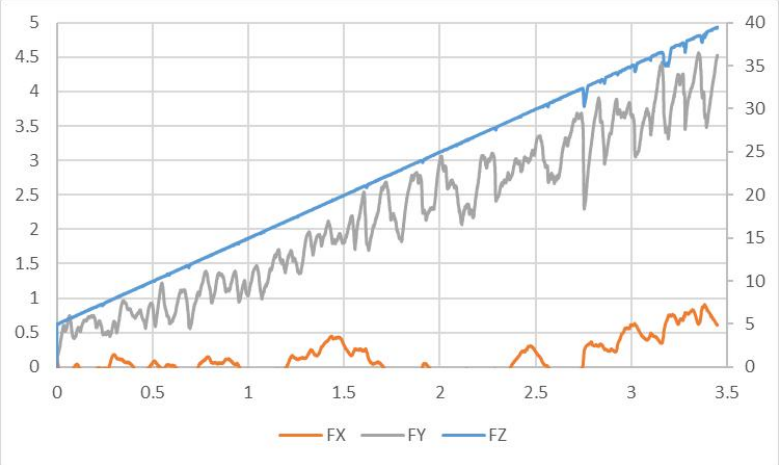



**Figura 4.b.** Resultado da ferramenta TiN

As oscilações na carga em Z podem ser melhor entendidas com base nas microscopias eletrônicas de varredura das regiões analisadas, ilustrados na Fig.(5). A Fig.(5.a) referente a ferramenta de TiNAl não apresenta falhas do revestimento na região do risco, o que explica a pouca oscilação da carga em Z. A ferramenta de TiN, por sua vez, aprensetou descolamento do revestimento, indicando sua baixa adesividade com a matriz, conforme ilustra a Fig.(5.b). O evento de falha do revestimento alivia as tensões de contato entre o identador e o corpo de prova, o que resulta nas oscilações da carga em Z observadas na Fig.(4.b).

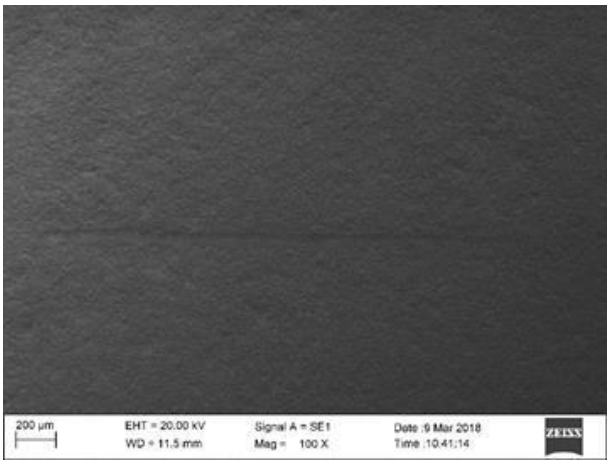



**Figura 5.a.** Trincas no Revestimento de TiNAl

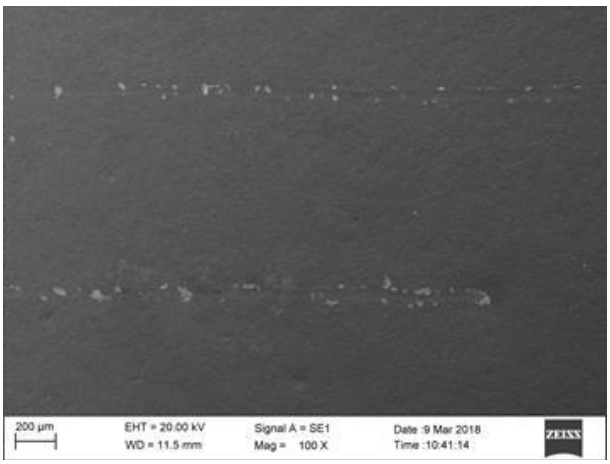



**Figura 5.b.** Falhas no revestimento de TiN

A adesividade destes revestimentos pode ser melhor entendida com base na composição de suas camdas formadoras, ilustras para a ferramenta de TiNAl na Fig.6 e para a ferramenta de TiN na Fig. 7 através de suas respectivas secções transversais. A composição das camadas da ferramenta é ilustrada para as ferramentas de TiNAl e TiN nas tabelas 2 e 3, respectivamente.

A amostra com revestimento de TiNAl (Fig. 6) apresentou uma maior adesividade se comparada com a ferramenta revestida de TiN (Fig. 7), fato esse que pode ser explicado pela presença de uma relativamente espessa camada de TiCN entre a base da ferramenta (WC-Co) e a camada superior do revestimento (TiNAl),conforme indicado por A.A. Matei., et al. (2015). Uma vez que a camada de TiCN tem como uma das principais caracteristicas a adesividade elevada com o substrato de ferramentas de WC-Co, especialmente quando comparada ao TiN e ao TiNAl, pode-se então entender o melhor desempenho da ferramenta revestida de de TiNAl em relação a de TiNAl.

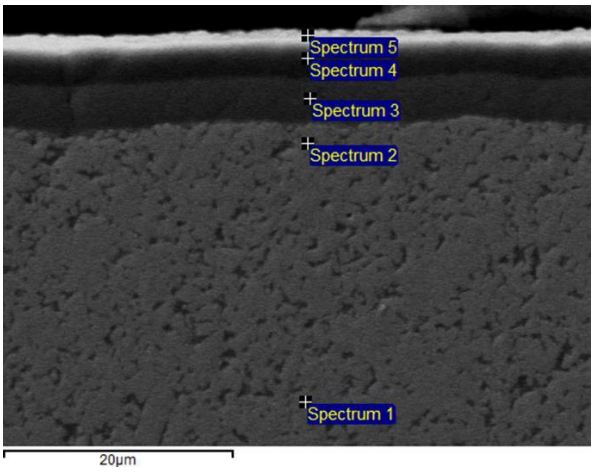



**Figura 6** MEV da ferramenta de TiNAl

**Tabela 2** Composição química dos espectros da ferramenta TiNAl

| Spectrum | C | N | Al | Ti | Co | W | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Spectrum 1 | 12.87 | | | | 1 | 83.1 | 96.97 |
| Spectrum 2 | 10.76 | | | | 45.43 | 43.81 | 100 |
| Spectrum 3 | 6.31 | 30.12 | 4.16 | 53.69 | 1.89 | 3.83 | 100 |
| Spectrum 4 | 12.28 | 36.07 | 42.3 | 9.35 | | | 100 |
| Spectrum 5 | 10.24 | 35.95 | 35 | 18.81 | | | 100 |

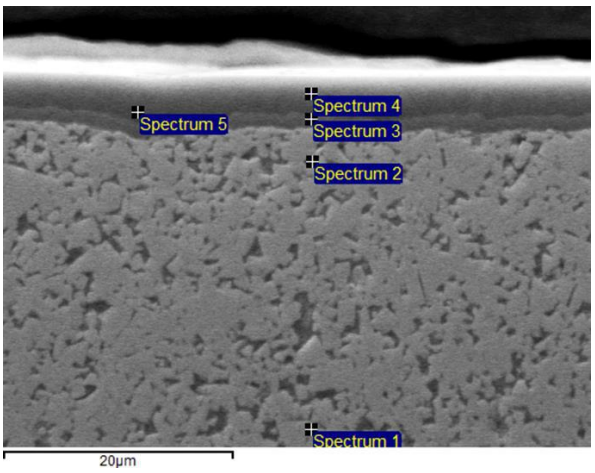



**Figura 7.**MEV da ferramenta de TiN

**Tabela 3**Composição química dos espectros da ferramenta TiN

| Spectrum | C | O | Al | Ti | Fe | Co | W | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Spectrum 1 | 11.34 | | | | | 4.63 | 80.45 | 96.42 |
| Spectrum 2 | 12.2 | | | | | 12.36 | 72.02 | 96.58 |
| Spectrum 3 | 19.18 | | | 80.82 | | | | 100 |
| Spectrum 4 | 11.52 | 50.97 | 37 | 0.5 | | | | 99.99 |
| Spectrum 5 | 55.02 | 26.26 | 0.2 | 15.65 | 0.38 | | 1.72 | 99.23 |

## CONCLUSÃO

Neste trabalho pode-se evidenciar a eficácia da combinação das tecnicas de esclerometria linear com carga progressiva e de microscopia eletrônica de varredura na investigação da adesividade de revestimentos. Ambos os testes convergiram para mostras que o revestimento de TiNAl apresentou uma adesividade superior ao de TiN, sendo a mais provável causa para este fato a presença de uma considerável camada intermediária de TiCN a qual aumenta a adesividade entre a camada superior de TiNAl e o substrato da ferramenta.

## AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos irão para as Fundições Tupy e Walter Tools, por fornecer as ferramentas e materiais da trabalho e ao Vinícius Teles por ajudar no manuseamento do tribômetro.

## REFERÊNCIAS

P.A.Steinmann, Y.Tardy e H.E.Hintermann,1987,"Adhesion testing by the scratch test method: The influence of instrinsic and extrinsic parameters on the critical load", 14th international conference on Metallurgical Coatings, San Diego, USA, Elsevier,Vol.154, 12 november 1987, pp333-349.

LU.P, X. Xiao, M. Lukitsch, A. Sachdev, Y.K. Chou,2011,"Interface characterizations of diamond-coated tools by scratch testing and simulations", Mechanical Engineering Department, The University of Alabama, Tuscaloosa, Alabama, USA,Elsevier, Vol.154, 25 december 2011, pp 1860-1866.

Teles.C.V, 2014, "Desgaste abrasivo de revestimentos cralsin multicamada/gradiente", Uberlândia, Brasil, Universidade Federal de Uberlândia, 3 agosto 2014.

A.A. Matei, I. Pencea, S.G. Stanciu, R. Hristu, I. Antoniac, E. Ciovica (Coman), C.E. Sfat, G.A. Stanciu, 2015, "Structural characterization and adhesion appraisal of TiN and TiCN coatings deposited by CAE-PVD technique on a new carbide composite cutting tool", Journal of Adhesion Science and Technology, 17 agosto 2015.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

( )Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(**X**) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( )Termociências e Mecânica dos Fluidos

XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 27 à 31 de agosto de 2018 – Brasília, DF

# ESTUDO DE UM CICLO ALTERNATIVO PARA ESFEROIDIZAÇÃO NO AÇO SAE 5160

**Gustavo de Oliveira Benites, Guilherme Pellat dos Santos**
Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões
Av. Universidade das Missões, 464 - Universitário, Santo Ângelo - RS, 98802-470
gustavooliveirabenites@hotmail.com

**RESUMO:** O presente trabalho tem como objetivo estudar e propor um novo ciclo de recozimento de esferoidização no aço SAE 5160, o qual é um aço ligado de médio carbono, que quando necessita de máxima ductilidade para trabalhos que exigem muito esforço, tanto da ferramenta quanto do material, devem ser esferoidizados, a esferoidização aumenta a vida das ferramentas e facilita as operações de conformação mecânica e usinagem. O processo de esferoidização é um processo lento e com elevado custo, diante destes fatores, foi proposto um novo ciclo de recozimento com um tempo consideravelmente menor. O processo teve duração de 8 horas e 30 minutos e após o mesmo, foram realizados testes de dureza e metalografia na amostra como recebida, sem tratamento, assim como nas amostras provenientes do ciclo. Após a comparação de dureza e microestruturas, verificou-se que os resultados foram muito satisfatórios, foi possível diminuir em torno de 48% a dureza do material em um tempo bem curto comparado ao processo convencional.

**Palavras-Chave:** Esferoidização, Aço SAE 5160, Ciclo de Recozimento

***ABSTRACT:*** *The present work aims to study and propose a new spheroid annealing cycle in SAE 5160 steel, which is a medium carbon bonded steel, which it needs maximum ductility for work that requires a lot of effort, both tool and material, must be spheroidized, spheroidization increases tool life and facilitates machining and machining operations.. The spheroidization process is a slow and costly process, in view of these factors, a new annealing cycle with a considerably shorter time has been proposed. The process lasted 8 hours and 30 minutes and after that, hardness and metallography tests were performed on the sample as received without treatment, as well as on the sample from the cycle. After the comparison of hardness and microstructures, it was verified that the results were very satisfactory, it was possible to reduce the material's hardness by 48% in a very short time compared to the conventional process.*

***Keywords:*** *Spheroidization, SAE 5160 Stell, Annealing Cycle*

## INTRODUÇÃO

Em aços de médio e alto teor de carbono que são aplicados em processos de usinagem e conformação mecânica, os mesmos apresentam uma dureza consideravelmente elevada, os quais devem passar previamente por tratamento térmico antes dos processos citados, a fim de diminuir a dureza, resistência mecânica, assim como aumentar sua ductilidade. O processo de recozimento prolongado ou esferoidização, segundo (Chiaverini, 2005) consiste num aquecimento e resfriamento subsequente em condições tais a produzir uma forma globular ou esferoidal de carboneto no aço. A taxa de esferoidização está diretamente relacionada com a difusão do carbono na ferrita e que a mesma decresce com o crescimento do tamanho médio da partícula. Elementos de liga diminuem a taxa de difusão de carbono na ferrita (coeficiente de difusão) e, portanto, a taxa do processo de esferoidização. Se o aço conter elementos formadores de carbonetos, ocorre o mesmo efeito, reduzindo fortemente a taxa de esferoidização. A esferoidização das partículas de cementita presentes na perlita tem um efeito determinante no resultado de propriedades mecânicas dos aços médio carbono (THELNING, 1984). É um processo que normalmente tem uma cinética muito lenta, portanto são comuns tempos longos de tratamentos, como algo em torno de 20 a 30 horas que varia com a microestrutura inicial do aço, gerando assim um gasto considerável desembolsado nesse tipo de tratamento. Diante do fato da esferoidização ser um processo demorado, aliado ao alto custo, tem despertado o interesse de engenheiros e técnicos em estudar maneiras para diminuir o tempo do tratamento, baixando assim o custo total do processo. O aço em estudo é o SAE 5160, o qual tem uma porcentagem média de carbono, aliado de uma alta taxa de cromo e manganês que pode ser visto na Tab. 1, esse tipo de aço é interessante para o uso em engrenagens, semi-eixos e molas helicoidais, porém com o fato de ter uma elevada dureza, o mesmo deve ser submetido a um tratamento de esferoidização. Foi estudado e testado um ciclo de recozimento para avaliar a eficácia do mesmo para o aço em questão.

## METODOLOGIA

O trabalho foi baseado no aço SAE 5160 em questão, que tem uma composição química demostrada na Tabela 1.

**Tabela 1.** Elementos constituintes do aço SAE 5160

| Elemento | Concentração (%) |
|---|---|
| Cromo, Cr | 0,70 a 0,90 |
| Manganês, Mn | 0,75 a 1,00 |
| Carbono, C | 0,56 a 0,64 |
| Silício | 0,15 a 0,30 |
| Enxofre, S | 0,04 (máx) |
| Fósforo, P | 0,035 (máx) |

Para o trabalho foram cortados e produzidos 3 (três) corpos de prova do aço SAE 5160, Fig. (1), sendo caracterizados por CP1, CP2 e CP3. O CP1 não sofreu tratamento, ou seja, as propriedades permaneceram inalteradas, a fim de coletar-se-as propriedades originais do aço como recebido para posterior análise com o resultados obtidos do corpo de prova que passou por tratamento. Ja o CP2 e o CP3 primeiramente foram submetidos a um tratamento térmico de têmpera, a fim de se obter uma microestrutura martensítica para o posterior ciclo de recozimento de esferoidização, o CP'S permaneceram em forno Mufla QUIMIS durante 1 hora e 11 minutos com uma temperatura de austenitização de 850°C e posterior resfriamento em óleo SAE 15W40.

**Figura 1-** Corpo de prova usado no trabalho.

Há diversos tipos de ciclos de recozimento de esferoidização, de um modo geral, para o processo pode-se utilizar os ciclos térmicos apresentados na, Fig. (2), (ROSSI, 1983).

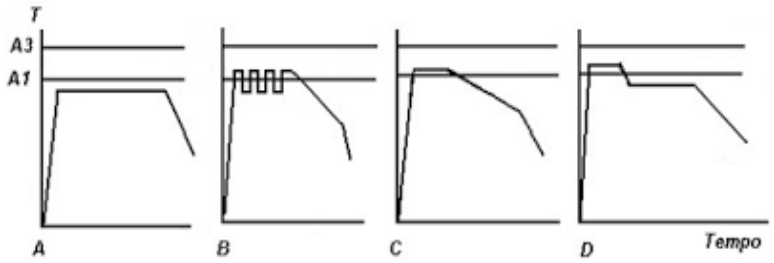



**Figura 2.** Ciclos térmicos para recozimento de esferoidização

Diante do estudo dos ciclos já existentes, para este trabalho foi proposto um novo ciclo de recozimento conforme esquematizado na figura 4. Foi levantado previamente a curva CCT para o aço SAE 5160, o qual pode ser observado na figura 3, esta curva nos apresenta as temperaturas A1 e A3 e, analisando o tempo de cada ciclo, pode-se prever a estrutura microscópica esperada ao fim do tratamento térmico. Pode-se observar que o aço SAE 5160 apresenta um A1 = 732°C e A3 = 747°C. Devido ao pequeno intervalo das linhas A1 e A3 do aço 5160 neste diagrama, é necessario um cuidado na avaliação do tempo, pois uma analise errada poderá indicar uma microestrutural final totalmente diferente da desejada.

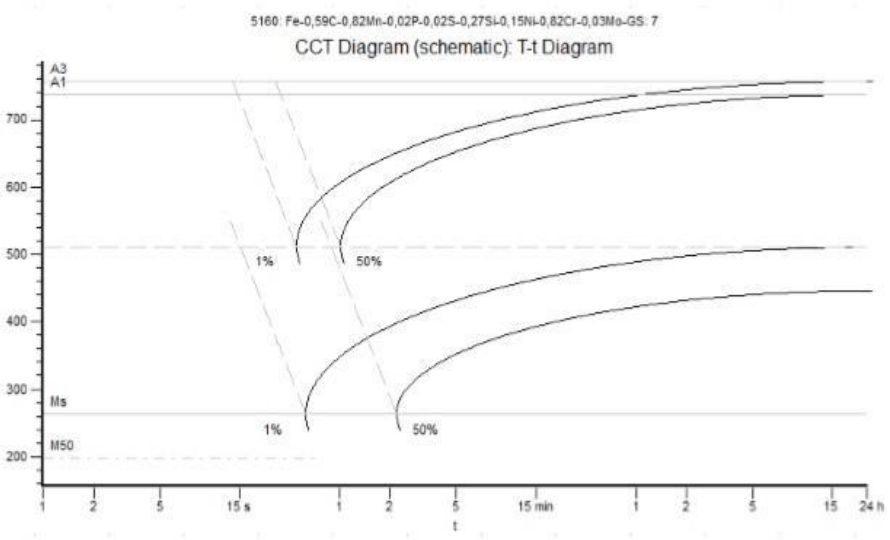



**Figura 3.** Diagrama CCT do aço SAE 5160 usado como base para estudo do novo ciclo.

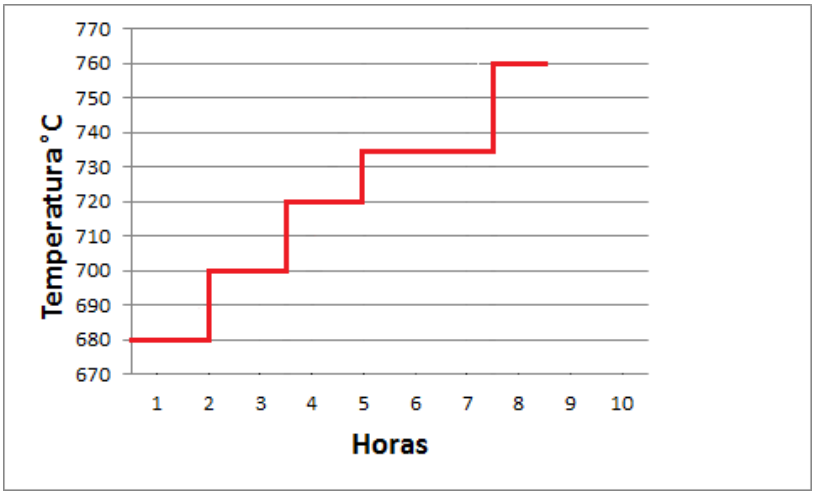



**Figura 4**- Ciclo proposto para esferoidização do aço SAE 5160.

O ciclo começa com o Recozimento Subcrítico: neste tratamento o aço é aquecido à temperatura um pouco abaixo de A1, no ciclo é possivel observar que a temperatura foi de 680°C, onde permaneceu por um período de 2 horas, após as 2 horas, elevou-se-a temperatura à 700°C, onde permaneceu por 1 hora e 30 minutos, após esse tempo, elevou-se novamente a temperatura à 720°C, onde o mesmo ficou por mais 1 hora e 30 minutos, passado esse tempo, elevou-se-a temperatura entre A1 e A3 caracterizando um recozimento isotérmico, à 735°C, onde permaneceu por 2 horas e 30 minutos, e por fim elevou-se novamente à uma temperatura acima de A3, 760°C, durante 1 hora, isso se deve ao fato do aço 5160 possuir um elevado teor de Cromo e Manganês, que, segundo (OHASHI, 1992)[6], nos ciclos térmicos em que o aço é aquecido em temperaturas superiores a A1, elementos de liga como o cromo e o manganês tendem a acelerarem o processo de esferoidização, pois estabilizam a cementita na austenita formada durante o tratamento térmico realizado em temperaturas mais elevadas, reduzindo a solubilização da cementita na matriz austenítica. A martensita irá se transformar de uma estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC) para uma estrutura mista de ferrita cúbica de corpo centrado (CCC) e carbonetos (Fe3C) precipitados, com o aumento do tempo, nas microestruturas martensíticas, os precipitados de Fe3C coalescem e formam estruturas esferoidizadas. O ciclo teve um total de 8 horas e 30 minutos, praticamente 1/3 (um terço) do tempo de ciclos convencionais existentes na indústria. Encerrado o ciclo o aço foi retirado da mufla e colocado para resfriar continuamente ao ar.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para análise dos resultados foi medida a dureza dos corpos de prova, tanto CP1 quanto CP2 e CP3, a fim de compará-los tanto na dureza quanto na sua microestrutura.

Foi realizado o Ensaio de Dureza Brinell (HB) utilizando o durômetro. Para maior precisão da análise dos resultados foram medidas as durezas em 5 lugares diferentes dos corpos de prova. Os resultados do teste de dureza podem ser visto no grafico da figura 5.

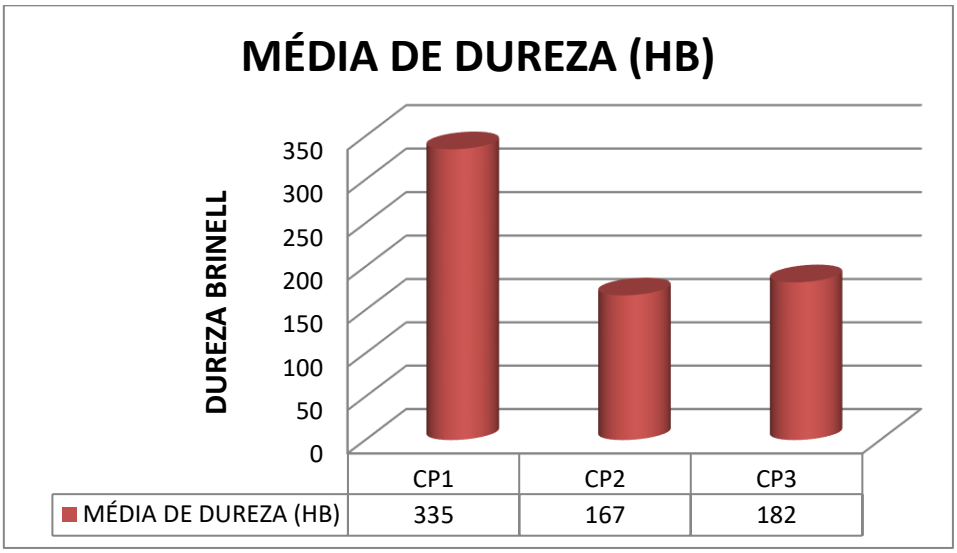



**Figura 5.** Representação dureza média do aço como recebido e tratado térmicamente no ciclo proposto

O aço 5160 como recebido (CP1) teve uma média de dureza de **335 HB**, enquanto os aços submetidos ao ciclo proposto CP2 e CP3, tiveram uma média de **167 HB** e **182 HB**, respectivamente. Analisando os resultados de dureza dos dois corpos de prova submetidos ao ciclo, foi possível notar uma média de redução de dureza em torno de 48%, diante disso pode-se observar que o ciclo proposto foi bastante eficaz e teve ótimos resultados em questão de dureza, além de um período de tempo bem abaixo dos tratamentos convencionais. Ao comparar conceitos e estudos de ciclos propostos por outros autores em relação ao aço SAE 5160, como o de (GEORGE HENRIQUE, 2017), onde propôs 3 ciclos diferentes de 16:06, 14:54 e 17:33 horas, em que obteve uma redução de dureza de 38,8%, 37,4% e 47% respectivamente, e o de (PERUCH, 2009) onde estudou a influência do ciclo de recozimento nas propriedades do aço SAE 5160, chegando a conclusões de que a temperatura de 700°C foi a que melhor proporcionou um processo de esferoidização em um tempo semelhante ao usado no ciclo proposto neste trabalho, diante desse comparativo literario o ciclo proposto neste trabalho se mostra bastante competitivo, porém entende-se que é possivel melhorar, a partir da influência dos elementos de liga, pode-se desenvolver um ciclo em menor tempo ainda, assim como fatores de temperatura e tempo.

Também foi realizado analise microestrutural dos corpos de prova, a fim de comparar a microestrutura original (CP1), a qual pode ser vista na fig. 6 e as microestrura após o ciclo (CP2 e CP3), fig. 7 e 8, respectivamente. Foi feita análise metalográfica em cada um dos corpos de prova. É possível ver a clara diferença entre as duas microestruturas e perceber a cementita em formatos esféricos após o ciclo.

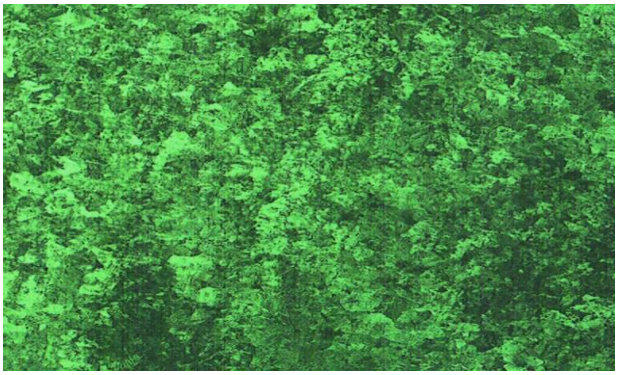


**Figura 6-** Microestrutura do aço como recebido (CP1), ampliada 400x

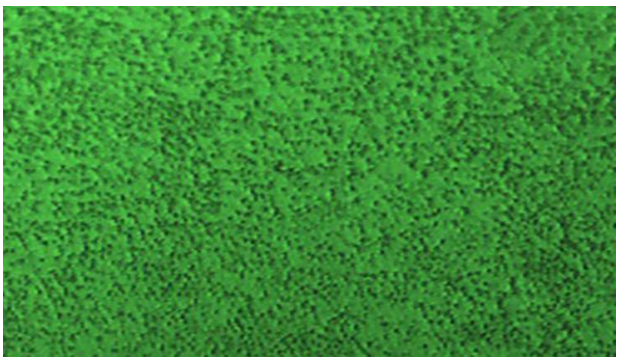


**Figura 7-** Microestrutura após o ciclo proposto (CP2), ampliada 400x

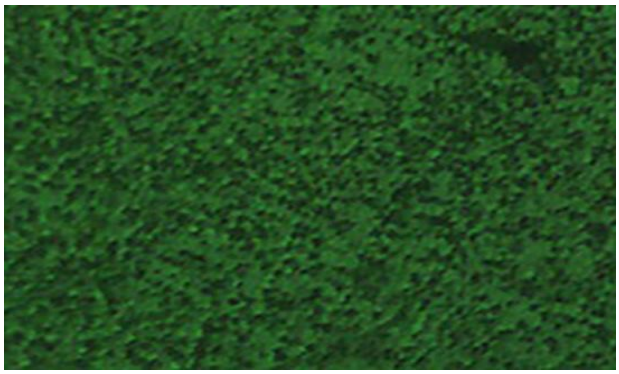


**Figura 8-** Microestrutura após o ciclo proposto (CP3), ampliada 400x

## CONCLUSÃO

O tratamentos térmicos aplicados contribuiram para a mudança de microestrutura do aço SAE 5160, o ciclo mostrou-se bastante eficaz para o aço em questão, houve diminuição da dureza do CP2 e CP3 tratados termicamente no mesmo ciclo, mostrando que a estrutura de esferas em matriz ferrítica tornou-o mais ductil, foi possível observar uma redução de dureza na casa de 48% em um tempo de tratamento significativamente menor aos tradicionais.

## REFERÊNCIAS

PERUCH, F. A influência do ciclo de recozimento para esferoidização nas propriedades mecânicas do aço ABNT 5160. 2009, 28p. Dissertação ( Mestrado em engenharia de Minas, Metalúrgica e de materiais) – Escola de Engenharia, UFRGS, Rio Grande do Sul.

T. STROHAECKER.; F. KIECKOW.; M. TIER.; V. FRAINER.; et al. “Princípios de tratamentos térmicos em aços e ferros e ferros fundidos’’.

CHIAVERINI, V.; Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos – 7. ed.ampliada e revisada. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008. 599p

THELNING, K. E.; Steels And Its Heat Treatment, 2aed., Butherworths, Mackays of Great Britain: Chatham Ltd., 1984.

ROSSI, H. E.; COTINHO, C. A. B.; Influência das Variáveis de Processamento na Esferoidização do Aço SAE 52100. METALURGIA-ABM, v. 39, n. 310, Set.1983.

OHASHI, Y.; WOLFENSTEIN, J.; KOCH, R.; SHERBY, O.D.; Fracture Behavior os a Laminated Steel-Brass Composite in Bend Tests. Materials Science and Engeneering, A151,1992. p. 37 – 44.

DINI, GEORGE HENRIQUE; Estudo de diferentes ciclos de tratamento térmico de esferoidização para aços da família AISI 51XX.Guaratinguetá, 2017, f. 79 – 83.

**DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE**

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

**ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO**

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(X) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

# FABRICAÇÃO E ANÁLISE DE ÓLEOS DE CORTE COM BASES PARAFÍNICAS E NAFTÊNICAS EM SUBSTITUIÇÃO AO ÓLEO COMERCIAL

**Nome do(s) autor(es)**
Gustavo Santos de Toledo
Igor Veneroso do Nascimento
Lucas Santos Moura
Pedro Henrique de Q. Rocha
Thaynara Késsia Espíndola Pereira
Instituição: Universidade de Brasília – Faculdade do Gama
Endereço Completo da Instituição: St. Leste Projeção A - Gama Leste, Brasília - DF, 72444-240
E-mail para correspondência: thaynara@aluno.unb.br / thaynarakep@gmail.com

**RESUMO:** O presente artigo relata o processo de fabricação de dois tipos diferentes de óleo para serem utilizados como fluído de corte em substituição ao óleo comercializado atualmente, afim de obtenção de melhor rendimento sob diversos parâmetros. Para tanto, foram fabricados um óleo com base parafínica e um óleo com base naftenica, ambos foram submetidos a testes de caracterização de amostra, tais como análise de infravermelho e medição de densidade. Assim sendo, os óleos foram então testados na usinagem de uma peça de aço automotivo SAE 8640, onde por meio de teste de rugosidade foi comprovado um rendimento superior do fluído feito com a base parafínica, apresentando rendimento 50% maior comparado ao fluído de base naftênica, por fim, foi atestada a necessidade da utilização de um fluído de corte, uma vez que também foram feitos testes a seco que apresentaram resultados inferiores (maior rugosidade) que quando comparados aos resultados obtidos para os óleos de base naftênica, de base parafínica e o óleo comercial.

**Palavras-Chave:** Fluído de Corte, Óleo de Corte, Testes de Rugosidade.

***ABSTRACT:*** *The present article reports the process of manufacturing of two different types of oil to be used as cutting fluid in substitution of the oil currently commercialized in order to obtain a better yield under various parameters. For that, a paraffinic base oil and a naphthenic based oil were manufactured, both of which were subjected to sample characterization tests, such as infrared analysis and density measurement. Thus, the oils were then tested in the machining of a SAE 8640 automotive steel part, where a superior performance of the fluid made with the paraffinic base was demonstrated by a rugosity test, presenting a 50% higher yield compared to the naphthenic base fluid. Finally, it was verified the necessity of the use of a cutting fluid, since dry tests were also done that presented inferior results (greater rugosity) than when compared to the results obtained for naphthenic base oils, paraffinic and the commercial oil.*

***Keywords:*** *Cutting Fluid, Cutting Oil, Rugosity Testing.*

## INTRODUÇÃO

Um fluído de corte nada mais é que um líquido ou gás que é aplicado entre a ferramenta e o objeto em um processo de usinagem a fim de facilitar o corte por meio de processos de lubrificação e arrefecimento. A água foi o primeiro fluído de corte utilizado. Entretanto, com o desenvolvimento da usinagem e das técnicas de produção a água passou a não atender as necessidades dos processos. Assim, foram desenvolvidos fluídos bastante complexos para atender as demandas e especificações exigidas pelos processos de fabricação. Os fluídos de corte podem ser utilizados para diversas funções, entre elas: refrigeração, lubrificação, redução do esforço e do desgaste, remoção de cavacos, proteção contra corrosão, melhor acabamento das peças e lubrificação de guias e barramentos (BIANCHI, 2004).

A necessidade de utilização desses óleos vem da grande quantidade de calor que envolve o processo de corte, este calor é oriundo da energia demandada para deformar o cavaco e do atrito que ocorre entre a ferramenta e objeto a ser cortado, a lubrificação diminui este atrito e o arrefecimento auxilia na dissipação do calor, o que culmina na redução do desgaste da peça. Uma função secundária do fluído de corte é ainda, a expulsão do cavaco da zona de corte, facilitando assim o processo, além de dependendo de seu tipo pode auxiliar na proteção da peça contra a corrosão (DINIZ *et al*, 2010).

Os fluídos de corte possuem a capacidade de absorver calor e uma boa lubrificação evitando assim o desgaste da peça, protegem as ferramentas dos processos químicos que culminam na ferrugem e corrosão. Assim, quando utilizados corretamente promovem diversos benefícios, tais como o aumento da produtividade, assim como reduzir o custo com trocas de peças ou maquinário. É importante que o fluído de corte apresente estabilidade no armazenamento após o uso, como não possui odor desagradável e não agredir a saúde dos operários, também é esperado que o fluído de corte não produza danos ao meio ambiente quando descartado (DINIZ *et al*, 2010).

As bases usadas para fabricação dos óleos derivam do petróleo parafínico que é formado por hidrocarbonetos de cadeias carbônicas retilíneas, ramificadas ou não, apresentando ligações simples entre os átomos de carbono. O petróleo parafínico apresenta até 90% de alcanos (JÚNIOR, 2010). O refino do petróleo tem com derivado a base parafínica, que é um excelente fluído lubrificante. Esses óleos são encontrados em maior abundância e, portanto, apresentam um custo menor, possuem alto índice de viscosidade , maior resistência à oxidação, são menos prejudiciais à pele e ainda menos agressivos à borracha e ao plástico (JÚNIOR, 2010).

As bases podem ainda, ser de origem base naftênica, que derivam do refinamento do petróleo cru naftênico. O uso desses óleos como bases para fluído de corte tem diminuído em função de problemas causados à saúde humana, os fluídos lubrificantes podem em alguns casos ser de baixa qualidade e escassos. (JÚNIOR, 2010)

Este trabalho tem como foco a análise de óleos naftênico e parafínico, onde os óleos utilizados serão caracterizados análise dos espectros do infravermelho e por suas respectivas densidades e a eficiência destes óleos serão avaliadas por parâmetros de comparação da rugosidade das peças usinadas.

## METODOLOGIA

### Materiais

Aditivos Ipiranga Neutro Leve e Ipiranga NH10
Bases Naftênicas e Parafínicas
Bequérs
Bastão de Vidro Aquecedor (Agitador Magnético)
Densímetro
Equipamento FTIR Thermo Nicoleti iS – 10
Aço automotivo SAE 8640
Rugosímetro portátil digital Mitutoyo modelo SJ 210

### Procedimento experimental

- Ambos os óleos foram fabricados em remessas de 500 mL e em ambos foi seguida a proporção de 9 partes de base para 1 parte de aditivo, que é descrita na literatura;
- Foi adicionado no béquer 450 mL de base e 50 mL de aditivo, o mesmo foi colocado no aquecedor e com o auxílio do bastão de vidro foi agitado durante 10 minutos a 70º C para garantir a uniformidade do óleo, em seguida os mesmos foram passados para frascos plásticos armazenadores;
- O procedimento foi repetido tanto para a fabricação do óleo naftênico quanto do parafínico;
- Depois de obtidos os óleos, os mesmos foram misturados na proporção de 1:1 com água para formar emulsão;
- Com o auxílio de um densímetro foram medidas a densidade dos oléos de corte fabricados e de suas respectivas bases e aditivos;
- Com o equipamento FTIR Thermo Nicoleti iS – 10 e uma tabela de regiões de absorção foram observados e analisados os picos característicos da região de infravermelho para caracterizar cada um dos óleos e suas respectivas bases e aditivos;
- Utilizando o aço automotivo SAE 8640 foram realizadas usinagens em condições de ausência de fluído de corte (a seco) e com o auxílio de um rugosímetro foi medida a rugosidade da peça após a usinagem;
- Com o mesmo aço foram utilizados o óleo comercial, o óleo parafínico e o óleo naftênico na condição de abundância de fluído de corte, aplicando uma vazão de 45 l/h e com o auxílio de um rugosimetro foram medidas as respectivas rugosidades que as peças em aço apresentavam após a usinagem utilizando cada um dos diferentes óleos;
- Com o aço SAE 8640 foram utilizados o óleo comercial, o óleo parafínico e o óleo naftênico e com aplicação de mínima quantidade de lubrificante (MQL), ou seja, os óleos foram injetados na máquina a uma vazão de 250 ml/h e por uma corrente de ar comprimido o fluído foi direcionado para zona de corte na forma de vapor então, com o auxílio de um rugosimetro foram medidas as respectivas rugosidades que as peças em aço apresentavam após a usinagem utilizando cada um dos diferentes óleos;

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para as medições da densidade dos óleos de corte e suas respectivas bases e aditivos são apresentados a seguir na Tab. 1.

**Tabela 1.** Densidade dos óleos naftênico e parafínico com seus respectivos aditivos e bases

| Amostra (fluído) | Densidade (g/cm³) | Temperatura (ºC) |
|---|---|---|
| Água ($H_2O$) | 0,996 | 24,9 |
| MQL (Naftênico) | 0,889 | 25,5 |
| RLAM Neutro | 0,869 | 25,9 |
| Óleo comercial | 1,085 | 26,3 |
| Naftênico | 0,904 | 26,6 |
| Naftênico (aditivo) | 1,004 | 27,9 |
| Parafínico | 1,004 | 28,7 |
| Óleo promof | 0,879 | 29,5 |

Os valores apresentados possuem um erro intrumental na ordem de grandeza de $10^{-3}$ oriundo do densímetro utilizado. Observou-se que a densidade do óleo parafínico é superior a do naftênico, ou seja, a viscosidade do óleo parafínico é menor e a do óleo naftênico maior, como sabe-se e será comentado em outras partes deste artigo a máquina utilizada para testes funciona a alta usinagem, segundo o referencial para altas usinagens temos altas velocidades de corte e isto demanda um fluído em emulsão (como foi o fabricado), além de que a característica mais determinante que o fluído deve possuir deve ser a refrigeração, assim sendo o fluído que melhor se comportará como refrigerante será o de menor viscosidade, portanto, o fluído parafínico.

Os próximos resultados obtidos foram a análise do espectro infravermelho das bases e aditivos utilizados, isto é necessário para caracterizar o óleo fabricado, uma vez que tanto para fins comerciais quanto acadêmicos é necessário saber a composição exatas de todas as amostras afim de melhor explorar suas características, os resultados dos espectros infravermelhos e suas respectivas análises por grupos funcionais são apresentados a seguir nas Figs. 1, 2, 3 e 4 e nas Tabs. 2, 3, 4 e 5.

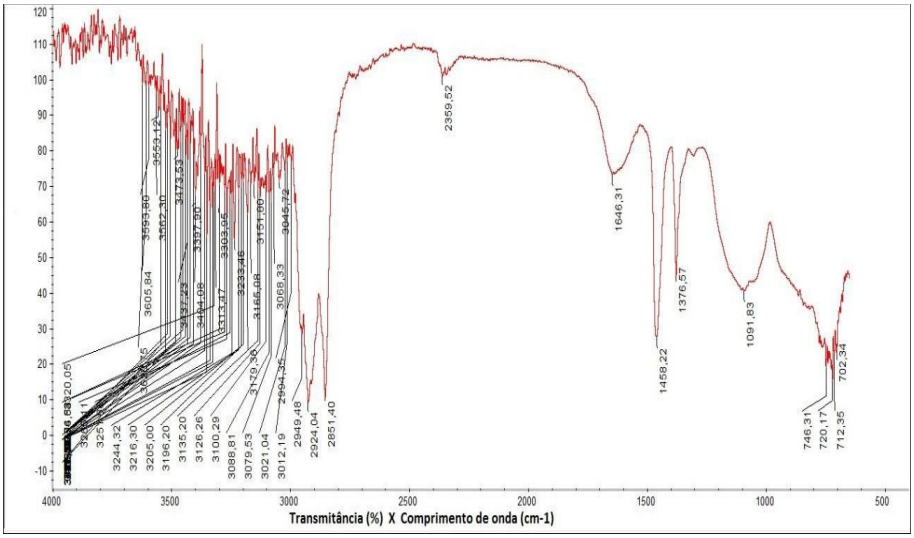



**Figura 1.** Espectro IV base parafínica

**Tabela 2.** Espectro IV base parafínica

| Tipo de ligação | Região de absorção ($cm^{-1}$) | Intensidade |
|---|---|---|
| C – H alifáticos | 2949, 2924, 2851 | Fino e comprido |
| C = O | 2359,52 | Curto e Médio |
| C = C | 1646 | Curto e grosso |
| CH2 | 1458 | Fino e comprido |
| CH3 | 1376 | Fino e curto |
| C – O (de éteres) | 1091 | Grosso e comprido |

O pico em 2359,52 é provavelmente um contaminante oriundo de uma falha do operador, que durante o teste deve ter respirado muito próximo ao equipamento (ALPERT *et al*, 1970).

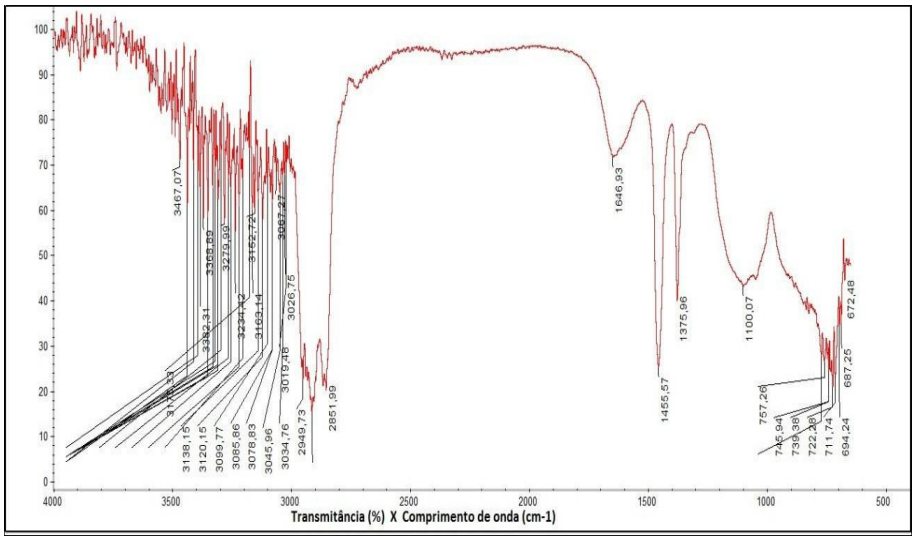



**Figura 2.** Espectro IV base naftênica

**Tabela 3.** Espectro IV base naftênica

| Tipo de ligação | Região de absorção ($cm^{-1}$) | Intensidade |
|---|---|---|
| C – H alifáticos | 2949, 2900, 2851 | Fino e comprido |
| C = C | 1646 | Curto e grosso |
| CH2 | 1455 | Fino e comprido |
| CH3 | 1375 | Fino e curto |
| C – O (de éteres) | 1100 | Grosso e comprido |

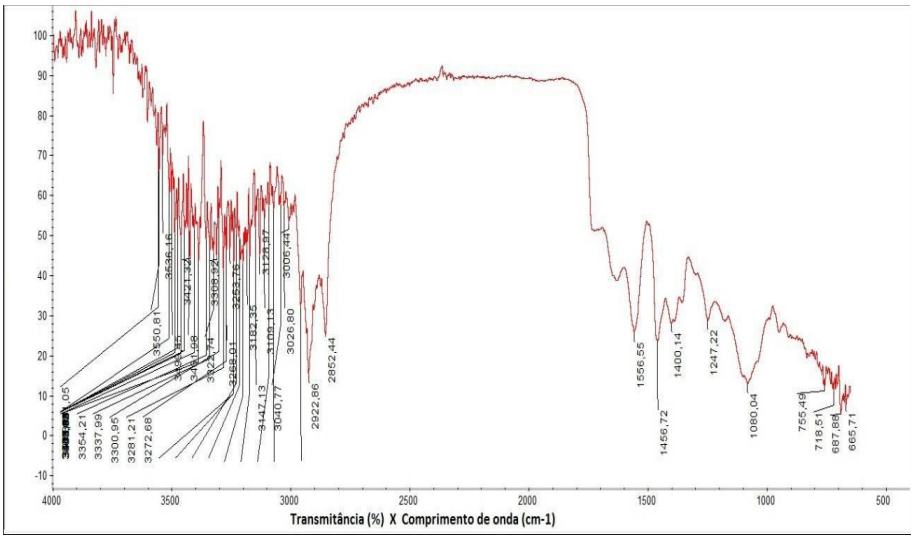



**Figura 3.** Espectro IV aditivo parafínico

**Tabela 4.** Espectro IV aditivo parafínico

| Tipo de ligação | Região de absorção ($cm^{-1}$ ) | Intensidade |
|---|---|---|
| C – H alifáticos | 2950, 2922, 2852 | Fino e comprido |
| NH2 | 1556 | Fino e curto |
| N - H | 1456 | Fino e curto |
| C – O (de ésteres) | 1247, 1080 | Grosso e curto |

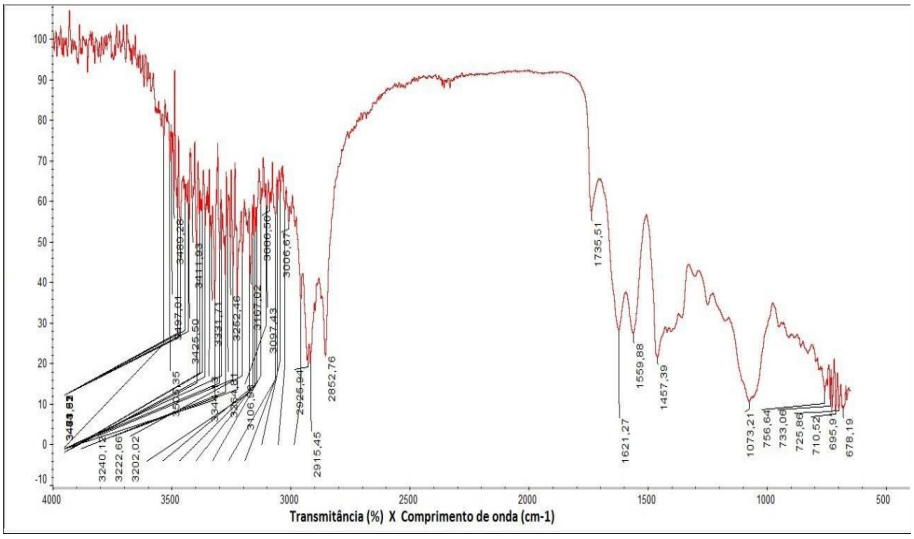



**Figura 4.** Espectro IV aditivo naftênico

**Tabela 5.** Espectro IV aditivo naftênico

| Tipo de ligação | Região de absorção ($cm^{-1}$) | Intensidade |
|---|---|---|
| C – H alifáticos | 2925, 2915, 2852 | Fino e comprido |
| C = O (de ácidos carboxílicos) | 1735 | Fino e curto |
| NH2 | 1559 | Fino e curto |
| CH2 | 1457 | Fino e curto |
| C – O (de ésteres) | 1073 | Grosso e curto |

Após a identificação dos grupos orgânicos presentes nos constituintes dos óleos de corte através da análise IV, feitas com base no procedimento e tabelas de grupos funcionais presentes em (ALPERT *et al*, 1970) e da densidade de cada um dos óleos e seus constituintes podemos dizer que as amostras estão plenamente caracterizadas e podemos então utilzá-las no processo de usinagem para testar sua funcionalidade e eficiência.

Como objetiva-se identificar o fluído de corte mais eficaz em relação a rugosidade do aço automotivo SAE 8640 foram feitas diversas medições, a título de contextualização, foram realizados testes de usinagem na ausência de fluído de corte (a seco), com aplicação em abundância de fluído de corte – vazão de 45 l/h – e com aplicação de mínima quantidade de lubrificante (MQL) com fluídos naftênico e parafínico – ambos de 250 ml/h. Contudo, serão analisados somente os testes com os fluídos naftênico e parafínico, uma vez que o escopo do artigo é utilizar um fluído de corte de fabricação própria (eliminando a análise do corte a seco) e visa menos impactos ambientais, danos a saúde do operador e desperdícios (eliminando a análise do fluído em abundância), porém por parâmetros didáticos reafirmamos que tanto no corte a seco como na utilização do fluído em abundância as rugosidades foram superiores se comparadas com a utilização do MQL.

Os ensaios foram realizados nas mesmas condições de usinagem, determinadas pelo experimentador, para a correta avaliação e comparação das medidas de rugosidade (Ra, Rq e Rz) do corpo de prova conforme o fluído de corte utilizado.

As condições de usinagem foram:

1. Velocidade corte da ferramenta: vc = 240 m/min com rotação da ferramenta de 1530 rpm;
2. Velocidade de avanço da ferramenta: vf = 612 mm/min, isto é, a velocidade de deslocamento linear da ferramenta durante o corte do metal;
3. A profundidade de corte: ap = 1,0 mm, ou seja, o quanto a ferramenta entra na peça no eixo vertical da máquina, eixo Z, na retirada de material;
4. A penetração de trabalho da ferramenta: ae = 50 mm, o quanto a ferramenta entra na peça no eixo Y da máquina.

As rugosidades foram medidas através de um rugosímetro portátil digital Mitutoyo modelo SJ 210 em três pontos diametralmente equidistantes e posteriormente calculados os valores médios e desvios padrões. Os resultados obtidos são mostrados nas tabelas a seguir nas Tabs. 6 e 7.

**Tabela 6.** Rugosidade fluído de corte naftênico

| MQL | 1 | 2 | 3 | Média | Desvio Padrão |
|---|---|---|---|---|---|
| Ra (µm) | 0,492 | 0,378 | 0,641 | 0,504 | 0,132 |
| Rq (µm) | 0,568 | 0,448 | 0,704 | 0,573 | 0,128 |
| Rz (µm) | 2,252 | 2,071 | 2,696 | 2,340 | 0,322 |

**Tabela 7.** Rugosidade fluído de corte parafínico

| MQL | 1 | 2 | 3 | Média | Desvio Padrão |
|---|---|---|---|---|---|
| Ra (µm) | 0,269 | 0,181 | 0,153 | 0,201 | 0,061 |
| Rq (µm) | 0,309 | 0,222 | 0,186 | 0,239 | 0,063 |
| Rz (µm | 1,213 | 1,045 | 0,916 | 1,058 | 0,149 |

Onde:
Ra - Rugosidade média da superfície usinada;
Rq - Rugosidade quadrática média da superfície usinada e
Rz - Rugosidade máxima da superfície usinada.

Foi então elaborado um gráfico comparativo entre os testes com fluído de corte naftênico e parafínico sob o âmbito da rugosidade, o mesmo é apresentado a seguir na Fig. 5.

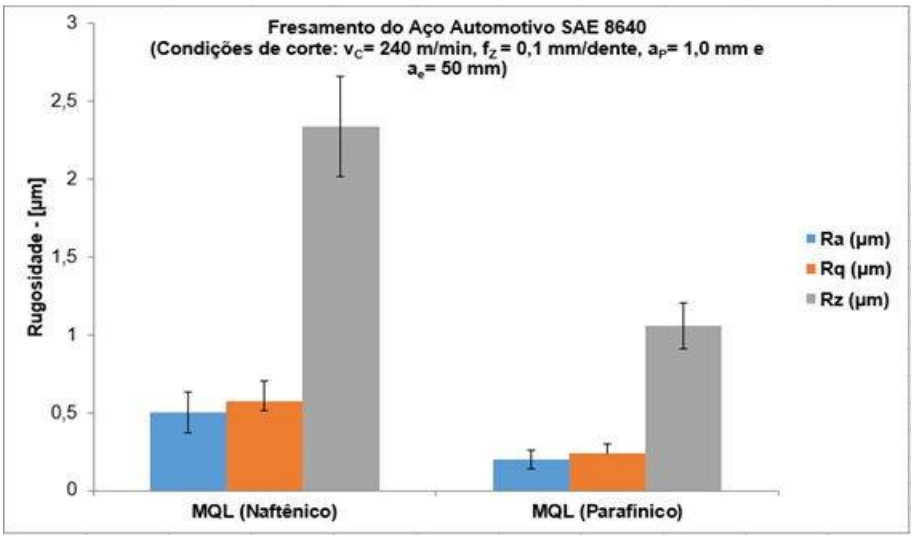



**Figura 5.** Comparação darugosidade dos fluídos de corte naftênico e parafínico

A partir da análise dos gráficos, vemos que o fluído de corte Naftênico imprimiu o dobro de rusodidade quando comparado ao fluído de Corte Parafínico (MQL), que apresentou melhores resultados se comparado ao Naftênico (MQL), com uma diferença superior a 50%, seguindo os mesmos parâmetros, no que diz respeito a rugosidade (ou imperfeições indesejadas) do material após a usinagem.

## CONCLUSÃO

O estudo das análises instrumentais se mostrou de extrema importância no decorrer dos últimos anos, pois a caracterização de materiais tornou-se uma alternativa das empresas para avaliar as condições dos lubrificantes de suas máquinas e equipamentos. A análise da espectroscopia FTIR e os testes de rugosidade foram de suma importância, pois através dos mesmos foi possível identificar e caracterizar as amostras, assim como diferenciá-las de possíveis produtos similares e verificar a existência de contaminantes nas mesmas. Isto é necessário para qualquer aplicação futura que os óleos venham a ter, pois o operador saberá exatamente com qual produto está lidando e o projetista pode determinar claramente as aplicações.

O teste de densidade também foi importante para determinar quais seriam as condições de corte mais adequadas para cada um dos fluídos e analogamente identificar o melhor fluído para as condições pré-determinas de operação dos elementos envolvidos. O teste de densidade já indicava que o fluído parafínico seria mais apropriado para a máquina e a peça utilizadas para este estudo, pois a mesma funciona a altas velocidades de corte. Assim sendo, além desta indicação o teste de rugosidade confirmou o pressuposto e ainda mensurou quão melhor seria esse fluído, obtendo-se a resposta que a utilização do fluído parafínico é 50% melhor para o acabamento da peça. Assim sendo, pela rugosidade, pela densidade, pelo parâmetro de menos danos a saúde do operador, além do menor custo de fabricação do óleo indica-se a utilização do óleo parafínico como fluído de corte em máquinas e peças idênticas ou similares as que foram aqui apresentadas.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos imensamente a nossa orientadora professora dr. Pilar Delgado pela sugestão do tema de pesquisa, pelas orientações e diretrizes acerca do mesmo, agradecemos ao professor Randher Viana e seus orientandos por utilizar os óleos que fabricamos em seus testes de usinagem, possibilitando a coleta dos dados de rugosidade, que foram essenciais para a discussão e conclusão do presente artigo.

## REFERÊNCIAS

Alpert, N. L.; Keiser, W. E.; Szymanski, H.,1970 - "Theory and Practice of Infrared Spectroscopy", Ed. Springer US, 1ª Edição, New York, USA, 381 p.
Bianchi, E.C., 2004 - "Aplicação e Utilização dos Fluidos de Corte", Ed. Artlibert, São Paulo, Brazil, pp. 1-12.
Diniz, A.E.; Marcondes F.C.; Coppini N.L., 2010, " Tecnologia da Usinagem dos Materiais", Ed. Artlibert, 4ª Edição, São Paulo, Brazil, pp. 147-171.
Júnior, G.,2010 "Processamento Primário de Petróleo / Noções de Processo de Refino", Universidade Fderal do Sergipe, Aracaju.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os 05 autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(X) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

**XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 27 à 31 de agosto de 2018 – Brasília, DF**

# IDENTIFICAÇÃO DOS MATERIAIS DE UM PISTÃO DE MOTOR A COMBUSTÃO

**Gabriel Coelho da Silva, João Paulo Sanches Guimarães, Mateus Felipe Massa Pereira e Rafael Paiva Lôbo**
Universidade de Brasília – Campus Gama
St. Leste Projeção A - Gama Leste, Brasília - DF, 72444-240
csilvagabriel@hotmail.com, joaosanches.jpsg@gmail.com, mateusmassa7@gmail.com, rafaelp.lobo@hotmail.com

**RESUMO:** O artigo consiste da experimentação de técnicas de identificação dos materiais. Como base, fora utilizado um cabeçote de um pistão de um motor a combustão. Após análise teórica para uma identificação inicial dos possíveis materiais dos componentes, pesquisa essa utilizada como fundação do artigo, foram realizados os ensaios de densidade, dureza Vickers e metalografia. Com os resultados em mão, eles foram comparados com o encontrado na literatura. Pode se averiguar que as características físicas e a estrutura cristalina dos materiais estavam de acordo com a bibliografia, o que confirma o uso correto dos ensaios e reafirma a importância e utilidade dos testes laboratoriais para a análise de materiais.

**Palavras-Chave:** Pistão, Identificação de materiais.

***ABSTRACT:*** *The paper consists of materials identification techniques experimentation. As basis, was utilized a piston head of a combustion motor. After theoretical analysis for an initial identification of the possible components materials, research used as the paper foundation, were made the density test, Vickers hardness and metallography. With the results in hand, they were compared to the literature. It can be found out that the physical characteristics and the crystalline structure of the materials agreed with the bibliography, which confirms the correct use of the tests and reinsures the importance and utility of the laboratorial tests for material analysis.*

***Keywords:*** *Piston, Materials identification.*

## INTRODUÇÃO

Para esse estudo, foi recebido um cabeçote de um pistão de um motor a combustão, e nele estava presente quatro peças: o êmbolo, o anel de óleo, o anel de compressão e o pino do pistão.

O êmbolo é a peça do pistão que possui as funções de transferir as forças da explosão do gás de combustão para a biela, guiar a biela através do cilindro, suportar as forças laterais, selar a câmara de combustão, dissipar o calor absorvido pelo pistão na combustão e configurar a geometria inferior da câmara de combustão para favorecer a mistura e a queima (Barros, 2003). Observando isso, podemos aferir que ele deve ser composto de um material que possua um baixo coeficiente de expansão térmica (Barros, 2003), de forma que o mesmo não expanda, mesmo após o aquecimento que ocorrerá devido ao calor produzido durante o processo de combustão, vindo a atrapalhar o deslize do pistão. Em concordância com a característica desejada, os êmbolos atuais são compostos de uma liga de alumínio-silício (Al-Si), que pode ser eutética (11% a 13% de Si), semieutética (mesma porcentagem de silício, juntamente com cobre e níquel) ou supereutética (15% a 25% de Si) (Barros, 2003). No entanto, motores antigos eram constituídos de ferro fundido cinzento.

O anel de óleo, ou anel de controle de lubrificação, juntamente com anel de pressão (mola), tem a finalidade de remover o lubrificante do cilindro no movimento de descida do pistão, o anel fazendo a raspagem e a mola assegurando a pressão do anel contra o cilindro. Esse óleo removido pelo anel percorre dois caminhos até chegar ao cárter: os canais internos e as laterais da saia do pistão (Portal Lubes, 2017). Algumas características importantes para essa peça, como a condutividade térmica, expansão térmica e resistência à corrosão, influenciam na escolha do material (Federal Morgul, 2008). Tendo isso em vista, é possível observar que essas peças são compostas, usualmente, de ferro fundido cinza puro (Federal Morgul, 2008).

O anel de compressão tem como requisito básico assegurar a compressão da câmara de combustão, permitindo assim o máximo contato com o cilindro e a melhor vedação (Portal Lubes, 2017). As características desejadas são semelhantes às do anel de óleo, isto é, uma resistência à corrosão e à temperatura (Portal Lubes, 2017). Em concordância com essas características, o material do anel de compressão é o ferro fundido nodular temperado (Barros, 2003).

O pino do pistão tem como objetivo conectar o êmbolo a biela, resistir às cargas cíclicas do movimento alternativo do pistão e aceitar uma lubrificação desfavorável (Barros, 2003). Para cumprir tal papel, é necessário que o

material haja boas propriedades mecânicas, juntamente com boas propriedades térmicas. Dessa forma, o material mais comum utilizado é o aço ferramenta do tipo aço L (17Cr3) ou M (16MnCr5) (Barros, 2003).

## METODOLOGIA

Para uma melhor análise das peças, as mesmas foram cortadas em tamanhos menores para uma melhor realização dos experimentos. No caso do êmbolo, foi necessário também revestir a peça com resina, devido ao seu tamanho e formato circular, que impossibilitava o ensaio de dureza, já que a peça não podia ser lixada adequadamente, como também não tinha uma boa superfície de apoio, o que influenciaria no resultado da dureza.

**Peças Analisadas**

**Figura 1.** Pedaço do êmbolo retirado para análise, revestido em resina

**Figura 2.** Pedaço do anel de óleo retirado para análise

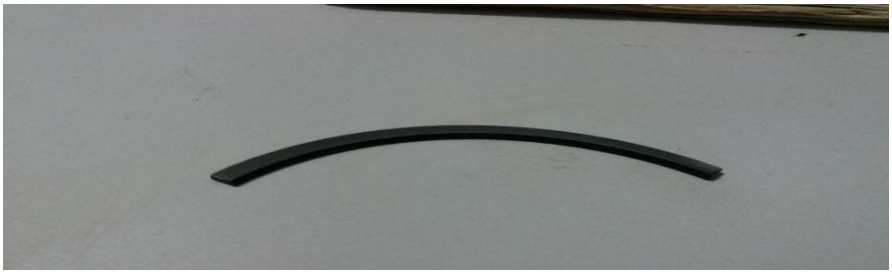


**Figura 3.** Pedaço do anel de óleo retirado para análise

**Figura 4.** Pedaço do pino do pistão retirado para análise

**Materiais Utilizados**

- Politriz Lixadeira Motorizada Dupla Polipan-2D
- Cortadeira metalografica Pancut 100
- Microscópio Metalográfico Pantec
- Microdurômetro FM-700-Future/Tech
- Microscópio metalográfico Pantec com lentes de 50x, 100x, 200x e 500x;
- Lixas com granulometria de: 80, 100, 220, 320, 400, 600, 1000 e 2500;
- Pano de veludo;
- Óxido de alumínio;

**Densidade**

Para o cálculo da densidade, a massa foi obtida através de uma balança digital, com erro na faixa de ± 0.0001g e o volume foi obtido através de medições das dimensões das peças, realizadas com um paquímetro analógico com erro na faixa de ±0.05 mm.

**Dureza Vickers**

Em seguida, foi medida a dureza das peças. Para melhor acurácia nos resultados, as amostras foram lixadas utilizando-se diversas granulações de lixa, seguindo a ordem de granulação: 80, 100, 220, 320, 400, 600, 1000 e 2500. Devido à espessura reduzida das peças, foi realizada apenas a microdureza, cujos resultados foram obtidos na escala Vickers.

**Metalografia**

Após a obtenção dos valores de dureza das peças, foi realizado o procedimento de metalografia, a fim de obter ainda mais indicações sobre os materiais analisados. Para preparar as peças para este procedimento, foi realizado novamente o lixamento das peças anteriormente preparadas para o ensaio de microdureza, porém, desta vez, a granulação das lixas foi: 600 e 1200, seguido de polimento com óxido de alumínio, com o propósito de conferir uma superfície a mais lisa e "limpa" possível para ser possível a análise microscópica de sua estrutura.

Além disso, é proposto um ataque ácido na superfície polida, com a finalidade de diferenciar microestruturas que compõem a peça, devido aos diferentes níveis de oxidação sofrido por diferentes composições. No entanto, não foi possível o uso do ácido, visto que o fornecimento estava comprometido por questões administrativas. Com isso, obtivemos apenas as imagens das peças sem o ataque químico, o que acabou prejudicando a identificação das microestruturas na análise das fotos do microscópio. Para documentação dos resultados, foi utilizada uma câmera digital para captura das imagens.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Comparando os valores encontrados de densidade com os valores teóricos dos materiais que, supostamente, compõem as peças, temos:

**Tabela 1.** Densidade encontrada vs. densidade teórica por peça

| Peça | Material teórico | Densidade encontrada (g/cm³) | Densidade teórica (g/cm³) |
|---|---|---|---|
| Anel de compressão | Ferro fundido nodular temperado | 6,80 | 7,08 |
| Anel de óleo | Ferro fundido cinza puro | 3,25 | 7,15 |
| Êmbolo | Liga de Al-Si | 2,60 | 2,65 |
| Pino do pistão | Aço ferramenta | 7,75 | 7,81 |

Os valores das densidades do êmbolo e do pino do pistão foram bem semelhantes aos valores teóricos dados por (ASM International, 2004) e (Azom, 2012), com uma variação percentual de cerca de 1% e 2%, respectivamente. No entanto, as densidades do anel de compressão e do anel de óleo apresentaram discrepâncias de 4% e 56%, respectivamente, dadas por (Mat Web, 2018a) e (Mat Web, 2018b). O que justifica essa diferença mais acentuada é a imprecisão de do cálculo do volume, por se tratarem de segmentos de um círculo e o volume depender muito do ângulo que a peça representa em uma circunferência, dado esse não adquirido com precisão pelos experimentadores. Sobre a imensa discrepância do anel de óleo há outra variável, o fato da peça ser vazada e não totalmente maciça, ao contrário do que o cálculo do seu volume inferiu.

Os valores obtidos no ensaio de dureza foram convertidos da escala Vickers (HV) para a escala Brinell (HB) com auxílio de tabelas de conversão disponíveis online, pois os valores de dureza são comumente dados em escala Brinell na literatura. Dessa forma, tem-se que:

**Tabela 2.** Dureza encontrada vs. densidade teórica por peça

| Peça | Material teórico | Dureza encontrada (HB) | Dureza teórica (HB) |
|---|---|---|---|
| Anel de compressão | Ferro fundido nodular temperado | 360 | 270 – 335 |
| Anel de óleo | Ferro fundido cinza puro | 277 | 280 |
| Êmbolo | Liga de Al-Si | 111 | 105 |
| Pino do pistão | Aço ferramenta | 415 | 388 – 430 |

Observando a Tab. 2, podemos ver que a dureza do anel de compressão é superior ao valor teórico, algo em torno de 7% (Euroaktion, 2018). Para o êmbolo, foi encontrada uma diferença de 6%, tendo em vista que a parte analisada foi o corpo do mesmo (skirt) (Chua *et al.*, 2006). Para o anel de óleo (Make it from, 2018), foi encontrada uma diferença de 1%. Tal diferença pode ser originada da conversão de escalas de dureza, juntamente com a aplicação de um ensaio não adequado para o tipo de material, pois o ensaio mais adequado é o ensaio Brinnel, não o Vickers. Já o pino de pistão encontra-se dentro da faixa de dureza esperada (Alro, 2018).

Nas figuras abaixo, podemos verificar a metalografia do êmbolo do pistão obtida experimentalmente e, em seguida, uma imagem comparativa de um êmbolo de pistão composto de uma liga de Al-Si, que, à primeira vista, aparenta ser um material totalmente diferente. Porém, deve-se levar em consideração que uma não foi atacada com ácido, ao contrário da outra, que foi atacada com ácido hidrofluorídrico 3%, o que propicia a exposição mais detalhada da microestrutura do material. Porém, pode-se notar semelhanças, como os aglomerados que refletem mais uniformemente a luz, aparentando serem mais claros, o que se acredita serem aglomerados de silício, o que justifica também, em partes, a discrepância na dureza encontrada, pois a maior concentração de silício proporciona maior dureza ao material, bem como maiores aglomerações, como as observadas na segunda imagem seguinte.

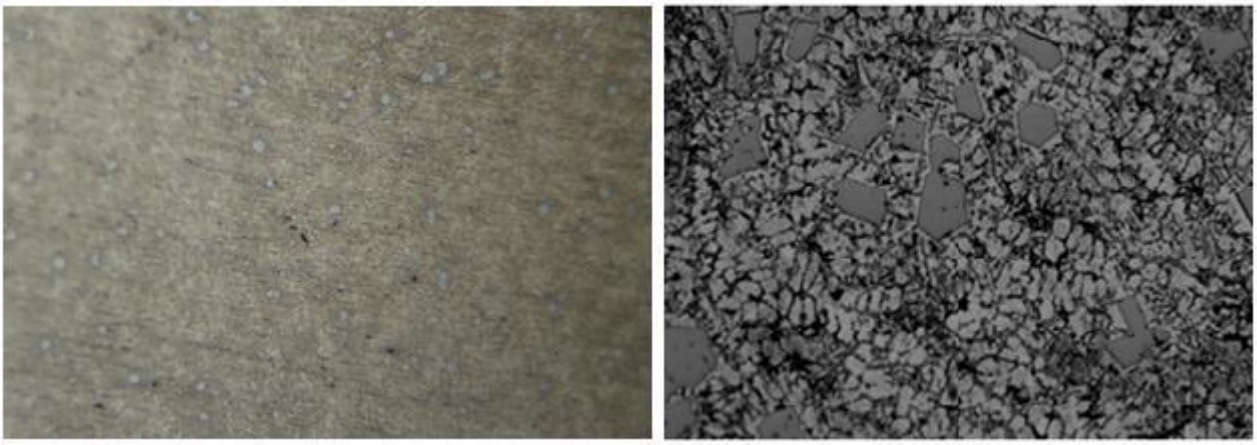


**Figura 5.** Metalografia do êmbolo: à esquerda, sem ataque químico, lente de aumento de 100x. Á direita, com ataque químico retirado da literatura, lente de aumento de 100x (Chua *et al.*, 2006)

Buscando comparações para o material do anel de óleo, direcionando a pesquisa para o ferro fundido cinzento, chegou-se ao resultado esperado. A metalografia do metal se assemelha com a bibliografia encontrada, exibida após a captura obtida em laboratório. Acredita-se fortemente que o material que constitui esta peça seja o ferro fundido cinza, devido à coerência entre os ensaios realizados.

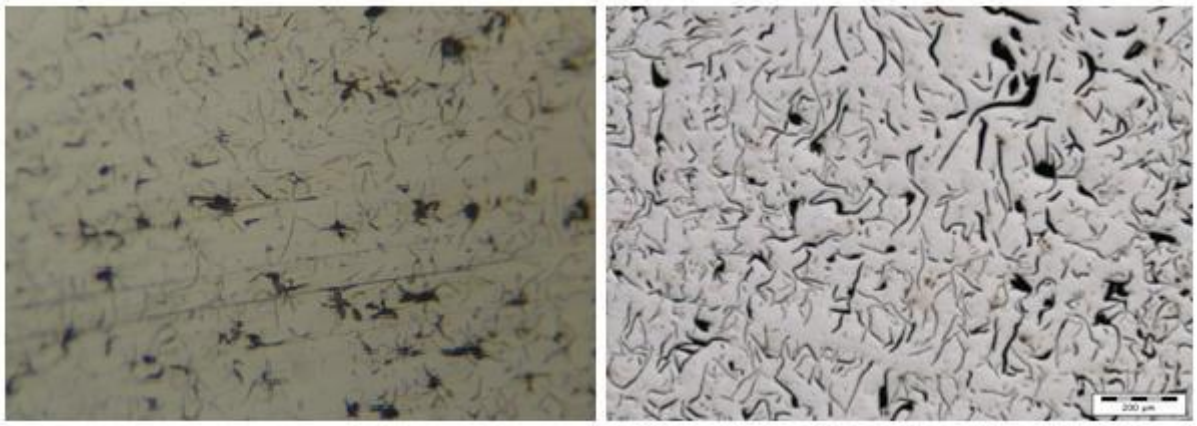


**Figura 6.** Metalografia do anel de óleo: à esquerda, sem ataque químico, lente de aumento de 200x. À direita, com ataque químico, lente de aumento de 200x (Pereira *et al*, 2014)

A figura seguinte faz referência à metalografia do anel de compressão da peça recebida. É possível notar em sua estrutura, nódulos esféricos. A partir do ensaio de microdureza, suspeita-se que o material se trata de um ferro fundido nodular, o qual contém nódulos esféricos de grafite, que podem ser observados na imagem comparativa seguinte. Nota-se concordância entre os resultados de dureza e metalografia, visto que ambos apontam o material como um ferro fundido nodular, tanto pelo valor da dureza, tanto visualmente, em comparação com a bibliografia encontrada.

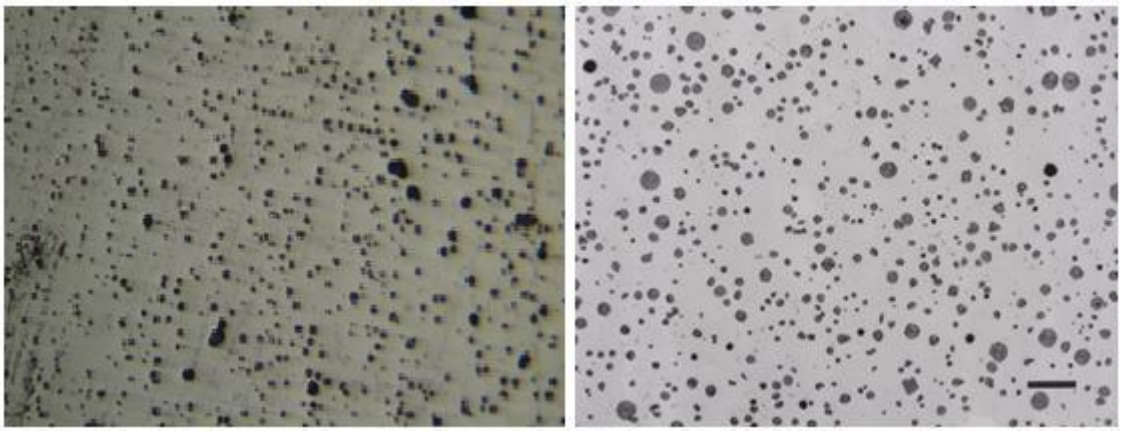


**Figura 7.** Metalografia do anel de compressão: à esquerda, sem ataque químico, lente de aumento de 100x. À direita, com ataque químico, lente de aumento de 100x (Voort, 2015)

Nas figuras abaixo podemos verificar o resultado da metalografia do pino do pistão, sendo a primeira imagem o resultado da metalografia com aumento de 500x e abaixo uma imagem comparativa da literatura mostrando como deveria ser a microestrutura de um aço ferramenta H13, material suposto do pino do pistão, com aumento de 1000x. Percebe-se grande diferença entre as imagens, contudo é necessário salientar que não foi possível realizar o ataque na peça em questão devido a falta do ácido no laboratório, dessa forma não é possível comparar as imagens, pois trata de uma imagem sem o ataque, no caso a primeira, e o resultado bibliográfico da microestrutura com o ataque.

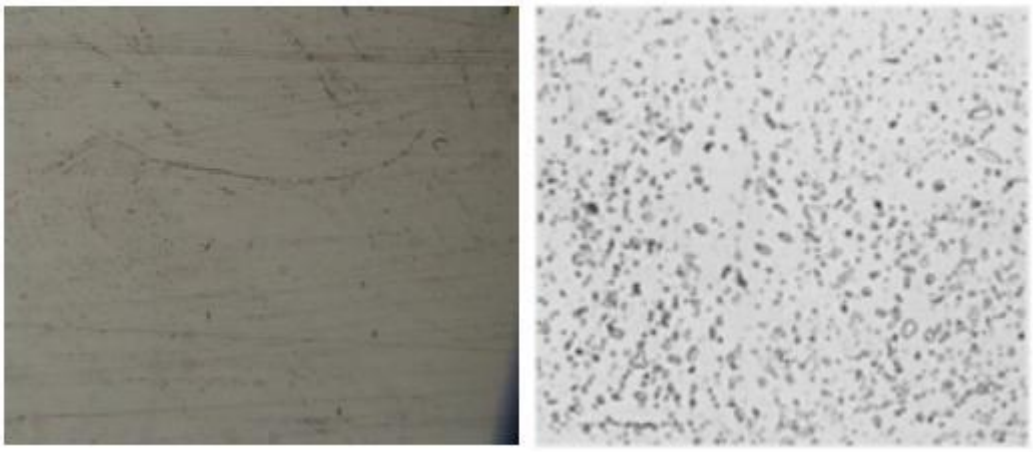


**Figura 8.** Metalografia do pino do pistão: à esquerda, sem ataque químico, lente de aumento de 500x. À direita, com ataque químico, lente de aumento de 1000x (ASM International, 2004)

## CONCLUSÃO

O êmbolo do pistão, quanto à dureza e densidade, aproximou-se bastante dos dados teóricos encontrados, sendo, portanto, a liga de alumínio e silício (Al-Si) o material mais provável para a peça. A partir da metalografia, não foi possível confirmar com exatidão as semelhanças entre a peça analisada e a bibliografia, porém é possível perceber que no êmbolo há algumas manchas prateadas, assemelhando-se bastante às manchas presentes no Al-Si quando atacado.

Após a análise realizada no anel de óleo, foi possível confirmar seu material como sendo o ferro fundido cinzento. A dureza medida experimentalmente foi muito próxima da dureza obtida na bibliografia, juntamente com a densidade. Além disso, a metalografia, mesmo sem o ataque com ácido, também favoreceu esta conclusão.

Sobre o anel de compressão, foi constatado que seu material é um ferro fundido nodular. A dureza foi próxima ao limite "máximo" para esse tipo de material, porém a metalografia se aproximou bastante da teoria, assim como a densidade medida.

Quanto à última peça analisada, o pino do pistão, não foi possível concluir qual o tipo de material da peça, pois a análise de metalografia sem o ataque ácido não levou a nenhum material quando comparado à teoria. Seria, portanto, necessário realizar o ataque com ácido para obter uma exposição melhor do material e assim compará-lo novamente com a bibliografia. Dessa forma, o que se pôde concluir sobre o pino do pistão, é que seu material possui propriedades mecânicas semelhantes ao aço ferramenta, onde a dureza obtida é comparável com a dureza do aço.

## REFERÊNCIAS

Alro, Tool Steel. Disponível em:<http://www.alro.com/datacatalog/014-toolsteel.pdf>. Acesso em 25/06/18.

ASM International, Introduction to Aluminum-Silicon Casting Alloys. Disponível em:<https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/06993G_Chapter_1.pdf>. Acesso em 25/06/18. ASM handbook: Volume 9. Materials Park, 2004.

Azom, O1 Tool Steel - Oil-Hardening Cold-Work Steel (UNS T31501). Disponível em:<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6229>. Acesso em 25/06/18.

Barros, J. E. M. "Estudo de Motores de Combustão Interna Aplicando Análise Orientada a Objetos". Belo Horizonte: Tese de Doutorado, Engenharia Mecânica, UFMG, 2003

Chua, K. A.; Sharifudin, A.; Yazief; Firnadauz, M.; Nazri, M.; Saadiah, H.; D Ayu, Shamsul, J. B.; Fitri, M. W. M.; Rizam S., Microstructure and hardness evaluation of Al-Si piston alloy. (2006). Disponível em:<https://www.researchgate.net/publication/265508143_MICROSTRUCTURE_AND_HARDNESS_EVALUATION_OF_Al-Si_PISTON_ALLOY>. Acesso em 25/06/18.

Euroaktion, Aplicações e Características dos Ferros-Fundidos. Disponível em:<http://euroaktion.com.br/Aplicações%20e%20Características%20dos%20Ferros-Fundidos.pdf>. Acesso em 25/06/18.

Federal Morgul, Piston Ring Handbook. Disponível em:<http://korihandbook.federalmogul.com/en/section_41.htm>. Acesso em 25/06/18.

Mat Web, ASTM A897 Grade 2 (150-100-07 or 150-110-7) Austempered Ductile Iron. Disponível em:<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=d56aa753fb8743529c3dfe910affe3aa>. Acesso em 25/06/18.
SAE J431 heavy duty automotive gray cast iron, SAE grade G4000d. Disponível em:<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=921108b3155e4faeb1fb5fae22b7f5e2>. Acesso em 25/06/18.
Make It From, SAE-ASTM Grade G4000d (F10012) gray Cast Iron, Disponível em:<https://www.makeitfrom.com/material-properties/SAE-ASTM-Grade-G4000d-F10012-Grey-Cast-Iron>. Acesso em 25/06/18.
Pereira jr., A. R.; Alves, B. S.; de Paula, L. V.; Ribeiro, M.; Raymundo, E. A., Comparação Morfológica entre microestruturas de ferro fundido cinzento. In: VII Simpósio de tecnologia FATEC Pindamonhangaba. Nov. 2014. Disponível em:<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgko8AD/ferro-fundido#>. Acesso em 25/06/18
Portal Lubes, Desvendando os segredos dos anéis do pistão que resultam em desempenho do motor e economia. Disponível em:< http://portallubes.com.br/2017/08/aneis-do-pistao/>. Acesso em 25/06/18.
Voort, G. V., Metallographic Procedures for Cast Iron. Disponível em :<https://vacaero.com/information-resources/metallography-with-george-vander-voort/1444-metallographic-procedures-for-cast-irons.html>. Acesso em 25/06/18.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção ‘área de conhecimento do trabalho’.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(X) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

# INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA-BICO-CONTATO-PEÇA NA ESTABILIDADE E PERFIL SOLDADO COM ER-NiCrMo-3 PELO PROCESSO MIG/MAG

**Adriane Faria de Almeida, Isabela de Magalhães Barcelos Costa, Mike Bezerra Paiva Ribeiro, Murilo Calaça Caetano, Demostenes Ferreira Filho**
Universidade Federal de Goiás
Av. Universitária, Quadra 86, 1488 – Setor Leste Universitário, Goiânia - GO, 74605-220)
adrianefaria.eng@gmail.com; isabela.costamb@gmail.com; mikebribeiro@gmail.com; murilocalaca@gmail.com; demostenesferreira@ufg.br

**RESUMO:**

O estudo da influência dos parâmetros do processo de soldagem na qualidade final da solda é essencial para a seleção adequada dos parâmetros em cada processo de soldagem. Os arames de inconel tem ganhado espaço frente aos demais materiais utilizados na indústria devido a sua excepcional combinação de propriedades desejáveis, que permitem a produção de cordões de solda de alta qualidade. Neste artigo avaliou-se a influência da DBCP (Distância de Contato Bico-Peça) na tensão e corrente de soldagem e na qualidade final do cordão de solda de uma liga de inconel em um aço carbono, realizado por um braço robótico Yaskawa. A análise foi realizada a partir da retirada de amostras soldadas variando os seguintes parâmetros de soldagem: DBCP, tensão e velocidade de alimentação. As amostras retiradas de cada combinação de parâmetros de soldagem foram avaliadas em microscópio para avaliação de altura e largura de penetração e também do aspecto geral da solda e foram avaliadas também as microdurezas Vickers das amostras. A altura e a largura de penetração da solda sofreram influência da variação de parâmetros, porém não foi possível encontrar padrões de variação destas propriedades com a variação da DBCP. A microdureza Vickers apresentou variações significativas entre as amostras, porém também não foi possível identificar padrões de variação da dureza em relação aos parâmetros variados nas amostras avaliadas.

**Palavras-Chave:** *DBCP, inconel, microdureza, MIG/MAG*.

***ABSTRACT:***.
The study of the influence of the parameters of the welding process on the final quality of the weld is essential for the proper selection of the parameters in each welding process. The inconel wires have gained space against other materials used in the industry due to its exceptional combination of desirable properties, which allow the production of high quality weld beads. In this article, the influence of DBCP on the variation of parameters used to estimate the final quality of the weld bead of an inconel alloy on a carbon steel was evaluated by a Yaskawa robotic arm. The analysis was performed from the withdrawal of welded samples varying the following welding parameters: DBCP (Contact Distance Nozzle-Piece), voltage and feed speed. Samples taken from each combination of welding parameters were evaluated under a microscope to evaluate the penetration height and width as well as the general appearance of the weld and the Vickers microhardness of the samples were also evaluated. The height and penetration width of the solder were influenced by the variation of parameters, but it was not possible to find patterns of variation of these properties with the variation of the DBCP. The Vickers microhardness showed significant variations among the samples, but it was not possible to identify hardness variation patterns in relation to the varied parameters in the samples evaluated.

***Keywords:***. *DBCP, inconel, microhardness, MIG / MAG*.

## INTRODUÇÃO

O processo de soldagem conhecido como MIG/MAG é aquele na qual a solda é feita por meio de um arco elétrico com gás de proteção. O arco funde de forma contínua o arame à medida que é alimentado à poça de fusão. O nome do processo, MIG (Metal Inert Gas)/ MAG (Metal Active Gas) faz alusão aos tipos de gases que são utilizados, no primeiro caso são utilizados gases inertes como o argônio para proteção, e no segundo caso são usados gases ativos como o dióxido de carbono para proteção do metal de solda.

Para esse processo existem diferentes tipos de transferência metálica que são determinados por fatores como: amperagem, voltagem, diâmetro do arame, comprimento do arco, gás de proteção e pelos equipamentos utilizados, são ela (Wainer, Brandi, Mello, 2004).:

T**ransferência por Curto Circuito -** a transferência do metal ocorre quando o arame entra em contato com a poça de fusão, provocando um aumento imediato da corrente, consequentemente o destacamento da gota.

**Transferência globular -** Esse tipo de transferência ocorre na zona de transição quando os níveis da amperagem e voltagem encontram-se entre o ponto de curto circuito e spray, ocasionando um alto nível de instabilidade não utilizado na maioria das aplicações.

**Transferência por spray** - a transferência do metal através do arco é feito na forma de micro gotas metálicas.

O foco do presente trabalho é a soldagem MIG/MAG onde a transferência ocorre por curto-circuito mesmo esse método de soldagem apresentando desvantagens relacionadas à instabilidade no arco, o que leva à geração de respingos, diminuindo a capacidade de produção (perda de material ou despesa para remoção).

Os parâmetros de soldagem escolhidos para avaliar e analisar os cordões de solda foram: tensão, velocidade de alimentação e distância-bico-contato-peça (DBCP).

A tensão do arco depende do comprimento do mesmo e também do tipo e diâmetro do eletrodo, do gás de proteção e do modo de transferência. Mantendo todas essas variáveis constantes, o aumento da tensão do arco provoca maior largura e menor altura do cordão, melhor molhagem, ou distribuição do metal depositado, e redução da penetração. Tensões excessivas do arco provocam porosidade, salpicos e mordeduras; por outro lado, tensões mínimas resultam em porosidade e cordões muito convexos. O aumento da DBCP implica em um aumento do comprimento do eletrodo (‘stickout”), influenciando no aquecimento do mesmo (efeito joule), o que vai diminuir a corrente necessária para fusão do arame. Além disso, um aumento na DBCP afeta o perfil do arco elétrico (Wainer, Brandi, Mello, 2004).

Para evitar problemas associados com a contaminação da poça de fusão, três gases principais são utilizados como proteção: argônio (Ar), hélio (He) e dióxido de carbono ($CO^2$). Desses gases, apenas o argônio e o hélio são gases inertes. O argônio, o hélio e o dióxido de carbono podem ser empregados puros, em combinações ou misturados com outros gases para proporcionar soldas livres de defeitos numa variedade de aplicações e processos de soldagem (Wainer, Brandi, Mello, 2004).

O arame MIG para soldagem de Liga Níquel-Cromo-Molibdênio conhecido também por "Inconel" M S NiCroMo-3 apresenta alto rendimento e excelente capacidade de fusão para atender da melhor forma possível as soldagens. Possui excelente resistência à corrosão e ao choque térmico em temperaturas variáveis entre -196°C até 1.200ºC. Seu depósito de arco macio e de boa fluidez e penetração, estável e uniforme, totalmente Austenítico, produz cordões com baixo índice de respingos, poros, fissuras, trincas e mordeduras. Apresenta excelente resistência à formação de carepa em temperaturas até 1.200°C, mantendo alta tenacidade até -196°C (MINÀ, et. al. 2016).

## METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido com o intuito de avaliar a influência que a distância do bico e contato com a peça (DBCP) tem nas áreas de reforço, penetração, microdureza do cordão de solda. Após os procedimentos experimentais as amostras foram analisadas no microscópio *ZEISS STEREO V8* para posterior análise visual. Foi utilizado no processo de soldagem um robô de solda (Braço Robótico Yaskawa HP-20), e a fonte IMC Digiplus A-7 como fonte de soldagem. Utilizando ER-NiCrMo– 3 como metal de adição, Ar+25%He como gás de proteção e a velocidade de soldagem 25cm/min foram preparados 27 cordões de solda, enquanto que os parâmetros variantes foram: tensão de 15V, 20V, 25V para distância bico-contato-peça variando de 14mm, 17mm e 20mm e velocidade de alimentação de 5m/min, 7,5m/min e 10m/min.

Ao final do processo de soldagem, cada uma das 27 amostras de cordão de solda foi dividida em três partes (corpos de prova). Para cada corpo de prova foi avaliado, área de reforço, área penetrada, largura do cordão, altura do cordão e penetração foram mensuradas no microscópio mencionado. Para quantificar a estabilidade de transferência do procedimento de soldagem os processos foram avaliados segundo o Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência por Curto-circuito.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As variações dos parâmetros adotados para todas as amostras analisadas no estudo são mostrados na "Tab. 1".

**Tabela 1 – Variação de parâmetros entre as amostras coletadas.**

| | PARÂMETROS | | |
|---|---|---|---|
| **AMOSTRAS** | **DBCP (mm)** | **Velocidade de Alimentação (m/min)** | **Tensão (V)** |
| **1** | **17** | **5** | **15** |
| **2** | **17** | **5** | **20** |
| **3** | **17** | **5** | **25** |
| **4** | **17** | **7,5** | **15** |
| **5** | **17** | **7,5** | **20** |
| **6** | **17** | **7,5** | **25** |
| **7** | **17** | **10** | **15** |
| **8** | **17** | **10** | **20** |
| **9** | **17** | **10** | **25** |
| **10** | **20** | **5** | **15** |
| **11** | **20** | **5** | **20** |
| **12** | **20** | **5** | **25** |
| **13** | **20** | **7,5** | **15** |
| **14** | **20** | **7,5** | **20** |
| **15** | **20** | **7,5** | **25** |
| **16** | **20** | **10** | **15** |
| **17** | **20** | **10** | **20** |
| **18** | **20** | **10** | **25** |
| **19** | **14** | **5** | **15** |
| **20** | **14** | **5** | **20** |
| **21** | **14** | **5** | **25** |
| **22** | **14** | **7,5** | **15** |
| **23** | **14** | **7,5** | **20** |
| **24** | **14** | **7,5** | **25** |
| **25** | **14** | **10** | **15** |
| **26** | **14** | **10** | **20** |
| **27** | **14** | **10** | **25** |

### Análise visual

Defeitos encontrados nas amostras:
1: O cordão se soltou e não houve penetração nem correta fusão do metal de adição.
2: Ocorreu a formação de bolhas na área de penetração.
3: Ocorreu uma inclusão na área do reforço, ocorreu formação de bolhas na superfície.
4:O cordão se soltou e não houve penetração nem correta fusão do metal de adição.
5: -
6: -
7: Não houve penetração, não houve penetração nem correta fusão do metal de adição e houve formação de respingos.
8: Não houve penetração e ocorreu a mordedura, forte formação de respingos.
9: -
10: Não houve uma correta deposição de material resultando em um cordão com duas linhas de deposição de material.
11: Apresentou uma bolha no meio do cordão.
12: Houve formação de bolhas na superfície do cordão.
13: Não ocorreu a correta deposição de material, não houve penetração no material de base e o aspecto do cordão se encontra irregular.
14: Apresentou uma bolha no meio do cordão.
15: -
16: Não houve penetração no material de base. Aparentemente o metal de adição não se fundiu corretamente.
17: Não ocorreu a correta fusão do metal de adição, não houve penetração.
18: O cordão apresentou um formato achatado na parte superior.
19: Ocorreu formação de bolhas na base do cordão.

20: Apresentou bolhas e inclusões.
21: -
22: Não houve penetração, não ocorreu a correta fusão do metal de adição.
23: Apresentou a formação de bolhas na área de penetração.
24: Ocorreu a formação de bolhas no reforço e na área de penetração.
25: Não houve penetração, nem a correta fundição do metal de adição. Apresentou respingos.
26: Não ocorreu a penetração, apresentou respingos.
27: -

A microdureza Vickers foi avaliada em todas as amostras, sendo que em cada amostra a dureza foi medida 5 vezes, das quais o maior valor e o menor valor medido foram descartados. Portanto, foram utilizados para análise apenas os três valores intermediários. Para que fossem melhor avaliados os dados coletados, foi considerado como sendo o valor da dureza de cada amostra a média dos três valores coletados. Para as três variações da distância entre o bico e a peça não houve um padrão de alteração na dureza do material, a dureza das amostras variaram de maneira aleatória, como pode ser observado na "Fig (1)". O que indica que a dureza do cordão de solda não está diretamente relacionada com a distância de contato entre o bico de soldagem e a peça. Conforme "Solosando (2007)" em soldagens de simples deposição, os resultados de microdureza não mostram grande variação em decorrência da variação da razão austenita/ferrita, pois não há diferença significante na composição destas fases. Isto se explica porque os elementos substitucionais não tem tempo para se separarem durante a soldagem.

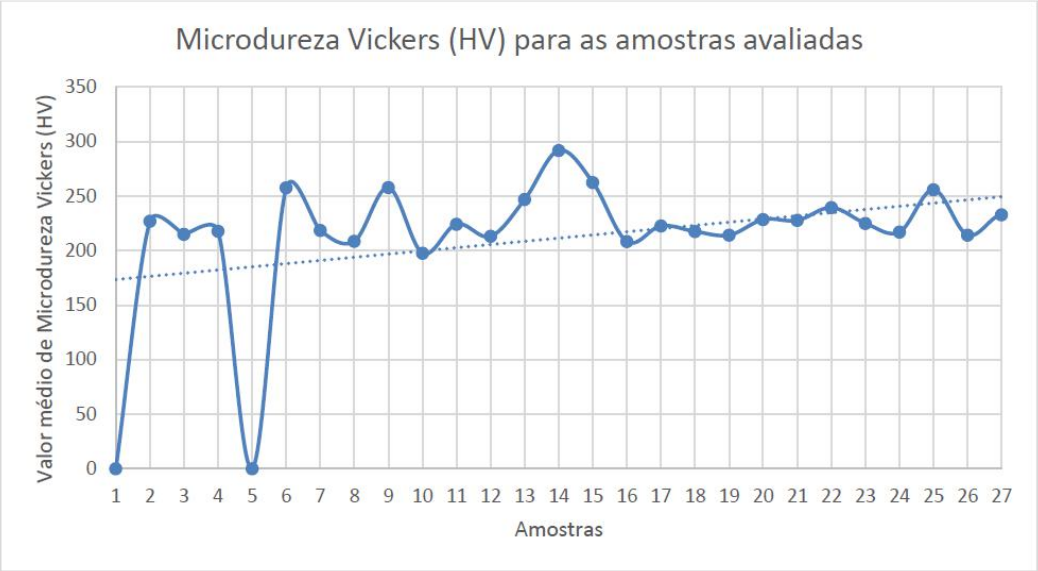



**Figura 1.** Microdureza Vickers (HV) para as amostras avaliadas.

Para a tensão de 20 V, não foi possível encontrar um padrão de variação da largura do cordão de solda em relação à variação da DCBP, conforme pode ser visto na "Fig (2)". A altura de penetração também possui um padrão aleatório de variação em relação a DCBP, conforme a "Fig (3)".

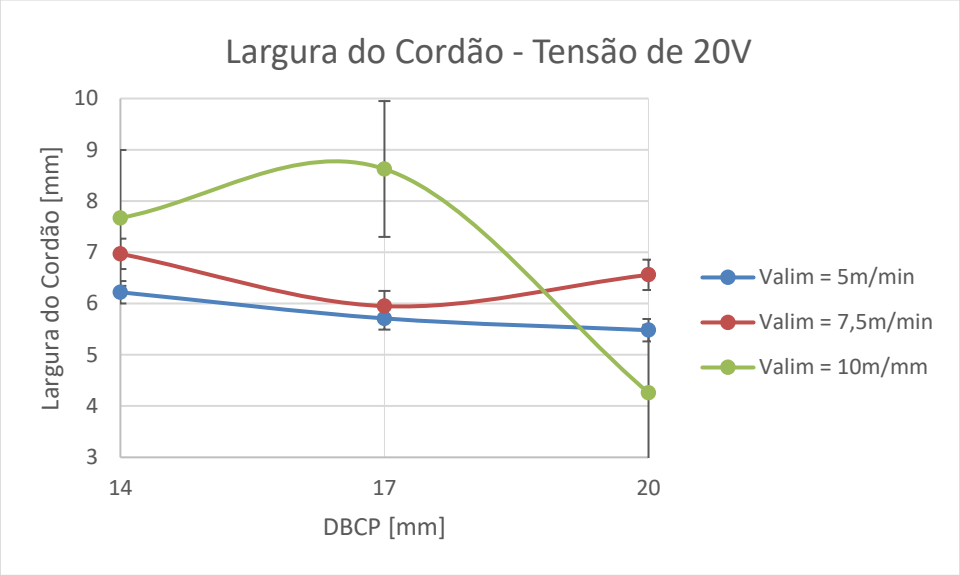



**Figura 2.** Largura do corsão de solda para 20 V.

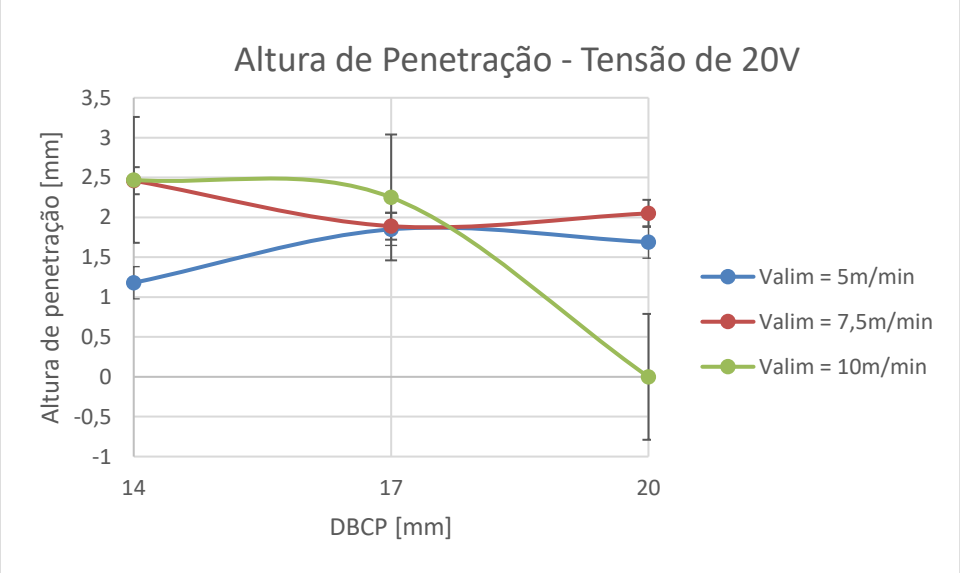



**Figura 3.** Altura de penetração da solda para 20 V.

Para a tensão de 25 V, a largura do cordão de solda seguiu uma leve tendência decrescente, porém conforme a “Fig (3)”, não caracteriza uma tendência evidente. A altura de penetração novamente variou de maneira aleatória em relação a DCBP, conforme “Fig (4)”.

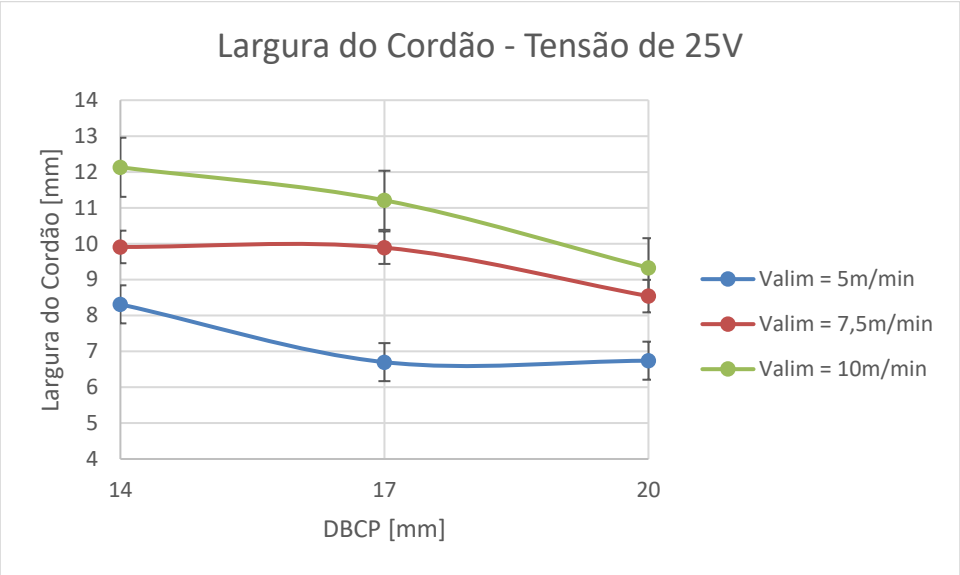



**Figura 4.** Largura do cordão de solda para 25 V.

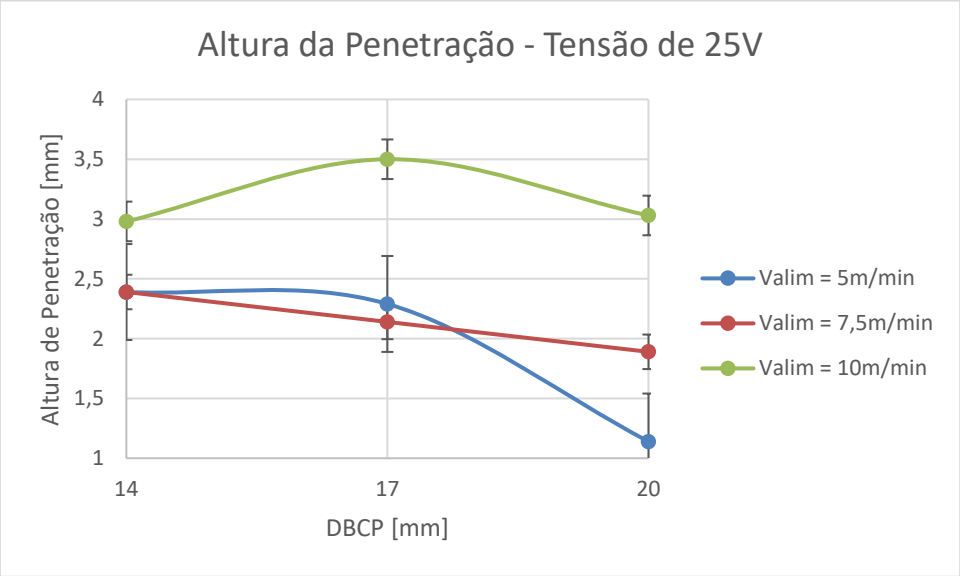



**Figura 5.** Altura de penetração da solda para 25V.

Para a tensão de 15 V não foi possível avaliar as variações de altura e largura do cordão de solda, pois ambos os parâmetros não possuíram valores significativos. Na maior parte das amostras não houve penetração e o cordão de solda apresentou aspectos bastante disperso, como pode ser visto na “Fig (5)”.

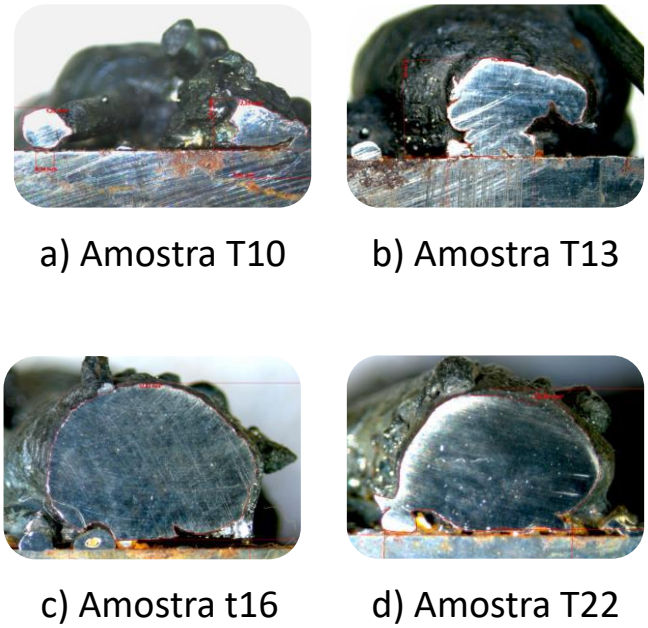



**Figura 6.** Imagens dos cordões de solda para 15 V.

O índice de Vilarinho cujo símbolo é o Ivcc, é calculado através dos coeficientes de variação dos tempos de curto circuito e de arco aberto. O mesmo pode ser analisado pelos gráficos a seguir, “Fig 7, 8 e 9”.

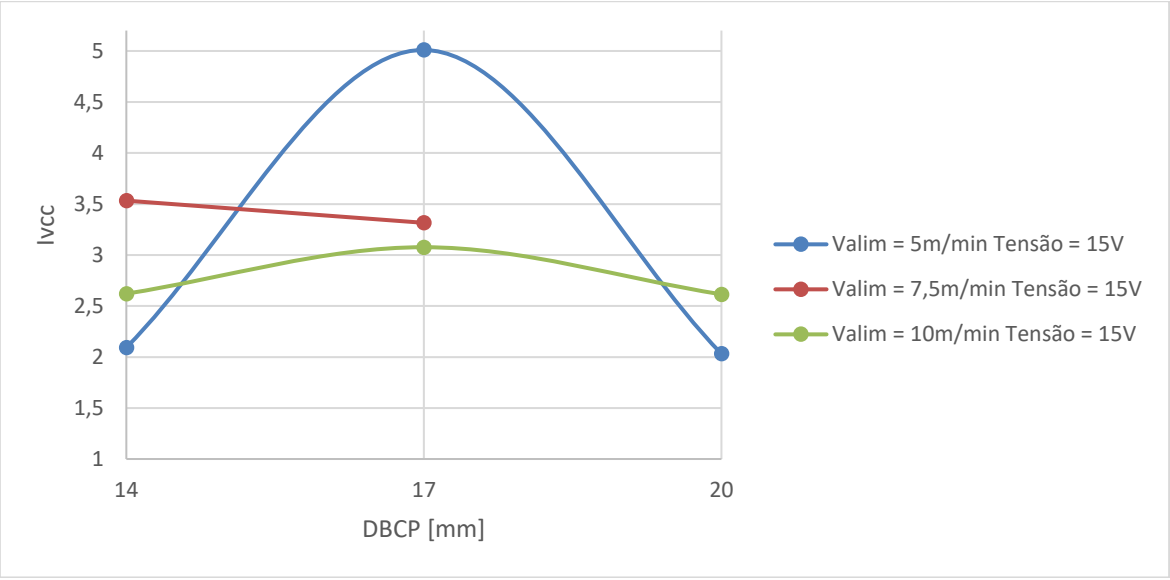



**Figura 7**. Ivcc x DBCP com Tensão fixa em 15V

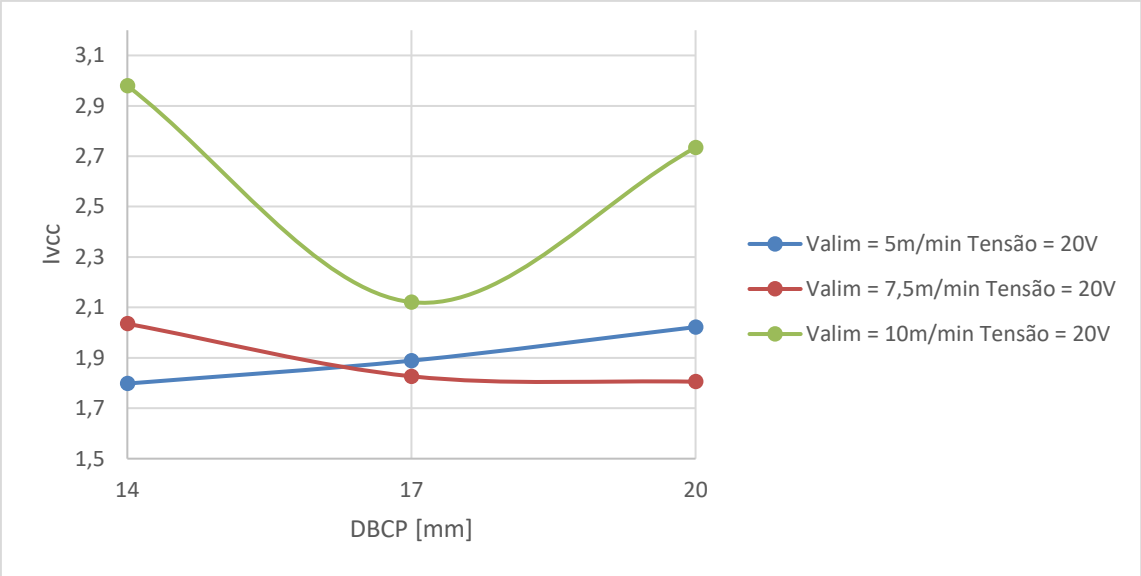



**Figura 8.** Ivcc x DBCP com tensão fixa em 20V

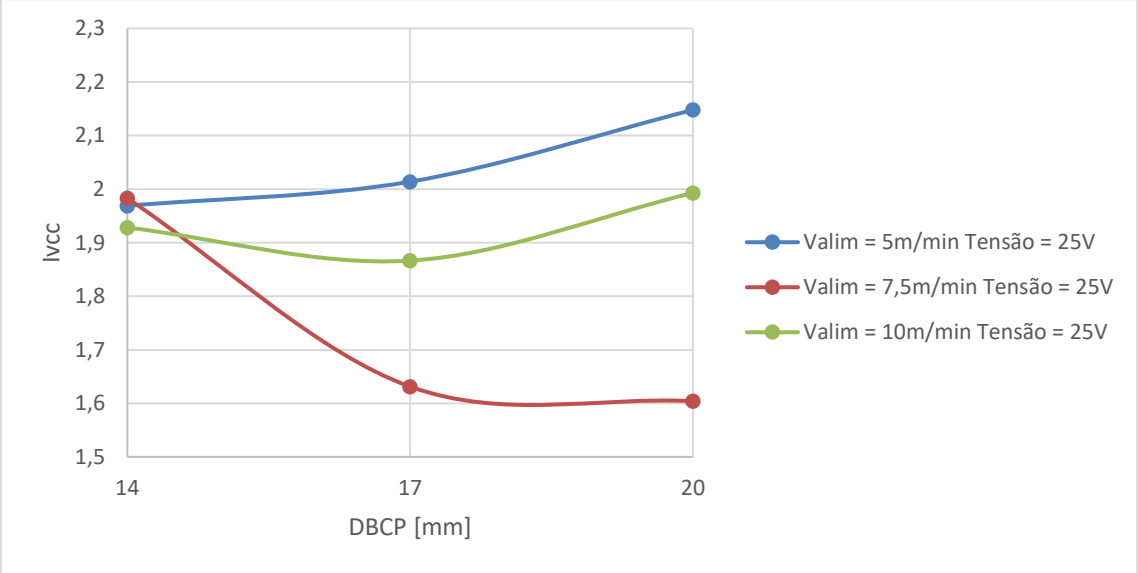



**Figura 9.**Ivcc x DBCP com tensão fixa em 25V

Foram realizadas soldagens alterando-se a DBCP de 14 mm, 17 mm e 20 mm, com atmosfera gasosa de Ar+25%He De acordo com os indices de vilarinho obtidos os paramêtros não foram estáveis, pois foram obtidos valores muito altos, pois o normal é estar entre 0 e 1, mostrando uma instabilidade do processo e é possível comparar que os ensaios com a menor índice de vilarinho foram os cordões com os melhores resultados, tanto em penetração como largura de cordão.
De acordo com “Souza et al. (2011)” valores menores do índice indicam melhor estabilidade, verifica-se que o processo tem pouca estabilidade para tensões muito baixas e muito altas, como esperado.

## CONCLUSÃO

A DBCP é uma variável importante nos processos de soldagem, sua variação causou alterações no aspecto geral da soldagem. A altura de penetração e a largura do cordão são mais influenciados pela variação da tensão do que da DBCP. Quanto à dureza, não foram observadas variações padronizadas com relação a nenhum dos parâmetros avaliados. Com base nos ensaios realizados conclui-se portanto que o aumento da DBCP gera:

- Alterações significativas tanto na corrente média quanto na freqüência de transferência metálica, principalmente no modo curto-circuito;
- A microdureza não obsevou variações padronizadas com relação a nenhum dos parâmetros avaliado;

- A altura de penetração e a largura do cordão são mais influenciados pela tensão do que pela DBCP;
- Pela análise dos ensaios, o aumento da DBCP não aumenta a largura do cordão;

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Federal de Goiás (UFG) por ter provido ambiente, máquinas e recursos para realização do experimento e ao professor Demóstenes Ferreira Filho por ter incentivado e acompanhado os procedimentos.

## REFERÊNCIAS

Brandi SD, Mello FDH. Soldagem: processos e metalurgia / coordenação Emílio Wainer. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

Infosolda. Processo Mig/Mag - Parâmetros De Soldagem. Disponível em: <http://www.infosolda.com.br/bibliotecadigital/livros-senai/processos/174-processo-mig-mag-parametros-desoldagem.html>.

Bessa, Paulo Cesar. Processo de Soldagem MIG/MAG. Disponível em: <http://www.alusolda.com.br/conteudo/processo-de-soldagem-migmag.html>.

Ferreira Filho, D., Bálsamo, P.S.S., Ferraresi, V.A., 2013, "Influência Do Tipo De Gás De Proteção Da Soldagem Mig/Mag Na Qualidade Do Cordão De Aço Inoxidável."

Fortes, Cleber. Apostila de Soldagem MIG/MAG. Ceres: Esab, 2005. 68 p. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0_apostilasoldagemmigmag_low.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2018.

Minà, ÉM, SILVA YC, Dille J, Silva CC. Efeito da Diluição Sobre a Microestrutura da Liga AWS ER NiCrMo-14 na Soldagem de Revestimentos pelo Processo TIG com Alimentação de Arame Frio. 2016;21(3):317-329. http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI2103.07, 2016.

SOLDAS, Mjv. Arame Níquel AWS ER NiCrMo-3. Disponível em: <http://www.mjvsoldas.com.br/produto/mjvarame-niquel-aws-er-nicrmo-3>.

Solosando, S.G., 2007, "Efeito bauschinger em aços inoxidáveis. Relatório Final.

Souza, D., Rossi, M.L., Keocheguerians, F., Nascimento, V.C., Vilarinho, L.O., Scotti, A., 2011, "Influência da regulagem de parâmetros de soldagem sobre a estabilidade do processo MIG/MAG operando em curto-circuito"

Soldag. insp. (Impr.) vol.16 no.1 São Paulo, Brasil.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(veis) pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção 'área de conhecimento do trabalho'.
( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(X) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

# INFLUÊNCIA DA ESPUMA DE ALUMÍNIO NA DISSIPAÇÃO DE CALOR

**Nome do(s) autor(es): Daniel de Oliveira Fernandes, Maurício Simões Santanna, Rodrigo Alkimim Faria Alves**
Instituição: Centro Universitário do Distrito Federal - UDF
Endereço Completo da Instituição: SEP/SUL EQ704 / 904 Conj. A CEP 70390-045 Brasília-DF
E-mail para correspondência: danieldeoliveirafernandes@gmail.com; mauriciosimoessantana@gmail.com

**RESUMO:** Este trabalho apresenta o propósito de avaliar a influência da espuma de alumínio na dissipação de calor, utilizando o método dos elementos finitos por meio da análise térmica transiente no programa ANSYS 18.2. Para representar a porosidade foram elaborados modelos com distribuição e tamanho de poros variados. O alumínio poroso ainda é um material com características não muito conhecidas, porém tem sido empregado constantemente na indústria automobilística e aeronáutica devido as suas propriedades de absorção de impacto. Aplicações térmicas devem ser estudas visto que quanto maior a quantidade de poros e maior o tamanho da galeria formada no processo de fabricação da espuma de alumínio, menor será sua condução térmica.

**Palavras-Chave:** Alumínio Poroso, Análise Térmica, Dissipação de Calor

***ABSTRACT:*** *This work presents the purpose of evaluating the influence of aluminium foams on heat dissipation using the finite element method using transient thermal analysis in ANSYS 18.2. To represent the porosity, models with different pore size and distribution were elaborated. Celmet aluminum is still a material with characteristics not very well known, however it has been used constantly in the automotive and aeronautical industry due to properties of absorption of impact. Thermal applications should be studied because the larger the pore size and the larger the gallery size formed in the aluminium foaming process, the lower its thermal conduction*.

***Keywords:*** *Celmet Aluminium, Thermal Analysis, Heat Dissipation*

## INTRODUÇÃO

A busca por eficiência energética tem feito do estudo da transferência de calor uma das áreas fundamentais para a engenharia em correlato com o desenvolvimento industrial. Esse estudo vem sendo aprimorado desde a época de Fourier (1768-1830) que desenvolveu um trabalho experimental e teórico sobre a propagação de calor.

A importância desse estudo se deve a diversos processos e aplicações que utilizam energia em trânsito. Çengel (2012) diz que esse transporte energético se dá pela diferença de temperatura entre duas regiões em um mesmo meio e podem ser representadas por equações diferenciais parciais que são denominadas equações de calor, e determinam a distribuição da temperatura em um corpo. A resolução dessas equações se dá pela utilização de métodos numéricos.

O comportamento da dissipação de calor pode ser observado de duas maneiras: experimental e simulação computacional, o mais recomendável pela viabilidade financeira e operacional é a simulação computacional, método. mais utilizado para compreensão do processo por apresentar resultados mais nítidos e rápidos e possibilitar a simulação do comportamento de calor em uma vasta classe de aplicações de interesse do projeto, além de permitir o tratamento de problemas cada vez mais sofisticados.

O método computacional permite a análise por elementos finitos, que é bastante usado na engenharia, pois vários problemas são descritos por equações diferenciais parciais e tais equações quando aplicadas em geometrias arbitrárias tornam a resolução por métodos analíticos inviáveis. O método de elementos finitos calcula essas equações de modo aproximado para diversos elementos em conjunto. E é empregado em problemas estruturais, de transferência de calor, fluidos e acústicos (Fish e Belytschko, 2007).

Banhart e Asbhy, (2003) afirmam que busca por materiais alternativos tem colocado o alumínio poroso em alta na indústria automobilística e aeroespacial devido ao seu baixo peso, boa capacidade de absorção de impacto e isolamento térmico e acústico. O alumínio poroso pode formar dois tipos de estruturas, com células abertas (esponjas de alumínio) ou com células fechadas (espumas de alumínio). Esses diferentes tipos permitem comportamentos únicos para cada modelo de estrutura e concedem diferentes aplicações na indústria.

Neste projeto buscaremos abordar como ocorre a dissipação em espumas de alumínio, no decorrer do tempo e melhor compreender como materiais de estruturas porosas se comportam quando estimulados termicamente.

## METODOLOGIA

**Criação do Sólido 3D**

Foi utilizado para a modelagem do sólido 3D, o programa SolidWorks da empresa francesa Dassault Systèmes, devido a praticidade de trabalho em relação ao SpaceClain e o Desing Modeler, disponíveis no ANSYS. As geometrias foram criadas a partir de um cubo de 20x20x20mm, totalizando um volume de 8000mm³, a partir daí foi feito o esboço de uma porosidade. Abaixo são mostradas as geometrias utilizadas durante a simulação e suas características.

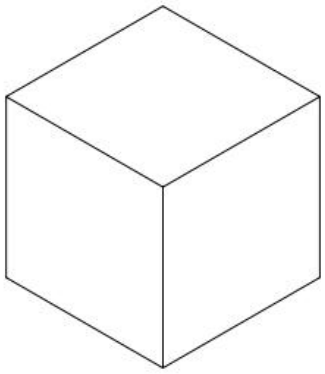


**Figura 1**. Geometria maciça

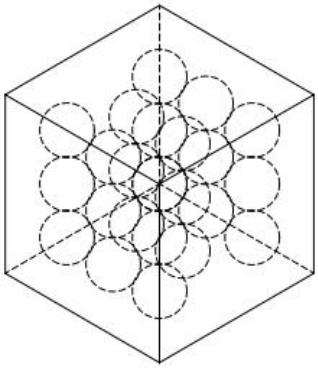


**Figura 2**. Geometria 2 com porosidade (20% do volume) poros de 5mm

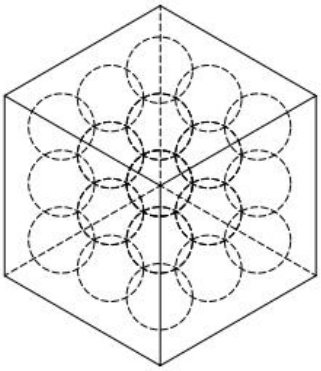


**Figura 3**. Geometria 3 com porosidade (40% do volume) poros de 6mm

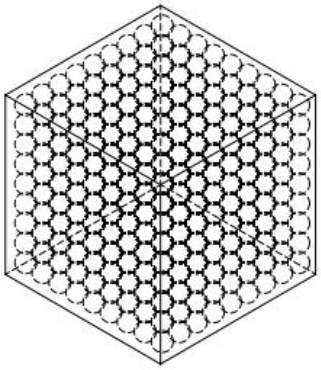


**Figura 4**. Geometria 4 com porosidade (40% do volume) poros de 2mm

**Criação da Malha**

A partir da geometria modelada, é utilizado o ANSYS 18.2 para iniciar as simulações. O primeiro passo é importar a geometria em formato ParaSolid, que é compatível com o programa ANSYS, a partir desse ponto realiza-se uma verificação na geometria importada, a fim de corrigir erros provenientes da conversão do formato original do SolidWorks para ParaSolid.

Com a geometria verificada é criado a malha do modelo, sempre se atentando à qualidade. Alguns métodos foram utilizados para obter o aspecto necessário para uma simulação válida. No bloco maciço foi utilizado o método automático, visto que a geometria não é complexa e no final gerou um *element quality* de malha igual a 1.

Para os modelos restantes com poros de 6, 5 e 1mm foi utilizado o método dos tetraedros, para melhor adaptação da malha à geometria, agregado a isso um *sizing* de 0,5mm e um *Face Mesh*, resultando em um *element quality* acima de 0,75, satisfatório para a simulação em questão.

Foi feito um refino da malha em todos os sólidos, e iria resultar em um maior gasto de processamento e o *element quality* da malha permaneceu o mesmo de antes do refinamento.

**Propriedades do material**

Todas as simulações foram regidas pelas mesmas condições de contorno, com o intuito de obter resultados diferentes apenas por conta da porosidade definida previamente no sólido. Os valores referentes às características do material apresentados pelo programa foram checados e estavam de acordo com os valores da literatura (Çengel, 2012).

**Tabela 1**. Propriedades do alumínio

| Grandeza | Valor | Unidade |
|---|---|---|
| Densidade | 2702 | $kg.m^{-3}$ |
| Condutividade térmica | 237 | $W.m^{-1}.k^{-1}$ |
| Calor específico | 903 | $J.kg^{-1}.K^{-1}$ |
| Temperatura ambiente | 27 | °C |

**Condições de Contorno**

Para a análise foi definido que a temperatura de contato com a peça deveria ser de 100 °C (Ponto A) e com uma convecção semelhante ao do ar natural com uma magnitude de 5W (Ponto B). É possível observar com maior clareza na Figura 8, para melhor efeito de visualização, que o bloco foi virado de tal forma que a área em vermelho à esquerda é a face que está para baixo durante a simulação.

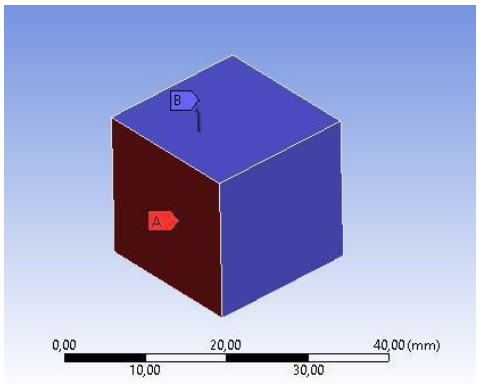



**Figura 5**. Condições de contorno

Outras variáveis também foram levadas em consideração, como o tempo de aplicação da temperatura, que foi programado para 10 segundos e a temperatura do ar ambiente dado como *input* 25 °C.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi simulado apenas blocos feitos em alumínio, um bloco maciço e os outros três blocos com a porosidade controlada: um com 20% do peso do bloco maciço e poros esféricos medindo 5mm de diâmetro, os outros dois blocos possuíam o mesmo peso, 40% do bloco maciço, porém um com poros esféricos de 6mm de diâmetro e o outro com 2mm de diâmetro.

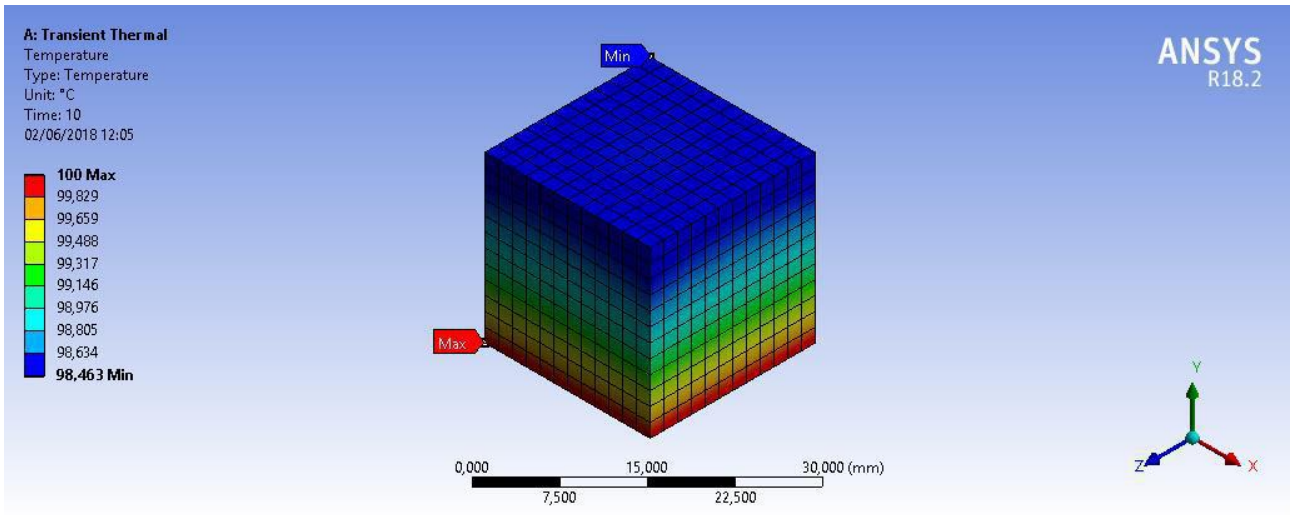



**Figura 6**. Gradiente de temperatura na geometria 1

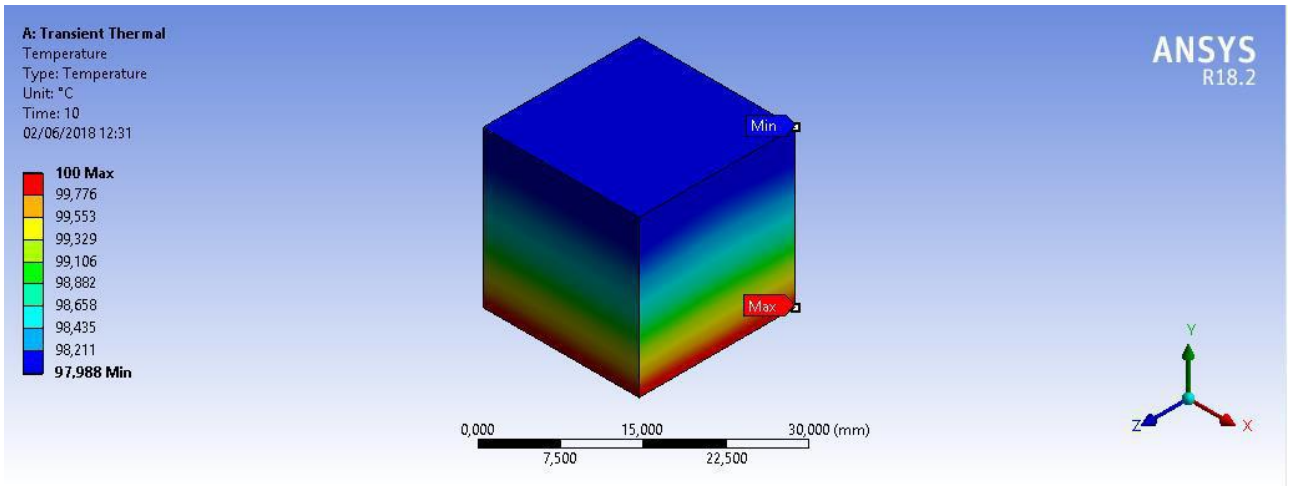



**Figura 7**. Gradiente de temperatura na geometria 2

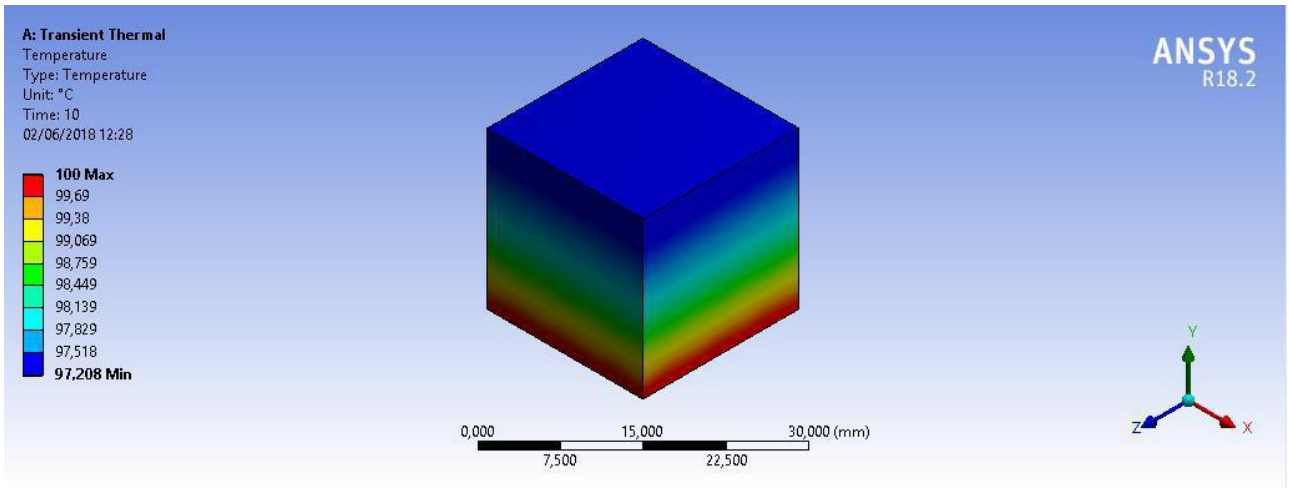



**Figura 8**. Gradiente de temperatura na geometria 3

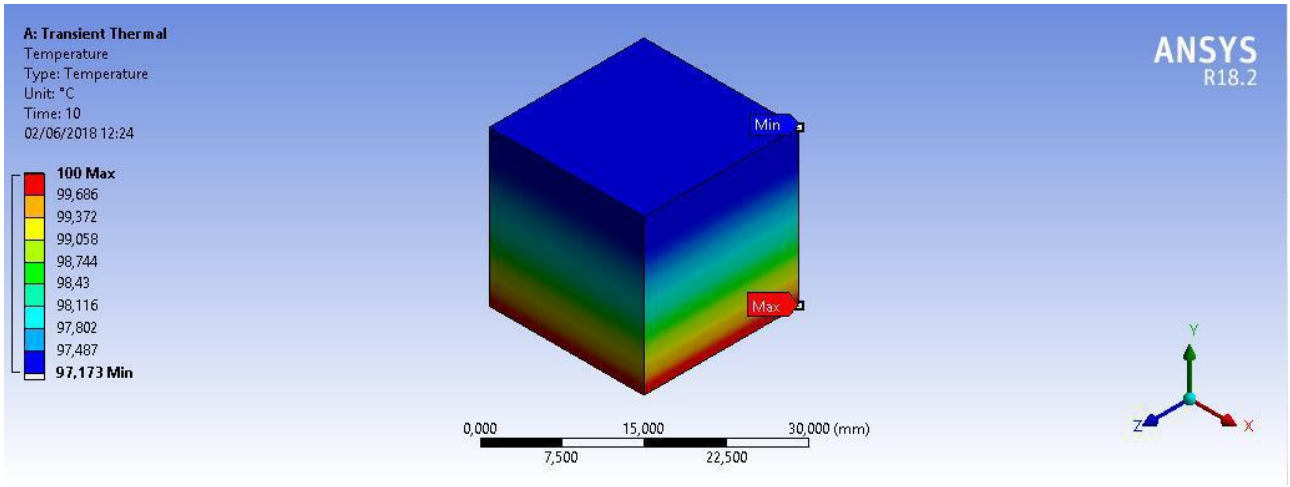



**Figura 9**. Gradiente de temperatura na geometria 4

**Tabela 2**. Temperaturas mínimas registradas em 3, 5 e 10s

| | Temperatura 3s | Temperatura 5s | Temperatura 10s |
|---|---|---|---|
| Bloco maciço | 77,544 °C | 90,635 °C | 98,463 °C |
| Bloco poroso 20% (5mm) | 74,307 °C | 88,58 °C | 97,998 °C |
| Bloco poroso 40% (6mm) | 71,796 °C | 86,436 °C | 97,208 °C |
| Bloco poroso 40% (2mm) | 71,289 °C | 86,246 °C | 97,173 °C |

Nas simulações percebe-se que quanto maior a porosidade menos condutivo o material se torna, pois a medida que a temperatura toma conta do sólido encontra galpões preenchidos por ar, criados durante o processo de fundição do material, também é possível observar que quanto maior for a quantidade de poros, menor será a condutividade do material, mesmo possuindo a mesma densidade, isto acontece por conta da distribuição dos poros que impedem que de uma camada pra outra transfira maior quantidade de energia.

## CONCLUSÃO

Através desse trabalho foi apresentada uma análise térmica via elementos finitos de como um sólido poroso irá se comportar, visando avaliar a influência da quantidade e tamanho dos poros quando o corpo for estimulado termicamente, visto que materiais porosos ainda não são estudados afundo termicamente quanto sua outra propriedade de absorção de energia mecânica.

O resultado final obtido foi correspondente com o qual a literatura prega, que corpos porosos tem taxa de transferência de calor menor que maciços. A análise gerou indagações que devem ser discutidas posteriormente em ensaios experimentais, como no caso de uma mesma porosidade para ambos os corpos porém com diferente de tamanho do poro e distribuição, devido a isso propõe-se como tema de trabalhos futuros a aplicabilidade de materiais porosos em isolantes térmicos.

## REFERÊNCIAS

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. Transferência de calor e massa: Uma abordagem prática. 4. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2012.

FISH, J.; BELYTSCHKO, T. A First Course in Finite Elements. West Sussex, Inglaterra, John Wiley & Sons, 2007.

HABERLING , C.; HALDENWANGER, H. G.; BERNHARD, T.; BURZER, J.; BERGMANN, H. W. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J, AshbyMF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bermen, Germany, 14-16 June 1999.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L; LAVINE, A. Fundamentos de transferência de calor e massa. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

BANHART, J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. Progress in Materials Science, vol 46, p. 559-632. Bremen, Alemanha, 2000.

JUDGE, M.; Foam sweet foam. New Scientist, 34-37, sep. 1997.

KREITH, F.; BOHN, M. S. Princípios de transferência de calor. 6. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2003.

L. D. Kenny and M. Thomas, Process for shape casting of particle stabilised metal foam, Alcan International 25 Jan 1994, Patent Nº US5281251, Convention date 4 Nov 1992.

LEFEBVRE, L. P.; BONHART , J.; DUNAND, D. C. Porous metals and metallic foams: current status and recent developments. p.775–787, 2008.

MIRLISENNA, G. ESSS, MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS: O QUE É? 2016. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>. Acessado em 26 de abril de 2018.

NAKAJIMA, H.; Porous Metals with Directional Pores, Springer, 7-12, 2013.

SILVA, R. ESSS, ANÁLISE TÉRMICA PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS. 2017. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/analise-termica-pelo-metodo-de-elementos-finitos/>. Acessado em 26 de abril de 2018.

SimWiki, What is FEA | Finite Element Analysis? Disponível em: <https://www.simscale.com/docs/content/simwiki/fea/whatisfea.html>. Acessado em 28 de abril de 2018.

SLATER, C.; STRANGWOOD, M. Modeling the effects of pore arrays on the electrical and mechanical properties of copper. Jornoul of Materials Reserch, vol 28, no 17, p,2559-2544. Cambrige University, 2013.

SOUZA. R. M. O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor. Universidade Federal Do Pará Centro Tecnológico Departamento De Engenharia Civil Núcleo De Instrumentação E Computação Aplicada À Engenharia, Belém, 2003.

REIS, F. G.; Análise de Dissipadores Térmicos para Componentes Eletrônicos de Alta Potência em um Equipamento Embarcado em Aeronave. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(veis) pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção 'área de conhecimento do trabalho'.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(X) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 27 à 31 de agosto de 2018 – Brasília, DF

# INFLUÊNCIA DA TAXA DE RESFRIAMENTO SOBRE MACROESTRUTURA DA LIGA DE ALUMÍNIO SAE 323 SOLIDIFICADO EM MOLDE DE AREIA

**Rafael Brasil da Costa, Rodrigo da Silva Miranda**
Universidade Estadual do Maranhão
Cidade Universitária Paulo VI - Tiririca/Cidade Operária, São Luís - MA - CEP 65055-310.
rafaelbrasil1212@gmail.com

**RESUMO:** O presente trabalho tem como objetivo o estudo do processo de fundição da Liga de Alumínio SAE 323, com a finalidade de analisar a sua macroestrutura em função da taxa de resfriamento promovida pela variação de parâmetros da composição do material do molde, onde foi possível verificar sua resistência ao desgaste e fenômenos como: cristalização, contração de volume, desprendimento dos gases e concentração de impurezas. Na macroestrutura observou-se defeitos que surgiram durante a solidificação como a grande presença de poros, também o crescimento das dendritas e formação dos grãos. Já na curva de resfriamento examinou-se a importância da taxa de resfriamento e seu efeito na formação das fases da Liga de Alumínio SAE 323, obtendo-se a macroestrutura de solidificação.

**Palavras-Chave:** fundição,macroestrutura,taxa de resfriamento.

***ABSTRACT:*** *The present work has the objective of studying the casting process of the SAE 323 Aluminum Alloy, with the purpose of analyzing its macrostructure as a function of the cooling rate promoted by the variation of parameters of the composition of the mold material, where it was possible to verify its resistance to wear and phenomena such as: crystallization, contraction of volume, evolution of gases and concentration of impurities. In the macrostructure it was observed defects that appeared during the solidification as the great presence of pores, also the growth of the dendrites and formation of the grains. In the cooling curve, the importance of the cooling rate and its effect on the formation of the SAE 323 Aluminum Alloy phases were analyzed, obtaining the solidification macrostructure.*

***Keywords:*** *casting,macrostructure cooling rate.*

## INTRODUÇÃO

A fundição é um processo de fabricação no qual um metal totalmente fundido é derramado na cavidade de um molde que apresenta a forma desejada; com a solidificação, o metal assume a forma do molde, mas sofre certa contração (CALLISTER, 2013).

As peças obtidas por fundição são utilizadas em grande quantidade de equipamento de transporte, construção, comunicação, geração de energia elétrica, mineração, agricultura, máquinas operatrizes; enfim, na indústria em geral, devido as vantagens que os processos de fundição oferecem (CHIAVERINI, 1986). Vantagens essas que são fabricação de peças com geometrias complexas e de qualquer tamanho, baixo custo de produção, método simples.

Na fundição em molde de areia, utiliza-se da areia como material para a confecção do molde, sendo esta composta por argila e água. Um molde é constituído de duas partes em que a areia é compactada em volta do modelo dentro do caixote, ao qual se deseja obter a forma da peça. Ainda mais emprega-se os canais de alimentação ou vazamento e de desprendimento dos gases junto ao molde.

Com 8,05% dos elementos existentes, o alumínio é o elemento mais abundante da crosta terrestre, mas ele não é encontrado livre na natureza devido a sua elevada afinidade com o oxigênio, o alumínio só existe combinado com outros elementos, sendo a bauxita ($Al_2O_3 \cdot nH_2O$) o mais abundante deles (HADIME, 2012). O alumínio é um material de uma importância relevante em meio a outros materiais e passou a ser muito utilizado no ramo da engenharia, por possuir uma massa especifica baixa, condutividade térmica e elétrica elevadas, resistência a esforços mecânicos, ductilidade e boa resistência a corrosão.

Segundo (ZANOTTO, 2016), o tamanho de grão cristalino é responsável por diversas características finais do material ou liga em estudo, por isso, é de extrema importância que o seu controle seja executado, de forma a se obter um material de maior qualidade. Dessa maneira a importância da análise da macroestrutura do material e da curva de resfriamento é fundamental para a averiguação e formação dos grãos e das fases, uma vez que essa influencia diretamente suas propriedades mecânicas.

## METODOLOGIA

**Procedimento experimental**

O procedimento experimental é dividido basicamente em 5 etapas: confecção do molde de areia, fundição do material no forno, vazamento no molde de areia, obtenção da taxa de resfriamento, ensaios de metalografia e dureza.

**Confecção do molde de areia**

Primeiramente desenhou-se o modelo da peça no AutoCAD® com medidas em mm como mostra a figura 1 e fabricou de madeira. Utilizando um caixote de madeira, areia misturada com argila para fazer o molde, o modelo da peça feito de madeira, pó de carvão para facilitar o desmolde e fazendo uso de dois eixos de aço para formar os canais de vazamento do metal e desprendimento dos gases, confeccionou-se o molde de areia onde seria vazado a liga de alumínio SAE 323 para obter- se a peça solida, mostrada na figura 2.

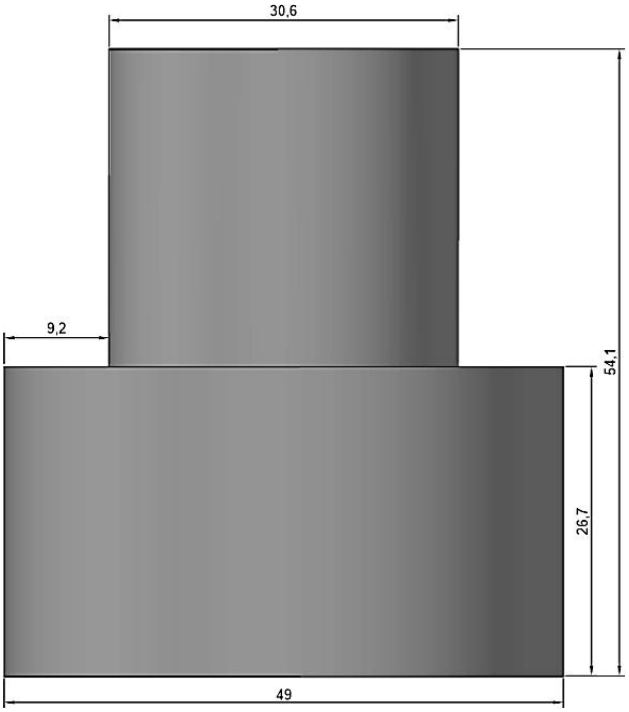



**Figura 1.** Modelo da peça com medidas em mm

**Figura 2.** Confecção do molde de areia

**Composição do material e propriedades**

O material utilizado foi dois blocos de Liga de Alumínio SAE 323 de aproximadamente 300g cada, depois de selecionado o material, colocou-se no cadinho e levou ao forno a uma temperatura de 820°C. Na tabela 1 mostra as propriedades do material e a tabela 2 sua composição.

**Tabela 1.** Propriedades da Liga de alumínio SAE 323

| SAE 323 | |
|---|---|
| Peso Especifico (g/cm³) | 2,68 |
| Coef. Dilatação Térmica (20° - 200°C) | 0,0000225 |
| Condutibilidade Elétrica (IACS) % | 36 |
| Dureza Brinell | |
| | 55/75 (coquilha) |
| | 50/70 (areia) |
| Fluidez | boa |
| Resistência a Corrosão | otima |
| Usinabilidade | regular |
| Temperatura de Vazão (°C) | 680 - 740 |

**Tabela 2.** Composição da Liga de alumínio SAE 323

| Liga SAE 323 | Si | Fe | Cu | Mn |
|---|---|---|---|---|
| | 6,5 - 7,5% | 0,50% | 0,25% | 0,35% |
| | Mg | Zn | Ni | Sn |
| | 0,25 - 0,45% | 0,35% | --- | 0,25% |

**Aquisição da Taxa de Resfriamento**

Com o objetivo de obter as curvas da taxa de resfriamento a qual a peça foi submetida desde o centro até sua superfície no processo de fundição, foram utilizados termopares Tipo K para captarem as diferenças de temperatura por meio de uma base de aquisição de dados FieldLogge, onde o princípio de funcionamento se baseia na diferença de voltagem causada pela elevação de temperatura entre os dois terminais de fios de materiais diferentes que compõe o termopar. A figura 3 mostra como ocorre o aquecimento do forno para a fundição do material.

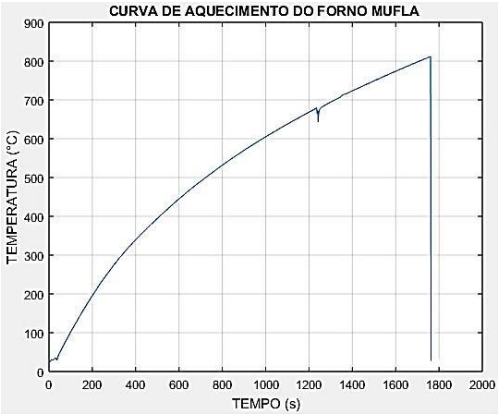



**Figura 3.** Curva de aquecimento do forno mufla

**Metalografia**

Na análise metalográfica as amostras foram lixadas de acordo com os procedimentos usuais (COLPAERT,2008), com lixas de granulometria variando de 100 a 1200, em seguida, polidas com suspensão em alumina de 1µm. As estruturas foram reveladas e atacadas com solução de Osmond e após o ataque, as metalográfias foram fotografadas.

**Ensaio de Dureza Rockwell**

Os ensaios de dureza foram realizados conforme a norma ASTM E18, Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials. O ensaio é baseado na profundidade de penetração Fig. 5 de uma ponta sobre o material, quando este é submetido a uma carga nominal (SOUZA, 1982), proveniente da soma de uma pré-carga e uma carga maior (após a recuperação elástica devido a retirada da carga menor). Dureza Brinell obtida no durômetro, onde se utilizou a pré- carga de 10 Kgf e carga de 60 Kgf com a ponta esférica de diâmetro de 1/8”

**Figura 4**. Equipamento do ensaio de dureza. (a) Durômetro PANTEC, modelo RBS-M; (b) corpos de prova padronizados para aferição da máquina: (c) endentadores

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A dureza da peça condiz com a encontrada na literatura como mostro a Tabela 1 e viu-se que o resfriamento no molde de areia não fez com que a peça tivesse um aumento de dureza e sua solidificação ocorreu com uma taxa de resfriamento baixa.

**Tabela 3.** Dureza da peça

| Dureza Brinell (HB) | |
|---|---|
| **Teste** | **Dureza (HB)** |
| **1** | **73** |
| **2** | **70** |
| **3** | **69** |
| **4** | **78** |
| **5** | **79** |
| **6** | **73** |
| **7** | **72** |
| **8** | **76** |
| **Dureza media** | **73,75** |
| **Erro** | **2,9375** |

Com o ataque de solução Osmond (HCl, $HNO_3$, $HF$, $H_2O$) conseguiu-se ver a formação da zona coquilhada na extremidade da peça onde há pequenos grãos equiaxiais de orientação cristalográfica aleatória junto a interface metal-molde, logo em seguida dar-se a formação da zona colunar em que é composta por grãos alongados e finos que se alinham paralelamente a direção do fluxo de calor, mais adiante e por fim há a zona equiaxial em que está próximo do centro da peça, onde a formação dos grãos se dão de forma aleatória e seu tamanho é maior em relação aos outros grãos formados nas outras zonas. A figura 5 como se dar o crescimento dos grãos durante o processo de solidificação.

**Figura 5**. Macroestrutura da peça

Observando no microscópio óptico a microestrutura ampliada 500x, pode-se ver a matriz formada da peça de alumínio e a nucleação e formação dos grãos se deu pelas moléculas de silício, o tamanho do grão de silício obtido foi de 14,3 µ dando assim as características e propriedades da peça por esse fator. Analisando da extremidade da peça ao interior, notou-se que possui uma granulação mais refinada na extremidade onde a solidificação começa e aumenta até o interior da peça devido a taxa de resfriamento diminuir.

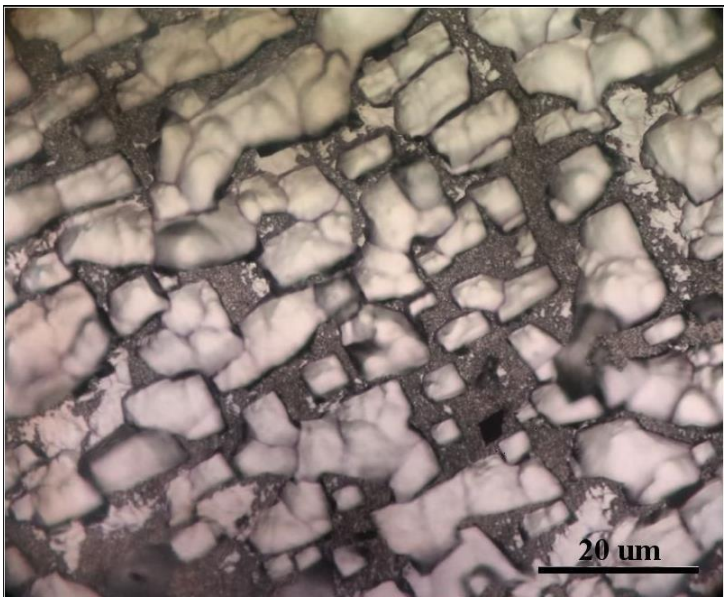



**Figura 6**. Microestrutura ampliada no microscópio óptico 500x

## CONCLUSÃO

Portanto, foi possível analisar o crescimento grosseiros dos grãos nas suas fazes visto na foto da macroestrutura. Analisando a formação granular do material vista na foto da microestrutura em que possui a matriz o alumínio e a formação dos grãos em silício em que o tamanho do grão de silício obtida de 14,3µ. Pode-se ver a zona coquilhada onde se dá o início da solidificação na parede do molde, logo após a zona colunar em é formado por grãos alongados e finos que se alinham paralelamente a direção do fluxo de calor, por último a formação da zona equiaxial formada por grãos equiaxiais e influenciada pelo tempo maior de resfriamento devido está se localizar no núcleo. Viu-se que o resfriamento da peça no molde de areia não influenciou para o aumento da dureza do material e condiz com o encontrado na literatura.

.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus em primeiro lugar, por me conceder saúde e disposição todos os dias. Em segundo minha família por me dar todo apoio e suporte em tudo que me dedico a fazer e agradecer também meus amigos Thiago dos Santos, Rodrigo Miranda, Paulo Araújo, Lucas Lobato, Leandro Moreira e Josué Alves que contribuíram de forma direta e indireta na realização desse trabalho, e aos professores do curso de engenharia mecânica José de Ribamar F. Barros Junior e Adilto Andrade Pereira Cunha.

## REFERÊNCIAS

CALLISTER, William D. Jr; REATHWISCH, David G., “Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução”. LTC 8° edição. Rio de Janeiro, 2013.

CHIAVERINI, Vicente. “Tecnologia Mecânica, Volume II”. 2° ed., McGraw-Hill, São Paulo, 1986.

CHIAVERINI, Vicente. “Tecnologia Mecânica, Volume III”. 2° ed., McGraw-Hill, São Paulo, 1986.

HADIME, Henrique Wantanabe Junior. “Análise da curva de resfriamento da liga de alumínio AA 356”. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012.

TRATHO. Alumínio. Disponivel em: <http://www.tratho.com.br/pdf/Aluminio.pdf>. Acesso em:08/11/2017.

COLPAERT, Hurbertus., 2008, “Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns”. 4. Edição. Editora Edgar Blücher. São Paulo – SP, Brasil.

ASTM E118 – Standard Test Methods for Characterizing Duplex Grain Sizes, ASTM International, 2004.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Declaro que sou responsável por este artigo e todo o conteúdo nele contido.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

(X) Fabricação Mecânica e Materiais

**XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 27 à 31 de agosto de 2018 – Brasília, DF**

# INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO EM SOLDAS GMAW SOB Ar+25%He COM ER-NiCrMo-3

**Lucas Posse e Souza, Thiago Fernando Santiago de Freitas, Ygor Peixoto Leonel e Demostenes Ferreira Filho**
UFG- Universidade Federal de Goiás
Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação, Universidade Federal de Goiás, Av. Universitária, 1488, Bloco: A, Piso 3, Setor Leste Universitário, Goiânia, GO 74605-010, Brasil
lucas_posse_@hotmail.com, thsantiago1@gmail.com, ygorpeixotoleonel@hotmail.com e demostenesferreira@furg.br

**RESUMO:** Um dos importantes fatores a se considerar na soldagem GMAW é a escolha do tipo de arame utilizado. O arame escolhido junto ao gás de proteção utilizado determinará as propriedades físicas e mecânicas da solda. Em conformidade com um arame e gás de proteção satisfatório deve ser empregado parâmetros que resultam em uma solda com as características idealizadas durante o projeto da mesma. O artigo analisa a influência do parâmetro da velocidade de alimentação em soldas do tipo GMAW, sob uma mistura gasosa de Ar+25%He com metal de adição ER-NiCrMo- 3. A influência da velocidade de alimentação é usada para se obter dados acerca da penetração, reforço, largura do cordão de solda, áreas de reforço e penetração e microdureza Vickers. Foi calculado o índice de qualidade Vilarinho (IVcc) para obter-se uma estimativa de como foram as transferências de curto circuito e foi relacionado os índices com os parâmetros observados. Constatou-se que a velocidade de alimentação varia positivamente com o reforço, a área de reforço e largura do cordão, entretanto é indiferente a penetração da solda ou a sua área de penetração. Apresenta uma estabilização da transferência por curto circuito com o aumento da velocidade de alimentação e apresenta um ponto ótimo que gera altos valores de microdureza Vickers.

**Palavras-Chave:** GMAW, Velocidade de alimentação, ERNiCrMo-3

***ABSTRACT:*** *One of the important factors to consider in GMAW welding is the choice of the type of wire used. The chosen wire next to the protection gas used, will determine the physical and mechanical properties of the weld. According to a satisfactory wire and protection gas should be used parameters that result in a weld with the characteristics idealized during the design. The article analyzes the influence of the rate parameter on GMAW welds under a gas mixture of Ar + 25% He with addition metal of ER-NiCrMo-3. The influence of rate is used to obtain data about penetration, reinforcement, weld bead width, reinforcement and penetration areas and Vickers microhardness. The Vilarinho quality index (IVcc) was calculated to obtain an estimate of how the short-circuit transfers were and was related to the relation between the index with the observed parameters. It has been found that the rate varies positively with the reinforcement, the reinforcement area and the width of the cord, however the penetration of the weld or its penetration area is indifferent. It presents a short-circuit transfer stabilization with increasing the rate and presents an optimum point that generates high Vickers microhardness values.*

***Keywords:*** *GMAW, Rate, ERNiCrMo-3*

## INTRODUÇÃO

A soldagem é um processo de união de dois ou mais materiais para fabricação ou recuperação de peças, equipamentos e estruturas. O processo MIG/MAG é um processo metalúrgico de união com fusão, homogêneo, com adição, eletrodo consumível e gás de proteção.

A tensão do arco é um dos parâmetros mais influentes nas características do cordão segundo Fortes, 2004 o aumento da tensão do arco gera um aumento da largura e diminuição da altura ou reforço do cordão de solda além da redução da penetração. Tensões elevadas geram excesso de respingos de solda e mordeduras e tensões baixas implicam em falta de fusão e cordões muitos convexos. Segundo Modenesi (2005), a tensão também afeta a microestrutura.

Segundo Fogliatto (2013), quando se aumenta a distância bico contato peça, o arco elétrico aumenta de comprimento (a tensão elétrica do arco aumenta, aumentando sua resistência elétrica e diminuindo a corrente de soldagem). Como consequência a taxa de fusão do arame diminui, não acompanhando mais a velocidade de alimentação gerando um stickout e retorno do comprimento do arco e da corrente aos valores iniciais. Quanto maior o stickout a corrente tende a ficar um pouco abaixo do valor inicial.

Segundo Machado (1996) a velocidade de alimentação do arame exerce influência significativa no resultado da soldagem tendo influência direta na taxa de fusão do processo. A velocidade de alimentação quando aumentada produz aumento da resposta da altura de reforço.

Segundo Medeiros & Farias (2016), a utilização de tensões intermediarias geraram amostras com maior valor de dureza, enquanto que maiores velocidades de alimentação de arame propiciaram um aumento na dureza dos cordões.

Segundo Wallerstein e*t al.* (2015), uma razão de velocidade de arame sobre a potência da ordem de $1{,}2 \times 10^{-5}\ m/J$, contribui com a estabilidade do processo e fator de forma adequado.

A distância entre bico de contato e a peça (stickout) afeta a corrente de soldagem necessária para fundir o arame a uma dada velocidade de alimentação de arame. Basicamente quando essa distância é aumentada, o aquecimento devido ao efeito joule aumenta e a corrente necessária para fundir o arame é diminuída. Além disso grandes extensões de eletrodo resultam em excesso de metal de solda sendo depositado com baixo calor do arco podendo causar geometria desfavorável e baixa penetração. Ainda assim o aumento da distância do bico contato peça aumenta o arco tornando-o menos estável. A tensão de soldagem está diretamente relacionada ao comprimento do arco e relaciona com a corrente e com a taxa de fusão.

Tratando de avaliação de processos de soldagem, o índice de regularidade Vilarinho (IVcc) é baseado na premissa de que a estabilidade do processo de transferência por curto circuito está ligada com a constância dos tempos em curto circuito e em arco aberto, ou seja, acredita-se que, se os tempos sofram pouca variação tanto em curto-circuito como em arco aberto, o processo está estável. Desta forma, as constâncias nos tempos são medidas por meio do coeficiente de variação, que leva em conta não somente o desvio padrão da amostra, mas também na sua média mostrada na Eq. (1):

$$IVcc = \frac{\sigma t_{cc}}{t_{cc}} + \frac{\sigma t_{ab}}{t_{ab}} \tag{1}$$

Sendo $\sigma t_{cc}$ o desvio padrão da média do tempo de curto circuito; $\sigma t_{cc}$é o desvio padrão da média do tempo de arco aberto, $t_{cc}$ média do tempo de curto circuito; $t_{ab}$a média de tempo de arco aberto.

## METODOLOGIA

Para a realização do experimento, foi utilizada um sistema completamente automatizado, composto por um robô (Motoman HP20D - Yaskawa), para que a habilidade humana não interferisse na qualidade do procedimento. A soldagem foi realizada em uma chapa AISI 1020, utilizando uma fonte multiprocessos (Digiplus A7 – IMC) adaptada especialmente para o sistema MIG/MAG, regulada para operar em tensão constante (CC+) e um sistema tracionador de arame (STA20-2 – IMC). Usou-se o arame-eletrodo AWS A5.14, tal como o gás de proteção Ar+25%He.

Uma análise estrutural também foi realizada com o auxílio de um microscópio de precisão (Discovery V8 – Zeiss) e um durômetro Micro vickers (HM-200 – Mitutoyo).

Com o obtivo de ampliar ao alcance amostral, foram realizados processos com diferentes parâmetros, de tal modo que houve a variação da velocidade de alimentação enquanto a distância bico de contato-peça e a tensão foram mantidas constantes, possibilitando observar a influência da velocidade de alimentação no processo. Esse artifício foi feito três vezes, obtendo-se 9 soldas para posteriores análises. A Tabela 1 indica os parâmetros utilizados.

**Tabela 1.** Parâmetros do procedimento

| Ensaio | Metal de adição | Gás de Proteção | Velocidade de Soldagem [cm/min] | DBCP [mm] | Tensão [V] | Tensão Média [V] | Corrente Média [A] | Corrente RMS [A] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | NiCrMo-3 | Ar+25%He | 25 | 17 | 20 | 19,200 | 127,920 | 148,428 |
| 2 | NiCrMo-3 | Ar+25%He | 25 | 17 | 20 | 19,000 | 160,821 | 184,381 |
| 3 | NiCrMo-3 | Ar+25%He | 25 | 17 | 20 | 22,500 | 164,778 | 231,285 |
| 4 | NiCrMo-3 | Ar+25%He | 25 | 20 | 15 | 39,900 | 77,420 | 151,741 |
| 5 | NiCrMo-3 | Ar+25%He | 25 | 20 | 15 | 32,200 | 112,892 | 181,198 |
| 6 | NiCrMo-3 | Ar+25%He | 25 | 20 | 15 | 24,400 | 147,063 | 206,677 |
| 7 | NiCrMo-3 | Ar+25%He | 25 | 14 | 25 | 23,900 | 142,616 | 155,288 |
| 8 | NiCrMo-3 | Ar+25%He | 25 | 14 | 25 | 24,900 | 180,396 | 195,792 |
| 9 | NiCrMo-3 | Ar+25%He | 25 | 14 | 25 | 24,300 | 217,429 | 241,981 |

Nove cordões de solda foram produzidos onde a velocidade de alimentação variou linearmente de 5 a 10 *m/min* de forma crescente e controlada diretamente pela fonte. Os nove cordões foram cortados com o uso de uma serra fita e posteriormente passaram por diversas etapas de lixamento. Ao final deste, foram atacados quimicamente com nital 5% e então foram conduzidos para o laboratório, onde passaram por duas análises: micrografia e de microdureza Vickers.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o uso do programa Axio, um software especifico do microscópio utilizado, foram adquiridas imagens que possibilitaram observar altura do reforço e penetração, suas respectivas áreas, e o tamanho do cordão de solda. Todos estão apresentados na Tab. 2.

O ensaio de microdureza Vickers foi regulado para um 0,3 *kgf*. A análise foi realizada a partir de cinco medições em diferentes locais da peça, de modo a garantir uma grande amplitude amostral. Os dados foram armazenados, organizados e são analisados ao longo do artigo.

**Tabela 2.** Propriedades dos cordões de solda, segundo análise microestrutural

| Amostra | Área do reforço [mm²] | Reforço [mm] | Área de penetração [mm²] | Penetração [mm] | Largura do cordão [mm] |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 19,655 | 4,055 | 6,515 | 1,85 | 5,705 |
| 2 | 33,243 | 5,056 | 6,033 | 1,893 | 5,947 |
| 3 | 47,590 | 5,693 | 5,200 | 1,417 | 6,883 |
| 4 | 12,065 | 2,652 | 0,000 | 0 | 3,057 |
| 5 | 11,360 | 3,390 | 0,000 | 0 | 3,010 |
| 6 | 27,830 | 5,150 | 0,000 | 0 | 5,970 |
| 7 | 16,067 | 2,843 | 12,463 | 2,393 | 8,310 |
| 8 | 29,763 | 3,787 | 13,090 | 2,387 | 9,913 |
| 9 | 39,160 | 3,980 | 17,660 | 2,977 | 12,127 |

Houve diversos defeitos na análise microestrutural. Nas amostras 4,5 e 6 não houve penetração por conta dos parâmetros impostos e o aspecto do cordão se tornou irregular. Enquanto na amostra 1 e 8 houve formação de bolha no cordão de base, um defeito volumétrico que piora a qualidade da solda.

Relacionando os parâmetros da Tab. 1 com os da Tab. 2, foram construídos gráficos para avaliar a influência da velocidade de alimentação no processo e determinar os seus impactos.

A Figura 1 expõe a influência da velocidade de alimentação com relação a área do reforço. Pode se observar que quanto maior a velocidade de alimentação, maior a área de reforço em todos os casos.

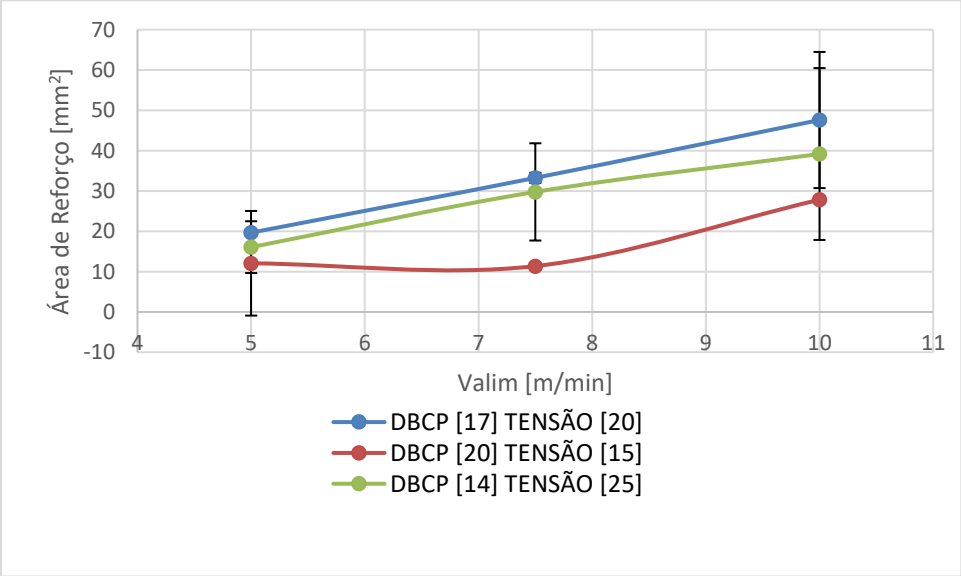



**Figura 1** - Área de Reforço

De maneira análoga, a Fig. (2) apresenta a influência da velocidade de alimentação sobre o reforço. Pode se observar que quanto maior a velocidade de alimentação maior o reforço, porém para uma DBCP 14 *mm* e uma tensão 25 *V*, ela tende a estabilizar seu crescimento a partir da $V_{alim}$ igual a *7,5 m/min*.

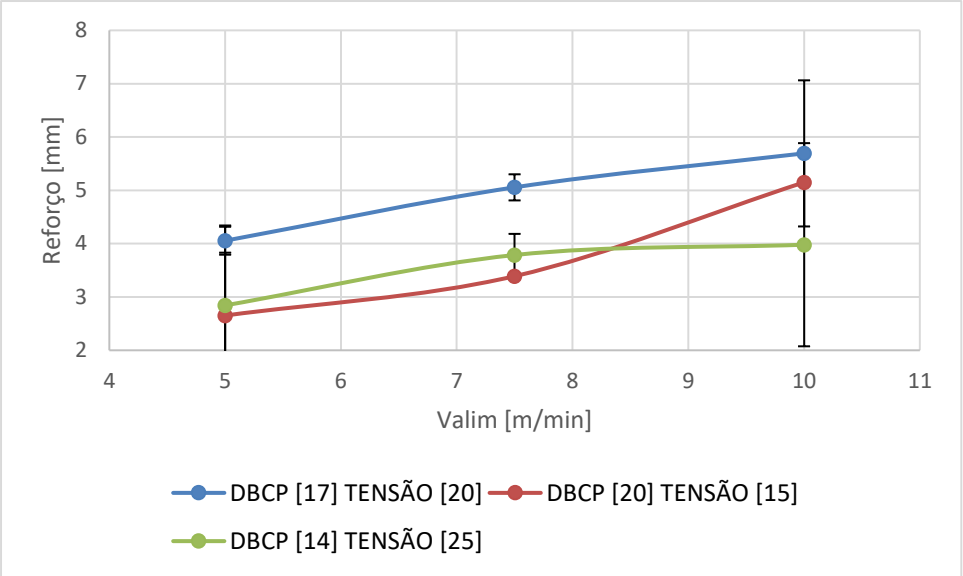



**Figura 2** - Reforço

A Figura 3 mostra a influência da velocidade de alimentação sobre a área de penetração. Pode se observar que quanto maior a velocidade de alimentação, maior a área de reforço quando os parâmetros são DBCP igual 14 *mm* e uma tensão de 25 *V*, porém decresce ligeiramente para uma DBCP de 17 *mm* e tensão de 20 *V*, praticamente a área permanece constante. Para um DBCP 20 mm e tensão de 15 *V*, não há área de penetração.

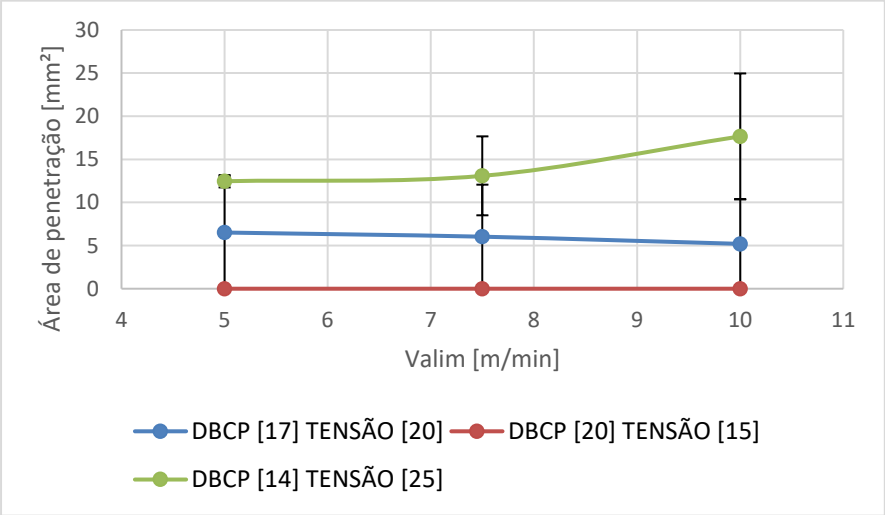



**Figura 3** - Área de Penetração

De maneira análoga, a Figura 4 revela a influência da velocidade de alimentação com relação à penetração. Pode se observar que o comportamento é similar ao observado Fig. (3), visto que a área de penetração depende diretamente da penetração.

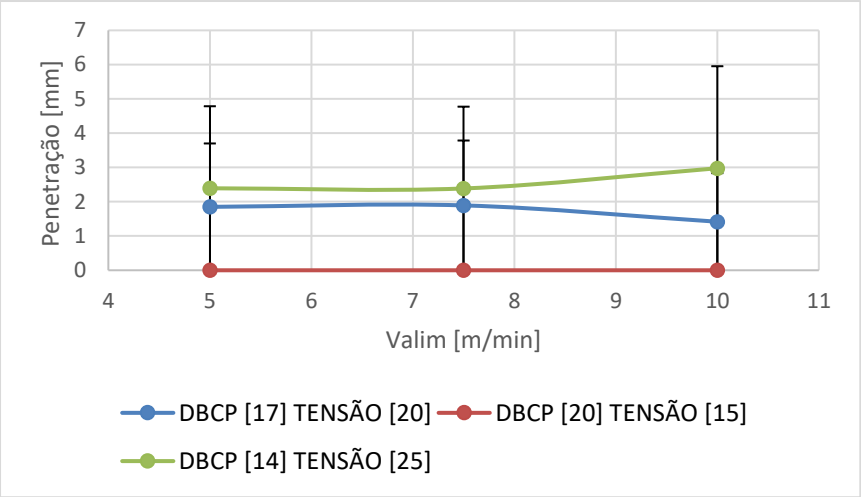



**Figura 4** - Penetração

A Figura 5 demonstra a influência da velocidade de alimentação com relação à largura de cordão. É possível observar que quanto maior a velocidade de alimentação, maior a largura do cordão em todos os casos. Este parâmetro é resultado, principalmente, do aumento da velocidade de alimentação que gera uma menor penetração, como o metal de adição não penetra sobre o material de base, tem-se o aumento da largura do cordão de solda.

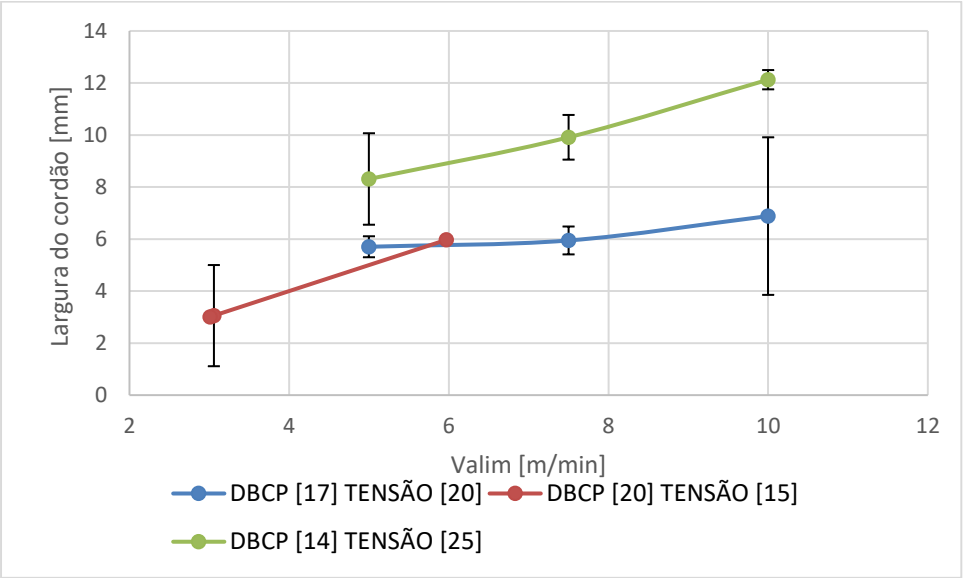



**Figura 5** - Largura de cordão

A Figura 6 demonstra a influência da velocidade de alimentação com relação à microdureza. Pode-se observar que em todos os casos há uma flutuação do valor, porém quando a DBCP é 17 *mm* e a tensão é 20 *V*, a solda passa a ter um comportamento relativamente constante, a partir de 7,5 *m/min*, enquanto as outras séries apresentam queda de microdureza. De acordo com a Figura 7 é possível afirmar que para cada parâmetro há uma velocidade em que a sua dureza é superior as outras, destaca-se ainda o valor significativo da dureza para um DBCP significativo (20 *mm*), uma tensão baixa (15 *V*) e uma velocidade de alimentação moderada (7,5 *m/min*). Os resultados encontrados pelo ensaio de dureza são consistentes, segundo trabalho recente de Trajano *et al* (2018). Com valor médio de 238,5 Hv05.

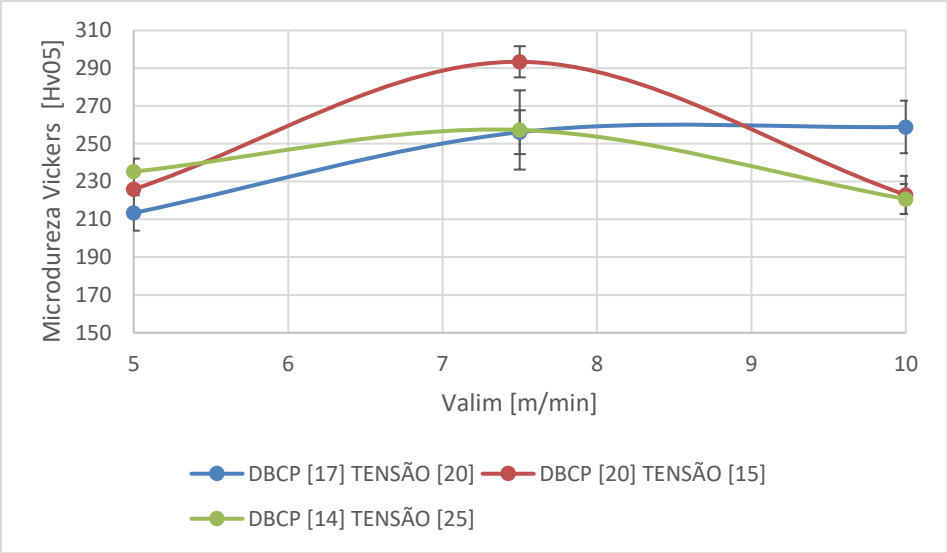



**Figura 6** - Microdureza Vickers

Analisando as soldas através do Índice de Regularidade Vilarinho (IVcc) é possível relacionar os valores estimados do índice com parâmetros já analisados. O índice avalia o comportamento da transferência por curto circuito ao longo do tempo, em que a transferência é mais estável a medida que o índice assume valores próximos de 0, ou seja, os valores do tempo de arco aberto e o tempo de curto circuito apresentam baixas dispersões. A Figura 7 apresenta o gráfico do comportamento do $IV_{cc}$ com os ensaios realizados.

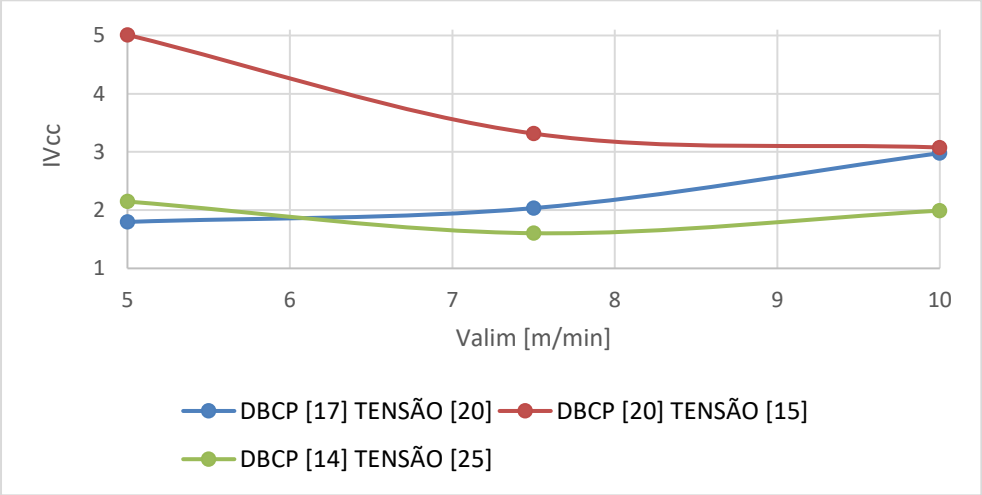



**Figura 7** – Índice de Regularidade Vilarinho (IVcc)

Para o DBCP de 20 *mm* e a tensão de 15 *V* ao longo da variação de velocidade o índice apresentou valores muito altos, afirma-se então que a transferência por curto circuito não foi eficiente, o que pode ser comprovado analisando as Fig. (3) e (4) que mostram que esta série não possui nenhuma penetração ou área de penetração. Ainda em relação a série de dados com DBCP de 20 mm, nota-se que com o aumento da velocidade de alimentação provocou-se uma estabilidade na transferência de curto circuito. Tal comportamento também é visto para a série que possui a tensão de 25 volts, esse comportamento é esperado já que com uma velocidade de alimentação maior ocasionou-se uma corrente maior durante o processo de transferência fazendo com que ocorresse o curto circuito mais rapidamente, gerando de certa forma uma espécie de estabilidade em relação aos tempos de arco aberto e curto circuito mesmo que para uma variação brusca de energia em um espaço de tempo menor gerou-se muitos respingos na solda perdendo-se material.

O melhor ensaio presente no gráfico seria o ensaio feito com uma DBCP de 14 *mm* e uma tensão de 25 *V*, para essa série de dados notou-se um índice relativamente constante para a variação de velocidade de alimentação, uma microdureza Vickers variando positivamente até 7,5 *m/min* e depois decaindo; a largura do cordão, a penetração, a área de penetração e a área de reforço variam positivamente com a velocidade de alimentação e em geral apresentam melhor comportamento

que as outras séries de dados analisadas; e o reforço permaneceu constante a partir da velocidade de alimentação com 7,5 *m/min*.

Destaca-se ainda a falta de transferências por curto circuito realmente estáveis, não houve nenhuma próxima de pelo menos a unidade. Esse comportamento é resultado do intervalo de tempo em que o índice foi calculado, em que foi padronizado a espaço de tempo para todas as soldas independente da forma de variação no trecho.

A velocidade de alimentação gerou transferência por curto circuito, mas estável com valores altos, entretanto provocou maior taxa de respingos sobre a solda ao mesmo tempo que o reforço possui a tendência de aumentar e a penetração desaparecer podendo chegar a uma penetração nula.

Mesmo com a tentativa da não variação dos parâmetros, eles influenciaram nos resultados, como por exemplo a Fig. (4) em que a largura do cordão é praticamente igual a mesma para a velocidade de alimentação anterior. O metal de adição pode ter perturbado a transferência por curto circuito, ou apenas que o contato do metal de adição com a mistura gasosa provocou instabilidade na transferência inteira ou ainda que nenhum parâmetro foi excelente para o transporte de material

## CONCLUSÃO

Com base nos ensaios realizados concluiu-se que o aumento da velocidade de alimentação para a soldagem GMAW pelo método de transferência por curto circuito sob Ar+25%He com ER-NiCrMo-3:

- Gera um aumento na área de reforço da solda;
- Gera um aumento no reforço da solda;
- Não influencia consideravelmente a penetração da solda;
- Não influencia consideravelmente a área de penetração da solda;
- Gera um aumento na largura do cordão de solda;
- Gera um decréscimo no IVcc, exceto para a DBCP igual a 17 *mm*;

Conclui-se ainda que a velocidade de alimentação que apresenta maior microdureza de Vickers será a de 7,5 *m/min* a microdureza antes desse ponto varia positivamente com a velocidade de alimentação e a partir desse ponto varia negativamente.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Goiás (UFG), em especial a Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e da Computação (EMC) pelo suporte infraestrutural e de consumíveis para a realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

FOGLIATTO,A.A.B,2013,"Influência dos Parâmetros do Processo MIG/MAG com Curto-Circuito Controlado Sobre a Geometria do Cordão de Solda",pp. 1-163 UFRS.

MACHADO,I.G,1996"Soldagem e Tecnicas Conexas; Processos",Porto Alegre.

MEDEIROS,G.S.N,PUKASIEIWCZ,A.G.M,2016,"Análise do Processo de Deposição FCAW de uma Liga de Carboneto de Cromo Aplicando o Planejamento Experimental Central Composite Circumscribed',UTFPR.

MODENESI, P.J, VILLANI, P.M, QUEIROZ, A.B,2005,"Soldagem – Fundamentos e Tecnologia, UFMG.

TRAJANO.A.O *et al.*2018,"Influência do Gás de Proteção, Tecimento e Pré-Aquecimento na Dureza de Revestimentos de Inconel 625 Depositados por GMAW em um Substrato de Aço Carbono',XLIII CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem.

WALLERSTEIN,D.F. *et al*,2015,"Influência da Posição e dos Parâmetros de Soldagem na Soldagem TIG Orbital Aplicada a Tubulações de Aço Baixo Carbono ",UFSC.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção 'área de conhecimento do trabalho'.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(X) Fabricação Mecânica e Materiais

( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 27 à 31 de agosto de 2018 – Brasília, DF

# INFLUÊNCIA DO ENSAIO METALÚRGICO DE TÊMPERA NA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS

**Nome do(s) autor(es) Rodrigo da Silva Miranda, Adilto Pereira Andrade Cunha**
Instituição: Universidade Estadual do Maranhão
Endereço Completo da Instituição: Cidade Universitária Paulo VI, Av. Lourenço Vieira da Silva, n 1000 – Bairro: Jardim São Cristovão CEP 65055-310 – São Luís/MA.
E-mail para correspondência: rodrigo.sv.miranda@gmail.com, adiltocunha08@gmail.com

**RESUMO:** Esse trabalho trata dos efeitos dos tratamentos térmicos, com ênfase no tratamento de têmpera que será analisado via ensaio Jominy, e da variação do elemento de liga carbono, sobre a microestrutura e propriedades mecânicas dos aços para aplicação. Serão realizados ensaios mecânicos e tratamento térmico em corpos de prova, possuindo baixo e médio teor de carbono. A verificação da evolução de suas propriedades físicas, serão acompanhadas através das análises microscópicas, que serão executadas antes e depois do tratamento térmico, onde terão o objetivo de caracterizar cada fase microestrutural no que diz respeito ao tamanho do grão, porcentagem volumétrica do constituinte e homogeneidade, onde serão mensuradas a partir da microscopia óptica (MO), para que se tenha uma relação concreta entre características microestruturais com as propriedades mecânicas obtidas.

**Palavras-Chave:** microestrutura, propriedades mecânicas, aços

***ABSTRACT:*** *This work deals with the effects of the heat treatments, with emphasis on the tempering treatment that will be analyzed by Jominy test, and the variation of the carbon alloying element, on the microstructure and mechanical properties of the steels for application. Mechanical tests and heat treatment will be carried out on test bodies, with low and medium carbon content. The verification of the evolution of their physical properties will be monitored through the microscopic analysis, which will be performed before and after the heat treatment, where they will have the objective of characterizing each microstructural phase with respect to grain size, constituent volumetric percentage and homogeneity , where they will be measured from optical microscopy (MO), so that a concrete relation between microstructural characteristics and mechanical properties can be obtained.*

***Keywords:*** *microstructure, mechanical properties, steels*

## INTRODUÇÃO

Desde a Revolução Industrial o aço vem sendo um dos materiais mais empregados nas diversas aplicações de engenharia (CHIAVERINE, 1988), o motivo desse fato é que o mesmo possui um alto grau de versatilidade, podendo ser: altamente resistente a esforços, bastante rígido, possuir alta dureza (SEIDEL, 2016), suportar altas cargas de impacto e poder ser deformado com facilidade, dependendo das condições de trabalho a qual foi empregado. Com isso, este trabalho visa analisar a capacidade de temperabilidade do aço e a variação da dureza a uma determinada profundidade específica do material.

## METODOLOGIA

### Procedimento experimental

A Figura 1 mostra as etapas do procedimento experimental usado neste trabalho.

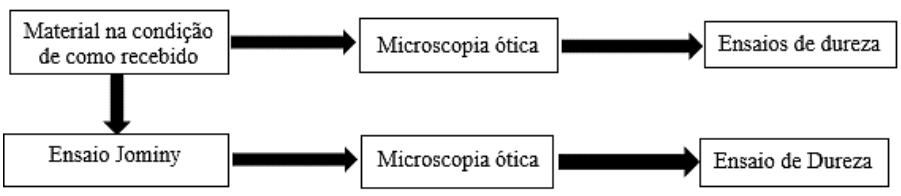



**Figura 1**: Fluxograma do procedimento experimental.

**Descrição dos aços**

Os corpos de prova utilizados nesse trabalho foram confeccionados a parti de tarugos de aços de baixo e médio carbono (SAE 1020 e SAE 1045), Fig. 2, com composição conforme descrito na Tab.1.

**Figura 2**: Barras cilíndricas de aço 1020 e 1045.

**Tabela 1** – Composição química dos corpos de prova.

| Aço | %C | Mn | %P,máx | %S,máx |
|---|---|---|---|---|
| SAE 1020 | 0,18−0,23 | 0,30−0,60 | 0,03 | 0,05 |
| SAE 1045 | 0,43−0,50 | 0,60−0,90 | 0,04 | 0,05 |

**Análise microestrutural**

Na análise microestrutural as amostras (Fig. 3) foram lixadas de acordo com os procedimentos usuais (COLPAERT, 2008), com a granulometria variando de 100 a 1200, em seguida, polidas com suspensão em alumina de 1µm. As microestruturas foram reveladas e atacadas por imersão em Nital 2% (solução de 98% de álcool etílico e 2% de ácido nítrico) no intervalo de 11 segundos e, após o ataque, as microestruturas foram fotografadas por microscopia ótica.

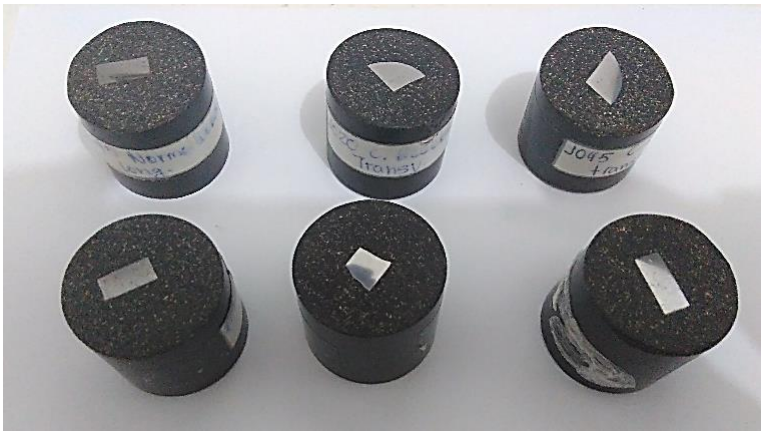


**Figura 3**: Algumas amostras metalográficas lixadas e polidas prontas para o ataque químico.

**Metalografia quantitativa**

A fração volumétrica das fases presentes para cada aço e o tamanho de grão (NEIS, 2009) são medidos em imagens já fotografadas dos processos metalográficos por meio do contraste de cores (DIAS, 2008), conforme a norma ASTM – 1382, através do Software Image J. Esse programa é dedicado a análise de imagens, com alvo na área médica,

mas que apresenta uma gama de funções para o uso metalográfico. Com isso, as operações envolvidas na análise, são realizadas de maneira muito mais eficiente com o uso da máquina, e é minimizado a necessidade de intervenções humanas.

**Ensaio Jominy**

O Ensaio Jominy foi usado para medir a temperabilidade do material. Essa propriedade determina a distribuição da dureza ao longo de um corpo de prova cuja extremidade está sujeita a uma taxa de resfriamento (REBECHI, 2011), tal propriedade também é entendida como a capacidade do material formar martensita durante a têmpera. Os procedimentos foram executados conforme a norma ASTM A255 para análise da curva de temperabilidade (Dureza em função da DER (Distancia da Extremidade Resfriada) do material. Os procedimentos do ensaio são (Fig. 4):

- Normalização prévia do material para corrigir e garantir as devidas características de endurecimento;
- Aquecimento dos corpos de prova em um forno que está com a temperatura de austenitização de 925 °C (JACOT, 1998) e mantê-lo a essa temperatura durante 30 ou até 35 minutos;
- Remover do forno e posiciona-los na aparelhagem de ensaio em um intervalo de tempo menor que 5 segundos, submetendo-os por 10 min a um jato de água cuja temperatura esteja no intervalo de 5 a 30 °C;
- Após o completo resfriamento, duas superfícies planas, $180^o$ uma da outra, foram lixadas até a profundidade mínima de 0,38mm ao longo do comprimento total do corpo de prova, para retirar a média das medidas de dureza em Rockwell C;
- A amostra é deitada sobre um de seus planos em um suporte, e em seguida, uma carga do testador Rockwell de 310kgf é submetida por uma ponta esférica de metal duro de 1/4, penetra na amostra. As leituras são feitas 1/16 pol para os primeiros 16 passos e 18, 22, 24, 28 e 32 avos de uma polegada;
- Os resultados dos testes são plotados em um gráfico, onde o eixo vertical representa a dureza em RC e o horizontal a distância da extremidade resfriada.

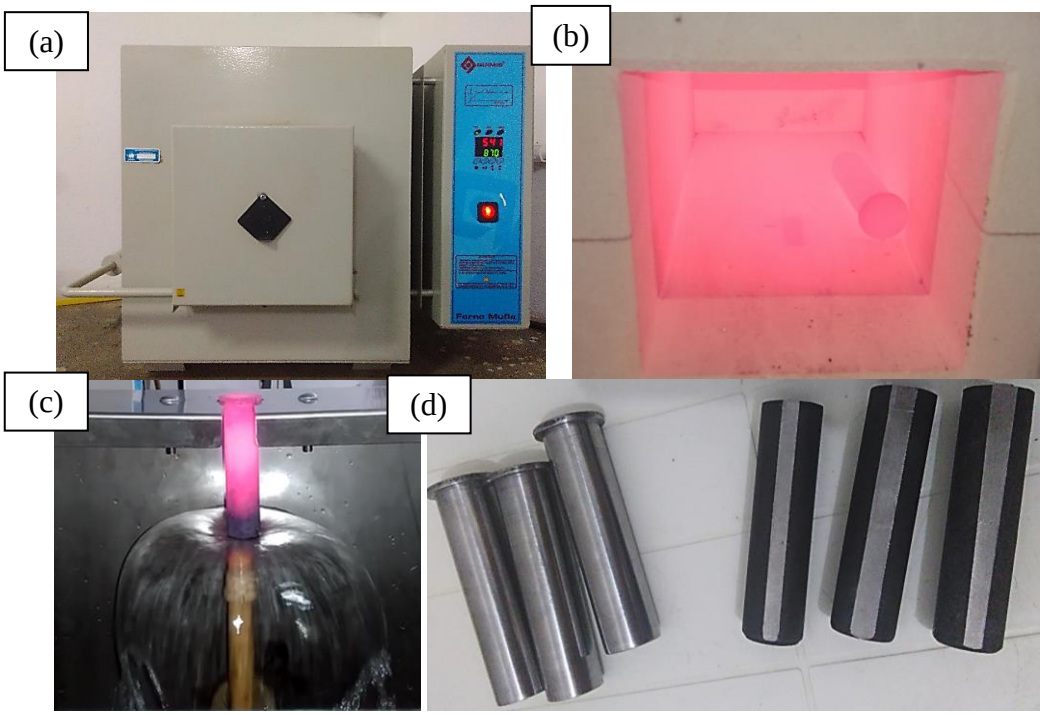



**Figura 4**: Sequência do ensaio Jominy. (a) Forno tipo Mufla utilizados nos tratamentos térmicos;(b) Corpo de prova sendo austenitizado para execução do ensaio de temperabilidade; (c) Corpo de prova sendo arrefecido. (d) A esquerda da imagem apresenta o corpo de prova antes do ensaio, e a direita o mesmo depois do ensaio, com o plano retificado ao longo da extensão para posterior ensaio de dureza.

**Ensaio de Dureza Rockwell**

Os ensaios de dureza foram realizados conforme a norma ASTM E18, Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials. O ensaio é baseado na profundidade de penetração (Fig. 5) de uma ponta sobre o

material, quando este é submetido a uma carga nominal (SOUZA, 1982), proveniente da soma de uma pré-carga e uma carga maior (após a recuperação elástica devido a retirada da carga menor).

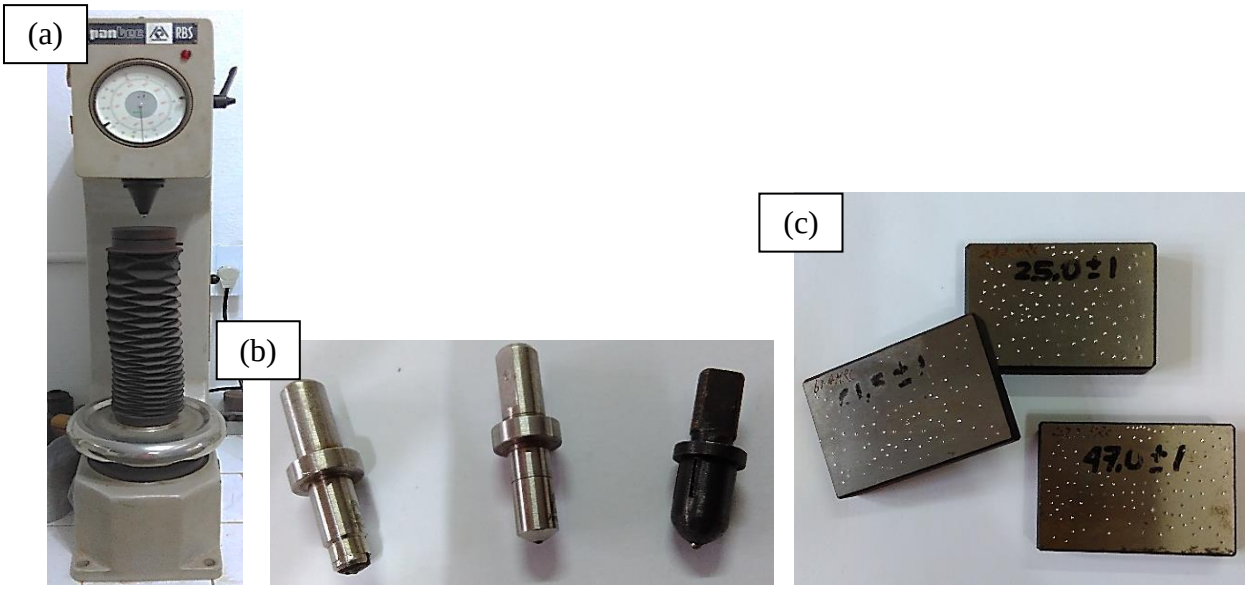



**Figura 5**: Equipamento do ensaio de dureza. (a) Durômetro PANTEC, modelo RBS-M; (b)endentadores; (c) corpos de prova padronizados para aferição da máquina.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Feita a análise microestrutural de acordo com a Fig. 6, para os dois materiais como recebidos, a estrutura apresenta um grão de formato equiaxial; em relação a fração volumétrica de perlita (Fig. 7), o SAE 1020 apresentou um maior percentual de perlita do que o SAE 1045, mas a resistência ao desgaste (Fig. 8) do SAE 1045 apresentou-se maior que o SAE 1020.

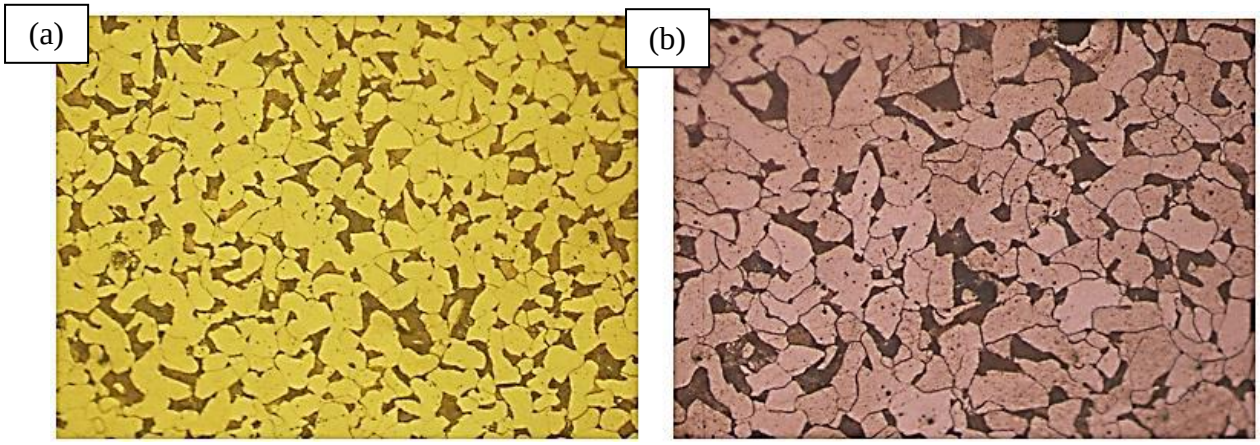



**Figura 6**: Microestruturas da ferrita e perlita sob a ampliação de 300X. (a) Aço SAE 1020; (b) Aço SAE 1045.

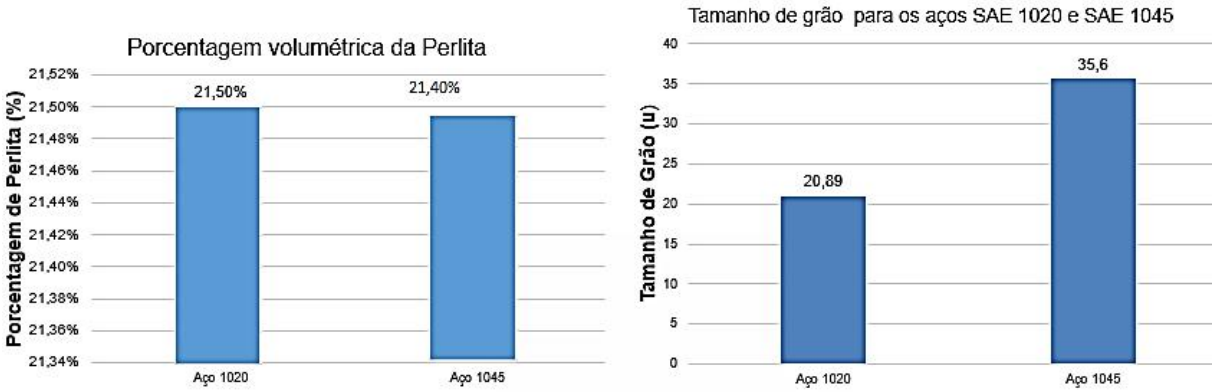



**Figura 7**: Propriedades metalúrgicas dos aços na condição de recebidos.

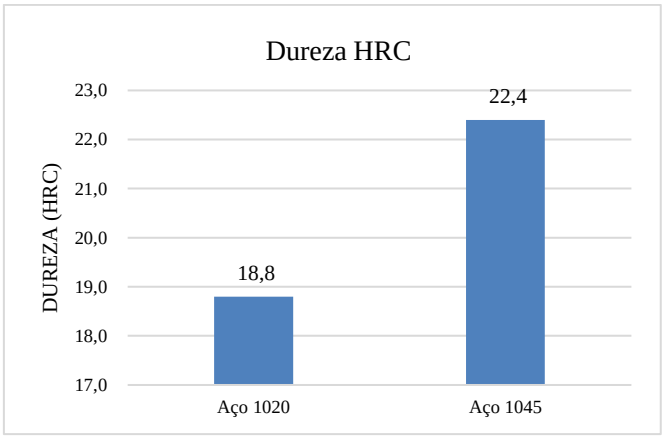



**Figura 8**: Propriedades mecânicas de dureza dos aços na condição de recebidos.

A seguir são apresentados na Fig. 9 as curvas de temperabilidade Jominy para cada material. As curvas são obtidas a partir dos valores de Dureza HRC versus Distância Jominy medidos nas amostras ensaiadas.

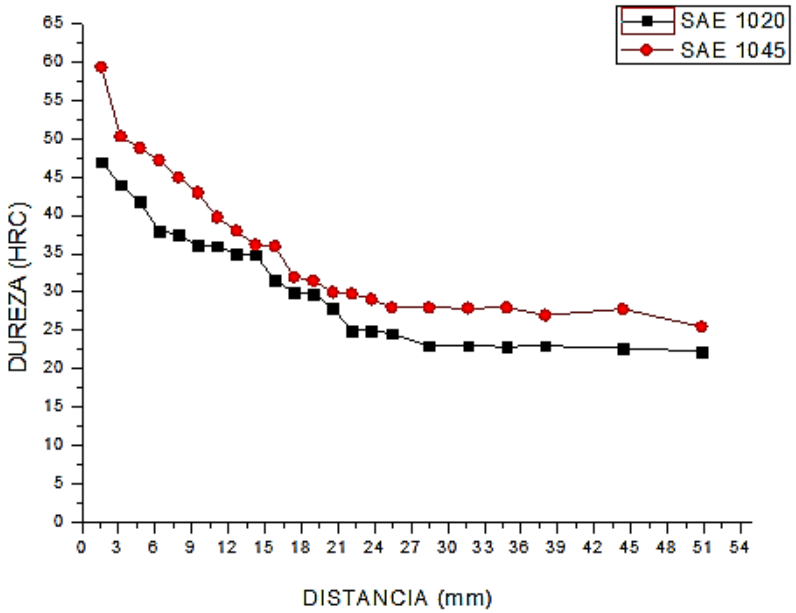
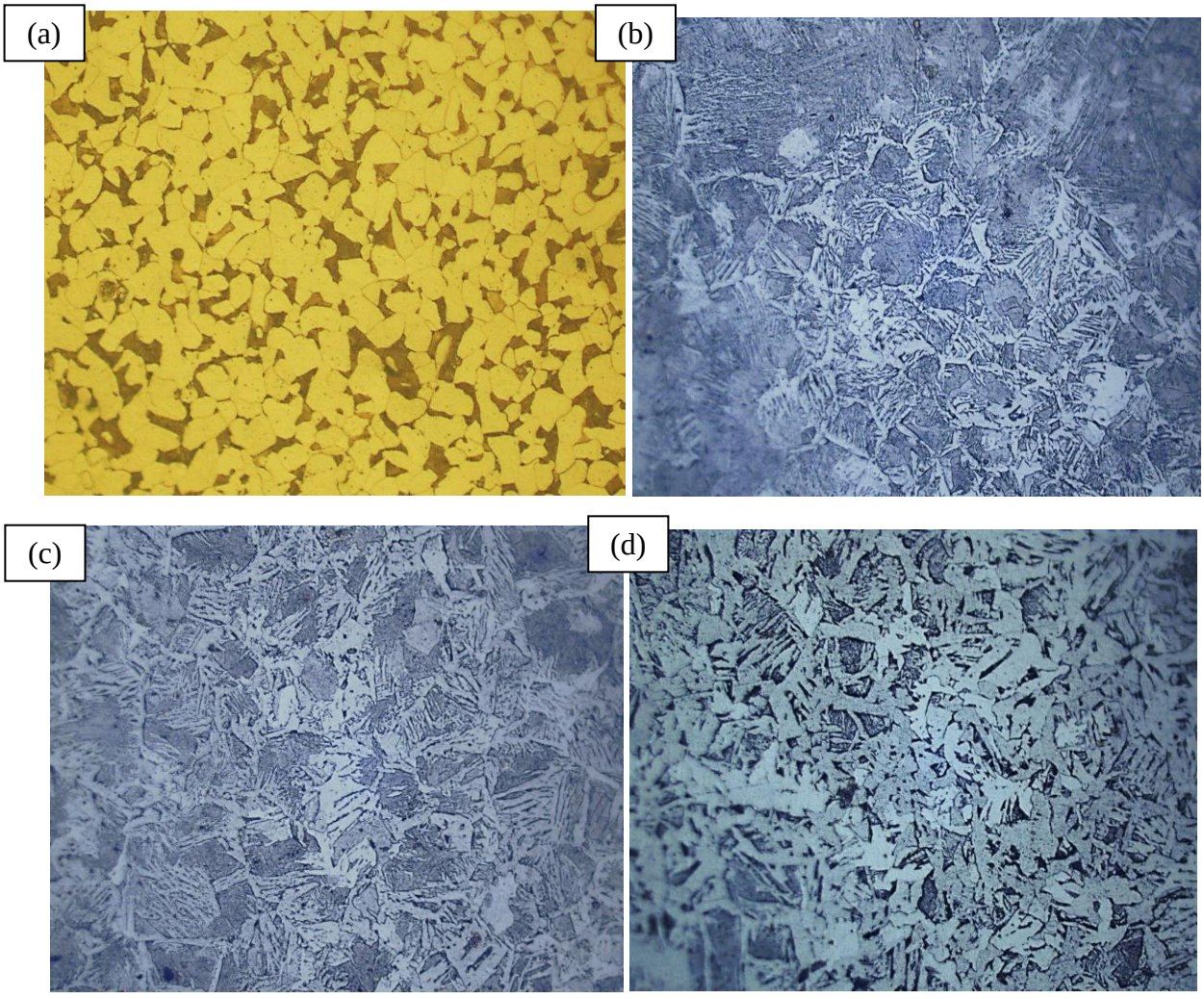



**Figura 9**: Curvas de temperabilidade Jominy para os aços: SAE 1020 e SAE 1045.

Com a análise nas duas curvas, é observado que o aço 1045 possui maior grau de temperabilidade que o 1020, que é a capacidade do endurecimento pela decomposição da austenita em martensita. O motivo desse resultado é que a

curva TTT do aço 1045 é mais deslocada para a direita por causa da maior quantidade do elemento de liga carbono, logo isso acaba por facilitar a formação da martensita para a taxa de resfriamento imposta. Os dois materiais apresentaram o gradiente de dureza desde a posição onde a taxa de resfriamento foi mais severa a região onde foi mais branda, que para o aço 1020 e 1045 foram respectivamente 47 e 59,4 HRC, resultando em uma variação significativa de 12,4 pontos na escala HRC. Para todos os pontos medidos no corpo de prova, o aço 1045 apresentou maior dureza que o 1020. Depois da distância de 30 mm desde a base resfriada, os dois materiais apresentaram somente pequenas variações de dureza gerando uma estabilização desta propriedade mecânica, que para o aço 1020 foi em média de 23 HRC e para o 1045 foi 27 HRC. Outro resultado importante é que para as posições intermediárias entre 15 e 20 mm, com a correspondente taxa de resfriamento imposta, a dureza dos materiais foram aproximadas.

As microestruturas ao longo dos corpos de prova Jominy de ambos materiais (Fig.10 e Fig. 11) apresentaram uma distribuição percentual da martensita decrescente com o distanciamento da base, apresentando um percentual significativo somente em 3mm de profundidade para o SAE 1020, já para o SAE 1045 essa distribuição é abundante até os 5mm. Tais características garantem boa resistência ao desgaste e a fadiga para peças que trabalham em contato e quando são submetidos a esforços cíclicos e oscilantes. Para ambos os materiais, a medida que a profundidade cresce, a estrutura vai perdendo a característica agulhar da martensita, e vai dando lugar para a normalizada com um grão equiaxial e completa distribuição da perlita, que garantem uma boa tenacidade para peças que são submetidas a esforços de impacto.



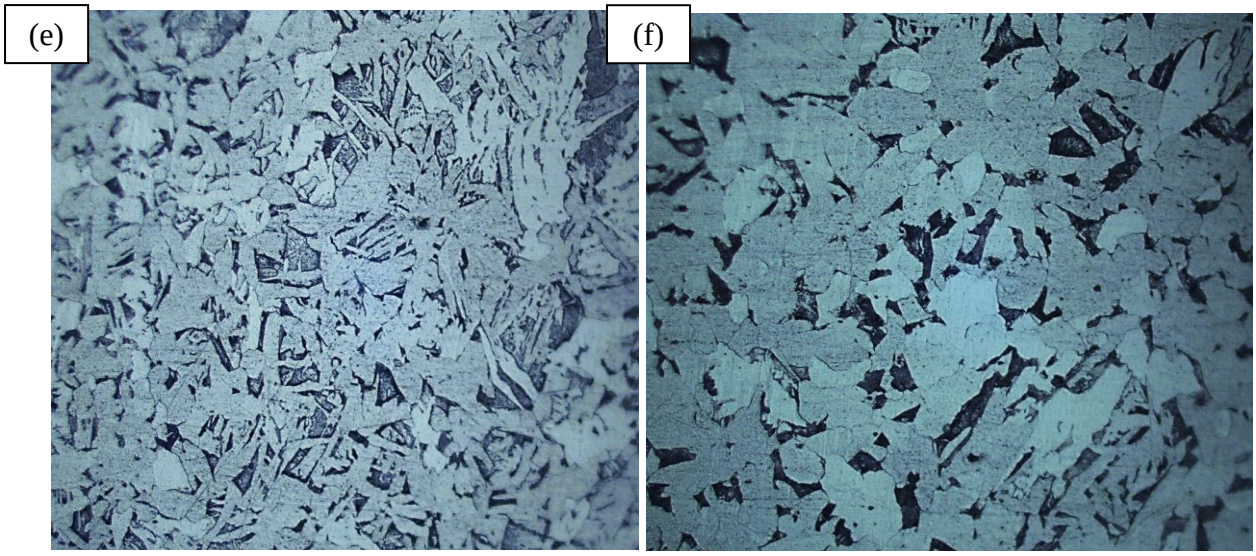
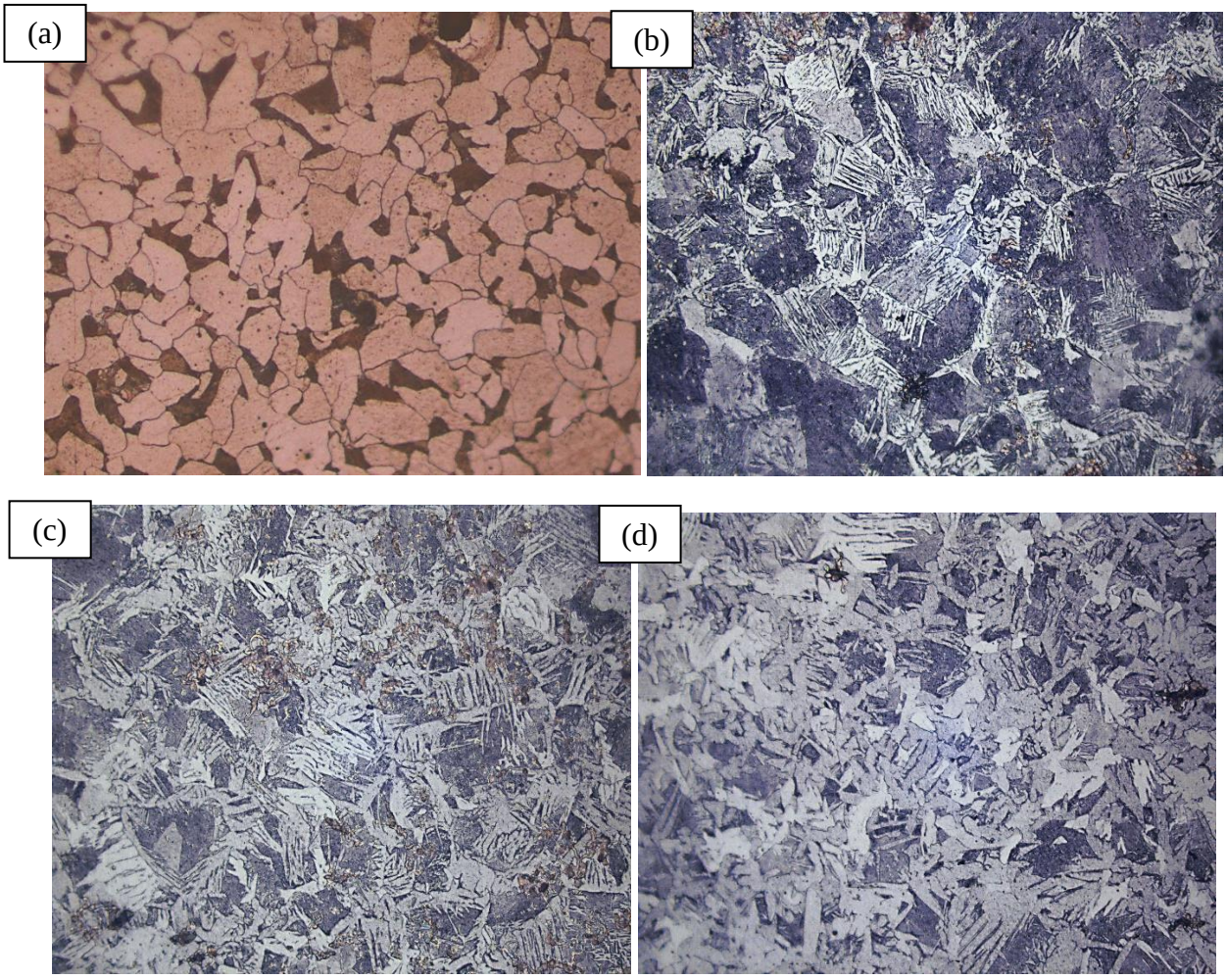



**Figura 10**: Microestruturas do CP Jominy do aço SAE 1020 para diferentes distâncias da base resfriada sob a ampliação de 750X. (a) Material sem tratamento térmico; (b) 3mm; (c) 5mm; (d) 10mm; (e) 15mm; (f) 20 mm.



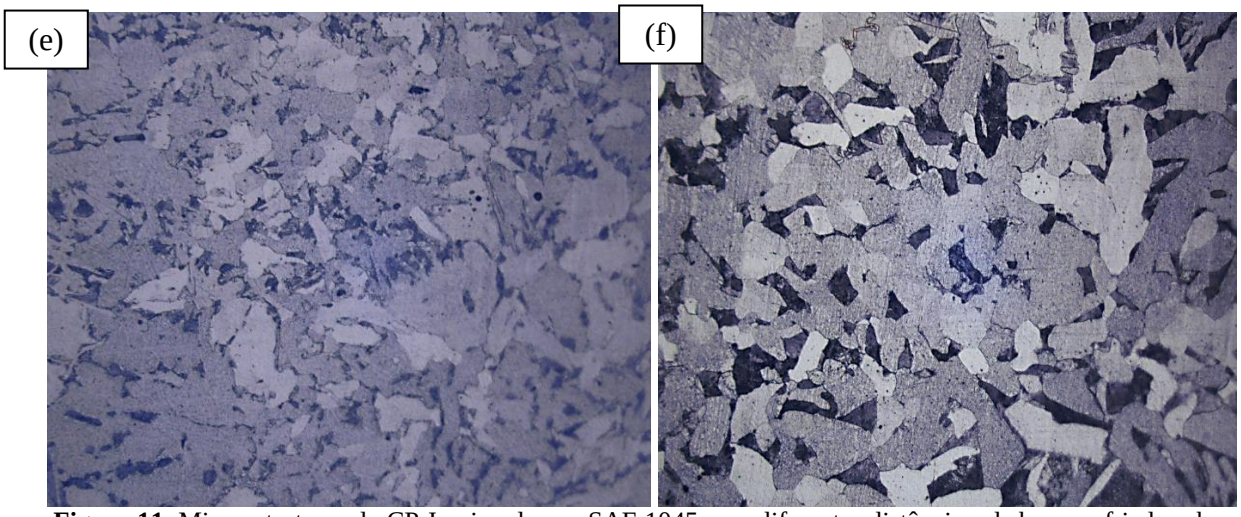



**Figura 11**: Microestruturas do CP Jominy do aço SAE 1045 para diferentes distâncias da base resfriada sob a ampliação de 750X. (a) Material sem tratamento térmico; (b) 3mm; (c) 5mm; (d) 10mm; (e) 15mm; (f) 20 mm.

## CONCLUSÃO

O ensaio de temperabilidade Jominy demostrou que com o aumento do teor de carbono na liga é possível elevar a resistência ao desgaste e a tenacidade do material de forma significativa, e ter um controle apurado dessas propriedades numa profundida específica do material. Inicialmente, o aço SAE 1020 e o SAE 1045 apresentaram uma dureza de 18,8 e 22,4 HRC respectivamente, e com o teste foi possível verificar que na região do subsídio arrefecido foi possível obter um salto nesta propriedade para 47 e 60HRC. Quanto às microestruturas, o SAE 1020 apresentou a presença da fase bainítica e da perlta em quantidade contínua pouco depois da amostra de teste Jominy ea porcentagem volumétrica da fase martensítica logo caiu ainda mais à medida que penetrou no material. Para SAE 1045, uma boa porcentagem da fase martensítica poderia ser mantida para uma maior profundidade no material com presença de bainita e perlita.

## AGRADECIMENTOS

À ***FAPEMA*** **-** Fundação de Amparo à Pesquisa e Desenvolvimento Científico do Maranhão***, que concedeu a bolsa e*** pelo seu importante investimento na pesquisa, à UEMA – Universidade Estadual do Maranhão, pela disponibilidade de seus laboratórios.

## REFERÊNCIAS

ASTM A255, Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel, 2010.
ASTM E112 – 96 (2004) Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, ASTM International, 2004.
ASTM–1382(2004) **S**tandard Test Methods for Determining Average Grain Size Using Semiautomatic and Automatic
ASTM E118 – Standard Test Methods for Characterizing Duplex Grain Sizes, ASTM International, 2004.
CHIAVERINE, V., Aços e Ferros Fundidos, 6ª edição, Associação Brasileira de Metais (ABM), São Paulo, 1988.
COLPAERT, Hurbertus., 2008, "Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns". 4. Edição. Editora Edgar Blücher. São Paulo – SP, Brasil.
DIAS, Felipe da Cruz. Uso do software ImageJ para análise quantitativa de imagens de microestruturas de materiais. 2008. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais na Área de Concentração em Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
JACOT, A. et al. Modelling of reaustenitization from the perlite structure in steel. ***Acta Metallurgical.*** v.46, p.3949-3962, 1998.
NEIS, Alexandro Edigio. **Determinação de tamanho de grão via software para análise de imagem e comparação com método manual**. 2009. 9 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecâica) - Universidade do Vale Do Rio Dos Sinos.
REBECHI, João Guilherme**. Correlações numéricas entre taxas de resfriamento, micro-estruturas e propriedades mecânicas para o tratamento térmico do aço AISI/SAE 41**40. 2011. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas e de Materiais na Área de Concentração de Processos de Fabricação de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
SOUZA, S. A., Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos. Editora Edgard Blucher. 1982.

SEIDEL , L. G. (01 de 06 de 2016). *TEMPERABILIDADE DOS AÇOS 1020, 1045 E 4140*. Fonte: webartigos.com.br: https://www.webartigos.com/artigos/temperabilidade-dos-acos-1020-1045-e-4140/143091

**DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE**

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

**ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO**

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(X) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

**XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 27 a 31 de agosto de 2018 – Brasília, DF.**

# INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE E A GEOMETRIA DA FERRAMENTA SOBRE POTÊNCIA, FORMAÇÃO DO CAVACO E GRAU DE RECALQUE NA USINAGEM DE LIGAS DE ALUMÍNIO

**Guilherme Agues Emerick**[1]
guilherme_aguese@hotmail.com

**Jordan Deambrosio Cussuol**[1]
jordancussuol@live.com

**Matheus Alves Lima**[1]
matheus13.limma@gmail.com

**Mário Cezar dos Santos Júnior**[1]
mcezarjrs@gmail.com

[1]Instituto Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Mecânica,
Rod. BR 101 Norte, km 58, Litorâneo, São Mateus, Espírito Santo, Brasil.

**RESUMO:** O processo de usinagem envolve a combinação de vários fatores. Esses, por sua vez, influenciadores no tipo e forma de cavaco formado. Dentre alguns desses fatores, podem-se citar a profundidade de corte (ap), o avanço (f), a velocidade de corte (Vc) e o ângulo de saída da ferramenta utilizada (A). Esses parâmetros afetam as áreas e as tensões de cisalhamento nos planos primário e secundário. Visando a verificação desses parâmetros de corte na formação do cavaco na usinagem de ligas de alumínio, utilizou-se um planejamento fatorial 2k nos experimentos em diferentes condições, coletando os cavacos formados e os dados de potência para cada experimento. Os resultados mostraram a ótima concordância da influência de cada parâmetro na forma do cavaco, no grau de recalque e potência desenvolvida dos resultados obtidos experimentalmente com a teoria, além da ótima correlação estatística do modelo matemático utilizado com os resultados.

**Palavras-Chave:** Torneamento, Parâmetros de corte, Ligas de alumínio.

## INTRODUÇÃO

O torneamento destina-se à obtenção de superfícies em revolução com auxílio de uma ferramenta de corte, que se desloca paralelamente ao eixo da peça, durante a rotação em torno de seu eixo (Dos Santos, 2003).

Segundo Narahari *et al.* (1999), a usinabilidade reflete na característica de remoção do material durante o processo de usinagem. Nesse processo, dá-se o nome de cavaco ao material removido, o qual depende de uma combinação de fatores para a sua formação, dentre eles o tipo de material e as condições de corte (Júnior, 2012). Os cavacos formados podem ser de duas maneiras, quanto à forma e ao tipo. Em relação ao tipo de cavaco, esses podem ser contínuos, parcialmente contínuos, descontínuos ou segmentados. Quanto à sua forma, são classificados como: em fita, espiral, helicoidal e em lascas ou pedaços (Da Silva, 2008).

Os cavacos contínuos são gerados na usinagem de materiais dúcteis e formam-se através de altas velocidades de corte (geralmente superiores a 60 m/min) e com ângulos de saída assumindo valores elevados. O cavaco descontínuo ou cavaco de ruptura forma-se na usinagem de materiais frágeis ou de estrutura heterogênea, quando ocorre uma ruptura completa do material na região de cisalhamento (Da Silva, 2008). Já o cavaco parcialmente contínuo, também chamado de cavaco de cisalhamento, é um tipo intermediário entre os cavacos contínuos e descontínuos. Os cavacos segmentados são caracterizados pelas grandes deformações continuadas em estreitas bandas entre segmentos com quase nenhuma deformação no interior destes segmentos (Machado e Da Silva, 2004).

Um parâmetro que pode ser usado para caracterizar e comparar os diversos tipos de cavacos formados no processo de usinagem é o grau de recalque (Rc), que é dado pela razão entre a espessura do cavaco e espessura de corte. Esse parâmetro é uma boa indicação da quantidade de deformação dentro da zona de cisalhamento primária. Altos valores de Rc resultam em grande quantidade de deformação no plano de cisalhamento primário (Machado e Da Silva, 2004). Logo, este parâmetro pode ser utilizado para indicar a medida da dificuldade de usinagem de um material. Assim, materiais mais difíceis de usinar possuem altos valores de Rc.

Segundo Teles (2006), a formação do cavaco é muito influenciada pelo seu movimento sobre a superfície de saída da ferramenta. Vários fatores influenciam as condições de corte na usinagem, sendo esses o avanço (f), a profundidade de corte (ap) e a velocidade de corte (Vc). Esses parâmetros afetam as áreas e as tensões de cisalhamento nos planos primário e secundário. O avanço é o parâmetro de maior influência e a profundidade de corte é a que menos influencia na forma dos cavacos (Smith, 1989).

Em relação às condições de corte, um aumento da velocidade de corte, uma redução no avanço ou um aumento no ângulo de saída da ferramenta tende a produzir cavacos em fitas ou contínuos. Diminuindo-se o ângulo de saída e de inclinação da ferramenta, ou empregando ambos com valores negativos, ocorre-se um aumento da deformação do cavaco no plano de cisalhamento, aumentando a capacidade de quebra do cavaco, principalmente para materiais não demasiadamente tenazes. O ângulo de saída da ferramenta também é um dos principais fatores que influenciam no fluxo de cavaco sobre a superfície de saída.

Conhecendo-se as forças atuantes sobre a ferramenta de corte, pode-se não somente estimar a potência necessária à realização do corte, como também dispor de valores importantes para a construção de máquinas-ferramentas rígidas capazes de garantir um melhor desempenho (Teles, 2006). Uma máquina-ferramenta gera potência para realizar o movimento de rotação do seu eixo, executar o movimento de corte e o movimento de avanço.

Em relação às potências de corte e de avanço observa-se que a maior parcela de potência efetiva é dada pela potência de corte, ou seja, a potência de avanço é muito pequena quando comparada com a potência de corte. Por esta razão a força de corte constitui-se da maior parcela de potência de usinagem, assim chamada como força principal de corte (Da Silva, 2008).

O objetivo deste trabalho é verificar a influência das condições de corte na formação do cavaco e na potência de usinagem, utilizando um planejamento de experimento fatorial 2k.

## METODOLOGIA

De acordo com Wu e Hamada (2009), planejar um experimento fatorial é a maneira mais eficaz de determinar a influência de dois ou mais fatores (k) sobre a variável resposta pois requer menos recursos e as estimativas são mais precisas. O experimento fatorial 2k consiste na realização de testes com cada combinação da matriz experimental. Feito esses testes, são determinados e interpretados os efeitos principais e de interação dos fatores analisados, e assim identificar as melhores condições experimentais do processo (Colombari, 2004). De modo geral, os níveis de cada fator em um experimento 2k são chamados de “baixo” e “alto” e podem ser representados por “-1” e “+1”, respectivamente (Montgomery, 2009).

Neste trabalho, realizou-se a usinagem de uma barra de alumínio 6351, com limite de resistência a tração de 290 MPa e dureza de 95 HB, utilizando um planejamento experimental fatorial de dois fatores. Investigou-se as relações dos parâmetros de corte com a formação do cavaco e as potências necessárias para usinagem, através do seu grau de recalque, análise dos tipos e formas de cavacos gerados e níveis de potências apresentados de acordo com cada variação de parâmetro. Variou-se quatro parâmetros de corte: velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e duas ferramentas com diferentes ângulos de saída.

Inicialmente, com auxílio do processo de torneamento, realizou-se a limpeza da amostra, removendo as incrustações na camada mais exterior. Para esse experimento utilizou-se o torno Nardini Mascote MS 205.

As potências efetivas encontradas para cada um dos testes foram medidas através de um wattímetro digital, que foi instalado aos fios da caixa de comando elétrico do torno. Os dados da potência medida pelo wattímetro foram obtidos pelo *software* Alicate ET-4091, um programa de aquisição de sinais.

A Tabela 1 apresenta o planejamento fatorial 2k utilizado para o experimento com k = 4. Já a Tab. 2 mostra, juntamente com os níveis baixo e alto do planejamento fatorial 2k, os parâmetros de corte analisados.

**Tabela 1.** Planejamento fatorial 2k do experimento.

| Número do experimento | Níveis lógicos |
|---|---|
| 1 | A- ap- Vc- f- |
| 2 | A- ap- Vc- f+ |
| 3 | A- ap- Vc+ f- |
| 4 | A- ap- Vc+ f+ |
| 5 | A- ap+ Vc- f- |
| 6 | A- ap+ Vc- f+ |
| 7 | A- ap+ Vc+ f- |
| 8 | A- ap+ Vc+ f+ |
| 9 | A+ ap- Vc- f- |
| 10 | A+ ap- Vc- f+ |
| 11 | A+ ap- Vc+ f- |
| 12 | A+ ap- Vc+ f+ |
| 13 | A+ ap+ Vc- f- |
| 14 | A+ ap+ Vc- f+ |
| 15 | A+ ap+ Vc+ f- |
| 16 | A+ ap+ Vc+ f+ |

**Tabela 2.** Parâmetros de corte analisados.

| Parâmetro analisado | Nível Baixo | Nível Alto |
|---|---|---|
| Velocidade de corte (m/min) | 100 | 150 |
| Profundidade de corte (mm) | 1 | 3 |
| Avanço (mm/rot) | 0.4 | 1 |
| Ângulo da ferramenta | 10º | 20º |

Após os experimentos e coletas dos dados de potência e dos cavacos formados no processo de usinagem para cada condição apresentada na Tab. 1, utilizou-se um paquímetro com 0,03 mm de incerteza para medir a espessura dos cavacos (h'). Foram medidas espessuras de quatro cavacos para cada condição e assim pelo valor médio estimou-se o Rc de acordo com a Eq. 1.

$$Rc = h'/f \qquad (1)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a medição da espessura dos cavacos gerados nos dezesseis ensaios conforme o planejamento descrito anteriormente, foi analisado a influência do avanço, da velocidade, do ângulo de saída e profundidade de corte no grau de recalque. Além disso, com auxílio de ferramentas estatísticas e de um modelo matemático, encontrou-se os efeitos fatoriais médios para cada parâmetro analisado.

A Figura 1 mostra os diferentes tipos de cavacos formados nos experimentos através de cada variação de parâmetro de corte, bem como o grau de recalque calculado pela Eq. 1, para cada condição.

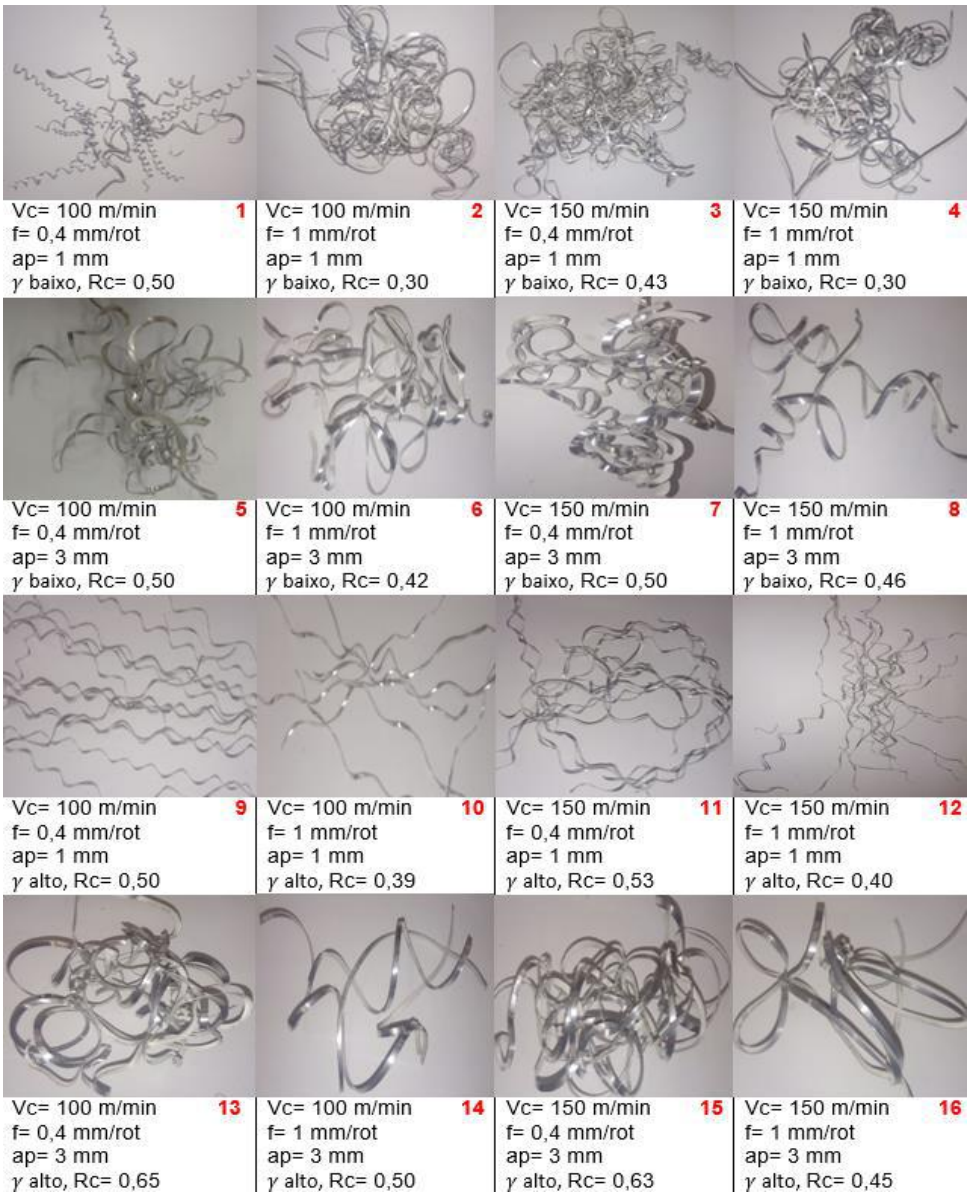



**Figura 1.** Cavacos formados no experimento.

Após as visualização e estudo das amostras dos cavacos obtidos nos experimentos realizados para cada uma das condições de teste, realizou-se uma classificação de acordo com a forma e o tipo de cavaco, mostrado na Tab. 3.

**Tabela 3.** Classificação dos cavacos obtidos nos experimentos.

| Condição | Tipo de cavaco | Forma do cavaco |
|---|---|---|
| 1 | Parcialmente contínuo | Helicoidal tipo arruela, curto |
| 2 | Parcialmente contínuo | Em fita, emaranhado |
| 3 | Parcialmente contínuo | Em fita, emaranhado |
| 4 | Contínuo | Em fita, emaranhado |
| 5 | Parcialmente contínuo | Em fita, emaranhado |
| 6 | Parcialmente contínuo | Em fita, emaranhado |
| 7 | Contínuo | Em fita, emaranhado |
| 8 | Contínuo | Helicoidal tipo arruela, emaranhado |
| 9 | Contínuo | Helicoidal tipo arruela, longo |
| 10 | Contínuo | Helicoidal tipo arruela, longo |
| 11 | Contínuo | Helicoidal tipo arruela, longo |
| 12 | Contínuo | Helicoidal tipo arruela, longo |
| 13 | Contínuo | Em fita, emaranhado |
| 14 | Contínuo | Em fita, emaranhado |
| 15 | Contínuo | Em fita, emaranhado |
| 16 | Contínuo | Em fita, emaranhado |

Analisando-se os resultados obtidos na Tab. 3, verifica-se que as formas predominantes são helicoidais e em fita. Em algumas condições os cavacos se apresentaram na transição de fita para helicoidal, na maioria emaranhado. Percebe-se também que os tipos de cavaco encontrados foram de maioria contínua. Esse fato é explicado, pois as ferramentas de corte utilizadas não possuíam o quebra cavaco (alteração na face da ferramenta) e o material usinado apresenta alta ductilidade.

Percebe-se que aumentando a velocidade de corte e ângulo de saída, o tipo de cavaco tende a ser contínuo. Também, o aumento da velocidade de corte, redução do avanço e ângulo de saída alto tendem a produzir um cavaco de maior continuidade.

A Fig. 2 mostra o comportamento do tratamento das ferramentas estatísticas do modelo matemático utilizado na correlação entre os dados obtidos de grau de recalque e potência com os valores preditos matematicamente. Observa-se que o comportamento dos valores é quantitativa e qualitativamente similar, mostrando a ótima correlação dos resultados.

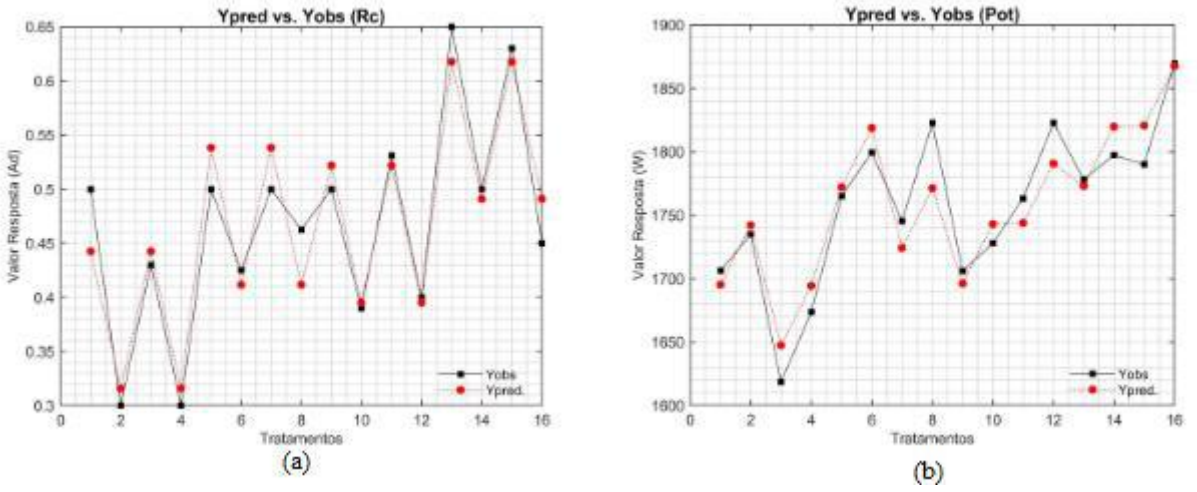



**Figura 2.** Correlação do modelo matemático para (a) grau de recalque e (b) potência

Em relação à Potência desenvolvida, as Fig. 3 e 4 mostram a influência dos parâmetros que foram significativos em sua variação. A Profundidade de Corte (ap), Avanço (f), Ângulo de saída da ferramenta (A) e da iteração do Ângulo de saída da ferramenta com a velocidade de corte (AxVc), proporcionaram um aumento na potência de corte em seus níveis altos.

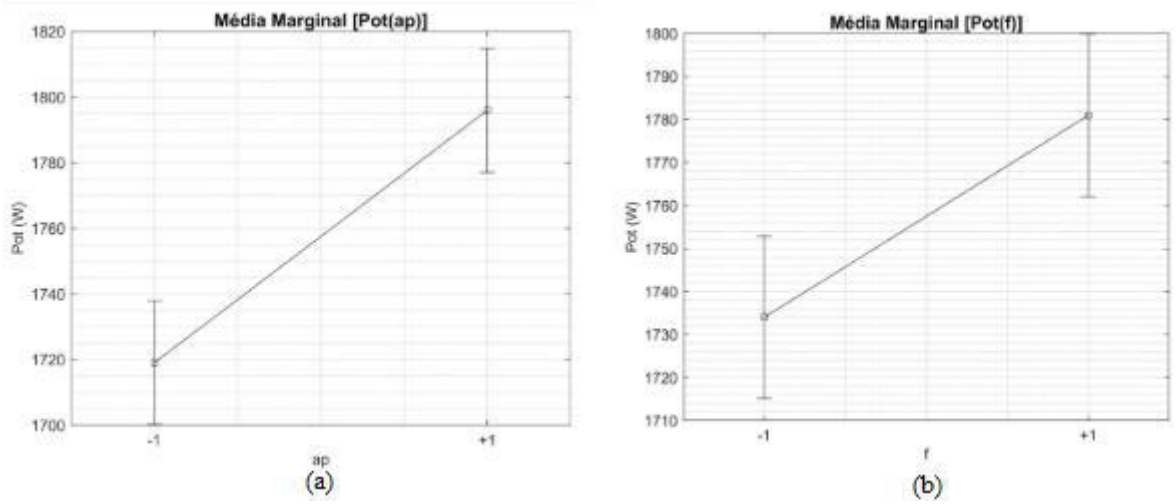



**Figura 3.** Influência na potência para (a) profundidade de corte e (b) avanço de corte

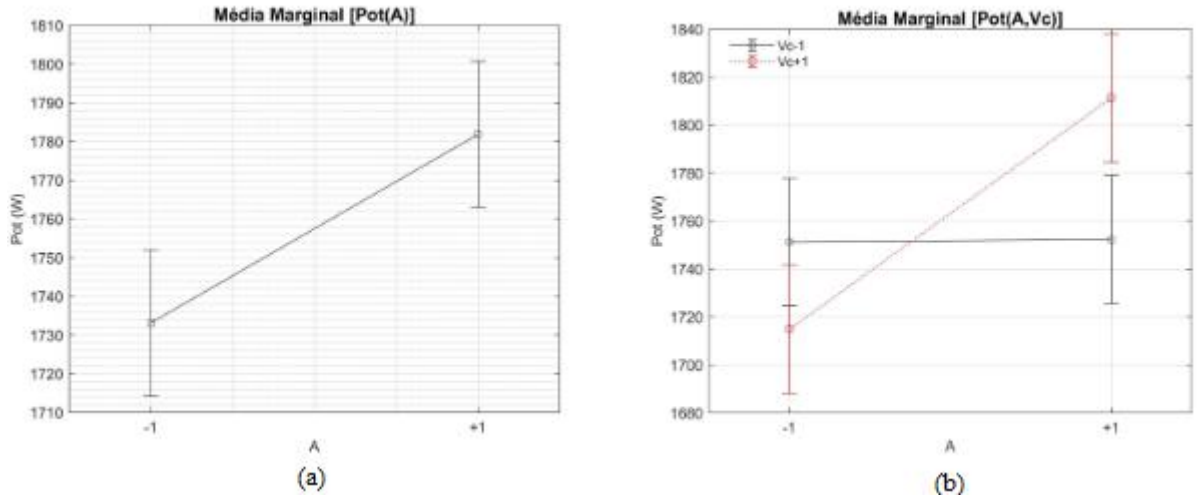



**Figura 4.** Influência na potência (a) ângulo de ferramenta e (b) iteração do ângulo da ferramenta e velocidade de corte

A potência é proporcional à força de corte e o aumento da velocidade de corte reduz a força de usinagem, uma vez que reduz a tensão de cisalhamento na região de corte e da área do plano de cisalhamento secundário (Da Silva, 2004). Conforme Machado e Da Silva (2004), o aumento do avanço e profundidade de corte levam ao aumento das forças de usinagem, visto que ocorrem mudanças nas tensões no plano de cisalhamento devido à redistribuição dos esforços de corte ao longo destes planos. Assim, os resultados estão em concordância com a teoria.

A Fig. 5 mostra os efeitos fatoriais médios dos parâmetros na potência, observa-se que a profundidade de corte (ap) tem um efeito maior em relação aos outros parâmetros significativos.

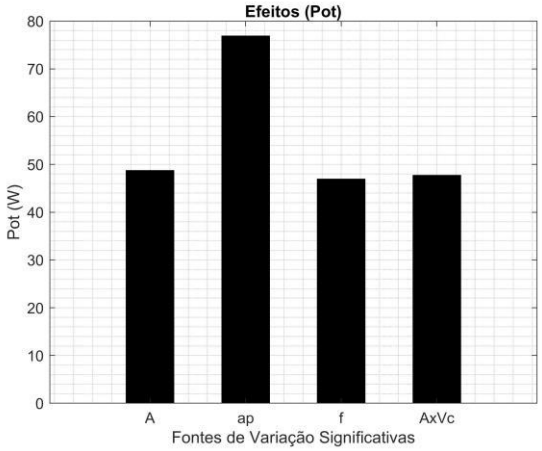



**Figura 5.** Efeitos fatoriais médios dos parâmetros significativos na potência.

Em relação ao grau de recalque, as Figs. 6 e 7 mostram o comportamento do grau de recalque com a variação do avanço e profundidade de corte, respectivamente. Analisando a Fig. 6, verifica-se que o aumento da profundidade resulta em aumento do grau de recalque, visto que produz cavacos mais largos, conforme a teoria. A Fig. 8 ilustra a variação do grau de recalque com o ângulo de saída da ferramenta. Verifica-se que o grau de recalque tende a aumentar juntamente com o ângulo.

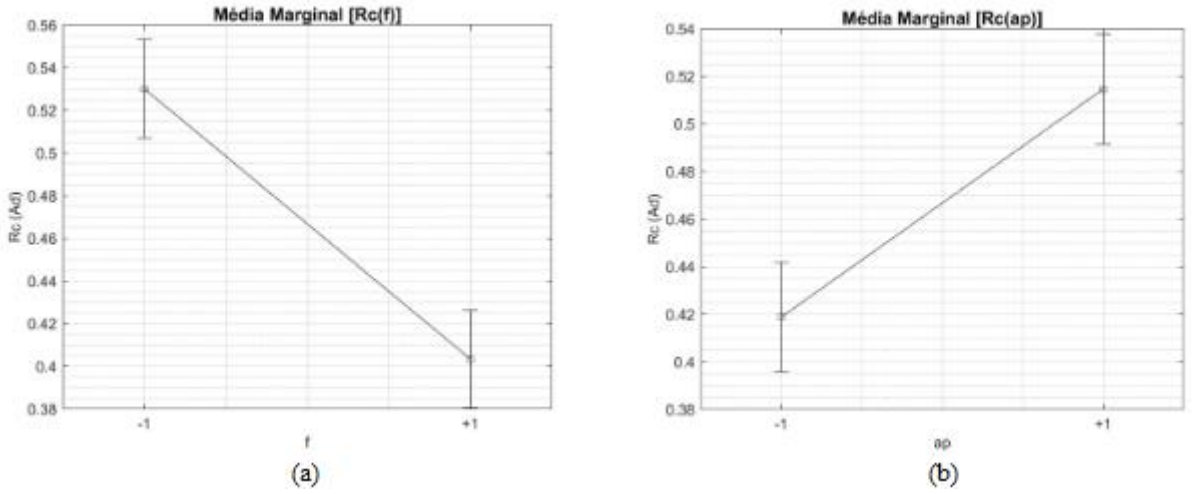



**Figura 6.** Influência no grau de recalque (a) avanço e (b) profundidade de corte.

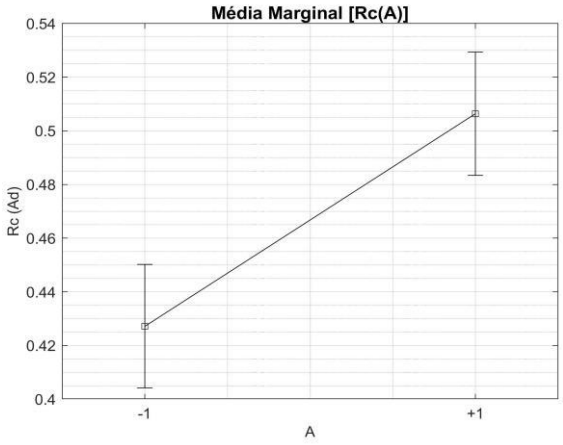



**Figura 7.** Influência do ângulo de saída no grau de recalque.

A Fig. 8 mostra o efeito fatorial médio de cada parâmetro, sendo o avanço o maior influenciador no grau de recalque para os ensaios realizados.

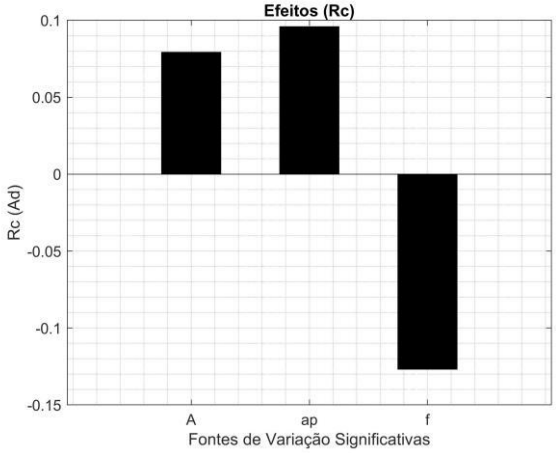



**Figura 8.** Efeitos fatoriais médios dos parâmetros significativos no grau de recalque.

## CONCLUSÃO

A partir dos ensaios realizados, foi possível comprovar que a variação dos parâmetros de corte tem grande influência na formação do cavaco.

Quanto ao seu formato, o ideal seria do tipo descontínuo mas nenhuma das condições nos proporcionou tal forma. A condição que apresentou o resultado mais satisfatório foi a 1, classificada como parcialmente contínua, helicoidal tipo arruela. O seu formato fornece menores chances de um operário se acidentar quando manuseá-lo ou de gerar problemas na máquina, quando comparado ao cavaco em fita emaranhado.

Em relação ao grau de recalque, verificou-se o comportamento do mesmo conforme lista a literatura (Da Silva, 2008; Machado e Da Silva, 2004 e Teles, 2006). O aumento do avanço reduz o grau de recalque, enquanto o aumento da profundidade resulta em comportamento contrário, ou seja, o grau de recalque aumenta com o aumento da profundidade, devido à maior espessura do cavaco formado. Porém, para a velocidade de corte, não foi possível tirar conclusões, pois os experimentos realizados pela variação da velocidade, não tiveram o mesmo comportamento.

Observando os parâmetros de corte na potência desenvolvida, verifica-se que, no experimento em questão, o ângulo da ferramenta, a profundidade de corte e avanço tiveram grande influência. Já a velocidade de corte não gerou grandes influências na potência, apenas quando combinada com outros fatores, por exemplo o ângulo da ferramenta.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal do Espírito Santo pelo apoio durante a pesquisa.

## REFERÊNCIAS

Narahari, P.; Pai, B. B.; Pillari, R. M. “Some aspects of achinig Cast Al-SiCp Composites with conventional high speed steel and tungsten carbide tools”. Journal of Materials Engineering and Performace. V. 8, p538-542, 1999.

Dos Santos, A. V.; “Usinagem em altíssimas velocidades: como os conceitos HSM/HSC podem revolucionar a indústria metal-mecânica”. São Paulo: Érica, 2003.

Júnior, M. C. Dos S. “Emprego de ferramentas estatísticas para avaliação da usinabilidade de ligas de alumínio”. Tese de Doutorado. Uberlândia, 2012.

Da Silva, M. A. “Investigação experimental da formação do cavaco na usinagem do aço ABNT 1045 e do ferro fundido nodular”. Tese de Mestrado. Uberlândia, 2008.

Machado, A. R.; Da Silva, M. B. “Usinagem dos metais”. Laboratório de ensino e pesquisa em usinagem. Uberlândia, 2004.

Teles, J. M. “Torneamento de Ferro Fundido Nodular Ferritizado com Nióbio Utilizando Ferramentas de Metal Duro”. Dissertação de Mestrado. Itajubá, 2007.

Smith, G. T. “ Advanced Machining – The Handbook of Cutting Technology”, IFS Publications, 1989, ISBN 1

Novaes, F. B.; Souza, R. A. “Análise da formação do cavaco no torneamento do alumínio utilizando câmera de alta velocidade”. Universidade Federal do Espírito Santo. Trabalho de conclusão de curso. Vitória, 2009.

Wu, C. F. J.; Hamada, M. S. “Experiments planning, analysis, and optimization”. 2. ed., Hoboken: John Wiley & Sons, 2009. 716p.

Montgomery, D. C. “Design and analysis of experiments”. 7 ed., New York: John Wiley & Sons, 2009. 656p.

Colombari, R. R. “Aplicação de delineamento de experimentos para o processo de solda à projeção”. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2004.

Aluminicopper. Alumínio 6351. Disponível em: <http://www.alumicopper.com. br/produtos_aluminio_6351.html>. Acesso em 09 de maio de 2018.

ISO 3685. Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools, 1977.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(X) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos

( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

# MANEIRAS DE SE EVITAR O PROCESSO DE CORROSÃO NOS TRILHOS DA VALE S.A.

**Nome dos autores: Israel Conceição Rocha, Alberth Rodolfo Ferreira Viana e Nícolas Rodrigues Ferreira**
Instituição: Universidade Estadual do Maranhão - UEMA
Endereço Completo da Instituição: Cidade Universitária Paulo VI, S/N - Tirirical, São Luís – MA
E-mail para correspondência: israelr777@live.com

**RESUMO:** A companhia VALE S.A., movimenta milhares de toneladas de minério por dia, essa mesma companhia representa uma maneira de locomoção rápida e eficaz para milhões de passageiros. Mas para que esses feitos sejam concretizados a companhia possui uma extensa malha ferroviária (cerca de 900 quilômetros). Todo esse comprimento demanda constantes manutenções e trocas de trilhos degastados, o que pode acarretar custos expressivos. Devido a isso, buscou-se formas de se suavizar o processo corrosivo que se mostra como um significativo fator de substituição de trilhos e manutenções nos mesmos. A galvanização pulverizada de alguns elementos específicos é, portanto, estudada e analisada para esta finalidade, e por fim sugerida a implementação desse processo de proteção anticorrosiva. Para tal aplicação, sugere-se a utilização de um veículo similar ao Truck Star, atendendo assim, todas as possíveis demandas do processo de proteção dos trilhos da companhia. Pinturas também se mostram como métodos de eficazes resultados, podendo se utilizar a configuração modificada do Truck Star para aplicação dos sistemas de pinturas.

**Palavras-Chave:** Corrosão, galvanização, trilhos.

***ABSTRACT:*** *The company VALE S.A., moves thousands of tonnes of ore per day, this company represents a fast and effective way for locomotion for millions of passengers. But for these achievements to be realized a company has an extensive railway network (about 900 miles). This can lead to significant costs. Due to this, we sought ways to soften the corrosive process which shows as a factor of rail replacement and maintenance on them. A powdered galvanization of some components was therefore studied and analyzed for this purpose, and finally the implementation of the anticorrosion protection process was suggested. For this application, it is suggested to use a vehicle similar to Truck Star, thus meeting all requirements of the process of protecting the tracks of the company. Paintings are also shown as methods of results, and can use a modified configuration of the Truck Star for application of paint systems.*

***Keywords:*** Corrosion, galvanization, rails

## INTRODUÇÃO

O processo de corrosão é muito intenso e comum em se tratando de metais, se tornando um problema considerável e que requer atenção especial. No Brasil, de 60% (sessenta por cento) da produção interna de aço, dois terços (2/3) se transformam em sucata e um terço (1/3) é destruído pela corrosão, segundo (OLIVEIRA, 2012). Sendo assim, o estudo da corrosão engloba uma dimensão importante e que representa não apenas um âmbito estético, mas os custos provocados por ela (a corrosão), muitas vezes incalculáveis, que envolvem despesas com reposição de materiais, reparos de manutenção, proteção, mão de obra, energia e manutenção preventiva, chamados de custos diretos.
Se não bastasse esses problemas ocasionados pela corrosão, a mesma acarreta outros, chamados de custos indiretos. Vale ressaltar a existência destes e dá alguns exemplos, são eles: os acidentes, perdas de vida, qualidade, eficiência, contaminações e, ainda, outros custos que podem ser gerados pela corrosão, impossíveis de serem medidos e que se manifestam ao longo do tempo. Atualmente existem estimativas interessante que nos oferece números para visualizarmos em termos gerais o processo de corrosão, uma dessas estimativas afirma que em torno de 20% (vinte por cento) da produção industrial mundial de aços é destinada à reposição de materiais que sofrem corrosão.
Devido a isso faz-se necessário proteger a estruturas e elementos de aço carnobo uma vez que os mesmos não possuem uma proteção específica à atmosfera agressiva, deixando-os suscetíveis ao processo de corrosão (GENTIL, 1987). Lembrando que a corrosão é o processo pelo qual o metal reage com os elementos do seu próprio meio formando assim um elemnto não metálico como produto de tal reação. Como resultado da corrosão o metal perde suas propriedades mecânicas desejáveis para a referida aplicação em questão, propriedades essas que não permitem que o elemento ou peça desenvolva plenamente a sua tarefa aoqual foi projetado (RAMANATHAN, 2004). Um elemento ou peça que

esteja em processo avançado de corrosão poderá, obviamente, ter suas dimensões reduzidas drasticamente (o que pode representar riscos a vida de operadores de maquinário e/ou usuários em geral que estejam próximo a tal elemento ou peça) afetando diretamente no desempenho de sua finalidade final (FURTADO, 2010). O metal pode receber um banho de zinco, seguido de um jato de nitrôgenio após o banho, em um processo chamado de galvanoplastia, e essa camada de zinco fará a proteção contra a corrosão (PINHÃO, 2000). A análise desse processo mostrou que o mesmo é inviável para se aplicar nos trilhos da VALE S.A. devido, entre outros motivos, a impossibiidade de se banhar os "trilhos" no zinco.

Percebe-se a importância da corrosão como ciência, já que está diretamente relacionada a custos e pelas suas relações com outras áreas científicas. É preciso então analisar a corrosão segundo os custos diretos e indiretos, já citados e em função do aproveitamento que se deseja obter ao se combater esse processo. Sem esquecer as características técnicas, a qualidade do material a ser protegido e sua aplicação. Em outras palavras, precisamos olhar a corrosão de forma integral, analisando assim todos os fatores que a influenciam, para uma visão geral. Por isso a importância de enxerga-la em sua forma de ciência metalúrgica.

Nesse contexto, faz se necessário buscar cada vez mais maneiras de se evitar, nas mais diversas áreas, problemas desse tipo. A maioria das grandes empresas estão submetidas a obterem problemas dessa instância, em maior ou menor grau. Entre elas, podemos analisar com maiores detalhes a companhia VALE S.A., a mais significativa no estado do Maranhão e uma das líderes em seu segmento.

## METODOLOGIA

A VALE S.A. possui diversas máquinas suscetíveis ao processo de corrosão, entretanto, os trilhos de transporte do minério são bem extensos (mais de 900 quilômetros), se prolongando por cidades, o que os torna fonte de uma pesquisa e/ou análise promissora envolvendo a corrosão. Esses trilhos estão sempre expostos ao ar e, às vezes, a água também, o que nos oferece um bom ponto de partida num estudo em busca de formas alternativas de diminuir os efeitos desses potenciais eletrólitos, que favorecem a corrosão e são indispensáveis para o andamento desse processo. O propósito é encontrar um elemento químico que impeça de forma eficiente e viável a corrosão e aplica-lo de maneira favorável, considerando todos os parâmetros possíveis. Não foi conseguido identificar por meio dos estudos realizados nas literaturas, forma mais eficaz do que pinturas e processos de decomposição de metais sobre metais (galvanização). Mas vale lembrar, que existem muitas outras maneiras de se evitar o processo corrosivo.

### Procedimento experimental

Os trilhos da Estrada de Ferro Carajás (EFC), são provenientes de diversos países, como por exemplo: Brasil, Polônia, Canadá, Japão. A VALE S.A. substitui os trilhos degastados sempre que necessário, o que se torna um processo continuo. A corrosão é um dos principais motivos para a troca dos trilhos, pois, esse referido processo causa desgaste que pode ocasionar buracos nos trilhos, dependendo do estado de avançamento do processo. Estes buracos, podem ocasionar acidentes e claro atrasos na entrega dos pedidos aos clientes, causando transtornos, perda de confiabilidade na companhia e prejuízos financeiros. Os trilhos precisam suportar grandes tensões (capacidade para transportar 40 mil toneladas) e por momentos contínuos, já que a locomotiva da VALE S.A. possui cerca de 3500 metros de comprimento e um total de 330 vagões. Devido a isso, o aço se torna o material mais adequado para tal aplicação.

O trilho deve ter propriedades mecânicas que satisfaçam os atributos requeridos para este uso tão exigente. Propriedades estas como; tenacidade, dureza, elasticidade e resistência à flexão. Após esclarecido todos estes pontos, atentou-se para a composição do aço para trilhos, com o intuito de entendermos a fundo o processo corrosivo nesses componentes. O ferro é o principal, cerca de 98 %, o elemento base. Outros componentes são; o manganês (aumenta a dureza), o carbono (aumenta a resistência) e o silício (aumenta a resistência à ruptura sem sacrificar a tenacidade ou ductibilidade). Em sua estrutura interna, os segmentos dos trilhos podem possuir diversas descontinuidades, tais como inclusões não metálicas, que aliados às condições severas de trabalho podem nuclear defeitos que levam o material ao colapso estrutural e influenciam no processo de corrosão. Finalmente, após todos os fatores e parâmetros considerados, buscou-se a forma mais eficiente de se evitar o processo corrosivo e chegou-se à algumas conclusões. Infelizmente não podemos nos aprofundar em todas (as conclusões) por meio deste artigo, mas apresentaremos a que acreditamos ser a mais ideal.

O cromo, o níquel, o estanho, o zinco, o bronze e o cobre formam o grupo dos elementos mais utilizamos no processo de galvanização que pode ser realizado de diversas maneiras e com outros elementos, além dos citados. A finalidade deste processo (a galvanização) é justamente proteger um metal do processo corrosivo. A galvanização pulverizada é a maneira mais eficaz encontrada para se proteger os trilhos de aço da companhia VALE S.A. deste referido processo. Isso pode ser realizado de diversas formas. Sem dúvidas, pulverizar 900 quilômetros de ferrovia não consiste em uma tarefa simples, entretanto, podemos sugerir ou projetar equipamentos e/ou máquinas para se realizar esta determinada tarefa.

Concessionárias adquirem carros-controle com sistemas de medição automatizados para inspeção da malha ferroviária permanente, também são programados para realizar a análise de geometria da via. O carro-controle mais eficiente na atualidade é o Truck Star, pois pode trafegar pelos trilhos ou fora deles. Pode fazer as análises com velocidade constante

de até 40Km/h, mas alcança velocidades bem maiores, o que possibilita seu uso em qualquer horário, estando parte da ferrovia ocupada por uma locomotiva ou não. O veículo segue os modelos de carro-controle americanos, que fazem monitoramento da geometria da via permanente com sistemas embarcados, possibilitando a análise de parâmetros de controle, que são as medidas mais conhecidas e que podem gerar acidentes se não corrigidos. Da fabricante norte-americana Holland, esse referido veículo é um caminhão Volvo com seis rodas, adaptado para trafegar em trilhos. Essa peculiaridade facilita a locomoção do veículo e permite que a inspeção possa ser feita no horário de funcionamento da via, sem que seja necessária a intercalação com passagem de trens. Como já citado, essa característica se mostra importante para a malha ferroviária da VALE S.A. que funciona em diversos horários por dia. Algumas adaptações no Truck Star seriam suficientes para que ele possa realizar o processo de pulverização dos trilhos.

É sabido, que as peças niqueladas apresentam uma coloração amarelada, já as peças cromadas possuem um aspecto prateado. O cromo se apresenta como um forte elemento para ser utilizado na galvanização, mas a sua fixação no aço ferroviário se torna mais eficiente e duradoura o cromo não for aplicado diretamente, ou seja, os trilhos deveriam antes da cromagem serem submetidos ao niquelamento. O zinco também possui características que favoreceriam seu uso nessa aplicação, pois esse elemento produz, em contato com o eletrólito ar, uma camada de óxido de zinco que protegeria os trilhos contra novos ataques corrosivos e ainda é transparente. Não sabemos exatamente quais dos elementos citados é o mais eficiente para se evitar o processo corrosivo, portanto, é necessário que experimente todos eles, até porque variados fatores estão a interferir no processo como um todo.

O processo de galvanização é composto por várias fases, citaremos algumas, pois, isto interfere diretamente na proposta apresentada. Mas antes deve-se esclarecer alguns conceitos de química básica para estarmos capacitados à uma compreensão geral e holística do tema. A ferrugem se forma pela oxidação do ferro presente no aço dos trilhos, então; de ferro (Fe) torna-se cátion ferro ($Fe^{2+}$) em presença do oxigênio do ar e da água. O ferro e a maioria dos metais (com exceção do ouro e da platina) possuem menor potencial de redução que o oxigênio e, por isso, esses metais tendem a se oxidar. Quando o ferro está em contato com o ar úmido, é formada uma espécie de pilha em que o oxigênio atua como cátodo ou polo positivo, ocorrendo sua redução (ganho de elétrons). O ferro perde elétrons, sofrendo oxidação e atuando como ânodo ou polo negativo. O hidróxido de ferro, $Fe(OH)_2$, é oxidado a hidróxido de ferro, $Fe(OH)_3$, devido à presença do oxigênio. Esse composto perde, então, água e se transforma no óxido de ferro mono-hidratado, $Fe_2O_3 + H_2O$, que possui cor castanho-avermelhada, ou seja, a ferrugem. Observe que tudo começou porque o ferro se oxidou a "$Fe^{2+}$". Assim, quando uma peça passa por um processo de galvanização, a camada do metal decomposto impede a oxidação do ferro, porque evita que ele entre em contato com o ar e com a água.

Mas, a frequência e a magnitude das cargas as quais os trilhos devem suportar ocasionam ranhuras em sua superfície (risco), fazendo com que naquele ponto o aço entre em contato com o ar. Se no processo de galvanização pulverizada for utilizado o zinco, ou até mesmo estanho, níquel ou cromo, não há um problema expressivo, porque inicialmente o ferro se oxidará, mas imediatamente o elemento galvânico também se oxidará, pois, o seu potencial de redução é menor que o do ferro, que o do oxigênio e que o da água. Portanto, a tendência desses elementos em oxidar-se é maior. Quando o metal usado na galvanização se oxida, acontecem duas coisas importantes que impedem o ferro de ser corroído. A primeira é que, visto que seu potencial de redução é menor que o do ferro, ele reduz o cátion $Fe^{2+}$ a ferro metálico novamente. O segundo ponto é que, em contato com o ar e a água, o metal galvânico geralmente origina um composto chamado de hidróxido, que se deposita sobre o ferro que estava exposto e novamente o protege contra a corrosão.

As empresas de galvanoplastia atendem em geral as indústrias metalúrgicas e da construção civil. Os revestimentos metálicos, além da finalidade decorativa, de resistência, de função elétrica e endurecimento superficial, servem para imprimir resistência ao processo corrosivo.

Haja visto anteriormente, ao se utilizarem metais nos revestimentos anticorrosivos, a ação protetora se explica pela formação de películas protetoras de óxidos, hidróxidos e outros compostos que reagem com os oxidantes do meio corrosivo, desde que ocorram formações de óxidos aderentes. É preciso que haja boa aderência e impermeabilidade da película e os revestimentos que possuem função protetora não devem formar pilhas galvânicas, como no caso do aço-carbono revestido com Sn – Cu – Pb – Ag e aço inoxidável. Esse revestimento protege o metal de base.

O processo de galvanização pulverizada aqui proposto, é conhecido também como metalização ou galvanização a frio. É um processo com fins de recuperação, que utiliza metalização, ou seja, outros metais decompostos sob o metal em que se deseja proteger. Esses processos ocorrem com a utilização de "pistolas" próprias de aplicação, de tamanho variantes dependendo da aplicação, e com o uso de oxiacetileno onde o fio de metal de revestimento se deposita na superfície do metal a ser protegido. O metal do revestimento de proteção depende da qualidade do metal do mesmo, da umidade, do preparo da superfície e da temperatura, para que haja aderência do revestimento, entre outras variáveis. Faz se essencial a análise dos meios corrosivos e os eletrólitos, que são o "combustível" do processo de corrosão.

A atmosfera tem sua ação corrosiva dependente da composição química, sendo constituída por substâncias poluentes que vão de partículas sÓlidas a gases, da variação de temperatura até a umidade relativa do ar e também do tempo de permanência do filme de eletrólito na superfície metálica, que poderá ser agravada pela intensidade e direção dos ventos e das variações climáticas em geral. A atmosfera pode ser classificada em: atmosfera seca, atmosfera úmida, atmosfera molhada, atmosfera com poluentes sólidos, atmosfera com poluentes gasosos, segundo (Shreir, 1868). Existem dois tipos de atmosfera que se adequam à apresentada ao longo da Estrada de Ferro Carajás; a Atmosfera seca e a atmosfera

úmida, que possuem semelhanças entre si mais diferem em alguns pontos. A atmosfera seca é um tipo de atmosfera isenta de umidade, onde não existe nenhum filme de eletrólito na superfície do metal. Nesse meio, a oxidação do metal e lenta e seu produto de corrosão e resultante de reações químicas puras, afetando propriedades físicas e químicas. Em se tratando de atmosfera úmida; um metal quando colocado em contato com esse tipo de atmosfera, que apresenta umidade relativa menor e não muito próxima de 100%, faz surgir um filme fino de eletrólito que se deposita na superfície metálica. A velocidade do processo corrosivo vai depender do grau dessa umidade relativa, da presença de poluentes atmosféricos e do grau de higroscopicidade (tendência de se absorver a umidade do ar) dos produtos de corrosão presentes. Em estudos atuais o ar pode ser considerado um eletrólito, pois, por meio dele o processo de corrosão também se executa, formando óxido de ferro.
Podemos relacionar a umidade relativa do ar como variável de agressividade no processo corrosivo A umidade relativa do ar é a relação entre o teor de vapor d'agua encontrado no ar e o teor máximo que pode existir no mesmo dentro das condições consideradas. Existem autores que adotam ser a relação entre a pressão parcial de vapor d'agua no ar e a pressão de vapor d'agua saturado, na mesma temperatura, sendo expressa em porcentagem. Maior umidade relativa do ar, maior formação do eletrólito água e, por consequência, maior índice de corrosão. Vários fatores se associam a uma variável produzindo maior agressividade no fenômeno de corrosão.
O ferro que, em baixa umidade, não sofre corrosão, na medida em que a umidade relativa cresce, o processo corrosivo vai aumentando até chegar ao nível de umidade crítica, onde a corrosão acelera. Se nessa atmosfera existir 0,01% de gás (SO2), a corrosão aumenta sua taxa. Se ainda existirem depósitos de NaCl na superfície do ferro exposto, na medida que a umidade aumenta, a taxa de corrosão vai alcançar níveis elevados no mesmo número de dias de exposição do material, mas acreditamos que esse não é o caso. A atmosfera pode ter fatores que aceleram ou inibem a sua ação corrosiva. Caso a temperatura seja alta, diminui a possibilidade de condensação de Vapor d'agua e de absorção de gases na superfície metálica. Quanto menor for o tempo de exposição, menor será a ação corrosiva da atmosfera. A chuva pode ser um benefício quando consegue solubilizar os sais da superfície dos metais. Porém, se existirem frestas ou locais de estagnação, aumentam a atividade do eletrólito e a consequente taxa de corrosão. As variações cíclicas de temperatura e umidade são variáveis possíveis de serem utilizadas em nível de controle estatístico da taxa de corrosão.

O processo de galvanoplastia é realizado em três etapas: pré-tratamento, tratamento e pós-tratamento das peças.
O pré-tratamento consiste na preparação da superfície da peça para que tenha aderência, favorecendo também a uniformidade e a aparência do metal que será depositado. Nessa fase do processo o fator limpeza é essencial, a fixação e resistência à corrosão dependem disso. Deve-se então, entender o conceito de impurezas, que podem diminuir consideravelmente a proteção desejada. A compreensão do que significam impurezas metálicas constitui uma etapa necessária para avançarmos em direção à um método de proteção de superfícies metálicas, no caso; trilhos ferroviários. Impureza é tudo o que pode interferir no processo e na qualidade da proteção que se pretende dar a uma determinada superfície. O tratamento das impurezas metálicas é um passo decisivo no processo definido como galvanização, uma vez que sua preparação varia em função do recobrimento protetor, ou seja, do tipo de elemento a ser aplicado. Como o objetivo e criar uma interface entre o meio corrosivo e a superfície do metal, essa camada protetora pode ser de formação natural ou artificial. A resistência dessas camadas protetoras, associada a aderência, a impermeabilidade e a insolubilidade, são características importantes a serem observadas. Como o ferro e o aço são materiais de maior consumo industrial, e preciso analisar o filme da oxidação que se forma em suas superfícies nos mais variados meios corrosivos.
Alcançar a aderência ou eficiência máxima de proteção através de revestimentos ou recobrimentos protetores depende do processo adequado da superfície metálica receptora. Uma superfície bem limpa, livre de ferrugem, isenta de graxas, sujidade e umidade oferece a base necessária para uma boa proteção por recobrimento, pois, uma superfície preparada para determinado acabamento pode não ser adequada a outro tipo de recobrimento. Para maiores níveis de sucesso, aplica-se primeiramente uma camada de níquel e em seguida uma camada de cromo. Existem quatro tipos de impurezas, segundo (OLIVEIRA, 2012). As mais vistas em trilhos ferroviários são; as **Impurezas oleosas e os óxidos e produtos de corrosão. As impurezas oleosas** representam os óleos minerais, óleos graxos, óleo de laminação, de estampagem, de repuxa mento, de trefilarão e óleos protetores contra a corrosão. A maior dificuldade está em sua remoção, pois, quanto mais viscosos forem os óleos minerais, mais difícil será sua remoção; os óleos graxos são os mais fáceis de se remover. Os ó**xidos e produtos de corrosão** – são impurezas resultantes de tratamentos térmicos; a camada de óxido formada é difícil de ser removida.
Existem alguns excelentes métodos de remoção de impurezas metálicas. Esses meios de remoção surgem após serem identificados os tipos de impurezas presentes na superfície metálica. E preciso encontrar os adequados para remove-los. Os mais usados são: detergência, solubilização, ação química, ação mecânica. Esses meios podem estar isolados ou em conjunto no processo de remoção. Os fatores mais intervenientes são: a condição do estado inicial do material a ser tratado, resultados obtidos pós-tratamento, condições econômicas, equipamento disponível e outros. Concluindo a análise dessa fase; O pré-tratamento pode ser realizado por escovação, lixamento, polimento, decapagem e jateamento para remoção de rebarbas, sulcos, tintas, graxas e ferrugem.

Na etapa de tratamento a peça é submetida a um ou mais banhos de metais para que adquira uma fina camada metálica. Para a cromeação, por exemplo, a peça passa por um banho de cobre, outro de níquel e ao final recebe uma camada de cromo.
O pós-tratamento consiste em um processo de lavagem com água fria ou quente, secagem em centrífuga, estufa ou jatos de ar, banho de óleo para embalagem, proteção e pintura ou envernizamento. No caso em questão, a secagem em centrífuga e as estufas serão dispensados, pois, não se apresentam de maneira eficaz para serem aplicados e não irão interferir no resultado final. Segue, em sequência, uma ordem das etapas do processo sugerido para a galvanização pulverizada dos elementos escolhidos nos trilhos da malha ferroviária:

- Preparo visto na primeira fase (pré-tratamento)
- Superfície seca, limpa e lisa
- Tinta preta ou branca para envernizar
- Lavagem com químico do grupo de detergente neutro
- Aplicação do pré-ativador
- Água deionizada
- Aplicação do ativador
- Agua deionizada
- Metalizantes A, B, C e D (níquel, cobre, níquel e cromo)
- Aplicação do espessante
- Água deionizada (pode ser ignorada)

A transladação do processo de galvanização pulverizada para sistemas de pintura não se mostra complexa, sendo que, os sistemas de pintura também estão compostos de três fases. Apenas a segunda etapa difere dos processos galvanizados, permanecendo a primeira e a terceira etapas inalteradas. Uma ordem sugerida para o caso de se utilizar sistemas de pinturas, está apresentada abaixo:

- Desengrachamento
- Primeiro enxágue
- Aplicação do refinador
- Fosfatização ou fosfatasse
- Segundo enxágue
- Passivação
- Lavagem com água desmineralizada

**Equações governantes**

O oxigênio oxida o ferro para Fe II

$$2 * Fe + O_2 + H_3 * O^+ \rightarrow 2 * F_e{}^{2+} + 6 * H_2O \quad (1)$$

O Fe II é oxidado para Fe III

$$4 * F_e{}^{2+} + O_2 + 12 * H_2O \rightarrow 2 * F_{e2}O_3 + 8 * H_3O^+ \quad (2)$$

Oxido-redução

$$4 * F_e + 3 * O_2 \rightarrow 2 * F_{e2}O_3 \quad (3)$$

O que causa a corrosão no caso a ferrugem como já sabemos é o oxigenio e a agua. Certo que pode ser só oxigênio ou só a agua, mas geralmente é utilizado os dois. No caso essa reacao é só do oxigenio, no caso o ar atmosférico;

**RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os métodos sugeridos para se evitar o processo de corrosão nos trilhos ferroviários da companhia VALE S.A. consistem em técnicas conhecidas e bem desenvolvidas por diversas empresas ao redor do Brasil, entretanto, apresentam-se de maneira exclusiva e inovadora em se tratando da forma de aplicação dessas referidas técnicas.

Como a maioria das novas ideias apresentam evidentes obstáculos, quanto à sua implementação, essa não fugiria a essa regra. Porém, como já citado, os possíveis obstáculos podem ser resolvidos com adaptações ou pequenos projetos. O Truck Star se apresenta, nesse contexto, como um veículo capacitado a realizar os processos sugeridos, sendo necessárias poucas alterações na configuração do mesmo. A incidência de troca de trilhos da companhia e o valor desses trilhos, poderiam ser revertidos na compra de um veículo do tipo Truck Star, onde seria analisada se esse custo benefício, oriundo da aquisição desse veículo, valeria a pena. Esta análise não foi possível devido à falta de informações, no sentido da frequência das trocas dos trilhos da companhia VALE S.A. e o preço fornecido pelos fabricantes. Esses dados são considerados confidenciais pela companhia e apenas de uso interno da mesma. A galvanização pulverizada, ou galvanização a frio, ou ainda metalização é a nossa proposta, e deve ser executada com quatro camadas de elementos protetores, sendo elas, em suas respectivas ordem; níquel, cobre, níquel e cromo. A máxima fixação do cobre e do cromo dependem do níquel, sendo que essas quatro camadas oferecerão um nível maior de proteção, devido a maior espessura que formarão.

Alguns metais utilizados para se evitar o processo de corrosão não estão incluídos no grupo de metais que sugerimos para serem pulverizados no processo de formação da camada protetora para os trilhos. Ou seja, dependendo dos efeitos obtidos durante a execução do referido processo de proteção alguns elementos podem ser adicionados ou substituídos, como por exemplo a adição de vanádio e tungstênio no processo. Não se pode descartar a possibilidade da utilização de tintas especificas contra o processo de corrosão, essas tintas, já existentes no mercado, podem ser substituir a pulverização da camada protetora até aqui discutida. Entretanto, a frequência de tal processo utilizando as tintas ao invés dos metais ocorrerá de maneira mais incidente. Devendo-se então haver cuidado quanto ao custo final dessa substituição em comparação aos efeitos resultantes da mesma.

Uma mistura entre as tintas e uma leve solução contendo metais é algo que nunca foi tentado no mercado atualmente (pelo menos não temos notícia disso) mas isso não deve ser descartado. É claro que nesse ultimo caso, deve haver estudos e pesquisas que tornem a mistura euilibrada e/ou harmoniosa trazendo bons resultados após a aplicação.

Devemos por fim fazer mais uma observação antes de se iniciarem os testes em compomentes e/ou elementos instalados em empresas com relevante grau de serviços. Dependendo da aplicação (falando um pouco além dos trilhos da companhia VALE S.A.) o metal em questão não apenas sofrerá o processo de corrosão como também poderá estar em atrito constante com outro metal ou material. Esse atrito ira influenciar na duração da camada protetota (ou película protetora) que será disposta no metal para evitar a corrosão. No caso dos trilhos da companhia VALE S.A. os mesmos se encontram em atrito com as rodas das locomotivas. Como esse atrito não pode ser evitado, uma maneira de amenizá-lo é aplicar a mesma camada protetora que seria aplicada nos trilhos. A resistência de ambas as partes seriam parecidas diminuindo assim o desgaste da proteção contra a corrosão. A aplicação de uma camada de um dito metal de sacrifício não se mostra uma ideia interessante pois isso poderia aumentar os custos do processo como um todo, o que nã´é desejado por enhuma empresa, pelo menos não comparado aos retornos oriundos de tal método.

Os autores se mostram anciosos para verem os resultados aqui apresentados sendo aplicados de fato. Os resultados seriam cuidadosamente analisados e a excelência na tentative de amenizar a corrosão seria buscada. Com aplicação no “mundo real” várias ideias e possibilidades surgirão e arranjos e alterações deverão ser feitas para se melhorar e/ou otimizar o referido processo.

## CONCLUSÃO

A galvanoplastia é um processo químico ou eletroquímico de deposição de uma fina camada de um metal sobre uma superfície, que pode ser metálica ou não. O objetivo deste processo é embelezar as peças, e também protegê-las contra a corrosão, aumentar sua durabilidade, melhorar as propriedades superficiais e características de resistência, espessura, condutividade e capacidade de estampar. A galvanoplastia é aplicada em vários ramos da atividade econômica: na indústria automobilística, na indústria de bijuterias, na construção civil, na indústria de utensílios domésticos, na informática, na indústria de telefonia e na recuperação de objetos decorativos. Para ganhar uma camada externa metálica, as peças são submetidas a um ou mais banhos, que podem ser de cromo, níquel, ouro, prata, cobre, zinco ou estanho. No presente estudo sugere-se que a galvanoplastia em sua forma pulverizada seja aplicada nos trilhos da companhia VALE S.A., com o propósito de se proteger esses trilhos do processo de corrosão. Essa aplicação ocorreria utilizando-se três elementos dispostos em quatro camadas. Uma modificação do veículo Truck Star seria usada para tal aplicação. Espera-se que com essa recomendação se minimize os gastos com manutenção e/ou troca desses trilhos da malha ferroviária.

## AGRADECIMENTOS

As considerações e agradecimentos são destinadas primeiramente à Deus, fonte de vida e de amor, que ainda nos mantém e nos busca. Em seguida, às nossas famílias pelo apoio em todas as áreas e ocasiões. E, à Universidade Estadual do Maranhão, que nos fornece conhecimento de diversas formas e possibilita estudos, trabalhos e pesquisas como essas.

## REFERÊNCIAS

Furtado P., Pintura anticorrosiva dos metais, Rio de Janeiro, LTC, 2010.
Gentil, V., Corrosão, 2011, 6ª edição.
Jambo H. C., Corrosão. Fundamentos, Monitoração e Controle, 12/2007.
Oliveira A. R., 2012, Corrosão e Transporte de Superficie, Instituto Federal do Pará, Santa Maria, UFSM.
Pinhão C. M. M., Aços galvanizados para indústria automobilística, BNDES, 2000.
Ramanathan L. V., Corrosão e seu controle, São Paulo, Hemus, 2004.
Serra E. T., Corrosão e Proteção Anticorrosiva dos Metais no Solo, 2014, 1ª edição.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores Israel Conceição Rocha, Alberth Rodolfo Ferreira Viana e Nícolas Rodrigues Ferreira são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
( **x** ) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 27 à 31 de agosto de 2018 – Brasília, DF

# MATERIAIS *SELF-HEALINGS*

**Lais Rocha Carvalho**
Universidade de Brasília (UnB) – Faculdade do Gama (FGA)
Setor Leste Projeção A - Gama Leste, Brasília - DF, 72444-240.
lais.rocha.carvalho@gmail.com

**RESUMO:** Os materiais avançados tem ganhado cada vez mais espaço no desenvolvimento tecnológico. Em estudos mais recentes, esses materiais buscam imitar ou se basear em mecanismos genéticos para que sua durabilidade aumente, ou até mesmo ele possa se auto-reparar, sendo portanto, caracterizados como materiais *self-healings*. Esse mecanismo, pode abranger diferentes classes de materiais incluindo metais, cerâmicos e polímeros. Esse artigo busca apresentar como essa gama de materiais podem ser trabalhados, relatando possíveis vantagens e desvantagens em algumas aplicações, mecanismos de cura e perspectivas para o futuro.

**Palavras-Chave:** Materiais avançados, auto-curáveis, revisão

***ABSTRACT:*** *The advanced materials have gained more and more space in the technological development. In recent researches, these materials seek to look like, or to base in genetic mechanisms to increase it's durability, or even to be possible to self repair, therefore they are characterized as self-healings materials. These mechanisms might include different material classes, including metals, ceramics and polymers. This paper aims to show how this variety of materials can be worked, relating possible advantages and disadvantages in some applications, healing mechanisms and future perspective.*

***Keywords:*** *Advanced Materials, self-healings, revision*

## INTRODUÇÃO

Em materiais biológicos a capacidade de auto-cura, como a fusão de ossos quebrados, é uma propriedade bem marcante e otimizada evolutivamente (Hager, 2010). No entanto, em materiais sintéticos não há naturalmente essa propriedade. Pelo contrário, são muitas vezes desenvolvidos com base no padrão de "prevenção de danos" ao invés de "gerenciamento de danos" (Zwaag, 2007).

Mediante isso, foram desenvolvidos os *self-healing materials* (SHM), materiais capazes de consertar fissuras e danos, recuperando propriedades mecânicas e funcionais da estrutura danificada (Ghosh, 2009). Essa "cura" fundamenta-se, em geral, na mobilidade de uma massa ou mecanismo a qual cobre totalmente a área corrompida e em seguida endurece, restaurando o material (Hager, 2010). Esse mecanismo geral de restauração não é limitado a apenas uma classe de material, porém a temperatura necessária pode variar de acordo com o material, onde no caso dos polímero são mais baixas (inferiores a 120°C) e para os cerâmicos são mais elevadas (superiores a 800°C) (Zwaag, 2007).

Os materiais sintéticos de auto-cura podem ser subdivididos em duas vertentes, os autônomos, os quais não necessitam ser ativados por nenhum estímulo específico, e não-autônomos, que necessitam de gatilhos externos de ativação para realizarem a auto-cura, dentre eles o calor e a radiação (Ghosh, 2009). Dessa forma, os materiais autônomos possuem um mecanismo interno capaz de detectar, como um sensor, e reparar, como um atuador, automatizado internamente (Anderson et al., 2007).

Outra subdivisão que pode ser encontrada dentro desses materiais é o extrínseco e o intrínseco. O primeiro caracteriza-se pela cura baseada em componentes externos como nano e microcápsulas (Anderson et al., 2007). O segundo, não necessita de agentes externos de cicatrização. Esse último mecanismo de cura é o mais almejado, porém nem sempre é viável (Jones et. al. , 2006).

Dependendo do tamanho da fissura, esta pode não ser remodelada ou fechada completamente (Jones et. al., 2006). Além disso, a capacidade de utilização do mecanismo de cura na estrutura por mais de uma vez é um atrativo significativo, porém de difícil execução (Jones et. al. , 2006). Definido esses principais conceitos na área de *self-healin*g, o restante do artigo abordará como as outras classes de materiais estão se adequando, as estratégias utilizadas, vantagens e desvantagens, e perspectiva futura de aplicação.

## METODOLOGIA

A seguir são apresentados as principais aplicações das classes de materiais no contexto de auto-curáveis.

### Metais

A auto-cura, seja ela por efeitos químicos ou físicos, é mais difícil em metais do que nas demais classes de materiais, pois seus átomos são muito pequenos e suas ligações químicas não possuem muita direcionalidade. Dessa forma, a cura é realizada em volumes muito pequenos. Além do reduzido número de trabalhos nessa área, devido às dificuldades já mencionadas, os que são encontrados levam em consideração a reação de superfícies metálicas com material circundante, o qual protege esta superfície de efeitos atmosféricos (Zwaag, 2007).

Em compósitos metálicos, os efeitos das anomalias da tensão de escoamento e a criação de barreiras de difusão de oxigênio nas propriedades mecânicas de materiais de alto desempenho estão sendo investigados (Lumley et.al., 2003). Ainda, estudos comprovam a deformação de grãos quando há a fluência e difusão em presença de elevadas temperaturas, permitindo o fechamento de alguns poros e fissuras. Em ligas com memória de forma (SMA) nota-se o uso de micro-cápsulas preenchidas com resina para suprimir a falha (Kirkby et. al., 2009).

Outro mecanismo utilizado, foi a incorporação de cápsulas com líquido eletrogalvanizados, que permitem o fechamento de fissuras e inibe a corrosão (Manuel, 2009). Com o avanço nessa área, espera-se obter uma construção leve e otimizada juntamente com uma maior confiabilidade estrutural nas áreas de automotiva e aeronáutica, principalmente.

### Cerâmicos

As últimas pesquisas sobre envolvendo cerâmicos e *self-healings* frisam bastante o concreto hidráulico. Quando fissurado, ao entrar em contato com a água induz a formação de hidratos que modificam o pH e realizam a cura. No entanto, a largura da fissura é algo importante, caso ela seja muito grande a auto-cura não é tão eficiente (Jonkers, 2007). Por causa disso, desenvolveram Compósitos Cimentícios que controlam a largura da fissura (Li & Yang, 2007).

Materiais cerâmicos para realizar a cura, necessitam de altas temperaturas no local da falha, geralmente superiores a 1000° C, e dependendo do tamanho da fissura o material não consegue fechar completamente a fenda (Ando et. al., 2002). É possível realizar a cura em temperaturas mais baixas se o grão for umedecido por uma fase de vidro intergranular, assim, a difusão superficial dos grãos permite começar a reação de cicatrização do local danificado, e posteriormente, fornecer mais energia para a geração de poros esféricos e cilíndricos de raios pequenos os quais podem colapsar a altas temperaturas (Ando et. al., 2002). Levando em consideração esse colapso controlado por difusão e o raio dos poros, é possível fechá-los completamente se o raio for de 10 a 25 $\eta$ m (Sugiyama et. al., 2008). A maior parte dos trabalhos na área de cerâmicos se concentra na cura a temperaturas acima da temperatura de trabalho, poucos artigos apresentam valores abaixo dessa temperatura.

### Polímeros

A pesquisa utilizando auto-cura extrínseca, geralmente incorpora agentes de cura líquido em microcápsulas. De forma que quando sofrido algum dano mecânico, o monômero polimeriza a fissura com a ajuda de um catalisador (Varley, 2007). A desvantagem desse métodos é a regeneração da função do material, que sofreu o dano mecânico, pode acontecer uma vez apenas (Varley, 2007). Estudos comprovaram, que os melhores sistemas semi-comerciais de microcápsulas para auto curáveis foram os de cápsulas alongadas com o comprimento cerca de 10 vezes o diâmetro (Chen et. al., 2003)..

A auto cura intrínseca pode ser realizada de maneira mais simples por interações físicas, como uma difusão de cadeias poliméricas que gerará nova outras cadeias para o fechamento da fenda (Zhang et. al, 2012). Outras formas de realizá-la depende diretamente de como o dano estrutural foi realizado (Zhang et. al, 2012). Caso seja balístico, o próprio calor gerado é suficiente para realizar a auto-cura por ligações químicas secundárias (Zhang et. al, 2012).

Caso o dano envolva a clivagem das cadeias poliméricas covalentes, a cura pode ser obtida ao formar novas ligações químicas (Zedler et. al., 2014). Este último, abrange uma vasta área de aplicações de polímeros, como fitas adesivas que utilizam quebra reversível de ligações de hidrogênio, de forma que depois do rompimento, o material está apto a se reconectar ao encostar uma superfície com a outra (Zedler et. al., 2014). Se a falha acontecer por tensão mecânica, um catalisador intrínseco ao material de cura pode ser ativado para induzir uma reação química e cobrir a fissura (Zedler et. al., 2014).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A perspectiva geral apresentada anteriormente, demonstra o grande potencial da aplicabilidade de cada material, como pode ser resumido na Tab. 1. O código de cores indica o nível de sucesso esperado ou demonstrado (cinza escuro - positivo; cinza claro - potencial; branco - improvável).

**Tabela 1.** Mecanismos potenciais selecionados para dar origem ao comportamento de auto-cura para as classes de materiais.

| Propriedades | Encapsulamento | Canais de transporte | Expansão de fases | Aumento de temperatura | Fase de separação | Crosslinks reversíveis | Processos biológicos | Processos eletroquímicos |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Polímeros e Compósitos | | | | | | | | |
| Cerâmicos | | | | | | | | |
| Metais | | | | | | | | |

Fonte: Adaptado de Harger et. al. (2010)

Dessa forma, a valia de materiais curadores é maior em polímeros do que nos demais, visto que o intervalo de temperaturas as quais são utilizadas são mais simples de se trabalhar. Além disso, espera-se que esse campo de *self-healings* cresça, visto que todos os materiais, sejam eles sintéticos ou naturais, tendem a danificar, e por consequência, perder a função da estrutura analisada. A auto cura por sua vez, é uma alternativa no gerenciamento de danos, ampliando a vida útil e a confiabilidade do material.

Ainda, seu desenvolvimento tende a gerar no futuro uma economia significativa de recursos, energia, redução nos fatores de segurança excessivos e melhorias no design de componentes que poderiam revolucionar diversas indústrias, como por exemplo: a aeroespacial, aeronáutica e automobilística.

## CONCLUSÃO

Apesar das pesquisas na área de *self-healings* serem revolucionárias, ainda há uma limitação significativa para a sua comercialização, pois são estruturas muito delicadas, e por vezes, complexas de se fabricar, requerindo uma boa análise da caracterização de seus efeitos sobre as propriedades mecânicas, principalmente dos constituintes que permitem a cura, como: microcápsulas ou redes vasculares. Infelizmente, esse estudo é caro e de difícil acesso, devido às ínfimas dimensões envolvidas. Outro motivo para a constante inviabilidade comercial, são as instabilidades estruturais e químicas, e também, o uso de aditivos para realizar a auto-cura.

Dessa maneira, os estudos não se concentram apenas nas abordagens mecânicas e químicas para melhorar a durabilidade dos materiais, eles envolvem técnicas para detecção de danos mais autônomos, por parte da estrutura. Portanto, a cada vez que as pesquisas avançam sobre os materiais s*elf-healing*, maiores são as chances de sua aplicação e o aumento de sua abrangência, como por exemplo: em nanoestruturas e materiais com memória de forma.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Cristian Vendittozzi, por guiar e propiciar o estudo desse tema na área de materiais avançados.

## REFERÊNCIAS

Andersson, H. M. ; Keller, M. W. ; Moore, J. S.; Sottos, N. R. ; White, S. R.; In Self Healing Materials – an Alternative Approach to 20 Centuries Materials Science ,(Eds: S. van der Zwaag ), Springer , Dordrecht, The Netherlands 2007 , Ch.2.

Ando, K., Chu, M.-C. , Tsuji, K., Hirasawa, T., Kobayashi, Y., Sato, S., Europ, J.. Ceram. Soc. 2002 , 22 , 1313.

Chen, X.,Wudl, F., Mal, A. K., Shen, H., Nutt, S. R., Macromolecules 2003 , 36 , 1802 .

Ghosh, S. K. Self-healing Materials: Fundamentals, Design Strategies, and Applications. Chennai: Wiley- Vch, 2009.

Hager, M. yr: Self-healing materials. Advanced Materials 2010 vol:22 iss:47 pg:5424 -30.

Hager, M. D. et al. Self-Healing Materials. Advanced Aterials, Germany, v. 5, n. 22, p.5424-5430, 13 set. 2010.

Jones, A. S. ;Rule, J. D. , Moore, J. S.; White, S. R.; Sottos, N. R. , Chem. Mater. 2006 , 18 , 1312.

Jonkers, H. M., in Self Healing Materials – an Alternative Approach to 20 Centuries Materials Science ,(Eds: S. van der Zwaag ), Springer , Dordrecht, The Netherlands 2007 , Ch.9.
Kirkby, E. L., Michaud, V. J., Sottos, N. R., White, S. R., Manson, J.-A. E. , Polymer 2009 , 50 , 5533.
Li, V. C.,Yang, E.-H., in Self Healing Materials – an Alternative Approach to 20 Centuries Materials Science ,(Eds: S. van der Zwaag ), Springer , Dordrecht, The Netherlands 2007 , Ch.8.Lumley, R. N., Polmear, I. J., Morton, A. J. , Mater. Sci. Technol. 2003, 19 , 1483.
Manuel, M. V., in Self-healing Materials: Fundamentals, Design Strategies, and Applications, (Eds: S. K. Ghosh ), Wiley-VCH , Weinheim, Germany 2009 , Ch.8.
Sugiyama, R.,Yamane, K., Nakao, W., Takahashi, K., Ando, K., Intell, J.. Mater. Syst. Struct. 2008 , 19 , 411.
Varley, R., in Self Healing Materials – an Alternative Approach to 20 Centuries Materials Science ,(Eds: S. van der Zwaag ), Springer , Dordrecht, The Netherlands 2007 , Ch.5.
Zhang M, Xu D, Yan X, Chen J, Dong S, Zheng B, et al. self healing supramolecular gels formed by crown ether based host guest interactions. Angew Chem 2012;124:5.
Zedler L, Hager MD, Schubert US, Harrington MJ, Schmitt M, Popp J, et al. Monitoring the chemistry of self-healing by vibrational spectroscopy e current state and perspectives. Mater Today 2014;17(2):57e69.
Zwaag, S. v. D., in Self Healing Materials – an Alternative Approach to 20 Centuries Materials Science,(Eds: S.van der Zwaag), Springer, Dordrecht, The Netherlands 2007, Ch.1.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

O autor é o único responsável pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção ‘área de conhecimento do trabalho’.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(X) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 27 a 31 de agosto de 2018 – Brasília, DF

# MEDIÇÃO DE CALOR E TEMPERATURA DE CAVACOS POR MEIO DO MÉTODO CALORIMÉTRICO

**Guilherme Henrique Alves Andrade, Ivanilson Sousa da Costa, Márcio Bacci da Silva**
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Av. João Naves de Ávila, 2121, Uberlândia - MG, CEP 38400-089, Brasil
E-mail: guilhermehenriqueaa@gmail.com, ivanilsonsousacosta@hotmail.com

**RESUMO:** Tem sido um consenso entre os pesquisadores que grande parte da energia mecânica associada à formação do cavaco se transforma em calor. Parte desse calor gerado é dissipado pelos cavacos formados durante o processo. Este trabalho tem como objetivo avaliar a quantidade de calor dissipada pelos cavacos e as temperaturas associadas à sua formação por meio do método calorimétrico. Foi utilizado um calorímetro de água constituído de Technyl® e PVC (Policloreto de Vinila). Termopares foram utilizados para medição das temperaturas no interior do calorímetro e na região próxima à zona de corte, através dos canais de lubrificação interna de uma broca. Os resultados mostraram que a temperatura média em que os cavacos adentraram no calorímetro foi de 171,80 ºC. O calor cedido pelos cavacos à água foi calculado em 0,57 kJ. Os termopares inseridos no canal de lubrificação interna apresentaram as temperaturas máximas de 170,1 ºC e 193,6 ºC.

**Palavras-Chave:** calorímetro, temperatura de corte, cavaco

***ABSTRACT:*** *It has been a consensus among researchers that much of the mechanical energy associated with chip formation turns into heat. Some of this generated heat is dissipated by the chips formed during the process. This work aims to evaluate the amount of dissipated heat by the chips and the temperatures associated to their formation by the calorimetric method. It was used a water calorimeter consisted of Technyl and PVC (Polyvinyl chloride). Thermocouples were used to measure the temperatures inside the calorimeter and in the region near the cutting zone, through the internal lubrication channels of a drill. The results showed that the average temperature in which the chips entered the calorimeter was 171.80 ºC. The transferred heat to the water by the chips was calculated at 0.57 kJ. The thermocouples inserted in the internal lubrication channels showed temperatures of 170.1 ºC and 193.6 ºC.*

***Keywords:*** *calorimeter, cutting temperature, chip*

## INTRODUÇÃO

Segundo Ferraresi (2012), a geração de calor no processo de formação dos cavacos ocorre em três regiões distintas: na zona primária de cisalhamento ($Q_z$), na interface entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta ou zona secundária de cisalhamento ($Q_{a1}$); na interface de contato da peça com a superfície de folga da ferramenta ou zona terciária de cisalhamento ($Q_{a2}$). A quantidade de calor produzida por estas fontes energéticas é dissipada através do cavaco ($Q_c$), da peça ($Q_p$), da ferramenta ($Q_{fer}$) e do meio ambiente ($Q_{ma}$).

Tem sido um consenso entre os pesquisadores que, grande parte da energia mecânica associada à formação do cavaco se transforma em calor (Trent e Wright, 2000; Ferraresi, 2012).

Muitas técnicas experimentais foram desenvolvidas para as medições de calor e temperatura em processos de usinagem e cada uma delas tem suas vantagens e desvantagens. Neste trabalho, foi empregada a técnica experimental denominada método calorimétrico. Define-se calorímetro como um sistema fechado que não permite trocas de calor com o ambiente (adiabático) e todas as trocas de calor ocorrem no seu interior. Um calorímetro ideal não permite qualquer perda de energia térmica para o ambiente e o seu conteúdo pode ser considerado como um sistema termicamente isolado (Santos, 2018).

Este trabalho tem como objetivo avaliar a quantidade de calor dissipada pelos cavacos e as temperaturas associadas a sua formação por meio do método calorimétrico.

### Medições de calor e temperatura de cavacos por meio do método calorimétrico

Segundo Ferraresi (2012), a temperatura média do cavaco pode ser determinada aproximadamente por meio de um calorímetro de água, conforme a Fig. (1).

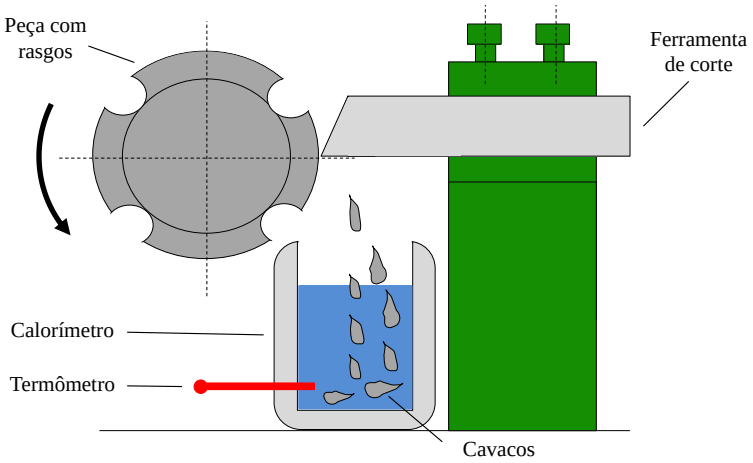



**Figura 1.** Determinação da temperatura média do cavaco através de calorímetro de água (adaptado de Ferraresi, 2012)

A metodologia consiste na medição da temperatura inicial da água seguida da usinagem de uma peça com rasgos axiais (para haver quebra de cavaco). O cavaco gerado se aloja no interior do calorímetro. Após a usinagem, a temperatura final da água é medida após um tempo previamente determinado. Os cavacos são pesados após a secagem. Desta forma, a temperatura do cavaco é determinada pela equação do calorímetro.

Por este método pode-se determinar também a quantidade de calor fornecida à ferramenta de corte (Ferraresi, 2012).

Uma metodologia similar foi utilizada no trabalho pioneiro de Schmidt e Roubik (1949). Os autores utilizaram um calorímetro de água para determinação do calor dissipado pelos cavacos, na furação de liga de magnésio. Este calor dissipado foi obtido observando o aumento de temperatura do calorímetro de água na qual a peça foi produzida de maneira que a formação do cavaco ocorresse em uma posição superior ao nível da água do calorímetro, sendo assim permitido que apenas os cavacos interagissem com a água, sendo coletados por gravidade. A configuração deste teste está apresentada na Fig. (2).

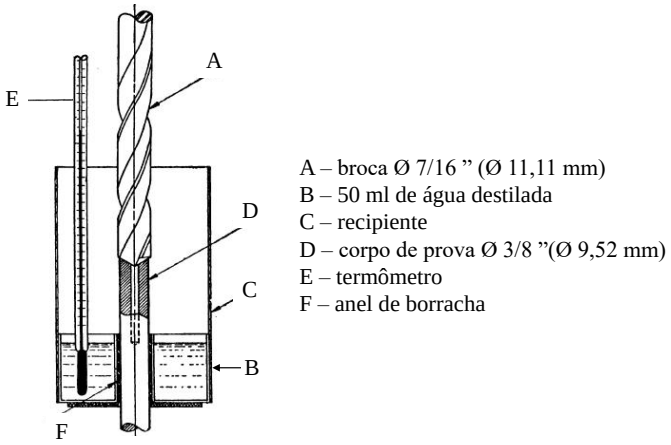



**Figura 2.** Calorímetro de água para estimativa de calor dissipado pelos cavacos (adaptado de Schmidt e Roubik, 1945 *apud* Komanduri e Hou, 2001)

Os resultados mostraram que a maior parte do calor gerado em usinagem, aproximadamente de 70 % a 85 %, foi dissipada pelos cavacos (Schmidt e Roubik, 1945 *apud* Komanduri e Hou, 2001). Por meio de uma metodologia semelhante, descrita na seção seguinte, este trabalho se propôs em avaliar o calor dissipado e as temperaturas dos cavacos na furação de ferro fundido cinzento utilizando o método calorimétrico.

Outra informação relevante é a temperatura vigente na região próxima a zona de corte, tanto da ferramenta de corte quanto da peça usinada. Sato *et al.* (2013) utilizaram os canais de lubrificação interna de uma broca para passagem de fibras óticas, dando acesso a região próxima à zona de corte para monitoramento das temperaturas da superfície inferior do furo com um pirômetro, assim como mostra a Fig. (3). Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios. Uma metodologia similar foi também empregada neste trabalho, todavia, foram utilizados cabos de termopares tipo T através dos canais de refrigeração interna de uma broca.

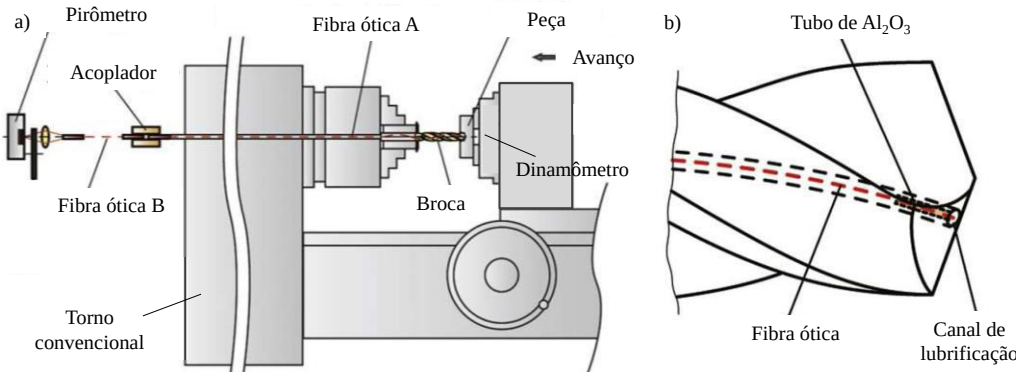



**Figura 3.** a) Configuração do experimento realizado; b) detalhe do canal de lubrificação e da fibra ótica utilizada (adaptado de Sato *et al.*, 2013)

## METODOLOGIA

### Calorímetro de água

O modelo de calorímetro utilizado foi o calorímetro de água desenvolvido por Silva (2015), consistindo de dois recipientes cilíndricos coaxiais encaixados entre si, o externo fabricado em Technyl® e o interno fabricado em PVC (Policloreto de Vinila). O recipiente externo foi usinado com um rebaixo para inserção do recipiente interno que, por sua vez, foi usinado com um rebaixo para inserção do corpo de prova. Entre os dois recipientes é adicionado poliestireno expandido para isolação térmica. No recipiente interno do calorímetro foram adicionados 90 ml de água destilada. Os componentes do calorímetro e suas dimensões estão apresentados na Fig. (4) e na Tab. 1.

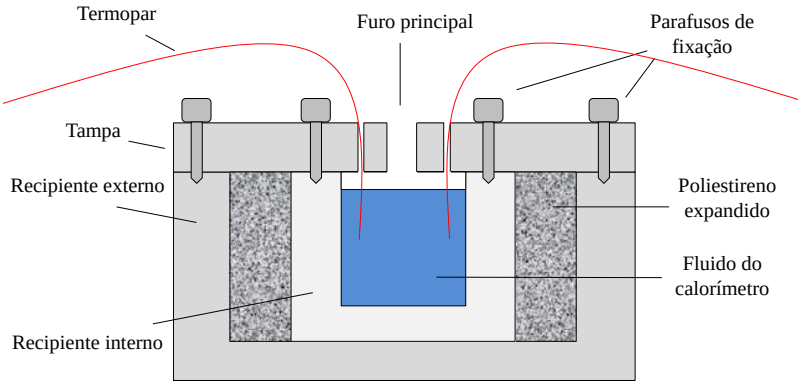



**Figura 4.** Seção esquemática do calorímetro de água

**Tabela 1.** Dimensões dos componentes do calorímetro de água

| Componente | Ø externo (mm) | Ø interno (mm) | Ø do rebaixo (mm) | Altura (mm) |
|---|---|---|---|---|
| Cuba externa (Technyl®) | 150 | 122 | 95 | 66 |
| Cuba interna (PVC) | 95 | 60 | 16 | 55 |
| Tampa (Technyl®) | 150 | - | 60(1) | 5 |

(1): No caso da tampa, a dimensão corresponde a um ressalto.

O equipamento para medição de temperaturas foi uma unidade de aquisição, comutação e registro de dados Keysight Technologies® modelo 34970A comandado pelo programa computacional Agilent BenchLink Data Logger 3.

As ferramentas de corte usadas nos ensaios experimentais foram duas brocas helicoidais de corte a direita com duas arestas cortantes e diâmetro de 10 mm: uma broca de aço-rápido/cobalto (HSS) tipo M42 (8% Co) revestida de TiAlN (nitreto de titânio e alumínio) e uma broca de metal duro (MD) classe K30 revestida de TiN (nitreto de titânio) com canais para refrigeração interna, utilizados para passagem de termopares, ver Fig. (5).

**Figura 5.** Broca MD com canais de refrigeração interna

A máquina-ferramenta utilizada foi um torno mecânico convencional Imor Maxi II 520, de potência máxima igual a 4,416 kW (6 cv). O corpo de prova foi uma barra cilíndrica de ferro fundido cinzento com 37,5 mm de diâmetro. Não foi utilizado fluido de corte durante os testes.

**Procedimento Experimental**

Na Fig. (6) é apresentada a configuração dos testes realizados. Para o controle automático do avanço, a ferramenta de corte foi fixada na torre porta-ferramenta do carro transversal do torno. O calorímetro foi posicionado abaixo da região de corte, onde os cavacos foram colhidos através de um funil e alojados no interior do calorímetro. O percurso dos cavacos, desde a sua formação até a entrada do calorímetro, foi medido em 195 mm.

No teste A, foi utilizada a broca HSS. Quatro termopares foram adicionados no interior do calorímetro, a 25 mm de distâncias desde a tampa do calorímetro, para monitoramento da temperatura da água. No teste B, utilizando a broca MD, foram inseridos dois termopares através dos canais de refrigeração para a medição de temperatura na superfície principal de folga da ferramenta. Os parâmetros de corte utilizados em ambos os testes foram: velocidade de corte de 27,3 m/min, avanço de 0,134 mm/volta e profundidade do furo de 15 mm.

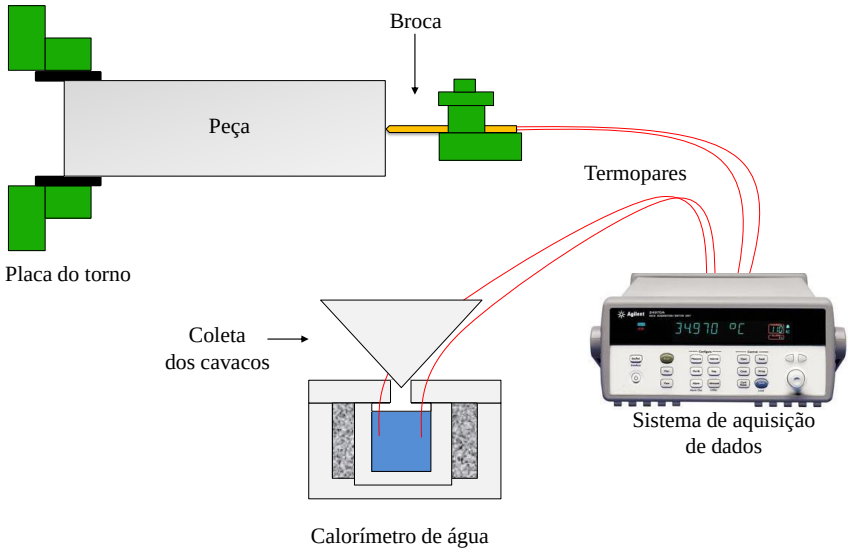



**Figura 6.** Montagem experimental utilizada nos testes

Após o corte, foi permitido que os cavacos trocassem calor com a água. Em seguida, os cavacos foram secos para medição da massa por meio de balança digital (resolução de 0,01 g).

**Estimativa da porcentagem de energia mecânica transformada em calor**

A avaliação das trocas de calor ocorridas no interior do calorímetro foi realizada por meio da equação fundamental da Calorimetria.

O valor de calor específico dos cavacos (ferro fundido cinzento) foi 0,460 J/kgºC (Guesser, 2009).

Pelo princípio da conservação de energia, o calor total dissipado pelo cavaco ($Q_c$) é absorvido pela água ($Q_a$) no interior do calorímetro. Desta forma, obtem-se a Eq. (1):

$$Q_c = Q_a \qquad (1)$$

Decorrente da Eq. (3), pode-se provar a veracidade da Eq. (2):

$$T_i^{cav} = \frac{m_a c_a (T_{eq} - T_i^a) + m_{cav} c_{cav} T_{eq}}{m_{cav} \cdot c_{cav}} \qquad (2)$$

Onde $T_i^{cav}$ representa a temperatura inicial na qual os cavacos chegam no calorímetro e $T_{eq}$ representa a temperatura de equilíbrio entre calorímetro e cavacos.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Na figura (7) são apresentadas as medições de temperatura da água para o teste A. Observa-se que a máxima temperatura medida ocorre na entrada dos cavacos no interior do calorímetro. A temperatura máxima registrada no interior do calorímetro foi em torno de 30,3 ºC. A temperatura de equilíbrio foi considerada em 900 s após a usinagem.

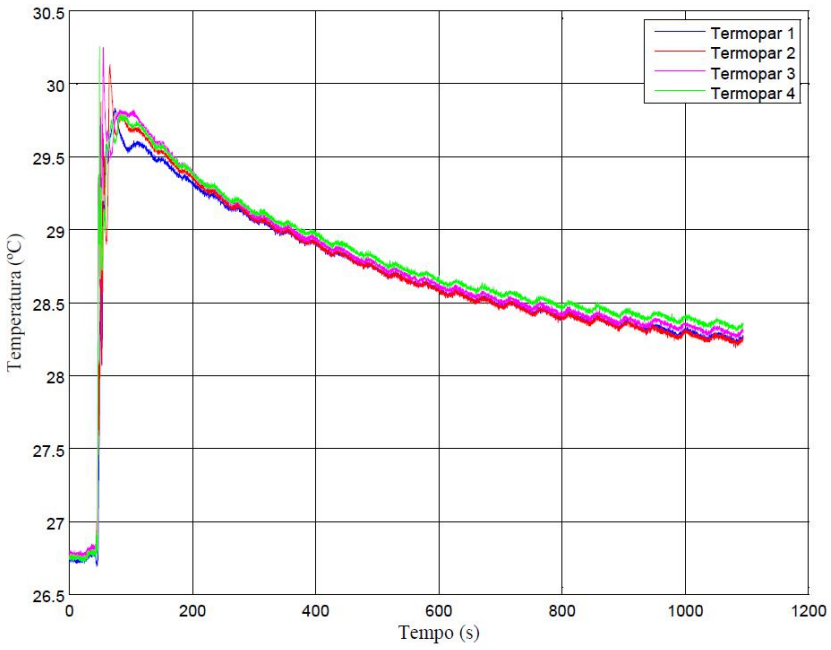



**Figura 7.** Medição de temperatura da água para o teste A

A massa dos cavacos medida foi de (8,35 ± 0,04) g. Calculando-se o volume de material retirado e, juntamente com a densidade do ferro fundido, pode-se estimar a massa de cavacos formados em (8,43 ± 0,06) g. Logo, pode-se considerar que o funil foi eficaz para a coleta dos cavacos.

Por meio da Eq. (2), obtém-se que a temperatura média em que os cavacos adentraram no calorímetro, de 171,80 ºC. É importante ressaltar que o percurso desde a zona de corte até a entrada dos cavacos no calorímetro foi de 195 mm. A taxa de resfriamento do cavaco durante este percurso é desconhecida, impossibilitando uma estimativa da temperatura dos cavacos imediatamente após sua formação. O calor cedido pelos cavacos, que é igual ao calor absorvido pela água, foi calculado em 0,57 kJ.

Na figura (8) é apresentada a variação de temperaturas na superfície principal de folga da ferramenta, realizada no teste B. Foram observadas as temperaturas máximas de 170,1 ºC para o termopar 1 e 193,6 ºC para o termopar 2. A taxa

de resfriamento apresentada logo após as máximas temperaturas registradas foi de até - 24 ºC/s, sendo um indício de uma acentuada taxa de resfriamento dos cavacos.

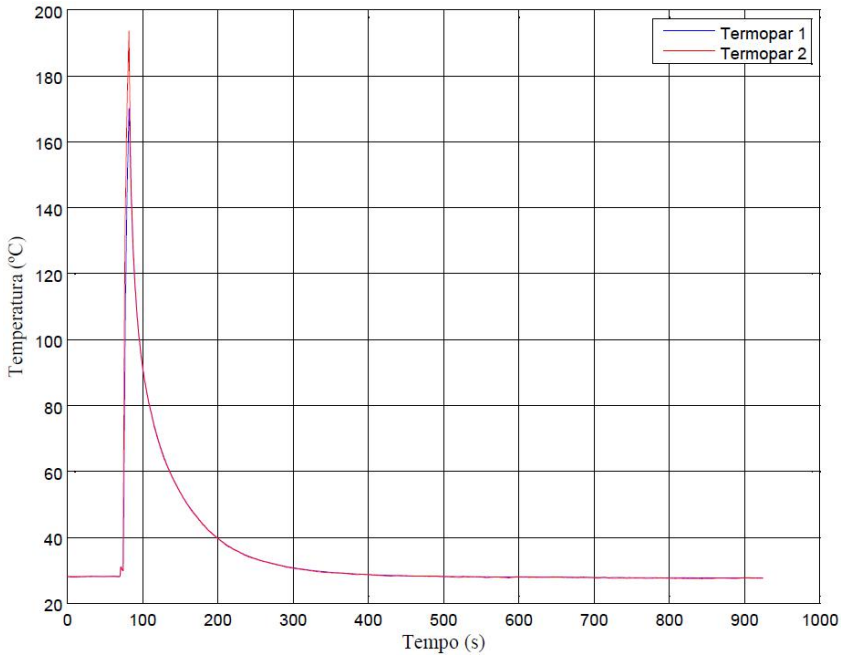



**Figura 8.** Variação da temperatura na água no teste B

## CONCLUSÃO

O método calorimétrico apresentou bons resultados na medição do calor dissipado pelos cavacos na furação do ferro fundido cinzento e nas temperaturas envolvidas na sua formação. A temperatura média em que os cavacos adentraram no calorímetro foi calculada em 171,80 ºC e o calor cedido pelos cavacos à água foi calculado em 0,57 kJ. Os termopares inseridos no canal de lubrificação interna apresentaram as temperaturas máximas de 170,1 ºC e 193,6 ºC e apresentaram taxa de resfriamento máxima de - 24 ºC/s, sendo um indício de uma acentuada taxa de resfriamento dos cavacos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores deveras agradecem ao CNPq, a CAPES e à FAPEMIG pelo apoio financeiro às pesquisas realizadas no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem da Universidade Federal de Uberlândia (LEPU/UFU).

## REFERÊNCIAS

Da Silva, M.B., Wallbank, J., 1999, "Cutting temperature: prediction and measurement methods – a review", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 88, Issues 1–3, pp. 195–202.

Ferraresi, D., 2012, "Fundamentos da Usinagem dos Metais", Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 751 p.

Guesser, W.L., 2009, "Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos", Ed. Blucher, São Paulo, 336 p.

Komanduri, R.; Hou, Z.B., 2001, "A Review of the Experimental Techniques for the Measurement of Heat and Temperatures Generated in Some Manufacturing Processes and Tribology", Tribology International 34, p.653–682.

Machado, Á.R., Abrão, A.M., Coelho, R.T., Da Silva, M.B., 2011, "Teoria da Usinagem dos Materiais", Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 397 p.

Sato, M., Aoki, T., Tanaka, H., Takeda, S., 2013, "Variation of Temperature at the Bottom Surface of a Hole during Drilling and its Effect on Tool Wear", International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 68, pp. 40-47.

Santos, M.A.S., "Calorímetro", Mundo Educação, 27 de Fevereiro de 2018, <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/calorimetro.htm>.

Schmidt A.O., Roubik J.R., 1949, "Distribution of Heat Generated in Drilling", Trans ASME, 71:242–245. (*apud* Komanduri & Hou, 2001).

Silva, M.D., 2015, "Desenvolvimento e Construção de um Calorímetro para o Processo de Furação", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 90 p.

Trent, E.M., Wright, P.K., 2000, "Metal Cutting", Butherwords, London, 446 p.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção ‘área de conhecimento do trabalho’.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(X) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 27 à 31 de agosto de 2018 – Brasília, DF

# NITRETAÇÃO DO DURALUMÍNIO AA 2011 POR ELETROEROSÃO

**Freddy Alejandro Portillo Morales, Marco Aurélio de Freitas Santos Júnior, Maria Cecília Pontes Silva**
Universidade Federal de Uberlândia
Av. João Naves de Ávila, 2121. Uberlândia, MG, Brasil
alejandro@ufu.br

**RESUMO:** Nas últimas décadas cresceu o interesse em aprimorar os métodos não convencionais de usinagem, modificando-os para um processo inovador. O processo de eletroerosão ou EDM (Electrical Discharge Machining) possui uma nova ênfase para modificação de superfícies. O objetivo desse presente estudo é o processo de nitretação do alumínio por descargas elétricas utilizando a máquina de EDM. O nitrogênio utilizado está presente no fluido dielétrico não convencional, uma solução de água deionizada com ureia, a fonte de nitrogênio. O eletrodo utilizado é de cobre eletrolítico e como eletrodo peça, foi utilizado o alumínio AA 2011. Este processo permite a implantação de íons de nitrogênio na superfície do material, promovendo uma camada protetora, contra a oxidação e melhoria nas propriedades mecânicas do material. Foi comprovada que a influência da geração de distorções na rede cristalina do material no processo facilita a troca iônica entre os eletrodos e o fluido dielétrico. Foi encontrado oxigênio na camada superficial que poderia indicar a incorporação deste através do canal de plasma, podendo se tratar de um tipo de óxido de alumínio $Al2O_3$, ou de um compósito de AlON. Evidenciou-se um ganho 2200 % na dureza superficial em comparação à microdureza do substrato.

**Palavras-Chave:** Nitretação, Duralumínio, EDM

***ABSTRACT:*** *In the last decades, the interest in improving the nonconventional methods of machining has grown, modifying them to an innovative process. The EDM process has a new emphasis on surface modification. The objective of this study is the process of nitriding the aluminum by electric discharges using the EDM machine. The nitrogen used is present in the unconventional dielectric fluid, a solution of deionized water with urea, the source of nitrogen. The electrode used is electrolytic copper and the aluminum used was AA 2011. This process allows the implantation of nitrogen ions on the surface of the material, making a protective layer, against oxidation and improvement in the mechanical properties of the material. It has been proven that the influence of distortion generation on the crystalline network of the material in the process provide the ion exchange between the electrodes and the dielectric fluid. Oxygen was found in the surface layer, that could indicate its incorporation through the plasma channel, which could be a type of Al2O3 aluminum oxide or an AlON composite. A 2200% gain in the surface hardness was evidenced in comparison to the microhardness of the substrate.*

***Keywords:*** *Nitriding, Duraluminium, EDM*

## INTRODUÇÃO

Conforme o avanço da engenharia, é evidente a importância da diminuição do peso de componentes nos projetos mecânicos. Isto cria a necessidade de produzir novos materiais compostos ou tratamentos para a melhoria da resistência superficial de algum material mantendo o peso e composição da sua matriz. Diversos tratamentos superficiais têm sido utilizados para melhorar o desempenho dos materiais para diferentes aplicações, o endurecimento superficial, por exemplo, diminui o desgaste superficial e aumenta a vida útil do material tratado. Outros fatores como a redução do coeficiente de atrito ou a resistência à fadiga são influenciados pelos tratamentos superficiais. A Nitretação é um tratamento físico químico que promove a criação de nitretos, neste caso superficialmente em forma de camada, mantendo o substrato com as suas propriedades normais e a superfície endurecida. No processo de nitretação do alumínio, utiliza-se diversas técnicas como nitretação a plasma, nitretação gasosa, nitretação em banho de sais (ou nitretação líquida) e implantação iônica, resultando em camadas finas de até 20 µm, como é no caso da pesquisa de Okumiya et al., (2009).

O princípio de funcionamento do processo de eletroerosão (EDM) é a conversão de energia elétrica em energia térmica através de uma série de descargas elétricas ocorrendo entre um eletrodo e um material imerso em um fluido. O efeito isolante do dielétrico é importante para evitar a eletrólise dos eletrodos durante o processo de EDM. A descarga é iniciada no ponto de menor distância entre o eletrodo e a peça quando a alta voltagem supera a resistência dielétrica do fluido dielétrico. Este, por sua vez, serve para concentrar a energia de descarga em um canal de área transversal muito pequena. Ele também resfria os dois eletrodos e elimina os produtos de usinagem da região entre eletrodos (KUMAR et al., 2008). Este processo tem emergido como um dos mais comuns na manufatura de moldes e matrizes metálicas

(SANTOS et al., 2016). Foi demonstrado que o canal de plasma gerado no processo promove o intercâmbio iônico tanto entre os eletrodos como das partículas suspensas no fluido dielétrico. Segundo Kruth et al., 1995 o processo de EDM muda não só a superfície do material em questão, mas muda as subcamadas deste. A formação do canal de plasma consiste na vaporização do eletrodo peça e do eletrodo de ferramenta; e a pirólise do dielétrico afeta a composição da superfície após a usinagem e consequentemente, suas propriedades. O uso de fluidos dielétricos alternativos e de misturas com material em pó apresentam deposição iônica, neste caso, foi usada uma mistura de água deionizada com ureia ($CH_4N_2O$).

Com respeito ao processo de nitretação usando EDM, Yan et al., 2005 demonstrou a possibilidade de enriquecer a superfície de titânio de aeronaves com nitretos. Nesse trabalho foi feita a nitretação do alumínio AA 2011 (liga de alumínio-cobre) através do processo de eletroerosão por penetração (EDM). Esse processo foi desenvolvido por SANTOS, (2013), dirigido pelos professores PhD. Alberto Raslan e PhD. Wisley Falco, ambos da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Este processo permite a implantação de íons de nitrogênio na superfície do material, promovendo uma camada protetora, contra a oxidação e melhoria nas propriedades mecânicas do material.

## METODOLOGIA

O método consiste em implementar o enriquecimento superficial por nitretos no duralumínio através da usinagem por descargas elétricas (EDM). As amostras foram testadas com duas diferentes condições: envelhecida e encruada, com a finalidade de achar a melhor resposta à implantação iônica produzida pelo processo de EDM, para isto, foram feitas três réplicas para cada condição.

Neste processo, foi utilizado um fluido dielétrico não convencional, uma solução de água deionizada com ureia, sendo a ureia a fonte de nitrogênio. Na pesquisa realizada por Santos (2013) observou-se que a concentração de ureia na água deionizada não tem influência significativa na criação da camada de nitreto ou na espessura da mesma na nitretação de um aço carbono AISI 1040. Isto indica que a quantidade de nitrogênio absorvida pelo canal de plasma é limitada. Segundo os resultados obtidos por Santos (2016), as amostras não apresentam mudanças físicas nem mecânicas com concentrações diferentes de ureia e os valores de microdureza Vickers obtidos são muito próximos entre si.

Os testes de nitretação foram executados em uma máquina de EDM por penetração ENGEMAC modelo 440NC, disponível no laboratório de tribologia e materiais (LTM-FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia, e mostrada esquematicamente na Fig.1. A máquina possui cabeçote porta eletrodo ferramenta, com movimento no eixo Z, através de guias lineares e fuso de esferas recirculantes, acionado por motor de passo e capacidade para eletrodos ferramenta de até 60 kg. A bandeja de trabalho, também denominada cuba principal, tem abertura lateral e frontal, com capacidade de 180 litros. A potência total descrita no manual da máquina é de 6,5 KVA.

Os parâmetros operacionais para o uso da máquina EDM são: polaridade do eletrodo ferramenta, tensão, corrente, tempo de pulso (ton), relação entre o tempo de pulso e o tempo total (Dt), fenda (gap), sensibilidade, tempo de erosão, afastamento periódico do eletrodo ferramenta, intervalo entre erosão e afastamento.

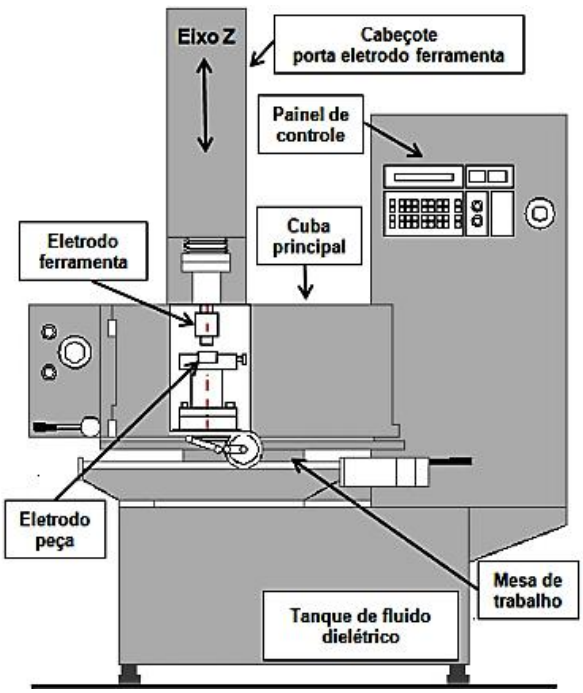



**Figura 1.** Esquema da máquina EDM por penetração ENGEMAC modelo 440NC (SANTOS, 2013)

Após nitretação do duralumínio, foram avaliadas a composição química da camada depositada, espessura da camada depositada e microdureza da camada de AlN e o substrato de Al-Cu.

Com a finalidade de elucidar a metodologia do processo desta pesquisa é apresentado um esquema com os parâmetros de entrada e saída na Fig.2.

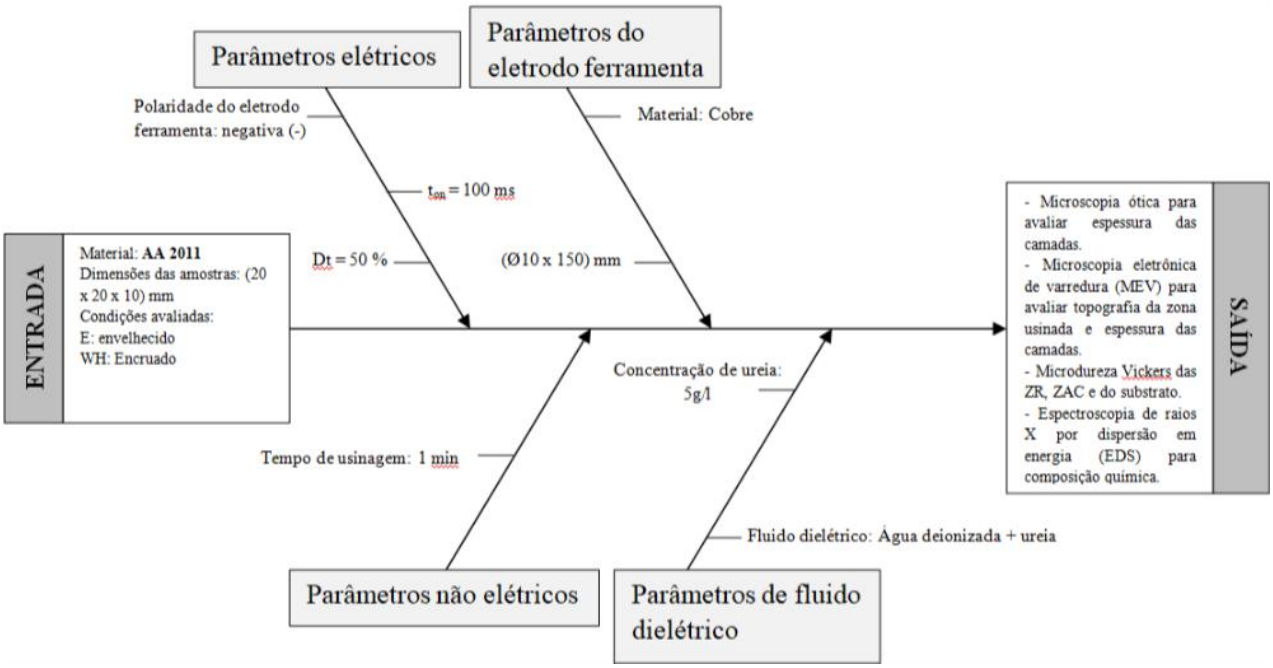



**Figura 2.** Esquema dos parâmetros de entrada e saída do processo de nitretação por EDM do duralumínio AA 2011

**Procedimento experimental**

O eletrodo utilizado é de cobre eletrolítico com diâmetro de 10 mm e comprimento de 150 mm. Para a realização do processo de nitretação por eletroerosão foi necessário preparar as amostras a serem submetidas ao processo, estas foram tiradas de uma barra de alumínio AA 2011 e cortadas com uma dimensão padrão de 20 mm x 20 mm x 10 mm e foram submetidas ao envelhecimento num forno tipo mufla a 160°C durante 14 h e encruamento de 50 % antes da nitretação para comprovar a influência da geração de distorções na rede cristalina do material no processo. O encruamento foi realizado após solubilização das amostras com a finalidade de fazer elas mais dúcteis e permitindo uma maior deformação plástica.

No processo de nitretação por eletroerosão não foi utilizada a cuba principal da máquina e sim um recipiente auxiliar de aço inoxidável de 150 ml de capacidade, o qual foi enchido com a solução de água deionizada com ureia (5 g/l).

Dos parâmetros com maior influência no processo encontram-se a corrente (i), tempo do pulso ($t_{on}$), tempo de trabalho (Dt), material do eletrodo, fluido dielétrico, polaridade e tempo de erosão. Estes parâmetros foram selecionados a partir de várias fontes bibliográficas, por exemplo, nos trabalho de Yan et al., (2005), Santos et al., (2016), Souza (2016) foram utilizados tempos de pulso ($t_{on}$) de 100 µs, também em todos os casos foi recomendado o uso da máquina com a polaridade invertida, ou seja, polaridade negativa para o eletrodo peça e positiva para o eletrodo ferramenta. Os outros parâmetros variam dependendo do desempenho no processo e da criação de um canal de plasma mais contínuo, variando corrente e materiais do eletrodo.

Os parâmetros usados no processo estão apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1. Parâmetros usados no processo de nitretação por eletroerosão**

| Parâmetro | Conceito |
|---|---|
| Corrente (i) | 30 A |
| Tempo do pulso ($t_{on}$) | 100 µs |
| Tempo de trabalho (Dt) | 50 % |
| Fluido dielétrico | Água deionizada + ureia (5 g/L) |
| Tempo de erosão | 60 s |
| Material do eletrodo ferramenta: | Cobre (Cu) |

Todas as amostras foram submetidas à análise metalográfica da secção transversal após da nitretação por eletroerosão. A preparação metalográfica consistiu no corte transversal à área usinada, subsequentemente o lixamento manual com lixas de carbeto de silício com granulometria mesh na seguinte sequência: 320, 400, 600 1000 e 2000, seguido de polimento com óxido de alumina e por último ataque químico com reativo Keller para a revelação dos contornos de grão e as áreas de interesse.

Depois da preparação metalográfica as amostras foram levadas a microscopia óptica, microscopia eletrónica de varredura (MEV) e espectrometria de raio X por dispersão de energia (EDS). Na microscopia óptica avaliou-se as diferentes fases criadas no processo, por causa da fundição e resolidificação da superfície do material. Com o uso do MEV conectado ao sistema de EDS avaliou-se a composição química das zonas de interesse, avaliando se houve nitretação no processo.

Para a avaliação da dureza superficial foi utilizado um equipamento de microdureza Vickers (HV), com uma carga de 40 gf, fazendo a analise da zona refundida e da matriz para comparação.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Fig.3 se mostra as imagens adquiridas por microscopia óptica das amostras submetidas ao processo de nitretação por eletroerosão para cada condição.

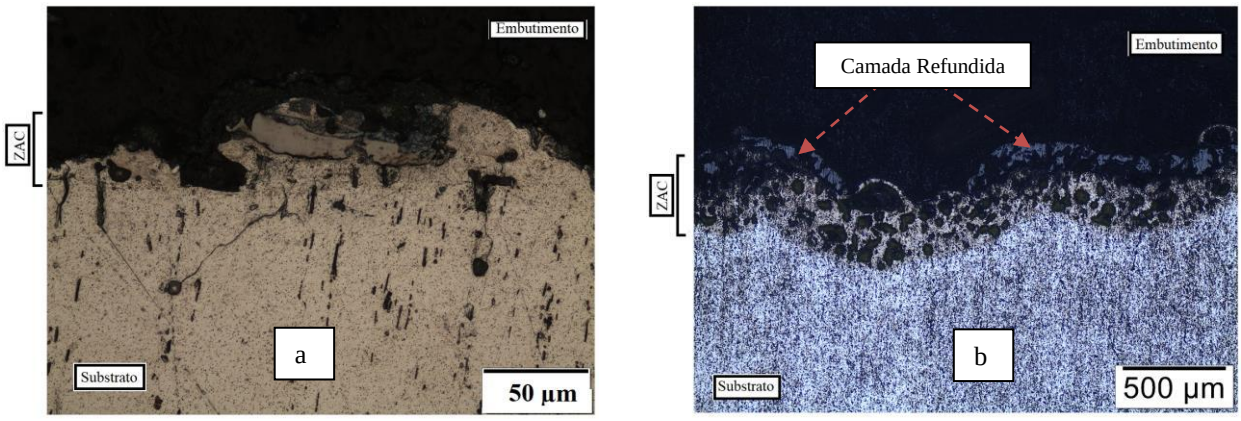



**Figura 3**. Imagens da secção transversal das amostras depois de serem submetidas ao processo de nitretação por eletroerosão A) Envelhecida (ampliação de 50 x) B). Encruada (ampliação de 5 x).

Através das imagens adquiridas com microscopia óptica mostradas na Fig. 3 podem se diferenciar as diferentes fases criadas no processo devido a fundição e resolidificação do material. A amostra envelhecida (Fig. 3a) apresentou uma ZAC com espessura de 130 ± 26 µm. A amostra encruada (Fig. 3b) apresentou uma ZAC com espessura de 722 ± 36 µm com uma camada refundida superficial endurecida de 260 ± 9 µm de aparência cerâmica. A espessura da ZAC nas amostras são consideravelmente diferentes, isto pode ser atribuído ao efeito de falha de empilhamento gerado no encruamento, gerando uma maior quantidade de distorções na rede cristalina do material e facilitando assim a troca iônica entre os eletrodos. A espessura de camada obtida no processo na condição como encruado é bem maior que nos resultados apresentados por diversos autores apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2: Características de criação camadas de AlN com diferentes processos.**

| Método | Autores | Espessura da camada de AlN | Temperatura e processo | Limitações |
|---|---|---|---|---|
| Nitretação a plasma | H. Chen et al. (1994) | 3 µm | >723 K, >8 h | Longo tempo de processamento. |
| PIII | T. Czerwiec et al. (2000) | 10 – 15 µm | 723 – 823 K, >5 h | Alto consumo de energia. |
| Nitretação a plasma | S. Gredelj et al. (2002) | 2 – 3 µm | 575 °C, 180 min. | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Nitretação por íons | T. Fitz (2002) | Até 1 µm | Limpeza prévia por pulverizado com argônio (Ar). 400 °C por 2 h | Alto consumo de energia, tempo de nitretação de entre 1 e 2 h. |
| Nitretação a plasma | P. Visuttipitukul et al. (2006) | 3 µm | Refinação da microestrura por Bulk Mechanical Alloying (BMA) | Longo tempo de processamento. |
| Nitretação a plasma/barril | M. Okumiya et al. (2009) | 20 µm | Processo combinado de nitretação de barril por 5 h a 903K e nitretação plasmática por 2 h a 853 K. | Longo tempo de processamento e alto consumo de energia. |
| EDM | D. M. Souza (2016) | 104 µm | Tratamento de Envelhecimento a 524 °C | Ainda em estudo. |

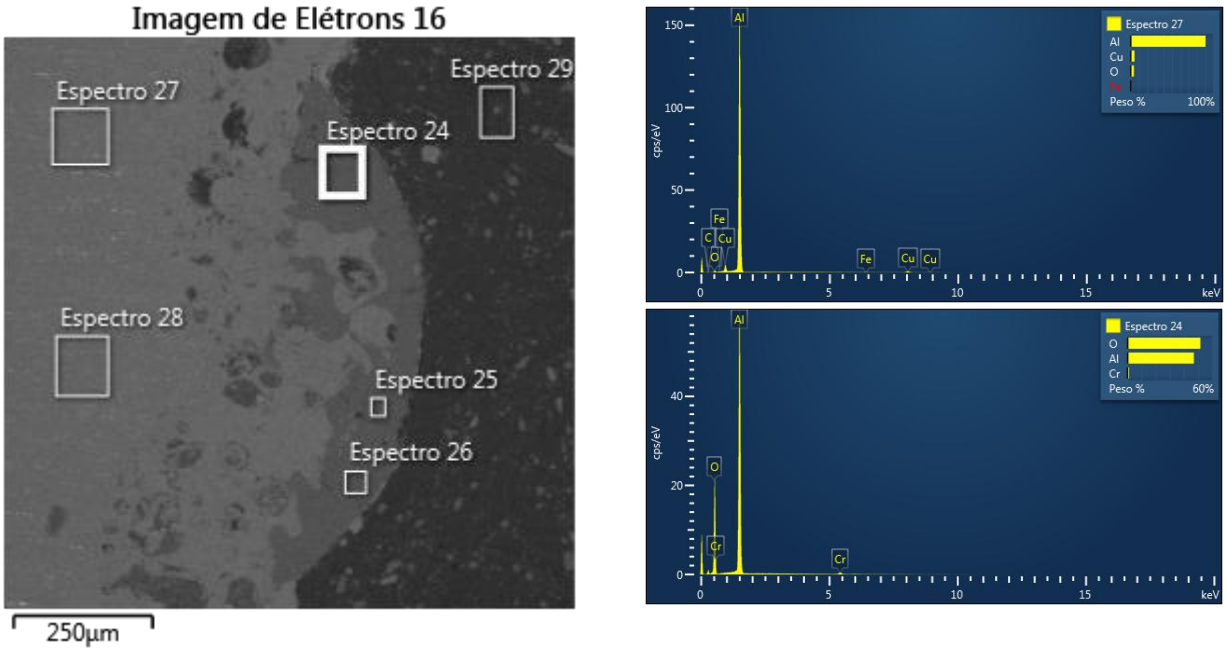



**Figura 4**. Análise de composição química do substrato e da ZAC da amostra na condição como encruada

Após avaliação da espessura das ZAC das amostras, foi feita a análise de composição química usando MEV conectado com o EDS. Na Figura 4 é apresentado o resultado da análise por EDS tanto da camada superficial como do substrato, onde evidenciou-se a presença de oxigênio nas zonas com aparência cerâmica enquanto no substrato não apresentou presença deste.

A presença de oxigênio na camada superficial poderia indicar a incorporação deste através do canal de plasma, podendo se tratar de um tipo de óxido de alumínio $Al_2O_3$, ou de um compósito de AlON.

Após avaliação da composição foram realizados testes de microdureza Vickers da amostra encruada com o propósito de saber se o tratamento superficial teve efeito algum nas propriedades mecânicas do material. Na Fig.5 apresenta-se o perfil de microdurezas Vickers feito na camada superficial, os testes foram feitos com uma carga de 40 gf.

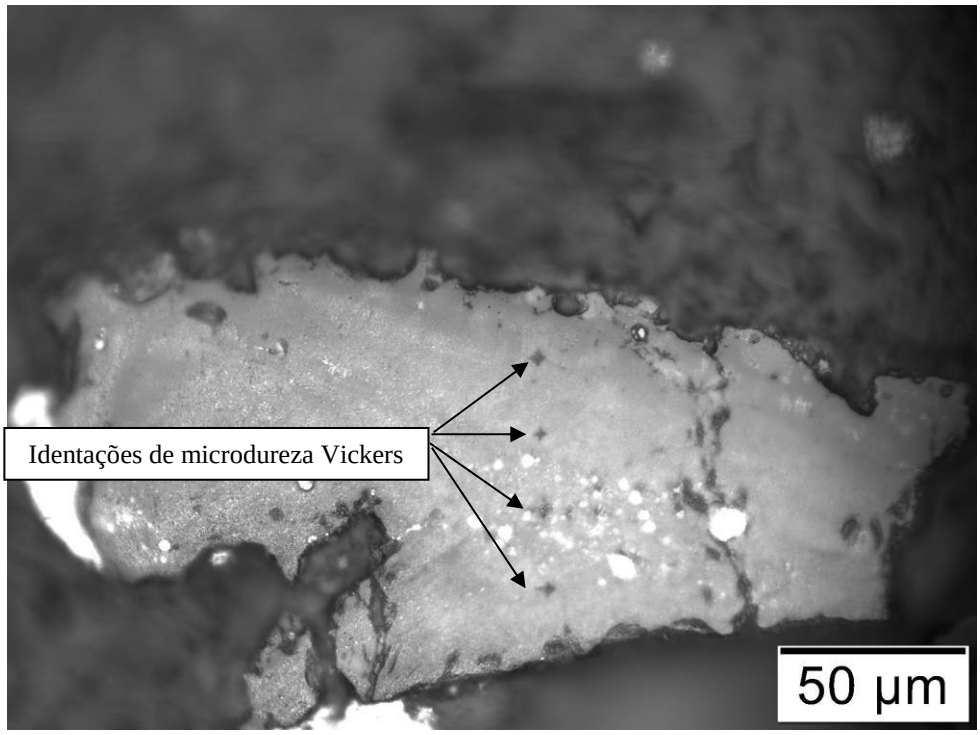



**Figura 5**. Perfil de microdurezas Vickers da camada superficial da amostra na condição como encruada. Carga: 40 gf

Os resultados de microdureza Vickers para a amostra encruada são apresentados na Fig. 6 com uma microdureza média de 2700 ± 700 HV, onde evidenciou-se um ganho 2200 % na dureza superficial em comparação à microdureza do substrato de 116,43 ± 4 HV. A grande variância apresentada nos resultados da microdureza da camada superficial pode ser atribuída à criação de um compósito instável, mas, no entanto, bastante duro quando comparado com o substrato.

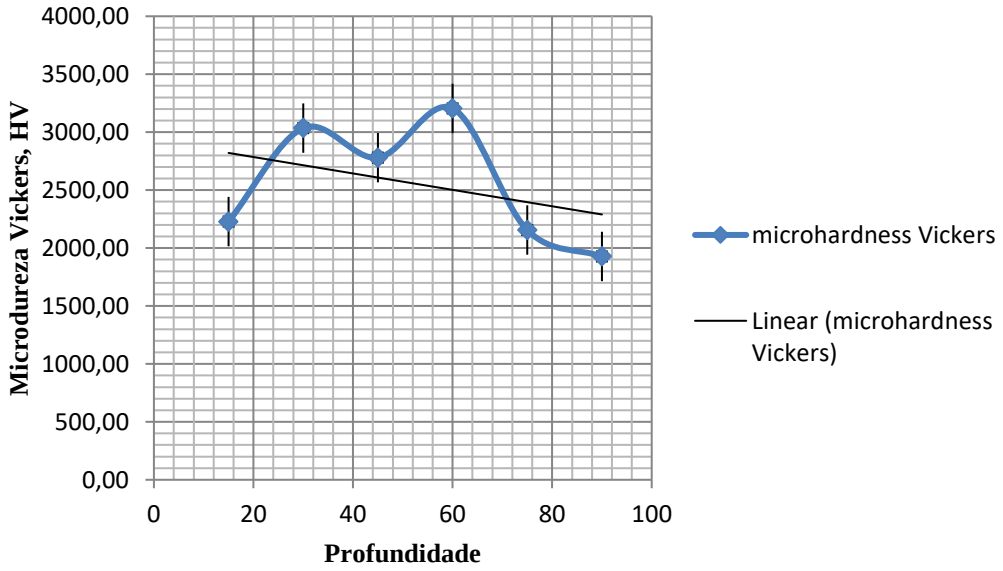



**Figura 6**. Valores do perfil de microdureza Vickers da camada refundida endurecida para a amostra na condição como encruada

## CONCLUSÃO

Este estudo buscou demonstrar a viabilidade do processo de nitretação por eletroerosão do duralumínio que leva alguns poucos minutos para ser realizado, em contrapartida com a técnica de plasma gás (processo atualmente utilizado) que leva algumas horas. Para realização desse processo na máquina de EDM, não se tem restrição de tamanho e complexidade da ferramenta, que pode acelerar o processo e aumentar a espessura da camada superficial endurecida em peças de tamanho considerável.

Demonstrou-se que a geração de discordâncias e distorções na rede cristalina do material no processo, principalmente a influência da falha de empilhamento produzida pelo encruamento, facilita a troca iônica entre os eletrodos e o fluido dielétrico. Além disso, os resultados de microdureza Vickers apresentaram um ganho elevado na dureza superficial em comparação à microdureza do substrato.

Apesar da criação de um compósito instável, o processo continua em estudos para comprovar incorporação de nitrogênio na camada superficial e assim obter resultados melhores e mais consistentes para posterior uso comercial. O melhor desenvolvimento desta técnica poderia providenciar um material leve com baixo desgaste superficial, melhores propriedades mecânicas e rápida manufatura que são propriedades importantes no projeto de diferentes áreas e setores, entre elas, a aeronáutica.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais à Universidade federal de Uberlândia por toda a disposição e colaboração para a realização deste projeto. Agradecimentos ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU-UFU) e ao Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM-UFU) quem permitiram o uso efetivo da maquinaria necessária para o pleno desenvolvimento do trabalho.

Agradecemos também aos professores PhD. Wisley Falco Sales e PhD. Alberto Raslan

## REFERÊNCIAS

CHEN, H.; STOCK, H.; MAYR, P. Plasma-assisted nitriding of aluminium. Surface and Coatings Technology, 1994. V. 64, p. 139 – 147.

CZERWIEC, T.; RENEVIER, N.; MICHEL, H. Low-Temperature Plasma-Assisted Nitriding. Surface and Coatings Technology, 2000. V. 131, p. 267 – 277.

FITZ, T. Ion Nitriding of Aluminium. 2002. Forschungszentrum Rossendorf. 107 p.

GREDELJ, S. et al. Plasma nitriding and in situ characterisation of aluminium. Applied Surface Science, 2002. v. 199, n. 1–4, p. 234–247.

KUMAR, S.; SINGH, R.; SINGH, T. P.; SETHI, B. L. Surface Modification By Electrical Discharge Machining: a Review. Journal of Materials Processing Technology. V. 209, p. 3675-3687. 2009.

OKUMIYA, M.; TSUNEKAWA, Y.; SUGIYAMA, H.; TANAKA, Y.; TAKANO, N.; TOMIMOTO, M. Surface modification of aluminum using ion nitriding and barrel nitriding. Surface and Coatings Technology, 2005, 200, 35–39. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.02.110

SANTOS, R. Nitretação por EDM do Aço AISI 4140. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2013.

SANTOS, R.; SILVA, E.; SALES, W.; RASLAN, A. Influence of urea content blended with deionized water in the process of nitriding using electrical discharge machining on AISI 4140 steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016.

SOUZA, D. M. Nitretação De Alumínio 2011 Utilizando Usinagem Por Descargas Elétricas. 2016. 62 f. Projeto de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Aeronáutica, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil.

VISUTTIPITUKUL, P.; AIZAWA, T. Plasma nitriding design for aluminium and aluminium alloys. Surface Engineering, 2006. v. 22, n. 3, p. 187–195.

YAN, B. H.; TSAI, H. C.; HUANG, F. Y. The Effect in EDM of a Dielectric of a Urea Solution in Water on Modifying the Surface of Titanium. International Journal of Machine Tools & Manufacture. N. 45, p. 194-200. 2005.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção ‘área de conhecimento do trabalho’.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial

( ) Energia
(X ) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

**XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 27 à 31 de agosto de 2018 – Brasília, DF**

# PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM CHAPAS DE AÇO AISI 316

**Victor von Glehn Mateus, victorvon.meta@gmail.com[1]**
**Leonardo Rosa Ribeiro da Silva, Leonardo.rrs@gmail.com[2]**
**Eder Silva Costa, edercosta@ufu.br[2]**
**Leandro Carvalho Pereira, cp.leandro@hotmail.com[2]**
**Wisley Falco Sales, wisley@ufu.br[3]**
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Avenida João Naves de Ávila, 2121 – Santa Mônica, Uberlândia – MG, 38400-902
victorvon.meta@gmail.com

**RESUMO**: Foram realizados cinco ensaios experimentais com os seguintes recursos: dispositivo prensa-chapas, software CAD / CAM, centro de usinagem CNC com três eixos, ferramentas de conformação incremental. Foi variado nos ensaios a rotação e o tipo de ferramenta de conformação, a aplicação da lubrificação durante os ensaios. Testes de tração, medição de parâmetros de rugosidade e análise metalográfica foram realizados antes e depois de cada experimento SPIF. Os ensaios experimentais mostraram que o aço apresenta boa conformabilidade e, que se faz necessária à utilização de lubrificação visando evitar qualquer tipo de força exagerada da ferramenta sobre a chapa. Além disso, foi constatado também que o aumento da velocidade de rotação da ferramenta melhorou o acabamento superficial da peça.

**Palavras-Chave:** aço AISI 316, Estampagem Incremental, Lubrificação

**ABSTRACT:** *Five experimental tests were carried out with the following resources: a blank holder, software CAD/CAM, CNC machining center with three axes, incremental forming tools. It was varied in the tests the spindle rotation and the type of the forming tool, the application of lubrication during the tests. Tensile tests, measurement of roughness parameters and metallographic analysis were conducted before and after each SPIF experiment. The experimental tests showed that the steel presents good formability, and therefore, it was required the utilization of lubrication to get better results. The lubrication helps to avoid any type of exaggerated force of the tool on the steel plate. In addition, it was also found that increasing the speed of rotation of the tool improved a better roughness parameters.*

***Keywords:*** *steel AISI 316, Incremental Sheet Forming, Lubrification*

## INTRODUÇÃO

Dentre todos os processos de fabricação, a conformação mecânica tem um papel de grande importância, já que é uma forma de produzir peças com excelentes propriedades mecânicas com uma perda mínima de material (SCHAEFFER, 1999). Este processo consiste em alterar a geometria de um material por meio de forças aplicadas através de máquinas e ferramentas específicas, forças tais que deformam plasticamente o material que está sendo conformado. Há inúmeros processos de conformação mecânica, desenvolvidos para aplicações diversas. Estes processos variam de acordo com o regime de operação de conformação, o tipo de esforço que provoca a deformação do material, a variação relativa da espessura da peça e o propósito da deformação.

Visando à alta taxa de produção, baixo custo por peça e um bom acabamento superficial, o processo de conformação mecânica denominado estampagem, se destaca na conformação de chapas metálicas. Entretanto, todas essas vantagens são obtidas quando se tem a produção de grandes e médios lotes de peças. Para casos em que um produto está sendo desenvolvido e a quantidade a ser produzida é em pequenos lotes, ou se faz necessário a fabricação apenas de um protótipo, o custo do ferramental de fabricação por estampagem convencional ocasiona em um alto custo do produto (TIBURI, 2007).

O processo de estampagem incremental (ISF- Incremental Sheet Forming) é uma excelente alternativa para a fabricação de pequenos lotes ou de protótipos, tendo sua principal vantagem o baixo custo do ferramental quando comparado aos processos de estampagem convencionais. Neste processo a conformação é realizada progressivamente, mediante a ação de uma ferramenta que produz deformações plásticas localizadas em regiões específicas da chapa. Estas regiões mudam de acordo com a movimentação da ferramenta sobre o metal (EMMENS e VAN DEN BOOGAARD, 2009). As deformações são ocasionadas pelas pressões pontuais realizadas por um punção com

geometria menor que a chapa metálica. Durante o processo, a conformabilidade da chapa vai aumentando. Para realizar a estampagem, podem-se utilizar maquinários específicos para o processo ou adaptar máquinas-ferramenta de usinagem.

Para a execução do processo de estampagem incremental, a chapa a ser conformada deve ser fixada em um dispositivo ou suporte que utilizem um ou mais pontos de fixação. O material da chapa metálica deve ter propriedades mecânicas adequadas, tais como tenacidade e ductilidade, suficientes para que o material possa ser deformado plasticamente durante o processo. Segundo STRANO (2003) ao ser conformada, a chapa original, que está fixa, tem sua espessura reduzida na região onde acontece a conformação, dando assim o formato desejado à chapa. A chapa é fixada em sua região externa e é deformada por uma ferramenta semiesférica, na extremidade de contato com a chapa.

O processo de ISF pode ser realizado em um Comando Numérico Computadorizado (CNC). Neste sistema, a chapa a ser conformada deverá ter espessura variando entre 0,5 e 1,5 mm, dependendo do tipo de material e suas características mecânicas. A chapa é fixada em um dispositivo móvel, deslizando paralelamente ao eixo Z (eixo vertical) do sistema da CNC. Elementos de fixação, como porcas e parafusos, evitam que a chapa se movimente durante o processo, possibilitando assim a deformação plástica da chapa. A deformação é gerada por uma ferramenta rotativa, acoplada ao eixo árvore do dispositivo CNC, que inicia o processo de ISF deslizando sobre a superfície da chapa gradativamente, conformando a mesma através de incrementos verticais negativos. A Figura 1 ilustra o processo de ISF.

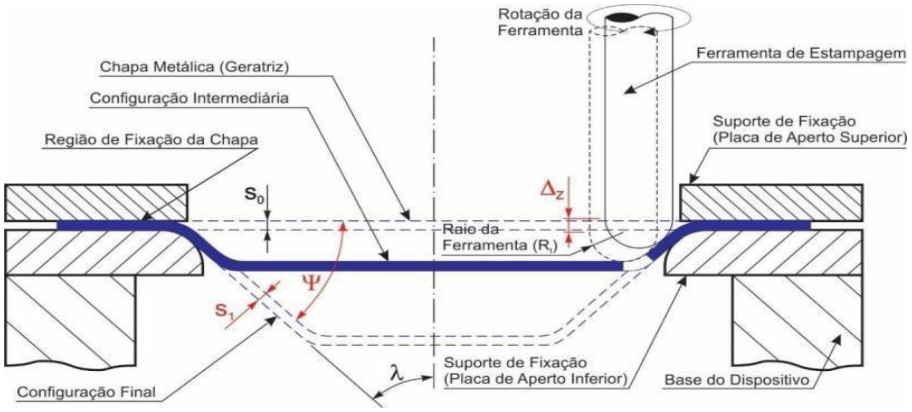



**Figura 1.** Parâmetros do processo de estampagem incremental (SILVA et al., 2008)

As aplicações da estampagem incremental utilizam ferramentas genéricas de baixo custo, possibilitando assim a manufatura de peças de diversas geometrias. As peças finais podem ser de peças-protótipos para a verificação de projeto ou de produção em pequenos lotes, a peças da indústria aeroespacial como caixas e carenagens. Mas a principal aplicação para o processo de ISF é na área médica, onde são produzidas próteses, órteses e implantes cranianos.

Há uma série de parâmetros envolvidos no processo de estampagem incremental que influenciam na conformabilidade do aço utilizado. Dentre eles: material e espessura da chapa; velocidade de avanço; temperatura; tipo e tamanho da ferramenta; profundidade do passo vertical; rotação da ferramenta; lubrificação; ângulo de parede da chapa e estratégias de conformação.

Há inúmeras vantagens no processo de estampagem incremental. Dentre elas, podemos destacar algumas como: flexibilidade com a parametrização do sistema CAD/CAM, possibilidade de estampagem de peças de dimensões variadas, operação livre de ruídos intensos, manufatura de peças com formatos irregulares e menor custo quando comparado a outros processos como mostrado na Fig. (2).

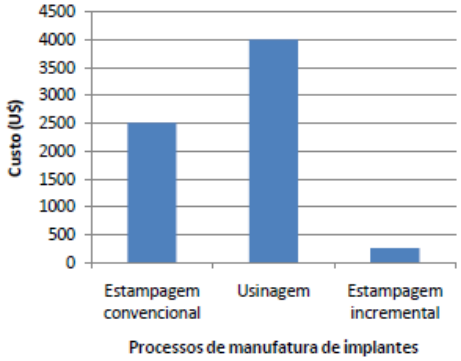



**Figura 2.** Comparativo do custo entre processos de fabricação (Lajarin, 2008)

Como qualquer outro processo de fabricação, pode-se citar algumas desvantagens no processo como: baixa conformabilidade dimensional entre a peça e o modelo CAD devido ao retorno elástico, ângulos de parede próximos de 90º necessitam de várias etapas intermediarias de estampagem e tempo muito alto para estampar a peça.

Durante o processo de estampagem incremental, as orientações preferenciais dos planos atômicos e direções cristalinas dos materiais ocasionam em variações das propriedades mecânicas com a direção, denominadas anisotropia. O grau de anisotropia das chapas quando deformadas plasticamente pode ser calculado através do índice de anisotropia. É importante também um estudo das direções de laminação da chapa para se calcular os índices de anisotropia média (rm) e a anisotropia planar (Δr) (SCHAEFFER, 1999). Para um material ser considerado isotrópico ele deve possuir $r_m = 1$ e $\Delta r = 0$. Para a fabricação por estampagem incremental é desejável que o material possua um alto valor de anisotropia média, significando assim uma maior resistência à diminuição da espessura da chapa durante o processo.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento da chapa de aço AISI 316 com espessura de 0,7 mm submetida ao processo de fabricação de Incremental de Ponto Único (*SPIF- Single Point Incremental Forming*).

## METODOLOGIA

Inicialmente uma placa de aço inoxidável AISI 316 com as dimensões de 960 mm de comprimento, 480 de largura e 0.7 mm de espessura, foi cortada igualmente em oito chapas quadradas de 240 x 240 mm com a ajuda de uma tesoura elétrica Bosch® GSC 2.8.

As chapas foram ensaiadas no Centro de Usinagem Vertical Discovery 760 da ROMI®. Para o processo, utilizou-se uma ferramenta de ponta semiesférica feita de aço ferramenta (AISI 52100) com dimensões de 85,19 mm de comprimento e 11.91 mm de diâmetro. As chapas foram fixadas no centro de usinagem, graças a um suporte prensa-chapas fabricado em aço o qual possui 16 furos em concordância com os furos de 4 peças metálicas, possibilitando assim a fixação do suporte com a chapa.

O centro de usinagem CNC utilizado possui comando SINUMERIK 810D. Sendo assim, utilizando o software Fusion 360® com o pós processador adequado foram geradas as trajetórias para os troncos de cone, com incremento vertical (Δz) de 0.5 mm, velocidade de avanço da mesa ($V_{fh}$) de 100 mm/min. Cinco condições distintas foram executadas nos ensaios, variando a rotação e a condição de lubrificação em cada uma delas. São elas: ferramenta sem rotação com óleo, rotação de 500 rpm com óleo, rotação de 500 rpm com óleo mais 10% de grafite em pó, 1000 rpm com óleo e 2000 rpm com óleo. O óleo utilizado foi o SAE 80W da Texaco®. A geometria do tronco de cone possui 75 mm de altura, 120 mm de diâmetro de base e 54º de ângulo de parede.

Aferiu-se a rugosidade de cada chapa anteriormente e posteriormente ao processo de estampagem incremental, afim de constatar qual das condições ensaiadas gerou o melhor acabamento. Os parâmetros de rugosidade medidos foram as variáveis Ra, Rz e Rq. Todos estes parâmetros foram aferidos utilizando-se um rugosímetro Surtronic S-100 da marca Taylor Hobson®.

Testes de tração foram feitos com o intuito de medir este índice, além de ajudar no estudo do comportamento do aço utilizado durante o processo de ISF. Para a fabricação dos corpos de prova para o ensaio de tração, foi utilizada uma das chapas quadradas de aço AISI 316 a qual foi cortada com jato d'água. Os corpos de prova possuíam diferentes angulações em relação ao sentido de laminação da placa (0º,45º e 90º). Utilizou-se um extensômetro para medir as deformações mecânicas nos corpos de prova. A Figura 3 ilustra o modelo e as dimensões dos corpos de prova.

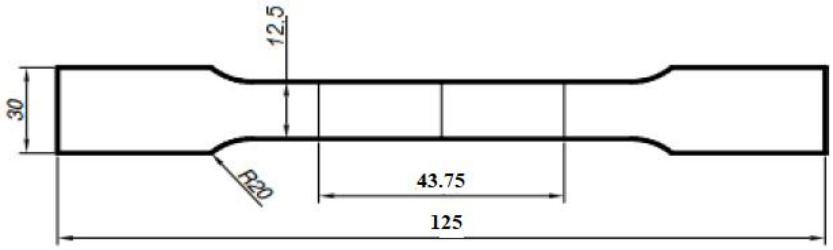



**Figura 3.** Dimensões do corpo de prova utilizado nos ensaios de tração

**Equações governantes**

O índice de anisotropia, como citado anteriormente, possui uma grande importância para a escolha do melhor material que utilizado no processo de estampagem incremental. Isso ocorre pois para a fabricação por estampagem incremental é desejável que o material possua um alto valor de anisotropia média, significando assim uma maior resistência à diminuição da espessura da chapa durante o processo.

Por definição, o índice de anisotropia ou coeficiente de Lankford ($r$) é a razão entre a deformação verdadeira na largura e na espessura de um corpo de prova de tração, podendo ser calculado através da Eq. (1):

$$r = \frac{ln\frac{t_0}{w_0}}{ln\frac{w_0 . l_0}{t_0 . l}} \quad (1)$$

Onde $t_o$ é a espessura inicial do corpo de prova submetido ao ensaio de tração [$mm$], o $w_o$ é a largura inicial do corpo de prova [$mm$], $l_o$ é o comprimento inicial do corpo de prova [$mm$] e l é o comprimento instantâneo do corpo de prova no momento do ensaio [$mm$].

Considerando as direções de laminação da chapa, pode-se a partir das três razões de deformação calcular a anisotropia média ($r_m$) e a anisotropia planar ($\Delta r$) respectivamente pelas Eq. (2) e Eq. (3):

$$r_m = \frac{1}{4} . (r_{0º} + 2 . r_{45º} + r_{90º}) \quad (2)$$

$$\Delta r = \frac{r_{0º} + r_{90º}}{2} - r_{45º} \quad (3)$$

**RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Todos os procedimentos cinco procedimentos de estampagem incremental ocorreram normalmente e a geometria prevista foi gerada. A Tab. 1 apresenta a rotação da ferramenta, a condição de lubrificação e duração de cada teste.

**Tabela 1.** Condições de lubrificação, de rotação e a duração de cada teste

| Teste | Rotação da ferramenta [rpm] | Condição de lubrificação | Duração [min] |
|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 20 ml de óleo 80W | 123 |
| 2 | 500 | 20 ml de óleo 80W | 121 |
| 3 | 500 | 20 ml de óleo 80W + 10% grafite em pó | 123 |
| 4 | 1000 | 20 ml de óleo 80W | 120 |
| 5 | 2000 | 20 ml de óleo 80W | 121 |

Nos testes as rotações foram variadas a fim de estudar as alterações de temperatura e a rugosidade final de cada chapa ensaiada. No teste 3 foi adicionado 10 %, em massa, de grafite em pó ao óleo para ver a influência que o lubrificante sólido poderia causar no ensaio.

Nota-se que a duração de todos os cinco testes foi bem semelhante, isso ocorre,pois, o intervalo de tempo está atrelado com a velocidade de avanço da mesa ($V_{fh)}$ que foi de 100 mm/min em todos os ensaios.

Foram medidos os valores dos parâmetros de rugosidade Ra, Rz e Rq das chapas dos cinco testes, assim como da chapa sem sofrer conformação, a fim de se observar a influência dos parâmetros de rotação, ferramenta e lubrificação na qualidade do acabamento superficial da peça. A Tabela 2 apresenta os valores médios obtidos em cada teste, assim como os valores do desvio padrão.

**Tabela 2.** Parâmetros de rugosidade medidos nas chapas após o processo

| | Ra (µm) | | Rz (µm) | | Rq (µm) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Média** | **Desvio Padrão** | **Média** | **Desvio Padrão** | **Média** | **Desvio Padrão** |
| **Sem Teste** | 0.42 | 0.192 | 3.20 | 1.440 | 0.69 | 0.306 |
| **Teste 1** | 2.80 | 1.953 | 6.60 | 2.302 | 3.15 | 1.975 |
| **Teste 2** | 12.76 | 0.300 | 37.40 | 2.382 | 12.28 | 0.449 |
| **Teste 3** | 7.62 | 1.479 | 25.10 | 4.478 | 9.71 | 1.363 |
| **Teste 4** | 11.04 | 2.211 | 32.94 | 2.783 | 12.28 | 1.653 |
| **Teste 5** | 2.24 | 1.011 | 10.70 | 3.768 | 2.95 | 1.450 |

Primeiramente nota-se que, como o esperado, a chapa que não foi estampada possui menores valores de rugosidade média quando comparada com aquelas que passaram pelo processo de estampagem incremental. Isso se deve ao fato de que quando a ferramenta executa o procedimento, a superfície vai sendo transformada e consequentemente a rugosidade do material vai sendo alterada.

Como no Teste 1 não houve rotação da ferramenta, o atrito gerado entre a peça e a chapa foi causado apenas pela movimentação da mesa da máquina em torno do punção. Neste caso, a falta de rotação da ferramenta contribuiu para uma baixa rugosidade quando comparada à outras condições ensaiadas.

Comparando o Teste 2 e o 3, para uma mesma rotação de 500 rpm os valores de rugosidade foram bastante distintos. A explicação deste fato é que como o Teste 3 utilizou-se uma quantidade de 10 % em peso de grafite misturado ao óleo lubrificante 80W. O pó ajudou a melhorar a qualidade superficial do tronco de cone pois minimizou o contato entre ferramenta e chapa.

Comparando o Teste 2 com o Teste 4, os quais tiveram a mesma condição de lubrificação mas diferentes rotações da ferramenta, nota-se que houve uma pequena melhora na qualidade superficial do produto final no teste onde a rotação foi maior. Isto se deve ao fato de que o atrito entre a ferramenta e a região estampada aumenta com o aumento da rotação, devido a ferramenta rotacionar mais vezes no mesmo ponto da peça estampada. Com o aumento do atrito, a geração de calor na região conformada também é aumentada, levando a uma melhora na conformabilidade do material e no acabamento superficial da peça. O Teste 5 obteve os melhores resultados de rugosidade das chapas ensaiadas pois sua rotação elevada ajudou na qualidade superficial do tronco de cone.

Foram obtidos pelos ensaios de tração os valores da força de tração (kN) e da variação do comprimento do corpo de prova (mm). Com esses dados, através do software Excel (2013), foram calculados os valores de Tensão (MPa) e Deformação Relativa (ε), e então gerado os gráficos Tensão x Deformação Relativa, para os corpos de provas nas direções de laminação de 0º, 45º e 90º. Os gráficos obtidos são mostrados nas Figuras 4, 5 e 6.

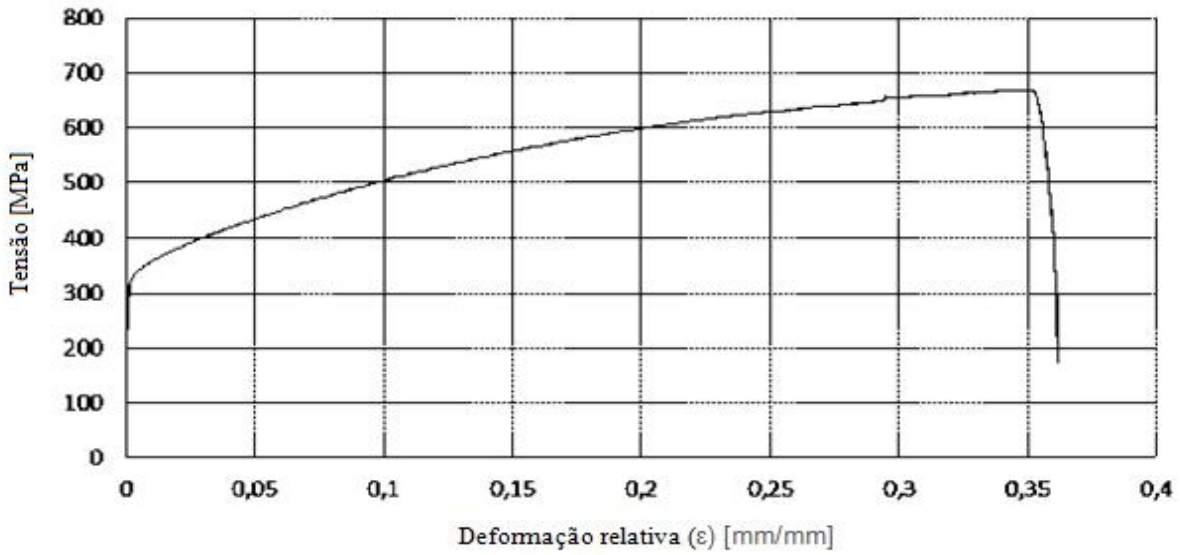



**Figura 4.** Curva de tensão em função da deformação obtida a partir de um corpo de prova paralelo à direção de laminação (0º)

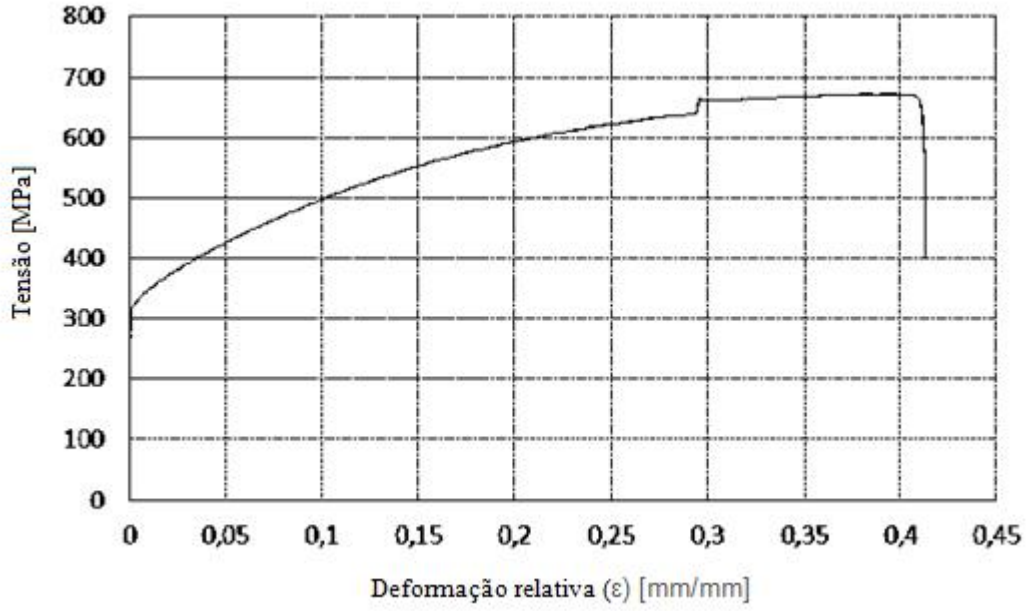



**Figura 5.** Curva de tensão em função da deformação obtida a partir de um corpo de prova diagonal à direção de laminação (45º)

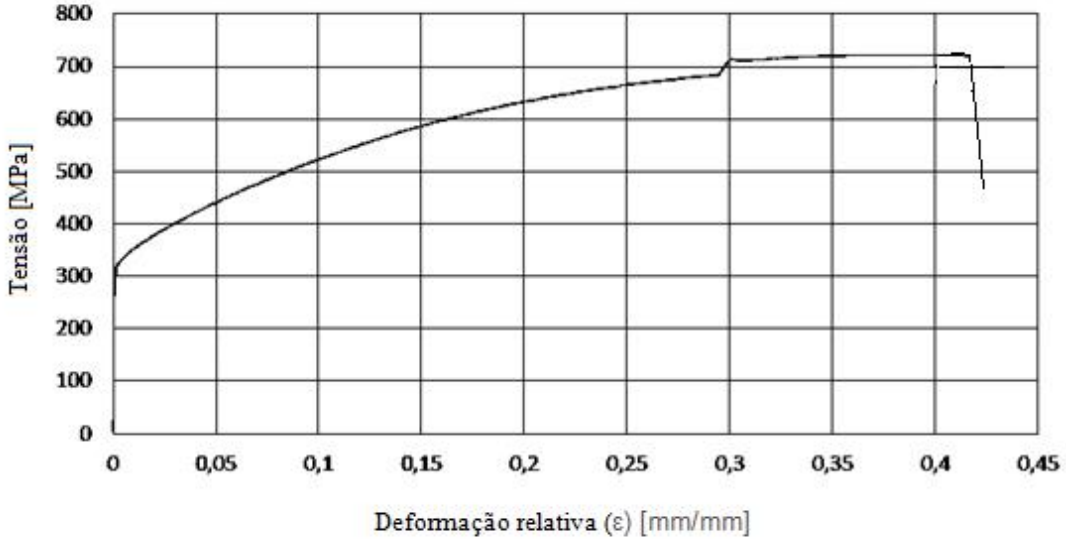



**Figura 6.** Curva de tensão em função da deformação obtida a partir de um corpo de prova transversal à direção de laminação (90º)

As três curvas apresentam comportamento semelhante, pode-se perceber que todas apresentam uma região elástica até a tensão de 300 MPa, e a partir desse valor o material entra em seu regime plástico, sofrendo a ruptura em um valor de tensão menor que 700 MPa. Outra observação que se pode fazer é que o material tem a transição da fase elástica para a fase plástica sem apresentar uma região de escoamento nítida.

Pode-se notar que a deformação relativa na fase elástica é muito pequena, enquanto que na região plástica o material e deforma consideravelmente e o valor da tensão continua a aumentar até a sua ruptura. Esses fatores mostram o comportamento de um material dúctil. Observam-se alguns picos de oscilação na deformação relativa nos corpos de prova transversal e no diagonal, que podem ser explicados pela energia acumulada pelo material durante o teste nestas

direções.

Por meio de uma regressão linear na região elásticas das curvas Tensão x Deformação relativa, é possível estimar o valor Módulo de Elasticidade (GPa) do material. Esse valor corresponde ao coeficiente angular da reta obtida pelo método da regressão linear. A Tabela 3 apresenta os valores obtidos em cada direção de laminação.

**Tabela 3.** Módulo de Elasticidade obtido para os corpos de provas

| **Direção de laminação** | Paralela (0º) | Diagonal (45º) | Perpendicular (90º) | Média |
|---|---|---|---|---|
| **Módulo de Elasticidade (GPa)** | 211,12 | 186,63 | 201,72 | 199,87 |

Os valores encontrados nos ensaios para o limite de escoamento (300 Mpa), limite de resistência a tração (670 MPa) e módulo de elasticidade (199,87 GPa) se aproximam daqueles encontrados na literatura, que são respectivamente: 288 MPa, 600 MPa e 193 GPa.

Para se calcular o índice de anisotropia do material, fez-se necessário a medição do comprimento e da largura do corpo de prova antes e depois do ensaio de tração. Foram avaliadas essas medidas para os três ensaios nas diferentes direções de laminação (0º, 45º, 90º). Os valores medidos são apresentados na Tab. 4.

**Tabela 4.** Medidas lineares dos corpos de prova antes e após o ensaio de tração

| **Direção de laminação** | Paralela (0º) | Diagonal (45º) | Perpendicular (90º) |
|---|---|---|---|
| **Comprimento inicial (mm)** | 119,163 | 123,681 | 123,961 |
| **Comprimento final (mm)** | 87,5 | 87,5 | 87,5 |
| **Largura inicial (mm)** | 10,5 | 10,1 | 10,6 |
| **Largura final (mm)** | 12,5 | 12,5 | 12,5 |

Através da Eq. (1), pode-se calcular os valores do índice de anisotropia (r) para cada ensaio nas diferentes direções de laminação. A Tabela 5 apresenta os valores calculados.

**Tabela 5.** Índice de anisotropia

| **Direção de laminação** | Paralela (0º) | Diagonal (45º) | Perpendicular (90º) |
|---|---|---|---|
| **Índice de anisotropia (r)** | 1,29 | 1,60 | 0,89 |

Utilizou-se as equações Eq.(2) e Eq.(3) para o cálculo da anisotropia média ($r_m$) e da anisotropia planar ($\Delta r$), cujos valores são apresentados na Tab. (6):

**Tabela 6.** Anisotropia média e planar do aço AISI 316

| | **AÇO AISI 316** |
|---|---|
| **Anisotropia média ($r_m$)** | 1,35 |
| **Anisotropia planar ($\Delta r$)** | -0,50 |

Como o valor encontrado para a anisotropia média é maior do que 1, pode-se concluir que a chapa apresenta resistência a deformação plástica maior na direção da espessura da chapa, sendo deformada principalmente nas direções do comprimento e da largura (MELCONIAN, 2014).

## CONCLUSÃO

A partir da realização deste trabalho foi possível verificar que o processo de estampagem incremental pode ser facilmente realizado em um centro de usinagem CNC, sendo necessários apenas pequenos ajustes, como por exemplo a construção do dispositivo para fixação das chapas metálicas e a fabricação de ferramentas dedicadas a conformação das

chapas.

O aço inoxidável AISI 316 apresentou boa conformabilidade, e por consequência o material se mostrou apto para o processo de estampagem incremental.

A lubrificação se mostrou necessária para a realização do processo para evitar qualquer tipo de força exagerada da ferramenta sobre a chapa. Em contrapartida, a utilização do lubrificante piorou o acabamento superficial da peça, o que comprova que se deve utilizar um outro tipo de lubrificante ou então mudar a estratégia de aplicação do mesmo.

O aumento da velocidade de rotação da ferramenta melhorou o acabamento superficial da peça, causando um possível aumento da temperatura da ferramenta e consequentemente a melhora na conformabilidade do material.

Através dos cálculos do índice de anisotropia, conclui-se que a chapa apresenta resistência a deformação plástica maior na direção da espessura da chapa, sendo deformada principalmente nas direções do comprimento e da largura.

A melhoria do dispositivo prensa-chapas se mostra necessária, devido ao tempo elevado na inserção e na retirada da chapa metálica. Outro fator importante é a velocidade de transmissão dos dados do software para o centro de usinagem, o que resultou em um movimento descontínuo da máquina e afetou diretamente o acabamento superficial da peça.

## AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem à imensa colaboração do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, por ter cedido todas as ferramentas e maquinários utilizados nesta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

EMMENS, W.C., G. SEBASTIANI, e A. H. VAN DEN BOOGGARD. “The technology of Incremental Sheet Forming—A brief review of the history”. Journal of Materials Processing Technology, 2009: 981-997.

LAJARIN, Sérgio Fernando. “Avaliação dimensional de implantes sob medida para cranioplastia.” Tese de Mestrado. Curitiba: UFPR - Universidade Federal do Paraná - Setor de Tecnologia. Programa de Pós-graduação em Eng. Mecânica - PG-Mec, 2008.

MELCONIAN, M. V. “Modelagem numérica e computacional com similitude e elementos finitos: equação preditiva geral para o cálculo da força de retenção em freios de estampagem”. São Paulo : Blucher, 2014.

SCHAEFFER, L. Conformação de chapas metálicas. Porto Alegre : Imprensa Livre, 1999. 267p. Bibliografia: p 122.

SILVA, M. et al. “Single point incremental forming of metals sheets: experimentation and theoretical interpretation”. Anais da 11ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas, 8 a 10 de Outubro de 2008, Porto Alegre/RS, Brasil, ed. Schaeffer L., Gráfica Metrópole., pp. 11-28.

STRANO. Incremental Forming Processes: Current and Potencial Applications, SME Technical Paper No MF03-114. 2003.

TIBURI, F.; SHAEFFER, L. “Aspectos técnicos e econômicos da estampagem incremental. In: X Conferência Nacional de Conformação de Chapas“(XVII SENAFOR), Bento Gonçalves, RS, p. 255-275, 2007.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção ‘área de conhecimento do trabalho’.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
( X ) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

# PROCESSO DE SOLDAGEM TIG CONVENCIONAL E A-TIG: UMA REVISÃO DE LITERATURA

**Rômulo Hudston Campos Neves; Thiago José Donegá; Isadora Ferreira Caixeta**
Centro Universitário de Patos de Minas - UNIPAM
Rua Major Gote, n° 808, Bairro Caiçaras - Patos de Minas - MG, Cep: 38702-054.
romulobmx3m@hotmail.com

**RESUMO:** O processo de soldagem TIG (Tungsten Inert Gas), é um processo onde a fusão das peças é realizada através de um arco elétrico que é mantido entre um eletrodo de tungstênio não consumível e as peças a serem unidas. Uma variante desse processo é a soldagem A-TIG (soldagem TIG com fluxo ativo), esse tipo de soldagem foi criado pelo Paton Welding Institute nos anos 60. Nesse processo deposita-se uma camada fina de fluxo ativo na superfície da peça na qual irá ser realizada a soldagem. A fonte, tipo de eletrodo e gás de proteção são os mesmos utilizados no processo TIG convencional, a única mudança está na aplicação prévia do fluxo. Esse trabalho tem como objetivo comparar a soldagem TIG convencional com a soldagem A-TIG, mostrando as principais diferenças entre cada processo através da apresentação de informações encontradas na literatura. O processo A-TIG se mostra um processo de soldagem vantajoso em relação ao processo TIG, principalmente quando se objetiva maior penetração da solda. No entanto, pode não chamar muita a atenção da indústria devido ao seu acabamento inferior e ao custo adicional com a aplicação do fluxo ativo.

**Palavras-Chave:** Arco elétrico, eletrodo de tungstênio, Fluxo Ativo.

***ABSTRACT:*** *TIG welding process (Tungsten Inert Gas) is a process where the fusion of the parts is performed through an electric arc that is maintained between a non-consumable tungsten electrode and the parts to be joined. A variant of this process is A-TIG welding (TIG welding with active flux), this type of welding was created by the Paton Welding Institute in the 1960's. In this process a thin layer of active flux is deposited on the part surface on which it will welding. The source, type of electrode and shielding gas are the same as those used in conventional TIG process, the only change is in the previous application of the flux. This work aims to compare conventional TIG welding with A-TIG welding, showing the main differences between each process through the presentation of information found in the literature. The A-TIG process shows an advantageous welding process in relation to the conventional TIG process, especially when it is aimed at greater penetration of the weld. However, it may not draw much attention from the industry due to its lower finish and the additional cost with the application of the active flux.*

***Keywords:*** *Electric arc, Tungsten electrode, Active Flux.*

## INTRODUÇÃO

O processo de soldagem GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) ou simplesmente TIG (Tungsten Inert Gas), é um processo onde a fusão das peças é realizada através de um arco elétrico que é mantido entre um eletrodo de tungstênio não consumível e as peças a serem unidas. Para realizar a proteção do arco elétrico e da poça de fusão, utiliza-se uma coluna de gás inerte ou a mistura destes gases, com o intuito de evitar a contaminação de agentes externos presentes na atmosfera. A soldagem TIG pode ser feita sem metal de adição, e com metal de adição adicionado diretamente na poça de fusão (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2017). A soldagem sem metal de adição é conhecida como autógena e é utilizada principalmente para união de chapas de pequena espessura.

Uma variante desse processo é a soldagem A-TIG (soldagem TIG com fluxo ativo), esse tipo de soldagem foi criado pelo Paton Welding Institute nos anos 60. Nesse processo deposita-se uma camada fina de fluxo ativo na superfície da peça na qual irá ser realizada a soldagem (DONEGÁ, et al., 2014). A fonte, tipo de eletrodo e gás de proteção são os mesmos utilizados no processo TIG convencional, a única mudança está na aplicação prévia do fluxo.

O fluxo para soldagem A-TIG é diluído em solventes como álcool e acetona e pode ser aplicado com um pincel ou *spray* antes da soldagem. Alguns estudos e experimentos comprovam que a produtividade com o processo A-TIG é aumentada em até três vezes comparado com o processo TIG convencional (AZEVEDO, FERRARESI e FARIAS, 2009). Esse fluxo faz com que o arco aumente a densidade de corrente no ânodo, com isso a sua força se aumenta na poça de fusão. A utilização desse processo se dá principalmente quando se deseja obter um aumento de penetração na soldagem (VILARINHO, et al., 2009).

Esse trabalho tem como objetivo comparar a soldagem TIG convencional com a soldagem A-TIG, mostrando as principais diferenças entre cada processo através da apresentação de informações encontradas na literatura.

## PROCESSO DE SOLDAGEM TIG

O processo de soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) é o processo onde se utiliza um eletrodo de tungstênio não consumível protegido por um gás inerte para realizar a soldagem. Esse processo consiste em uma soldagem a arco elétrico com adição de gases inertes, que fazem a proteção da área soldada, evitando contaminações ocorridas através de reações com elementos existentes no ar. O gás inerte não reage com o metal derretido, resultando em soldas com menos defeitos e com maior resistência. O processo TIG foi criado principalmente para realizar soldas em manganês, alumínio e aço inoxidável, e atualmente é amplamente utilizado para soldagens em metais não ferrosos (GEARY e MILLER, 2011). A figura 3 mostra de maneira esquemática o processo de soldagem TIG.

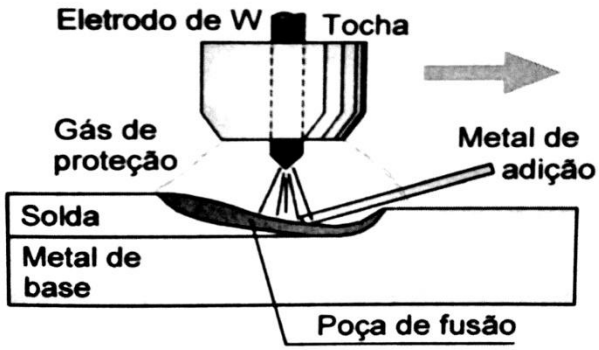



Figura 3 - Processo de soldagem TIG (esquemática)
Fonte: (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2017, p. 191)

No processo de soldagem TIG o eletrodo de tungstênio não fornece metal de enchimento como no processo de eletrodo revestido, os metais de adição utilizados vêm em forma de haste ou vareta separadamente, e são adicionados junto à poça de fusão como mostra a figura. O tungstênio é utilizado no processo de soldagem TIG por ter um ponto de fusão bastante alto, com isso faz com que ele consiga aquecer de forma fácil outros metais até o seus pontos de fusão, sem que o próprio eletrodo derreta (FARNSWORTH, 2010). O fato do eletrodo de tungstênio ser não consumível inclui neste processo uma vantagem de realizar soldagens de maneira autógena.

No processo de soldagem TIG utiliza-se gases inertes ou mistura desses gases para realizar a proteção da poça de fusão. Os gases mais utilizados nesse processo são o argônio, o hélio ou a mistura deles. No entanto, é necessário que em ambas as situações a concentração de pureza desses gases esteja em 99,99% (SANTOS, 2015). De acordo com Wainer, Brandi e Mello (1992), a utilização desses gases ou mistura de ambos vai depender do tipo de liga na qual a soldagem irá ser efetuada, bem como as características da soldagem.

Os equipamentos utilizados para a soldagem TIG manual incluem tochas, eletrodos, sistemas de fornecimento de gás de proteção e fontes de energia. Quando se utiliza um sistema mecanizado, pode-se acrescentar uma combinação de controle de tensão de arco, controle de movimento e deslocamento, alimentadores de arame, além de osciladores de arco (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2004). A figura 4 mostra um esquema simplificado dos equipamentos utilizados para soldagem TIG manual.

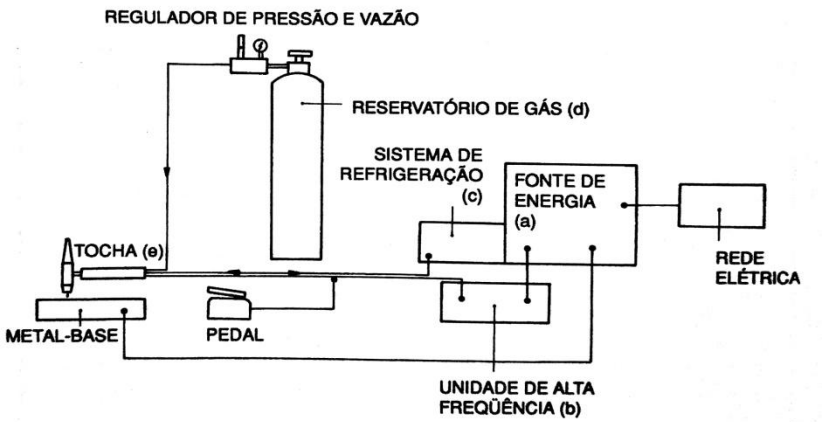



Figura 4 - Esquema simplificado dos equipamentos para o processo TIG
Fonte: (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992, p. 62)

A fonte de energia deve ser sempre de corrente constante, podendo ser gerador, transformador ou retificador. A unidade de alta frequência é fundamental para realização de soldagens em corrente alternada, e deve dotar-se de regulagens de intensidade e controle de pré e pós-vazão de gás. O reservatório de gás possui reguladores de pressão e vazão e na maioria das vezes tem um formato cilíndrico. As tochas TIG conduzem a corrente elétrica para o metal de base através do eletrodo de tungstênio, e proporcionam a proteção gasosa para o arco elétrico e poça de fusão (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992). Atualmente as fontes mais utilizadas são as do tipo eletrônicas e portáteis, além de menos peso, e mais regulagens, conseguem entregar um controle mais fino e preciso para a execução da soldagem.

O processo de soldagem TIG geralmente utiliza um arco de corrente continua (CC), e o eletrodo de tungstênio tem uma polaridade negativa. Desta forma o eletrodo torna-se o cátodo e a peça o ânodo. Esse tipo de configuração chama-se polaridade direta e é usada na maioria dos casos. A polaridade inversa ou reversa, o eletrodo de tungstênio tem uma polaridade positiva, neste caso a peça torna-se o cátodo e o eletrodo o ânodo. Como no processo TIG a maior parte do calor é gerada no ânodo, a polaridade inversa é utilizada para soldagem de alguns materiais finos e com baixo ponto de fusão (ASM INTERNATIONAL, 1993).

A soldagem TIG oferece vantagens para uma gama de aplicações, desde indústrias aeroespacial e nuclear a oficinas de fabricação e reparo. Além de poder utilizar quase todos os tipos de metais, incluindo metais dissimilares, as soldas podem ser realizadas em qualquer posição, podendo haver adição de metal ou não. O processo pode ser automatizado e programado para fornecer um controle mais preciso das variáveis de soldagem, esta flexibilidade pode ser obtida, pois o processo permite que a fonte de calor e o metal de adição sejam controlados de forma independente (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2004). Essas e outras vantagens fazem com que o processo de soldagem TIG se torne cada vez mais utilizado.

## PROCESSO DE SOLDAGEM A-TIG

O processo de soldagem A-TIG (Soldagem TIG com um fluxo ativo) consiste em aplicar uma camada de material, denominada de fluxo ativo, na junta, antes de realizar a soldagem. Os fluxos ativos utilizados na soldagem A-TIG foram inicialmente desenvolvidos pelo *Paton Institute Electric Welding* na antiga União Soviética, e tinham como principal objetivo aumentar a produtividade do processo TIG convencional. Atualmente, esses fluxos podem ser encontrados na forma de aerossol ou na forma de pó. Quando se adquire na forma de pó, o mesmo é dissolvido em um solvente para aplicação com pincel (VILARINHO, KUMAR, *et al.*, 2010).

O fluxo ativo para soldagem A-TIG pode ter varias composições, no qual irá depender material a ser utilizado para a soldagem. Segundo (MODENESI, NETO, *et al.*, 2013), os ingredientes utilizados para composição do fluxo ativo são parecidos com os fluxos utilizados nos processos de soldagem a arco submerso e eletrodos revestidos. Esses fluxos na maioria das vezes tem uma composição complexa e a análise da função de cada componente se torna difícil.

Uma das principais vantagens do processo A-TIG é o aumento de penetração na soldagem. De acordo com (SHYU, HUANG, *et al.*, 2008), esse aumento de penetração é causado pelo efeito do fluxo ativo, pois ele altera a tensão superficial da poça de fusão, e dessa maneira o fluxo do fluido é alterado fazendo com que haja mais penetração. Todavia, existem poucos dados disponíveis na literatura aberta a respeito da influência do fluxo com o aumento de penetração na soldagem A-TIG.

Além do aumento de penetração do processo A-TIG comparado com o processo TIG convencional, (VILARINHO, KUMAR, *et al.*, 2010) cita outras vantagens como, o aumento de produtividade do processo, pois devido ao aumento de penetração pode-se aumentar a velocidade de soldagem e com isso diminuir o tempo de execução de um mesmo serviço. Outra vantagem é a redução de distorções do metal de base, essa vantagem pode vir da diminuição da corrente elétrica para uma mesma penetração ou diminuição do número de passes para realizar uma mesma soldagem. Outros problemas como inconsistência na penetração, são atenuados neste processo.

Apesar das vantagens, o processo A-TIG não é muito utilizado industrialmente. Além da dificuldade de se adquirir o fluxo, o mesmo é visto como uma operação e um custo adicional. Outro ponto ruim é que os fluxos comercializados além de apresentarem um acabamento superficial pior que a soldagem TIG convencional, produzem resíduos de escória sobre a solda, necessitando de uma limpeza da superfície após a soldagem (VILARINHO, KUMAR, *et al.*, 2009). Essas particularidades fazem com que o processo A-TIG seja pouco difundido e utilizado nas indústrias.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através do estudo realizado na literatura disponível sobre os processos de soldagem TIG convencional e A-TIG, pode-se observar algumas características que cada processo possui, bem como as suas principais diferenças:

- Os dois processos utilizam os mesmos equipamentos, e os mesmos gases de proteção para a realização da soldagem, diferindo apenas na aplicação do fluxo ativo, no caso do processo A-TIG, que é feita antes da execução da soldagem.

- Devido ao efeito do fluxo ativo, o processo A-TIG consegue aumentar a penetração da soldagem em uma mesma faixa de corrente elétrica, quando comparado com o processo TIG convencional.
- O processo A-TIG consegue ter uma melhor produtividade do que o processo TIG convencional. Isso pode ser alcançado aumentando a velocidade de soldagem, ou diminuindo a quantidade de passes em uma mesma junta, que em alguns casos, devido ao aumento da penetração, pode ser realizado em apenas um passe.
- O processo de soldagem TIG convencional consegue entregar um cordão de solda com acabamento melhor, e sem resíduos de escória na superfície.

## CONCLUSÃO

O processo A-TIG se mostra um processo de soldagem vantajoso em relação ao processo TIG convencional, principalmente quando se objetiva maior penetração da solda. No entanto, pode não chamar muita a atenção da indústria devido ao seu acabamento inferior e ao custo adicional com a aplicação do fluxo ativo. A dificuldade de se adquirir o fluxo é outro ponto que influencia na baixa utilização desse processo no meio industrial, meio no qual o processo TIG convencional é bem mais difundido. Todavia, em alguns processos industriais onde as distorções do metal de base devem ser mínimas, a utilização do processo A-TIG pode ser mais interessante, isso é devido à capacidade desse processo obter uma penetração equivalente ao processo TIG convencional com uma faixa de corrente elétrica mais baixa, atenuando assim as distorções do metal de base.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos o curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário de Patos de Minas-UNIPAM pelo grande apoio na realização deste trabalho, e também aos seus professores que ajudaram com orientações.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding Handbook: Welding Processes, part 1. 9. ed. Miami: [s.n.], v. 2, 2004. 720 p.

ASM INTERNATIONAL. ASM handbook: Welding, Brazing, and Soldering. [S.l.]: ASM International, v. 6, 1993. 1299 p.

AZEVEDO, A. G. L.; FERRARESI, A.; FARIAS,. Soldagem de um Aço Inoxidável Ferrítico com o Processo A-TIG. Soldagem e Inspeção, São Paulo, v. 14, p. 002-009, Março 2009.

DONEGÁ, T. J. et al. Comparação da Eficiência Térmica entre Soldagem A-TIG e TIG Convencional. Soldagem e Inspeção, São Paulo, v. 19, p. 028-041, Março 2014.

FARNSWORTH, S. R. Welding For Dummies. Indianapolis: Wilen, 2010. 362 p.

GEARY, D.; MILLER, R. Welding. 2. ed. New York: McGraw Hill Professional, 2011. 254 p.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017. 370 p.

MODENESI, P. et al. Efeito da densidade do fluxo e da presença de aditivos na soldagem ATIG de aço inoxidável austenítico. Soldagem e Inspeção , São Paulo, v. 18, n. 2, Junho 2013.

SANTOS, C. E. F. D. Processos de Soldagem: Conceitos, Equipamentos e Normas de Segurança. 1. ed. São Paulo: Érica, 2015. 152 p.

SHYU, W. et al. Study of the Performance of Stainless Steel A-TIG Welds. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 17, n. 2, p. 193-201, Abril 2008.

VILARINHO, O. et al. Successful High-Productivity Welding with A-TIG process. 20th International Congress of Mechanical Engineering, Gramado, p. 15-20, novembro 2009.

VILARINHO, O. et al. Soldagem de Alta-Produtividade com o Processo A-TIG para Diferentes Metais de Base. VI CONEN - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande/ Paraíba, Agosto 2010.

WAINER, ; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. D. Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo: Bluncher, 1992. 494 p.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção ‘área de conhecimento do trabalho’.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(X) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

# PROJETO DE ADAPTAÇÃO DE IMPRESSORA 3D PARA IMPRESSÃO DE PEEK

**Ramon Carim Bevilacqua, Cristian Vendittozzi, Manuel Nascimento Dias Barcelos Júnior**
Universidade de Brasília – Faculdade do Gama
Área Especial de Indústria Projeção A, Setor Leste - Gama. CEP: 72.444-240
ramoncbevilacqua@gmail.com

**RESUMO:**

O amplo desenvolvimento de tecnologias de *additive manufacturing*, tem se mostrado uma alternativa para o desenvolvimento de peças e componentes nos mais variados segmentos industriais. Devido a sua intensa popularização e facilidade de manuseio, hoje podemos encontrar impressoras 3D, que utilizam a tecnologia de fabricação por adição de materiais, moldando peças que podem ser de brinquedos infantis, até componentes estruturais utilizados na indústria aeroespacial. A partir da utilização do meio espacial ser cada vez maior, e tendendo a se tornar ainda mais otimizada, faz-se necessária a pesquisa e desenvolvimento de novos materiais e técnicas de fabricação que resultem em características físicas e químicas cada vez mais especializadas de acordo com suas necessidades. No caso do PEEK, poliéter-éter-cetona, se trata de um polímero com características físicas e químicas importantes, que se manifestam apresentando melhores resistências mecânicas e térmicas, o que possibilita sua utilização em segmentos normalmente dominados por compósitos e ligas metálicas, entre outros. Com o intuito de estabelecer parâmetros de adaptação de uma impressora comercial, o presente trabalho explora as dificuldades e soluções que possibilitam a impressão de materiais inovadores que possuem maior complexidade, como PEEK e ULTEM.

**Palavras-Chave:** PEEK, Manufatura aditiva, Impressora 3D.

***ABSTRACT:***

*The extensive development of additive manufacturing technologies has proven to be alternative for the development of parts and components in the most varied industrial segments. Due to its intense popularization and ease of handling, today we can find 3D printers, which use the technology of manufacturing by adding materials, molding pieces that can be children's toys, to structural components used in the aerospace industry. Since the use of the space environment is increasing, and tending to become more and more optimized, it is necessary to research and develop new materials and manufacturing techniques that result in physical and chemical characteristics increasingly specialized of according to your needs. In the case of PEEK, polyetheretherketone, it is a Polymer with important physical and chemical characteristics, which manifests itself with better mechanical and thermal resistance, which makes it possible to use it in segments usually dominated by composites and metal alloys, among others. In order to establish parameters for adapting a commercial version, the present work explores the difficulties and solutions that make possible the printing of innovative materials that are more complex, such as PEEK and ULTEM.*

***Keywords:*** *PEEK, Additive manufacturing, 3D printer.*

## 1. INTRODUÇÃO

A ciência dos materiais, hoje, é considerada um promissor ramo de estudo, visto que sua importância reflete no desenvolvimento das mais variadas tecnologias, praticamente todo produto que é desenvolvido deve considerar os materiais que deverão ser utilizados para atingir as expectativas que se busca. De forma análoga, o estudo e desenvolvimento de materiais se mostra ainda mais importante no nicho aeroespacial, mesmo porque, devido ao seu alto grau de otimização, o peso, a resistência e outras diversas caraterísticas dos materiais a serem utilizados são de primeira importância para o funcionamento de sistemas.

O desenvolvimento da tecnologia de fabricação aditiva está totalmente atrelado ao que chamamos de prototipagem rápida. Assim, podemos dizer que a fabricação por adição é uma tecnologia matriz, que dá origem a tecnologias que seguem esse princípio de criação de objetos tridimensionais a partir da adição de materiais. Pode-se dizer que essas tecnologias tiveram real início com o surgimento da primeira impressora 3D, que foi inventada por Chuck Hull em 1984 (DUARTE, 2014). No começo a tecnologia tinha muitas imperfeições, porém mesmo não sendo completamente fidedigna

se mostrava uma ótima alternativa para confecção de polímeros, visto que os processos tradicionais levavam de 6 a 8 semanas, ao passo que a nova tecnologia se desenrolava de forma muito mais rápida (DUARTE, 2014). Continuando seus trabalhos, Hull, pouco tempo depois já tinha resolvido os problemas de seu protótipo e continuou criando diversas formas de impressão, posteriormente patenteando sua criação e inicializando a comercialização da tecnologia (DUARTE, 2014). Desde 2009, muitas patentes de tecnologias de fabricação aditiva têm expirado e por consequência, muitas empresas têm aproveitado para desenvolver máquinas de impressão 3D, que rapidamente se disseminam por médias e pequenas empresas, além de se tornarem até mesmo máquinas pessoais, visto que a ampla concorrência promoveu um rápido desenvolvimento das tecnologias e o barateamento das mesmas (RONCOLATO, 2014).

O processo de manufatura aditiva, ou fabricação por adição de material, se trata de um processo de criação de objetos pela deposição de camadas de determinados materiais a partir de um modelo previamente estabelecido por ferramentas e softwares de desenho assistido por computador (DAC) ou *Computer Aided Design* (CAD). Desta forma, o processo se mostra mais econômico que processos de usinagem no que diz respeito ao gasto de material, pois ao invés de gerar peças retirando material de um bloco maior, o que acarreta no gasto excessivo de materiais, no caso da fabricação por adição há uma perda de materiais muito menor por utilizar uma tecnologia que só usa o material que é necessário (VOLPATO, 2007).

Como justificativa desse trabalho, tem-se a possibilidade de inovação pela utilização de impressoras 3D de baixo custo para a manufatura de peças feitas de materiais plásticos de alta performance, como o PEEK e o ULTEM. Dessa forma, peças de materiais inovadores feitas com baixo custo, possibilitam o desenvolvimento de pesquisas no ramo de materiais aeroespaciais que poderão complementar a presente estudo. Nesse sentido, busca-se desenvolver a metodologia de impressão dos referidos materiais, procurando fazer as mais simples modificações de sistema, mas que beneficiem o mesmo de forma mais relevante. Devido à alta complexidade da impressão, a confecção de peças simples já é considerada um grande avanço pois envolve a solução de diversos problemas.

Este trabalho tem como objetivo, montar e adaptar uma impressora 3D comercial, considerando todos os problemas que um usuário comum poderia enfrentar, além dos entraves com os quais poderia se deparar no que diz respeito a adaptação para impressão de materiais mais sofisticados. Além disso, busca avaliar e caracterizar o uso e fabricação de componentes aeroespaciais formados a partir do polímero Poliéter-éter-cetona – PEEK, um material ainda pouco conhecido, mas que se mostra bastante valioso graças às suas propriedades, podendo substituir outros materiais atualmente utilizados na industrial aeroespacial. Além do interesse nas propriedades singulares encontradas no PEEK, um diferencial que reforça sua escolha é a sua possibilidade de fabricação de peças a partir da aplicação por deposição de material fundido, ou *Fusion Deposition Modeling* (FDM), uma tecnologia de fabricação por adição de material em camadas sucessivas, mais conhecida por *Additive Manufacturing* (AM).

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No ramo de AM existem diversas tecnologias de produção, no entanto uma das maiores diferenças entre elas está na forma na qual se encontra a material base, podendo ser visto em formato de base em pó, sólida ou até mesmo líquida. Sendo assim, aqui é descrito o funcionamento de uma das tecnologias.

A tecnologia FDM é um método de manufatura aditiva patenteado pela Stratasys. A tecnologia FDM produz modelos conceituais, protótipos funcionais e peças para uso final em termoplásticos padrão, de engenharia e de alto desempenho. Para isso, a tecnologia usa temperaturas controladas onde filamentos de polímeros como o Ácido Polilático (PLA), a Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) e o PEEK são fundidos e a partir de uma cabeça injetora móvel o material que é derretido e depositado camada por camada acima de uma plataforma normalmente fixa (ZEIN et al., 2002).

Para o estudo em questão, será utilizada a referida tecnologia de FDM, também conhecida como modelização por deposição de material fundido. Nessa técnica, para a fabricação por adição de material, o que ocorre é o aquecimento de determinados materiais, normalmente utilizando polímeros que se encontram na forma de filamentos, os quais são gradativamente derretidos ao passo que são depositados em uma placa. A partir da utilização de um modelo previamente estabelecido virtualmente, as cabeças injetoras de material se movimentam acima da placa, onde vão adicionando o material em cada lacuna que deve ser preenchida, dessa forma sobrepondo camadas e formando o produto desejado.

Esse processo, mesmo podendo aparentar ser sofisticado, tem sido largamente disseminado pelo mundo pois se trata de uma tecnologia que se manteve durante muitos anos bloqueada por direitos de patente, hoje a patente caducou e barateou bastante o custo das chamadas impressoras 3D, podendo ser compradas por algumas centenas de dólares.

A princípio esperava-se que a forma de impressão para materiais poliméricos fosse a mesma, sejam eles de ABS, PLA ou até mesmo de PEEK, porém para o último material, devido suas singulares características térmicas, é necessário atentar para a grande diferença de temperatura de impressão em FDM. O PEEK é um material que possui um ponto de fusão de 334 ∘C, o que é consideravelmente superior ao ponto de fusão dos outros polímeros normalmente utilizados para a deposição de matéria fundido como PLA e ABS.

Sendo assim, em uma impressão comum por FDM, usando ABS ou PLA, é necessário prover uma temperatura de impressão que se mostra próxima de 200 ∘C nos bicos de injeção, segundo o fabricante de filamentos Filament2print (FILAMENT2PRINT, 2015). Já para a impressão de peças formadas por PEEK, percebe-se que a temperatura de impressão é de 350∘C à 450 ∘C nos bicos de injeção, sendo também necessário um maior aquecimento da placa de

construção (chegando à 130◦C) e ainda exigindo o uso de lâmpadas de aquecimento laterais responsáveis pelo controle térmico da área de construção a cerca de 80◦C para evitar distorções severas e possíveis delaminações (VAEZI; YANG, 2015). Na Fig. 1, observa-se o modelo previamente descrito.

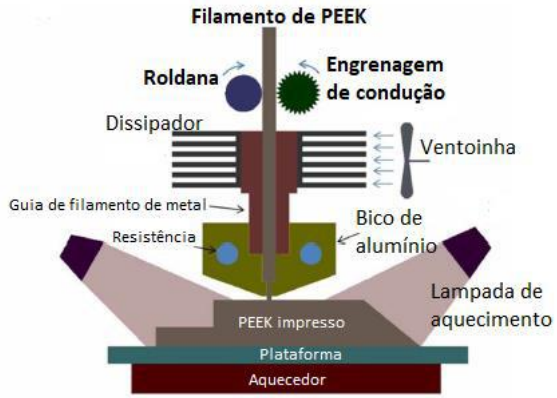



**Figura 1.** Impressora 3D modificada para PEEK. Adaptado. (VAEZI; YANG, 2015)

O PEEK é um polímero termoplástico que se caracteriza por uma alta temperatura de fusão, 334 ◦C, podendo ainda ser utilizado a temperaturas de até 250 ◦C por longos períodos sem apresentar mudanças significativas de propriedade (JONES; LEACH; MOORE, 1985). Apresenta ótima resistência química e relevantes propriedades mecânicas como boa resistência ao desgaste, rigidez importante, resistência à tração de 90 à 100 Mpa, baixo coeficiente de atrito e modulo de elasticidade de gira entorno de 4 à 24GPa (MAKEITFROM, 1999).

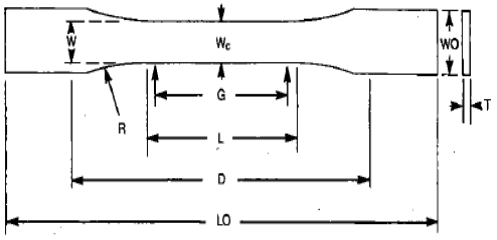
Ademais das suas propriedades mecânicas interessantes para a utilização na engenharia, o PEEK se mostra como uma boa alternativa para a diminuição do tempo de produção de peças, visto que tecnologias de prototipagem rápida simbolizam um menor tempo de produção se comparado com outros materiais mais comumente utilizados, como ligas metálicas. Ainda por consequência dessa substituição das ligas metálicas devemos destacar que as mesmas peças formadas por PEEK conseguem diminuir seu peso correspondente, podendo chegar a economia de 40% do peso de portas, suportes hidráulicos ou até mesmo em peças de junção, o que é uma grande preocupação quando falamos da indústria aeroespacial. Como exemplo de sua utilização na indústria aeroespacial podemos citar a fabricação de um duto de admissão de combustível a partir de impressão 3D feito pela Solvay no ano de 2015.

Essa peça normalmente é feita de liga de alumínio, porém com a utilização de PEEK reforçado com 10% de fibra de carbono, alcançou-se aproximadamente 50% de economia de peso ainda tendo um bom desempenho mecânico (MARTENDAL, 2016). Outros exemplos da utilização de componentes aeroespaciais feitos de PEEK estão começando a ser inseridos na produção dos aviões Airbus A350. Esse material tem sido empregado na manufatura de elementos de ligação como conectores, suportes, fixadores e grampos. dessa forma, reduzindo o peso, diminuindo os custos de desenvolvimento de componentes, aumentando a produtividade e em alguns casos diminuindo o tempo de montagem de sistemas (BRADY, 2016).

Baseado no sucesso dos componentes feitos de PEEK, alguns tipos desse material começam a ser produzidos em massa por empresas aeroespaciais como a Airbus, ajudando a diminuir peso, atingindo menores custos e aumentando a velocidade de produção.

## 3. METODOLOGIA

Para o experimento de solicitação mecânica, adota-se um corpo de prova para ensaios de tração, conforme a padronização ASTM, designação D638. Assim, os corpos têm espessura de 7 milímetros, sendo rígidos ou semirrígidos, utilizamos o ensaio tipo 1 como mostrado na Fig. 2 (STANDARD et al., 2003) e são desenhados em software CATIA.




| Dimensões | Tipo 1 |
|---|---|
| W (Largura da seção estreita) | 13 (0,50) |
| L (Comprimento da seção estreita) | 57 (2,25) |
| WO (Largura geral) | 19 (0,75) |
| LO (Comprimento geral) | 165 (6,5) |
| G (Comprimento do calibre) | 50 (2,00) |
| D (Distância entre apertos) | 115 (4,5) |
| R (raio da faixa) | 76 (3,00) |

**Figura 2.** Corpo de prova para ensaio de tração, norma ISO527-1.

Para um melhor aproveitamento dos recursos empregados no projeto, a primeira medida a ser tomada foi pesquisar de forma eficiente quais eram os fornecedores presentes no Brasil que poderiam atender as demandas para a compra de kit para montagem de impressora 3D, de peças avulsas e de impressoras montadas. Feito isso, os mesmos foram contatados para a apresentação de orçamentos e prazos de entrega. Já no começo das pesquisas de preço, as opções de impressoras montadas foram descartadas pois apresentavam grandes aumentos de preço quando comparadas as outras opções.

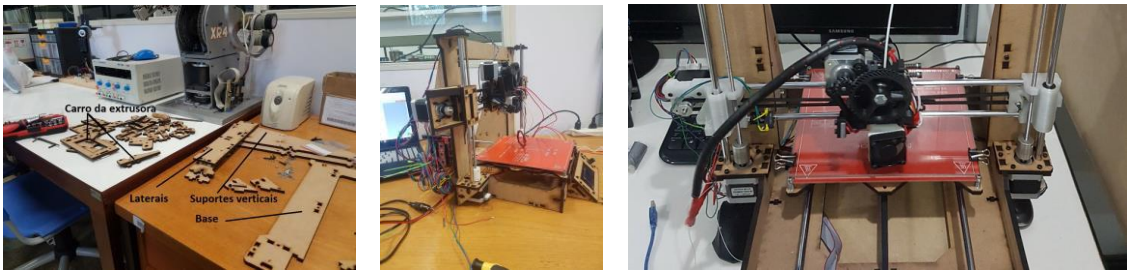
Dessa forma, foram feitos levantamentos dos preços de kits e de peças avulsas, que manifestavam características semelhantes por custos comparáveis. Por fim, a opção considerada mais interessante para o projeto foi um kit Graber i3 completo no valor de 1700,00 reais, onde estaria contemplada a estrutura em MDF cru, Kit de nivelamento automático da mesa e display com entrada para cartão SD.

A impressora 3D foi adquirida desmontada, sendo encontrado o kit com todos os seus componentes. Assim, foi necessário fazer todo o reconhecimento e levantamento de componentes antes de sua montagem. Para o reconhecimento dos componentes foi feita a listagem de eletrônica, peças do frame, contagem de parafusos e porcas, entre outros. Em seguida, iniciou-se a montagem da impressora, começando pelo frame de MDF, e após sua estruturação, montagem dos motores e display. Continuando, deu-se a instalação da eletrônica, distribuição dos fios e conectores, além da fixação das placas arduino e ramps. Posteriormente sendo fixada a extrusora, fusos e eixos.

Para o sistema em questão, identificou-se que a impressão apresentava certas inconstâncias e instabilidades no que concerne a deposição do material fundido. Sendo assim, o sistema responsável pela modificação de valores verticais de posicionamento do bico extrusor foi investigado e remontado diversas vezes com o intuito de solucionar o problema. Como o problema não apresentava grande melhora, a segunda medida a ser tomada foi a substituição dos acopladores rígidos feitos de PLA por acopladores de metal com o centro flexível, que aumentam a correção de diferenças entre os dois fusos e barras de eixo presentes no eixo z da impressora.

Com a troca dos acopladores a impressora apresentou melhora na impressão, porém ainda não se fazia completamente correta, justificando que a investigação de problemas continuasse. Quando se dava a remontagem e aperto de parafusos do eixo x, o sistema apresentava certa melhora de estabilidade, porém a mesma voltava a apresentar problemas pouco tempo depois. Os motores responsáveis por elevar e abaixar o carro extrusor não conseguiam trabalhar de forma sincronizada e então o sistema apresentava inclinações laterais que comprometiam a qualidade da impressão.

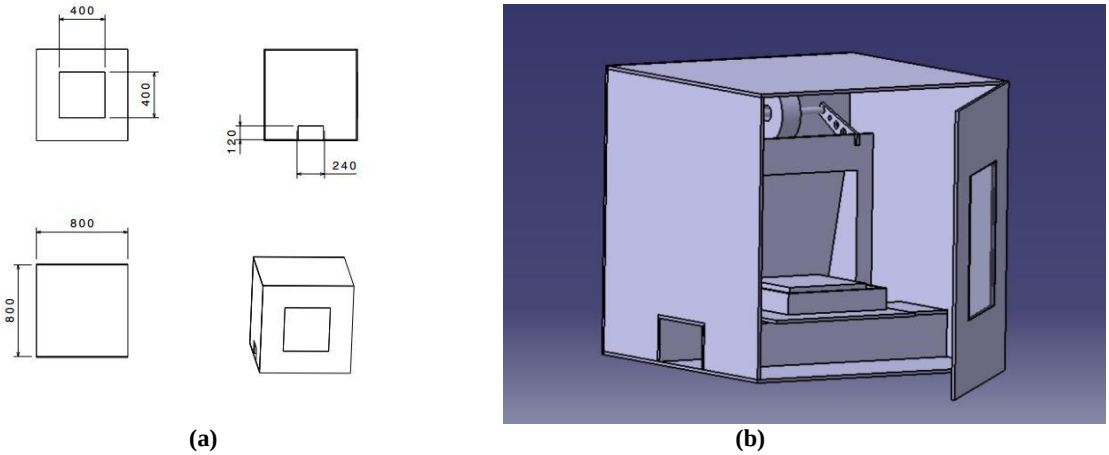
Como forma de solucionar problema, foi pensado um jeito de substituir as junções dos fusos e eixos para que os mesmos conseguissem trabalhar de forma mais estável. Por fim, foram adquiridos modelos em formato CAD que pudessem substituir as junções de forma que seria necessária a mudança do menor número de peças do sistema. Assim, as peças selecionadas foram impressas em uma impressora 3D alternativa com o material PETG, dessa forma proporcionando grande melhora da rigidez e estabilidade das referidas junções, ainda conseguindo alcançar boas temperaturas como é necessário no sistema, Fig. 3. Como conclusão da montagem das novas peças percebeu-se que os problemas que acometiam a impressão foram sanados e pode-se dizer que até mesmo a qualidade das impressões foi melhorada se compararmos aos resultados de quando o sistema de madeira ainda estava estável.




**(a)** **(b)** **(c)**

**Figura 3. (a)** Reconhecimento dos componentes do frame, **(b)** Instalação da extrusora e seus componentes, **(c)** Novas junções de eixos e fusos, feitos de PETG.

De forma paralela às mudanças de peças e calibragens que foram feitas na impressora, também foi desenvolvido o trabalho de desenho em CAD, desenho técnico, elaboração de cálculos e montagem do sistema de controle térmico, onde a impressora deve ser estabelecida para a impressão do material PEEK. Assim, como mostra nas Fig. 4 (b), o sistema elaborado, foi pensado para envolver toda a impressora e manter a temperatura ambiente estável e em torno de 80 ∘C. Como desenhos técnicos desenvolvidos para o modelo, se encontra também na Fig. 4 (a), apresentadas em escala 1:18 e com medidas em centímetros.




**(a)** **(b)**

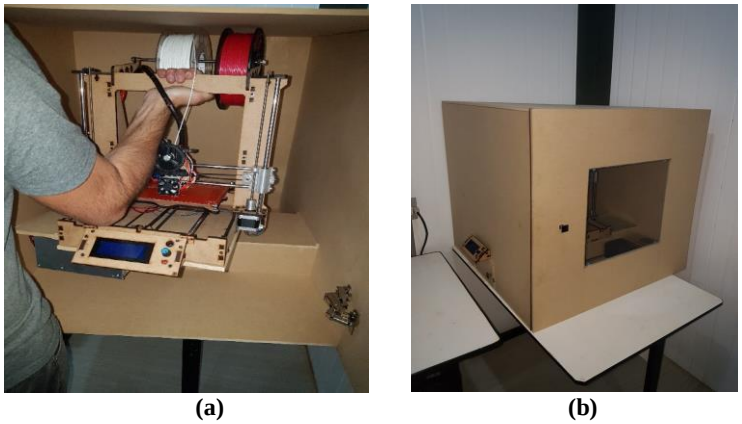
**Figura 4. (a)** Sistema completo com medidas em centímetro, **(b)** Modelo da caixa térmica com a impressora.

Como a impressora tinha sua eletrônica muito exposta ao ambiente e o mesmo terá sua temperatura elevada, foi criado o duto que se localiza abaixo da impressora e é onde se aloja toda a eletrônica que poderia ser removida do ambiente aquecido. Dessa forma, além de retirar a eletrônica mais sensível à altas temperaturas do ambiente aquecido, também se promove um ambiente onde a mesma pode fazer suas trocas de temperatura de forma eficiente.

Tendo os cálculos e modelo do sistema bem definidos, foi feita a compra de MDF de 9 mm e dobradiças para a porta, possibilitando a montagem do mesmo. A primeira etapa foi fazer os cortes desejados utilizando serra rotativa e a serra tico-tico. Seguindo com o trabalho, foi feita a montagem da caixa por meio de parafusos para madeira.

Depois da montagem da caixa, foram feitas as modificações que eram necessárias para a instalação do duto de resfriamento da eletrônica. Além do duto, foi instalado o vidro da porta que facilita a visualização durante a impressão de peças. Com o duto bem estruturado, foi feita a fixação da impressora no suporte, conferiu-se as medidas e a ergonomia da mesa e foi considerada satisfatória para a impressão de peças, além de possibilitar a manutenção e potenciais trocas de componentes. Em seguida foi feito o corte na madeira suporte da impressora para facilitar o manuseio do sistema.

Após algumas alterações, a impressora pode ser completamente removida da caixa de forma relativamente simples. Dessa forma, favorecendo possíveis manutenções, Fig. 5 (a). Depois que o sistema se encontrava completamente definido, a impressora foi retirada e realojou-se a eletrônica na parte inferior do suporte. Como resultado do realojamento da impressora pode-se perceber que o sistema ficou mais organizado e visualmente mais limpo. Dessa forma, além de favorecer um melhor resfriamento da eletrônica que é uma parte sensível a altas temperaturas, também evita possíveis choques mecânicos. Por fim, pode-se visualizar a instalação do visor na parede externa da caixa e a porta do duto de resfriamento, que pode ser fechada quando o sistema não está operando, Fig. 5 (b).



**(a)** **(b)**

**Figura 5. (a)** Possibilidade de remoção da impressora, **(b)** Sistema completo e com visor fixado acima do duto de resfriamento.

Para a impressão do PEEK, buscou-se respeitar as características que o fabricante informava. Sendo assim, o mesmo deveria apresentar uma temperatura de 420 ◦C no bico de impressão, 120 ◦C na mesa de deposição do material e 80 ◦C no ambiente em que se dá a impressão. Para alcançar a referida temperatura na mesa de deposição foi necessário fazer uma pequena alteração nos parâmetros de impressão do software Repetier, no entanto para as demais não foi tão simples. Primeiramente, deve-se notar que o alcance máximo de medição do termistor presente no sistema, modelo Ntc 3950 é de 300 ◦C o que inviabiliza uma possível configuração para extrapolar em cerca de 50% seu ambiente de atuação. Pensando

nisso, a atitude adotada para substituir o menor número de componente presentes, foi modificar o local de medição da temperatura e desse modo não extrapolar os referidos 300 ∘C. Dessa forma, foram feitos furos para alojar o termistor no meio do dissipador de temperatura que dessa forma exerceria seu papel sujeito a temperaturas mais baixas.

**(a)** **(b)** **(c)**

**Figura 6. (a)** Bico de impressão chegando à 418 ºC, **(b)** Parede do ambiente de impressão à 64ºC, **(c)** Impressão de corpo de prova em PEEK.

A princípio a medida de realojar o sensor, seguida de sua correta fixação para promover uma boa condução de calor seria suficiente para solucionar a questão. Quando foram realizados testes de temperatura sem a atuação do cooler, o sistema conseguia atingir seus 420 ∘C sem maiores problemas. No entanto, o mesmo se comportava de forma incontrolável quando recebia influência de sua ventilação, não conseguindo se manter estável nas temperaturas e não atingindo os 420 ∘C por perder muito calor no dissipador. Uma medida, adotada a título de teste, foi a tentativa de impressão com o cooler desligado, o que fez com que o sistema atingisse sua temperatura ótima, porém derreteu parte do carro de impressão que era feito de PLA.

A ação seguinte foi pensar em uma forma de conseguir fixar o dissipador com materiais que poderiam ser submetidos a temperaturas mais altas e elaborar uma forma de distanciar o cooler do dissipador circular, de forma que a resistência que aquece o bico extrusor não fosse atingida pela ventilação. Foi usado um novo dissipador e dessa forma o sistema obteve sucesso ao atingir a temperatura necessária. Como mostra na Fig. 6 (a) foi instalado um termopar adicional que faz a medição da temperatura no bico extrusor, assim pode-se notar que agora o sistema possui a medição de temperatura em dois locais pertinentes, evitando problemas e assegurando que atinja a temperatura que se deseja.

Através de um outro sensor de temperatura foram feitas várias medições durante a impressão do PEEK. Essas medições não foram completamente fidedignas pois sofria muita influência da temperatura refletida no vidro, no entanto, como mostra a Fig. 6 (b) os 80 ∘C ainda assim não foram atingidos, o que provavelmente afetou a qualidade de impressão

Mesmo não atingindo todas as especificações do fabricante, foi possível adquirir impressões como mostra a Fig. 6 (c). Devido a impossibilidade de atingir as especificações do fabricante, verificou-se que a qualidade das impressões foi gravemente atingida. No caso, a peça de PEEK se descola da mesa de impressão e apresenta deformações provavelmente inerentes a retração do material, que é causada pela baixa temperatura do ambiente.

Mesmo apresentando problemas na impressão, os corpos de prova adquiridos foram testados com ensaios de tração que são mostrados a seguir. Para isso, como mostrado na Fig. 7 foram usados 2 corpos, devidamente marcados para os ensaios. Para os testes em questão, os corpos foram devidamente testados com o extensômetro posicionado, assim, foram rigorosamente tracionados. Como mostra a Fig. 7, percebe-se a deformidades que podem afetar os resultados.

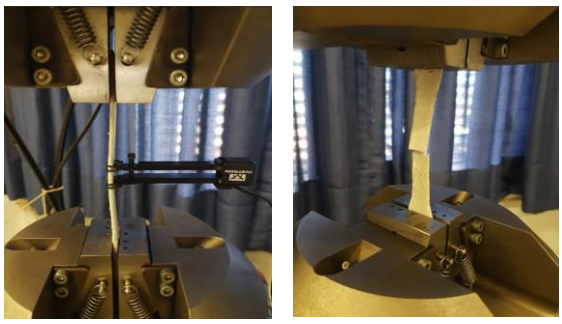


**Figura 7.** Corpo de prova de PEEK na máquina de tração.

Além do arqueamento dos corpos, também se percebe que os mesmos possuem espessuras menores do que é previsto pela norma, o que pode ter ocasionado menores resistências e afetado os dados recebidos pelos testes de tração.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o distanciamento da ventoinha e como resultado da modificação do local de medição da temperatura da impressora, percebeu-se que quando o sensor foi posicionado mais distante do bico de extrusão, o software e hardware da impressora eram suficientes para possibilitar a elevação de temperatura. Assim, quando o software apresentava temperaturas mais baixas, o local de derretimento do material atingia as temperaturas necessárias para favorecer a deposição de material. Essa forma foi adotada pois se mostrou ser a mais barata e de simples adesão, não tendo necessidade imediata de modificar configurações do Arduino, nem acrescentar componentes como amplificadores. Como já abordado, foram feitos furos no dissipador para possibilitar a instalação do sensor na nova posição, Fig. 8 (a), e conforme mostra a Fig. 8, o sensor da impressora se encontra na posição atual destacada, enquanto um sensor termopar adicional é usado para aferir a temperatura efetiva do bico. Na Fig. 8 (b) nota-se as modificações do sistema montado.

**(a)** **(b)**

**Figura 8. (a)** Dissipador com novos furos, **(b)** Posição atual e padrão do sensor de temperatura.

Com o novo posicionamento do sensor de temperatura, foi feita um gráfico, Fig. 9, com as principais temperaturas de utilização da impressora, para as temperaturas desejadas para impressão de PEEK e PLA, além de suas temperaturas próximas. Pode-se perceber que há grande diferença entre os locais de aquisição de dados, o que se justifica pela dificuldade de transferência de calor por condução do primeiro para segundo local, o que no caso é explorado por esse estudo.

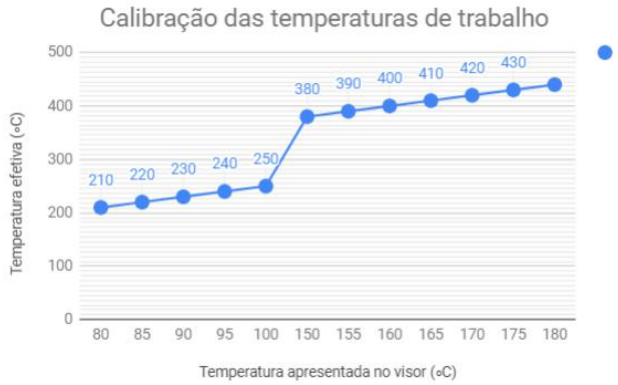



**Figura 9.** Gráfico de calibração das temperaturas da impressora.

Como o sistema recebe interferência da temperatura da mesa e do aquecimento do ambiente, julga-se necessário o uso do segundo sensor de temperatura para as impressões em ambiente fechado, evitando assim, que o mesmo se comporte de forma errônea e gere resultados indesejados.

Algo notório na impressão do material é que o mesmo não demonstra a mesma qualidade e uniformidade que estavam presentes nos feitos de PLA, no entanto os mesmos tiveram a maior parte de sua impressão concretizada, o que viabiliza os testes de tração, ainda que não gerem resultados completos. Após o ensaio dos corpos, percebe-se certa uniformidade de parâmetros e por consequência revelando dados equiparáveis. Pela Fig. 7 mostra-se que um corpo sofreu ruptura onde era esperado, porém o outro não. Ainda assim não inviabiliza o teste pois a ruptura se deu no estreitamento da seção, como é esperado.

Sobre a avaliação do tratamento de dados adquiridos nos testes, os corpos mostram que houve um comportamento predominantemente linear para sua deformação, apresentando uma grande área de deformação elástica, da mesma forma que o PLA e outros materiais impressos. Dessa forma pode-se dizer que a deposição de camadas se deu de maneira relativamente regular. Outra característica que pode ser observada no gráfico é a de que o material rompe de forma abrupta e frágil, o que já era esperado pelos dados bibliográficos. Percebe-se pelos gráficos apresentados na Fig. 10 que mesmo com baixa qualidade, geraram quase o mesmo resultado entre carga sustentada e deformação.

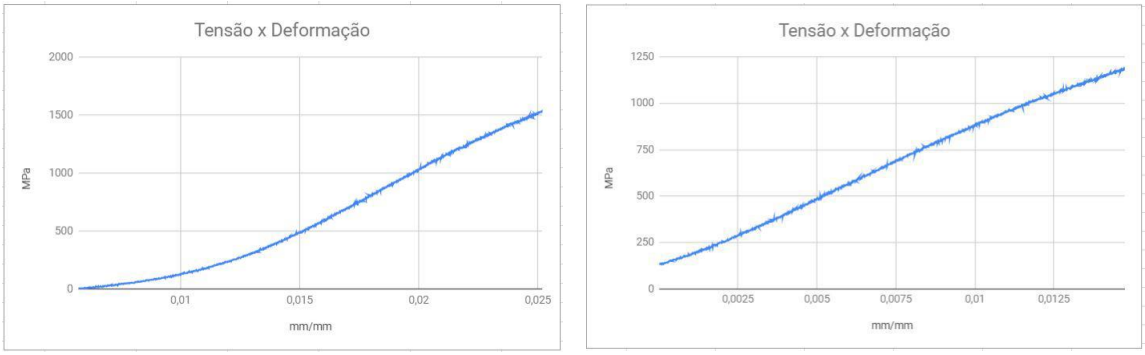



**Figura 10.** Gráficos 1 e 2 dos corpos de prova de PEEK (Tenção no eixo das coordenadas e deformação no eixo das abscissas).

No caso dos corpos de prova de PEEK, a ruptura ocorreu quando submetidos a 1,5 GPa, um resultado abaixo do esperado. Isso provavelmente se deve aos problemas de impressão. Primeiramente, podemos destacar que como o sistema falhava na sustentação da temperatura certas vezes, pode ter havido deposição de camadas quando as mesmas já estivessem enrijecidas, dessa forma prejudicando a resistência do material. Outro problema que pode justificar essa medida inferiores ao PLA, é a constatação de que o corpo de PEEK tinha espessura 25% menor que os de PLA. Uma outra característica aplicada nos gráficos de PEEK é que os mesmos possuem zonas de deflexão que não são típicas de materiais frágeis, no entanto, acredita-se que essa característica se fez presente pelo arqueamento das peças.

Mesmo sendo considerado um trabalho com ampla relevância e gerador de conhecimento, outros objetivos podem ser alcançados ou melhorados a partir de mudanças no sistema. Dentre as possíveis mudanças, algumas das mais promissoras seriam:

- utilização de carro extrusor feito de materiais termicamente mais resistentes como o alumínio.
- Utilização de lâmpadas infravermelhas para o aquecimento mais eficiente do sistema.
- Utilização de placas de MDF mais espessas que 15 milímetros, o que pode conferir maior isolamento ao sistema.
- Aquisição de aquecedor do bico extrusor mais potente.
- Utilização de materiais que possibilitem redução de umidade do sistema (gel de sílica), bem como melhoras no armazenamento e manuseio do material que pode ser prejudicado por umidade.
- Utilização de maiores saias de impressão para melhorar a fixação das peças na mesa, além da aquisição de colas mais fortes.

## 5. CONCLUSÃO

O desenvolvimento do presente trabalho possibilitou o desdobramento de um estudo com o material PEEK e seus processos de fabricação para a aquisição de componentes da indústria aeroespacial, avaliando a viabilidade de sua utilização, além de mapear suas características mecânicas. Dada a complexidade de impressão do material, os testes físicos de ensaio de corpos de prova foram relativamente comprometidos, no entanto o material PEEK se aproximou bastante dos dados adquiridos para o PLA, que por sua vez tinha corpos de boa qualidade e espessura maior que os de PEEK. O trabalho desenvolvido traz resultados promissores pois deixa um legado substancial para a construção de um sistema isolado, dados pertinentes à montagem e adaptação de impressoras 3D, além de reportar problemas e suas possíveis soluções.

Por fim, ainda falta dados para uma correta caracterização do material em questão, porém já se percebe pela revisão bibliográfica feita que o poliéter-éter-cetona tem grande potencial de utilização, isso devido ao seu alto desempenho para solicitações mecânicas, alta resistência química e alto ponto de fusão, baixa densidade e possibilidade de impressão por FDM. Conclui-se que de acordo com o plano de atividades estipulado e com o desenvolvimento do sistema conforme o previsto, que o presente trabalho atingiu os objetivos almejados.

Como perspectivas de trabalhos futuros destaca-se que os estudos de caracterização do material PEEK impresso que pode ser continuada com a melhora na qualidade dos corpos de prova, além de poder ser estendida para ensaios de flexão e torção e avaliação das impressões em diferentes planos. Como segunda possibilidade de continuação de trabalhos, também podem ser inseridos outros materiais como o ULTEM, que se apresenta igualmente promissor. Além das possibilidades citadas acima, vale lembrar que este estudo viabiliza a construção de inúmeras peças de materiais termoplásticos que poderão ser exploradas em pesquisas aeroespaciais.

**REFERÊNCIAS**

3DERS. *Polymaker launches PolySupport filament, aiming to revolutionize 3D printing support material*. 2016. <https://www.3ders.org/articles/ 20150707-polymaker-launches-polysupport-filament-3d-printing-support-material. html>. [Online; acessado-dezembro-2017].

BRADY, R. The future of flight looks bright for peek. *JECMAGAZINE COMPOSITES*, JECMAGAZINE, v. 106, p. 43–45, 2016.

DUARTE, H. *Descubra como surgiu a impressora 3D*. 2014. <http://www.acervodigital. ufpr.br/bitstream/handle/1884/37115/MONOGRAFIA19-2014-1.pdf?sequence=1& isAllowed=y>. [online; acessado 20-Julho-2017].

FILAMENT2PRINT. *DÚVIDAS HABITUAIS SOBRE A TEMPERATURA E A VELOCIDADE DE IMPRESSÃO DO PLA E ABS*. 2015. <https://filament2print. com/pt/blog/9_Dudas-habituales-sobre-la-temperatura-y-la-ve.html>. [Online; acessado-Julho-2017].

GOODFELLOW. *Información sobre el Material*. 2017. <http://www.goodfellow.com/ S/Polieteretercetona.html>. [Online; acessado 29-Julho-2017].

JONES, D.; LEACH, D.; MOORE, D. Mechanical properties of poly (ether-ether-ketone) for engineering applications. *Polymer*, Elsevier, v. 26, n. 9, p. 1385–1393, 1985.

KRUTH, J.-P. et al. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid prototyping journal*, Emerald group publishing limited, v. 11, n. 1, p. 26–36, 2005.

MAGALHÃES, L. C.; VOLPATO, N.; LUERSEN, M. A. A influência dos parâmetros construtivos no comportamento mecânico de peças fabricadas pela técnica de modelagem por fusão e deposição (fdm). In: *Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande, Paraíba*. [S.l.: s.n.], 2010.

MAKEITFROM. *Polyetheretherketone (PEEK)*. 1999. <https://www.makeitfrom. com/material-properties/Polyetheretherketone-PEEK>. [Online; acessado-Julho-2017].

MARKETING, P. *Impressora 3D*. 2016. <http://publicidademarketing.com/wp-content/ uploads/2017/05/impressora-3d-capa.jpg>. [Online; acessado-dezembro-2017].

MARTENDAL, V. K. F. C. P. *PEEK: O polímero de alta performance*. 2016. <http: //engenheirodemateriais.com.br/2016/05/04/peek-o-polimero-de-alta-performance/>. [Online; acessado-Novembro-2017].

MARTÍNEZ, J. et al. Comparative between fem models for fdm parts and their approach to a real mechanical behaviour. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 63, p. 878–884, 2013.

MARTÍNEZ, J. et al. Modelization and structural analysis of fdm parts. In: AIP. *AIP Conference Proceedings*. [S.l.], 2012. v. 1431, n. 1, p. 842–848.

MARTINS, J. D. *Análise ao comportamento mecânico de estruturas de suporte produzidas por fdm*. Tese (Doutorado), 2016.

NOVAKOVA-MARCINCINOVA, L.; KURIC, I. Basic and advanced materials for fused deposition modeling rapid prototyping technology. *Manuf. and Ind. Eng*.

OBJECT. *Objet lança a Objet1000, sua maior impressora 3D*. 2016. <http: //www.tibahia.com/tecnologia_informacao/conteudo_unico.aspx?c=PROD_DES&fb=B_FULL&hb=B_CENTRA&bl= LAT1&r=PROD_DES&nid=20342>. [Online; acessado-dezembro-2017].

RONCOLATO, M. *Fim de patentes impulsionará mercado da impressão 3D*. 2014. <http://revistagalileu.globo.com /Revista/Common/0,,EMI340645-17770,00FIM+DE+PATENTES+IMPULSIONARA+MERCADO+DA+ IMPRESSAO+D.html>. [Online;acessado 20-Agosto-2017].

STANDARD, A. et al. Standard test method for tensile properties of plastics. *ASTM International. Designation: D*, v. 638, p. 1–13, 2003.

STRATASYS. *Termoplásticos FDM*. 1999. <http://www.stratasys.com/br/materiais/ fdm>. [Online; acessado-Julho-2017].

STUMP, F. V. *Otimização topológica aplicada ao projeto de estruturas tradicionais e estruturas com gradação funcional sujeitas a restrição de tensão.* Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2006.

VAEZI, M.; YANG, S. Extrusion-based additive manufacturing of peek for biomedical applications. *Virtual and Physical Prototyping*, Taylor & Francis, v. 10, n. 3, p. 123–135, 2015.

VOLPATO, N. *Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações*. [S.l.]: Edgard Clucher, 2007.

ZEIN, I. et al. Fused deposition modeling of novel scaffold architectures for tissue engineering applications. *Biomaterials*, Elsevier, v. 23, n. 4, p. 1169–1185, 2002.

**DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE**

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

**ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO**

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(x) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

# SISTEMÁTICA DE UM DISPOSITIVO EMBARCADO PARA SUPRIMENTO CRIOGÊNICO NA USINAGEM CNC EM LAMINADOS COMPÓSITOS

**Kalil Emmanuel Pereira Cruz[1]; Carlos Alberto Mendes Oliveira[2]**
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM)
Av. Sete de Setembro nº1975, Centro, 6900-000, Manaus-AM, Brasil Campus Manaus Centro (CMC)
kalil_emanuel@hotmail.com[1]; carlos.mendes@ifam.edu.br[2]

**RESUMO:** Este estudo na etapa secundária trata da compreensão de um dispositivo embarcado na máquina CNC, onde ao mesmo tempo aborda-se viabilidade do desenho de manufatura, dimensionamentos e material dos componentes, além dos ajustes quando da sistematização de balanços numa pesquisa de objetivos amplos. O apresto traz fins de suprir arrefecimento criogênico via nitrogênio líquido/$LN_2$ pulverizado na região de corte, empregando laminados compósitos fibroso de matriz polimérica, por meio do processo de furação/fresamento CNC, onde insere interstício de perfurados delineados aos espécimes produzidos especificamente de termorrígido Epóxi-Carbono e termoplásticos Poli-Sulfeto de Fenileno-Carbono. Entretanto, no projeto se utiliza de materiais distintos na fabricação das peças e hastes elétricas (opcional) montadas no dispositivo, e dentre os quais intercedem custos bem antes dos testes de usinagem.

**Palavras-Chave:** Manufatura de dispositivo embarcado na máquina, Caracterização de $LN_2$, Estratégia de arrefecimento para usinagem de laminados compósitos

***ABSTRACT:*** *This study deals with the secondary stage in understanding a device embedded in CNC machine, which simultaneously addresses are manufacturing feasibility of design, sizing, and material of the components, plus adjustments when the systematization of swings in a broad research goal. The finish brings purpose of supplying cooling cryogenic nitrogen via liquid/$LN_2$ sprayed in the cutting region, employing laminated composite fibrous polymeric matrix, through the process of drilling/milling CNC where Interstitial perforated inserts designed specifically to specimens produced thermosetting epoxy Carbon and thermoplastic Poly-phenylene Sulfide-Carbon. However, the project makes use of different materials in the manufacture of electrical parts and stems (optional) mounted on the device, and among which costs intercede well before the machining tests.*

***Keywords:*** *Manufacturing device embedded in the machine, Characterization of $LN_2$, Cooling strategy for machining of composite laminates*

## INTRODUÇÃO

Permanece bem claro que máquinas de usinagem são predispostas para armazenar, transportar e fornecer refrigerante/lubrificante de corte só da classe de fluidos e/ou emulsões no cenário da tríade de corte (ex. material, processo e cavaco) muito explorada por Ferraresi (1995), supridos na temperatura ambiente cerca 23 °C com vazão e volume pré-estabelecido nos catálogos do fabricante, avulta-se no país os da marca ROMI®. Contudo, acredita-se ser muito raro que empresas do segmento de produtos de usinagem em geral, oportunizem acessórios prontos para arrefecimento (ex. via nitrogênio líquido/$LN_2$) do local de corte usando só criogênicos. A luz do avanço tecnológico anota-se certa frequência de usinagem nos artefatos aeronáuticos, visto que os achados publicados por Bhattacharyya & Horrigan (1997) distinguem coevo volume de usinagem criogênica com compósitos da classe aeronáutica bem suscetível de transformação por processo de furação, até com torneamento, fresamento ou mesmo retificação, pois denotam numa sistemática inovadora. Efeitos comparativos estudados por Hong (2007), para atenuar complexidade do corte, também no tributo de defeitos de delaminação em laminados compósitos, as peças carecem de arrefecimento criogênico via $LN_2$ em temperatura próxima de -150 °C, além de adaptar e projetar vários acessórios para pulverização de nitrogênio localizada. Em tempos hodiernos, Yakup e Nalbant (2008) compendiaram dados de pesquisa do segmento de usinagem (ex. furação, torneamento e fresamento) executados em vários materiais, assim usinados empregando distintos tipos de aparelhos e ferramenta de corte, e de forma bem genérica apresentou os efeitos das variáveis procedentes da usinagem para vários tipos de ligas metálicas e também dos plásticos reforçados “Kevlar”. Às vezes, o dispositivo de arrefecimento na tríade do corte é voltado para materiais monolíticos (ex. bem comuns na usinagem de aços e ligas metálicas) através de métodos que consomem emulsões ou óleos solúveis (fluído) diluídos em H2O, esses encerram, balanço negativo no quesito eco-ambiente. Apesar disso, o mercado traz ferramenta que reúne num único dispositivo múltiplas funções, no que agrega a própria ferramenta de corte da classe broca BTA, assim ela contempla transporte e a alimentação do fluido refrigerante e também o expulsa o resíduo. Sistemático da qual ainda de certo modo

é embutido de relação implexa, o uso da ferramenta com criogênico, e ainda inclui custo alto. E delineado uma arte da broca ilustrada na fig. 1 e no caso de a usinagem usar ponta de metal duro/WC-Co, essa é apropriada para usinagem usando produto criogênico e, inclusive balizada nas publicações de Bhattacharyya & Horrigan (1997) e Yakup e Nalbant (2008), se observa ganho de qualidade nas propriedades da ferramenta em detrimento de atrito ou, e o balanço térmico. Logo, induz-se que é mais vantajoso direcionar um jato de arrefecimento na direção da ponta, ou seja, na região de corte, e não somente na massa usinada, pois desse modo evita-se alteração das propriedades em temperaturas criogênicas tanto do ferramental quanto da obra.

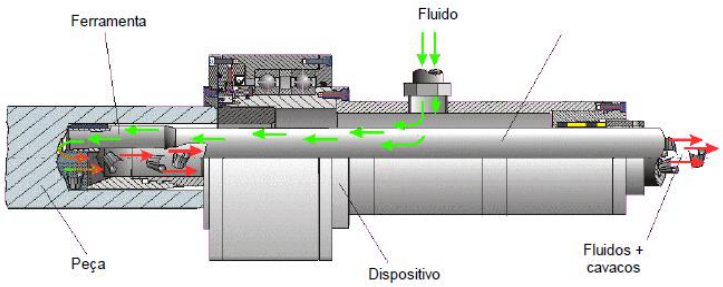



**Figura 1**. Broca BTA apresto de múltiplas funções reunindo a ferramenta de corte transporte e suprimento de óleo solúvel e resíduos do cenário de corte, (fonte: Stoeterau, R. L.)

Houve apenas poucos estudos sobre o efeito das condições de arrefecimento sobre a qualidade de usinagem, portanto, há uma abertura no domínio da pesquisa para estudar efeitos de diferentes métodos de arrefecimento aplicados na usinagem de compósitos. Na carência de dispositivos de marcas comercial volvidas ao suprimento de $LN_2$, de sorte abarca-se adequar um dispositivo ao cenário da usinagem criogênica para arrefecer perfuração em laminados compósitos. Atender os modos expostos antes, se torna imperativo idear um esboço do dispositivo embarcado a ser fixado na guia da máquina a CNC, de tal modo sua arquitetura e atributos é mostrado através da fig. 2 e ainda explica a introdução de nitrogênio líquido/$LN_2$ bem adequado ao processo de usinagem no produto.

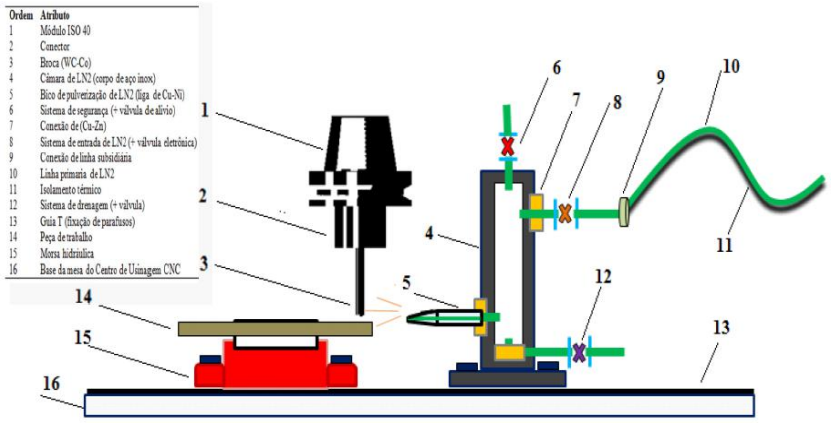



**Figura 2**. Esboço do dispositivo embarcado para suprimento de $LN_2$ na usinagem

## PROJETO DE MANUFATURA DO DISPOSITIVO

A Figura 3 apresenta o projeto do dispositivo de alimentação de $LN_2$ adequado ao arrefecimento no conjunto (ferramenta x peça x resíduo x ambiente) *in loco* do corte por processo de furação com respectivas dimensões acertada para manufatura individual dos componentes. Utilizando-se de uma base para fixação do apresto embarcado na máquina além das tampas, superior e inferior, todas são em aço ABNT 1020L. Já o mecanismo interno adiciona-se um eixo duto de alimentação de $LN_2$ feito de aço inoxidável austeníticos AISI 304, também um anel externo do costado em aço galvanizado ASTM A-36 e ainda um anel intermediário de revestimento, no qual é isolante do gradiente de calor e elétrico adotado um termoplástico Nylon 6.0®. Nas partes externas, a conexão de fixação do bico, e ainda há duas tubulações secundaria, sendo uma de segurança e outra é o dreno, ambas têm corpo em latão. Além de oito hastes elétricas em ligas de cobre eletrolítico, elas são integradas para manter o refrigerante $LN_2$ em temperatura próxima de 60 °C mantém o equilíbrio térmico esperado ao $LN_2$ na condição líquida no período de jato de resfriamento no perímetro da usinagem.

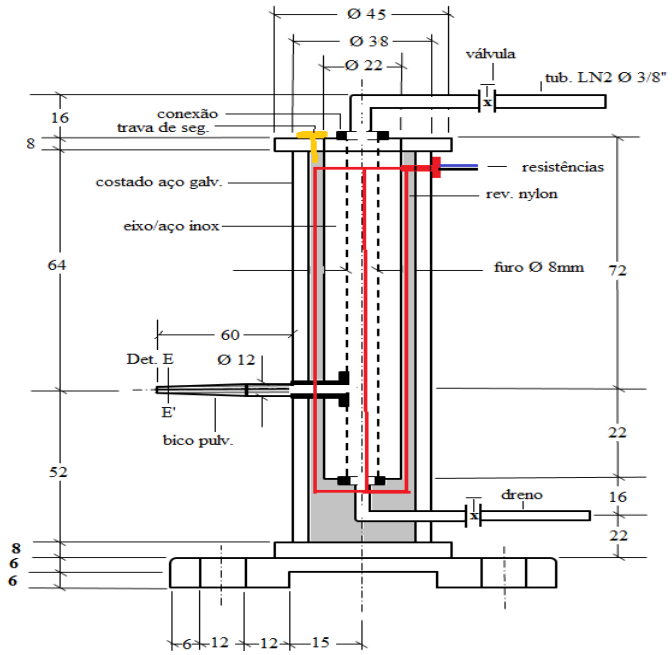



**Figura 3**. Projeto do dispositivo de suprimento de $LN_2$

**Manufatura dos Componentes**

**Tampa superior e inferior**

As tampas projetadas na fig. 4 para encapsulamento do conjunto no dispositivo a baixa pressão, contempla-se abertura de rasgo guia com 5mm de profundidade na peça superior e 4mm na inferior, usinadas em aço de baixo teor de carbono ABNT 1020L propício a sofrer intervenção de conformação por processo de torneamento e/ou soldagem.

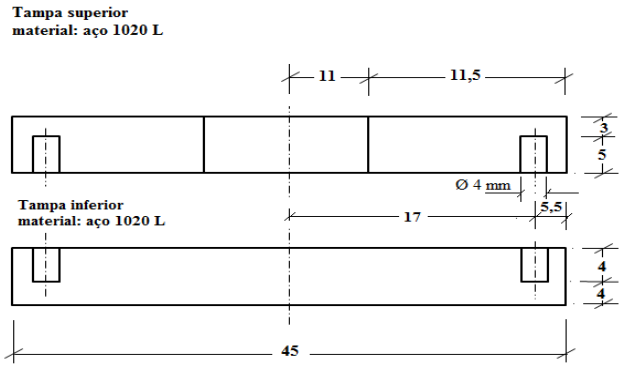



**Figura 4**. Projeto de manufatura das tampas; (a) superior (b) inferior

**Duto de alimentação**

Por se tratar de um componente confinado internamente no dispositivo no qual abrange contato direto com $LN_2$ em temperatura muito baixa a cerca de 150 °C no seu núcleo e ao mesmo tempo há o contato com oito hastes de resistências elétricas para manter ΔT no intervalo de 60 °C no corpo externo (ex. alterável na fase de testes). Esse duto requer determinadas qualidades para trabalhar num ambiente criogênico (-ΔT) e térmico ambiente (+ΔT), nesses modos optou-se pelo aço inoxidável que atende a variação de ΔT do método no projeto que ilustra o desenho da Figura 5. Ancorado no catálogo LOSINOX (2018) expõe que liga de aço (Carbono + Ferro) + Cromo, com no mínimo 10,5 % de Cromo, em condições favoráveis ocorre formação da camada passiva, que concede ao inox a resistência à corrosão. Prontamente os aços inox austeníticos, são formados principalmente de ligas de Ferro + Cromo + Níquel, que se caracterizam com diversas qualidades e são adequados para trabalho a altas e baixas temperaturas (aplicações criogênicas).

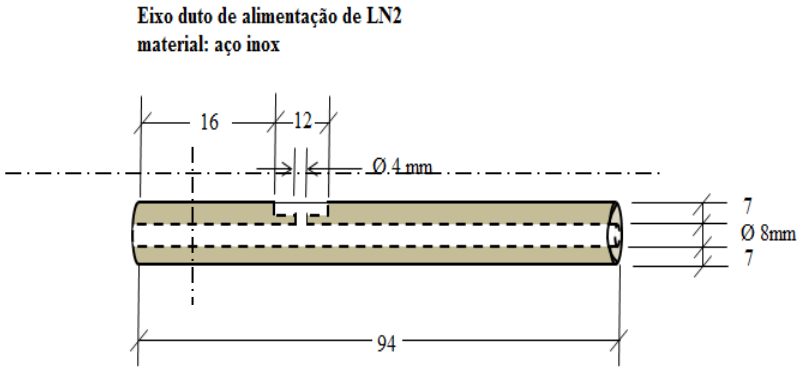



**Figura 5**. Projeto de manufatura do duto de alimentação de $LN_2$

**Anel de revestimento**

O anel de isolamento e vedação mostrado na fig. 6 o material atende o artifício de aplicação com as qualidades de isolante elétrico e térmico conforme dados extraídos do fabricante INCOMPLAST® (2018) sobre o Nylon 6.0 que é um termoplástico, obtido a partir da poliamida 6, cujas excelentes propriedades mecânicas, elétricas e térmicas, permitem as mais variadas aplicações, nos mais diversos ramos da indústria mecânica, elétrica e químicas. Sua substituição aos metais como materiais estruturais e/ou de construção são frequentes em situações distintas, pois se leva em consideração a leveza, baixo coeficiente de atrito, isolação elétrica, boas resistências à fadiga e a agentes químicos, no que se torna bem vantajoso.

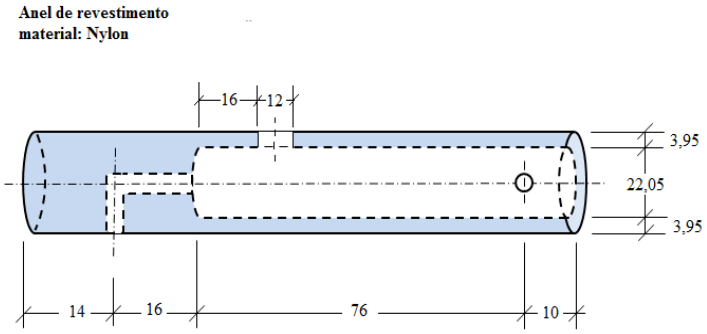



**Figura 6**. Projeto de manufatura do anel de revestimento

**Costado anel externo**

No costado mostrado na fig. 7 insere duas extremidades roscadas com 18 filetes p/inch (opcional com soldagem) para encaixe, é a peça que fica aparente externamente, compondo no conjunto do dispositivo a relação com o ambiente exterior, por questões de higiene se impede a impregnação de produtos oleosos num ambiente de corrosão da usinagem, nesse modo opta-se pelo tratamento de galvanoplastia na parte externa a baixo custo se comparados com outros acabamentos na superfície visível de contato manual do costado, selecionado para fabricação em aço ABNT 1020L.

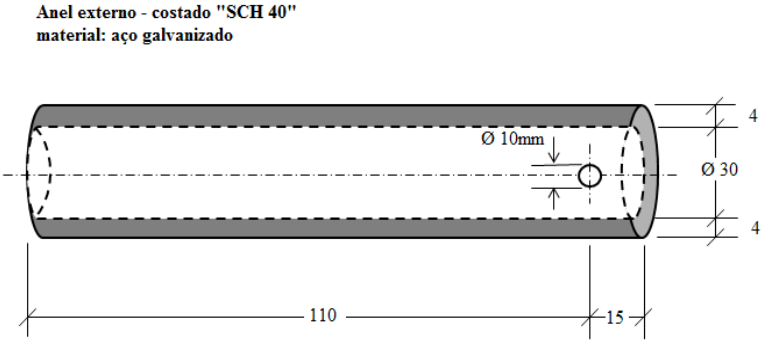



**Figura 7**. Projeto de manufatura do costado anel externo

**Base de fixação**

A base de fixação apresentada na fig. 8 é fabricada de material idêntico ao das tampas e contempla abertura de furos para alojamento de parafusos que serão elementos chave na fixação do dispositivo através da conexão em duas porcas movediças em forma do "rasgo T", ou seja, de geometria igual ao modelo de seção transversal das guias da máquina CNC.

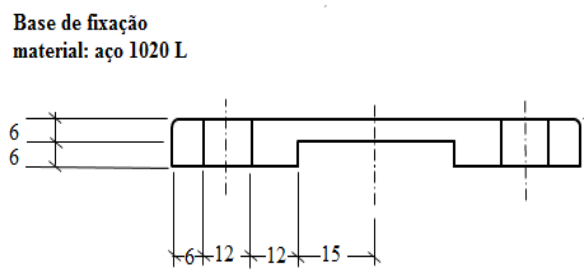



**Figura 8**. Projeto de manufatura da base de fixação

## DETALHAMENTO DA MONTAGEM DA ARTE

**Montagem do Bico de Pulverização de $LN_2$**

A montagem do bico de pulverização de $LN_2$ é detalhada na fig. 9 que inclui uma adaptação bem prática quanto aos orifícios, segurança e conexão, similar nos mesmos modos de quando se utiliza um bico (n° 4) no mecanismo de alimentação do padrão de chama produzido nos distintos tipos de bicos e canetas maçarico (denominação genérica) quando se combinam os gases oxigênio e acetileno oriundos do conjunto montado para soldagem.

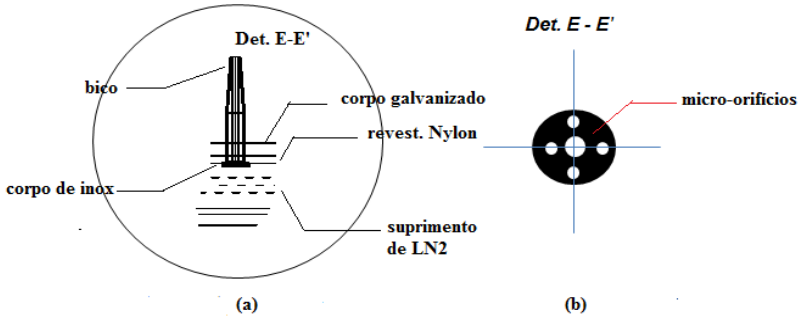



**Figura 9**. Detalhe da montagem do bico; (a) fixação no corpo do dispositivo,
(b) Micro orifícios para pulverização de $LN_2$

**Fixação das Hastes Elétricas**

As oito hastes elétricas (hn) distribuída no layout da fig. 10 têm fins de equilíbrio difuso com a temperatura externa do duto de alimentação no intervalo médio de 60 °C com ($\Delta T$) variável para manter $LN_2$ sempre líquido numa vazão de alimentação constante, mas, estão indicadas na DDP de 127 V interligadas em paralelo nas terminações, tendo como valor do diâmetro 5 mm e o mesmo comprimento da peça de Nylon isolamento/revestimento.

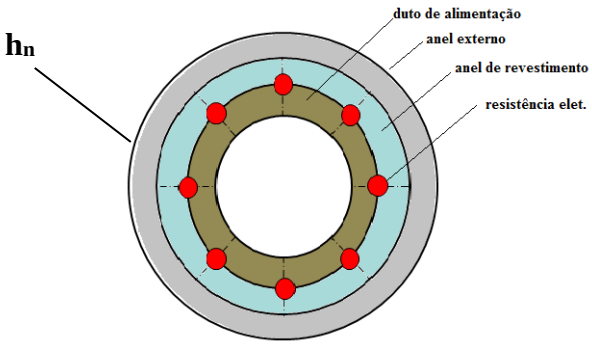



**Figura 10**. Detalhe da distribuição das hastes elétricas.

**Arquitetura de Montagem do Conjunto**

A Figura 11 apresenta o detalhamento da sistemática para sequência de montagem dos componentes do dispositivo de alimentação do $LN_2$.

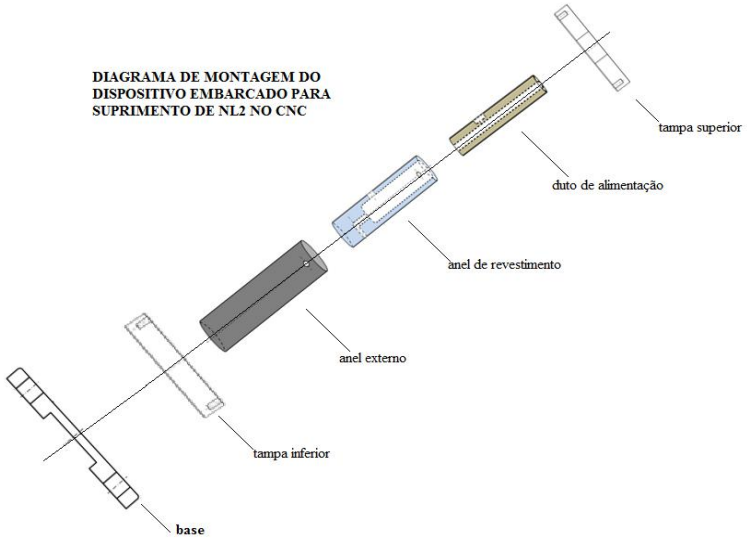



**Figura 11**. Detalhamento da montagem dos componentes do dispositivo (CAD)

## METODOLOGIA EXPERIMENTAL

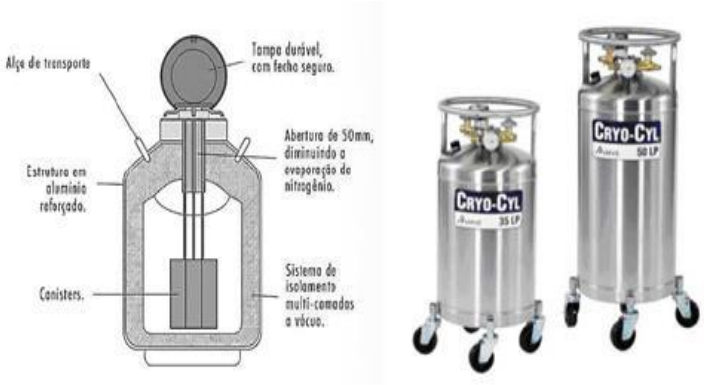
**Usinagem dos Componentes**

Os componentes "duto, anel de revestimento e costado" são usinados utilizando-se dos materiais selecionados nos itens anteriores, tendo como maquinário um torno mecânico convencional, furadeira de coluna além de ferramental de corte de ambos os processos e também os acessórios de ajustes de bancada adequados. E ainda nas verificações das dimensões os instrumentos metrológicos de média precisão "régua, paquímetro e micrometro". Contudo na abertura dos entalhes de alojamento das hastes (resistências elétricas) é ideia seleta uma peça cilíndrica e prefere-se de madeira rígida com parede bem robusta atende a relação *Schedule* (Øext. versus Øint.) tendo abertura de um furo no mesmo diâmetro externo do componente de isolamento/revestimento de Nylon. E na operação seguinte causa o encaixe das duas peças numa prensa, preparando-a para furação dos entalhes somente na borda do termoplástico (metade do furo formado por semicírculo).

**Características do Produto Criogênico**

O $N_2$ na forma líquida é elemento natural da atmosfera sendo não poluente e inodoro também é incolor bem parecido com a água, traz complexa vazão (i.e., inerte em explosivos) e também não é da classe de inflamável, o nitrogênio gasoso é um gás de molécula diatômica (N2) ele não é, em princípio, nocivo. Mas, a concentração acidental em ambientes confinados reduz o teor de oxigênio, podendo até provocar asfixia e morte. E se respirado em pressões acima de 3 bar (i.e., não é ocaso nos testes de usinagem) tem efeito anestésico, podendo provocar a narcose de nitrogênio, há também a dissolução no sangue e a descompressão rápida no que pode ser fatal devido à formação de bolhas, no entanto o nitrogênio líquido por ser substância criogênica  o contato com a pele pode causar graves queimaduras, e além disso, o $LN_2$ pode ser armazenado de diversas maneiras. Por exemplo, em botijão que é um recipiente térmico com isolamento a vácuo, destinado à conservação e outros tantos fins a uma temperatura de -196ºC distante da temperatura crítica Tc análoga a -146,9 °C. Contudo a classe de pressão para botijões despressurizados externamente considera-se de "1 atm da temperatura ambiente" e nos containers pressurizados é na faixa regulável de (0,83 a 1,5 bar) suprimento. No segmento de mercado há diversos tipos de armazenagem (ex. medicinal, laboratoriais, indústrias e inclusive no enchimento de pneus das grandes aeronaves) e demanda com e sem pressão para encapsular o nitrogênio, sendo destaques os recipientes no modelo de botijão mostrada na fig. (12a) e também está disponível uma série pressurizada representada por marca patente que é mostrada na fig. (12b) os da linha *Cryo Cyl*®. Logo, uma prática na comercialização traz conversão no ato da compra, podendo converter de litros (volume) para quilos (massa) ou vice-versa, para isto basta saber que 1 litro equivale a 0,808 kg de nitrogênio, ou seja, 1 kg convertido é igual a 1,238 litros de nitrogênio.  No sistema de confinamento há de se observar as perdas mesmo sem uso é por evaporação, pois o nitrogênio líquido evapora constantemente e traz desempenho de perdas a cerca de 4% ao dia (NER $LN_2$), por isso alguns preceitos com manuseio do nitrogênio são levados em conta na temperatura de ebulição de "1 atm" é 4,614

kg/m3. E quanto à temperatura no apresto o produto confinado, basta haver aumento da amplitude de aquecimento, o nitrogênio que antes estava no estado líquido passará ao estado gasoso, aumentando seu volume e a pressão dentro do recipiente, na linha de raciocínio desconsidera-se P do projeto do vaso no padrão da Norma ASME, se este aumento da pressão acontece de modo progressivo poderá ocasionar uma explosão do recipiente, isso só em casos extremos, quando o gás nitrogênio permanece muito além da pressão crítica $P_{CLN2}$ próximo de 3.399,9 kPa.




(a) (b)

**Figura 12**. Recipientes de armazenagem e uso de $LN_2$; (a) estrutura interna na versão sem pressão para os botijões, (b) versão para containers pressurizados de marca comercial

**Método para Suprimento de $LN_2$ com Recipiente Despressurizado**

Para suprimento de $LN_2$ na região de corte dos espécimes de compósitos, de certa forma na sistêmica da fig. 13 crê-se que um dispositivo simples pode ser acoplado ao bocal da vasilha/recipiente de $N_2$ líquido, contando ser uma tampa com duas furações, uma permitindo a entrada de pressão por meio da injeção de gás por compressor ligado a um filtro de desumificação da linha e posteriormente a uma válvula de controle ou vice-versa, apenas lembrando que a umidade é um veneno para o $LN_2$, posto que a água congele facilmente e impeça a passagem do $LN_2$, e outro furo em que se acoplaria uma vareta de cobre para a subida do $LN_2$ ligada a um bico metálico que seria direcionado ao elemento em usinagem.

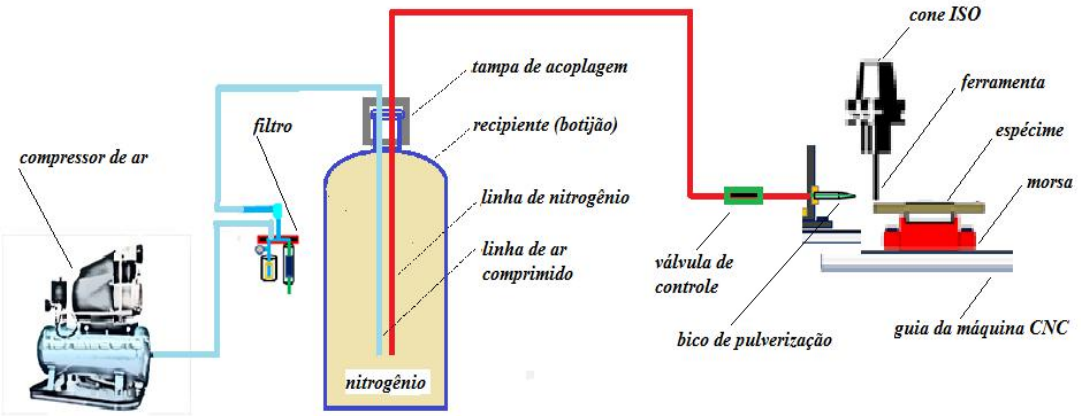



**Figura 13**. Nitrogênio confinado de modo despressurizado num recipiente, para estratégia de usinagem criogênica bem frequente na USP-EESC

**Método para Suprimento de $LN_2$ com Recipiente Pressurizado**

A Figura 14 mostra o método de suprimento de nitrogênio no local do corte, sendo bem similar ao que foi interpretado anteriormente para o modo de usinagem criogênica empregada e dando certo na USP-EESC. E vale a pena ressalvar que nesse outro método opcional, há apenas poucas diferenças na concepção do esquema de funcionamento quanto à aparelhagem, pois se insere um dispositivo embarcado (ver fig. 2), além de um vaso de pressão (*Dewar*) que confina o nitrogênio líquido e não necessita de pressão extra para retirar o produto que está armazenado no interior do container, e ainda traz a pressão de alivio análoga a de retirada na faixa de 0,83 a 1,5 bares também no mesmo apresto (vaso de $LN_2$) agrega um sistema de rodízios giratórios no que em muito facilita o movimento e deslocamento do equipamento no *layout* da usinagem.

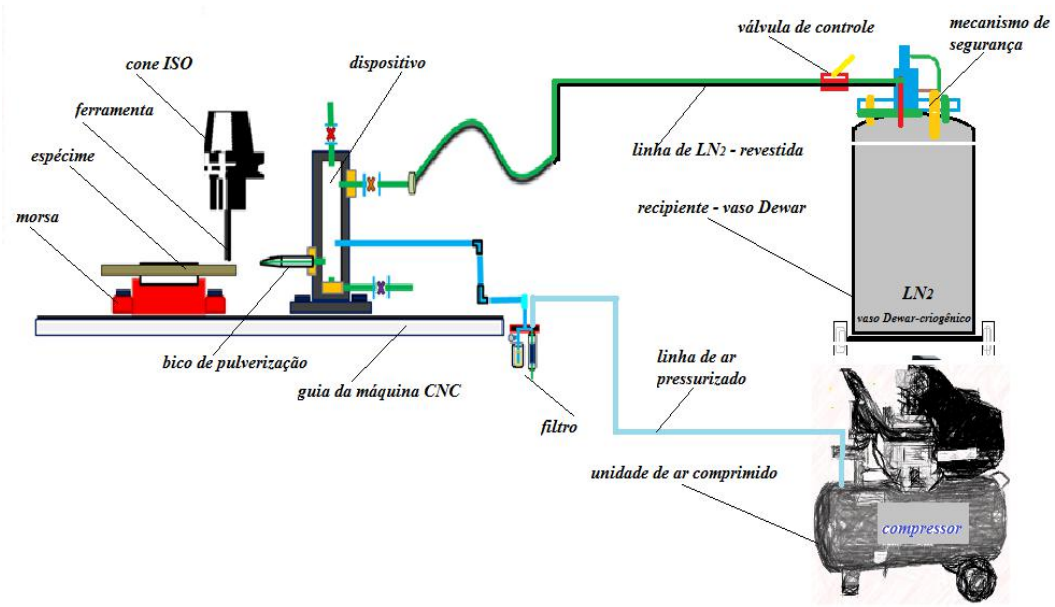



**Figura 14**. Sistemática para usinagem criogênica com $LN_2$ empregando um dispositivo que mistura na câmara o refrigerante somado ao ar comprimido a ser injetado no local do corte

## RESULTADOS

### Mecanismo Embarcado para o Suprimento de $LN_2$

Apesar de não sobrepor grande significância ao estudo, mas em se tratando de usinagem não trivial, pela arte, aí sim se qualifica inovadora, e é viável ponderar e se cercar de todos os recursos quando se aborda a aplicar produto criogênico, mesmo os que adicionem custos e complexidade a arte dos sistemas, pois a finalidade é ao contrário dos modos que são praticados para usinagem criogênica na *University of Bath's* e na arte final consiste adequar o dispositivo com capacidade de 0,67 dm3 da câmara de mistura do suprimento de $LN_2$ na faixa de 1,5 bares = 21,75 *psi* + ar comprimido filtrado com pressão controlada próxima de 40 *psi* no cenário dos testes de usinagem criogênica com vazão controlada por válvula em função do diâmetro do bico de pulverização e da tubulação, assim é mostrado na fig. 15 no mesmo raciocínio das estratégias da arte exemplificado com atributos ao longo do estudo na fig. (15a), no que ocasiona inserção de outras sequencias na concepção, desde a ideação fig. (15b) ao pré-finalizada na fig. (15e).

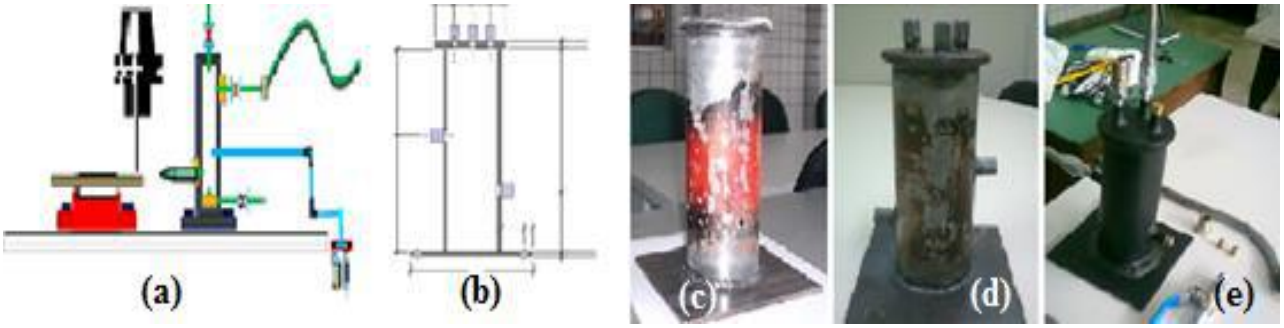



**Figura 15.** Concepção do dispositivo de suprimento; (a) ideação, (b) esboço, (c) soldagem do conjunto, (d) montagem de conectores, (e) arte final com conectos e cobertura fosca

### Arte Finalizada

No andamento se de fato é empregada, ela (arte) certamente é acondicionada em uma caixa de madeira (molde) e na sequência é injetado espuma de poliuretano ou mesmo *isopor* (EPS) nas partes cavas, assim compõe-se um isolamento anódino esperado ao conjunto e, das partes metálicas do dispositivo apresentado na fig. 16, isso serve para atenuar a transmissão e troca de calor para o meio externo e se colige equilíbrio termodinâmico no sistema por falta de uma coluna de vácuo ou mesmo uma superfície interna tratada para reter gradiente $\Delta T$.

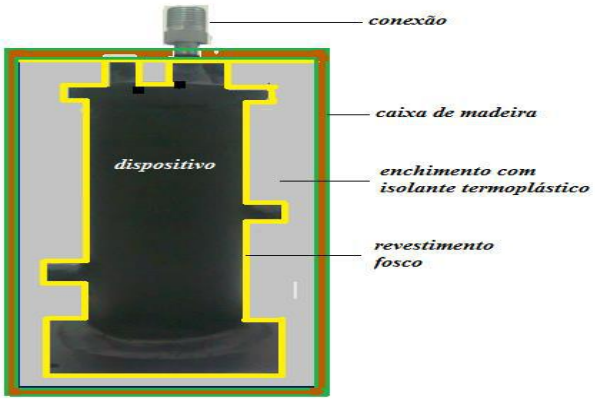



**Figura 16**. Dispositivo acabado pré-disposto para interface com vaso de $LN_2$ ou compressor

**Custos dos Componentes e Atividades**

A Tabela 1 apresenta as atividades e totalização dos custos rateados ao dispositivo, bem como as laboriosidades vinculadas às tarefas num ciclo de tf (tempo de fabricação) da arte.

**Tabela 1**. Custos da manufatura do dispositivo de alimentação de $LN_2$

| **Ordem** | **Componentes** | Material | **Atributo/processo** | **$t_f$** (h) | **Custo** (R$) |
|---|---|---|---|---|---|
| Peça 1 | base | ABNT 1020 L | preparação/medição/torneamento/furação/ajustes | 5 | 94,00 |
| Peça 2 | tampa inferior | ABNT 1020 L | preparação/medição/torneamento/furação/ajustes | 3 | 56,40 |
| Peça 3 | anel externo/costado | ABNT 1020 L galvanizado | preparação/medição/torneamento/furação/ajustes | 6 | 172,80 |
| Peça 4 | anel de revestimento | Nylon | preparação/medição/torneamento/furação/ajustes | 4 | 155,20 |
| Peça 5 | duto de alimentação | Aço inox AISI-304 | preparação/medição/torneamento/furação/ajustes | 4,5 | 124,60 |
| Peça 6 | tampa superior | ABNT 1020 L | preparação/medição/torneamento/furação/ajustes | 3 | 56,40 |
| Peça 7 | conectores | Latão (Cu-Zn) | corpo roscado | - | 84 |
| Peça 8 | trava de segurança | PVC | preparação/medição/torneamento/ajustes | 3 | 56,4 |
| - | válvulas | Terceiros | preparação/medição ajustes | 2 | 240,00 |
| - | tubulação secundária | Terceiros | Montagem/ajustes | 2 | 90,00 |
| - | ajustagem do conjunto | - | preparação/medição ajustes | 3 | 56,40 |
| - | Testes | - | bancada hidrostática | 2 | 120,00 |
| Peça 9 | hastes elétricas | Cu eletrolítico | Conjunto de hastes | 4 | 140,00 |
| - | Ferramental | Terceiros | preparação/medição ajustes | 1 | 78,00 |
| Subtotal (R$) | | | | | 1.524,20 |
| Utilidades (água, luz) | | | | | 0,5/% |
| Administração | | | | | 2% |
| Recursos Humanos | | | | | 4,5% |
| Despesas indiretas (transporte) | | | | | 1% |
| Tempo de produção (h) | | | | | 42,5 |
| *__Custo Total__ (R$) | | | | | 1.646,13 |

*Custos alocados em abril de 2018.

## CONCLUSÃO

A determinação *sine qua non* é avaliada para dar fluidez do $LN_2$ e a metódica do dispositivo consiste em equacionar um equilíbrio para fronteira térmica ($\Delta T$), onde o ideal é ter baixa transmissão de calor difuso entre os componentes do dispositivo, isso em detrimento do efeito termodinâmico/expansivo do $LN_2$ (ser grave), assim é chave manter-se sempre no estado líquido no momento do suprimento no local de corte, pois o gás suprido fluirá sem problema com a mesma pressão/P e vazão/v no bico de pulverização, e que essa "P" seja no mínimo igual à pressão de saída do vaso *Dewar* num ciclo de tempo ($\Delta t$), isso acontecendo atende o (tempo/t) de usinagem contínua nos espécimes de trabalho.


## AGRADECIMENTOS

Escola SENAI Waldemiro Lustosa de Manaus-AM, EMBRAER-SP, laboratórios de metrologia/usinagem CMC-IFAM, laboratório de moagem de pós-nano-metálicos CMDI-IFAM, a USP-EESC e a todos que apoiam esse projeto.


## REFERÊNCIAS


D. Bhattacharyya, D.P.W. Horrigan, "A study of hole drilling in Kevlar composites".

Ferraresi, Dino, "Fundamentos da Usinagem dos Metais", São Paulo, Edgard Blücher, São Paulo 1995, p. 151.

Incoplast, Catálogo em:<http://www.incomplast.com.br/htm/materiais.htm.>, acesso em 20 abr 2018.

Losinox, Aço Inox, Catálogo em:< http://www.losinox.com.br/pages/o_aco_inox.>, acesso em 22 abr 2018.

S.Y. Hong, "Economical and ecological cryogenic machining".

Yakup Yildiz, Muammer Nalbant, "A review of cryogenic cooling in machining processes", International Journal of Machine Tools & Manufacture 48 (2008) 947–964.


## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção 'área de conhecimento do trabalho'.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(X) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

**XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 27 à 31 de agosto de 2018 – Brasília, DF**

# TESTE BIOMECÂNICO: ENSAIO DE TRAÇÃO EM TENDÃO CALCÂNEO DE RATOS

**Karla Cristina Rodrigues Pereira, Carla Tatiana Mota Anflor, Rita de Cássia Marqueti, Fabrício Reichert Barin**
Universidade de Brasília, UnB
Área Especial de Indústria Projeção A, Setor Leste, Gama - DF, 72.444-240
karla.crpereira@gmail.com, anflorgoulart@gmail.com, marqueti@gmail.com, fabricio.barin@gmail.com

**RESUMO:** O tendão de Aquiles é um componente anatômico essencial para o movimento, uma vez que liga os músculos da panturrilha ao osso do calcanhar, região responsável pela geração de força para dar impulso de passada. Testes biomecânicos são utilizados para entender o funcionamento dos tendões e como a força de tração afeta esta região e seu movimento. O objetivo deste trabalho foi realizar o ensaio de tração em tendão calcâneo de ratos. Quatro amostras de tendão calcâneo foram utilizadas no ensaio. Um modelo de mordente para a fixação das amostras na máquina de ensaio de tração foi manufaturado, buscando evitar problemas como o deslizamento da amostra ou ruptura no local de fixação. As propriedades biomecânicas foram medidas através dos gráficos de tensão-deformação elaborados a partir dos valores de força-deslocamento emitidos pela máquina de ensaio multiaxial utilizada no teste. Os valores de carga e tensão máxima suportada encontrados através dos gráficos foram semelhantes comparando as amostras.

**Palavras-Chave:** Ensaio de tração, mordentes, tendão de Aquiles.

**ABSTRACT:** The Aquiles tendon is a essential anatomical component for movement, since it connects the muscles of the calf to the heel bone, region responsible for force generation to give momentum. Biomechanical tests are used to understand the tendon functioning and how the tensile force affects that region and its movement. The purpose of this work was to realize the traction test in rat calcaneal tendon. Four samples of calcaneal tendon were used in the test. A model of clamps for fixing the samples to the traction test machine was manufactured, seeking to avoid problems like the sliding of the samples or break on site fixation. The biomechanical properties were measured through the stress-strain graphs elaborated from the values of force and displacement issued by the multiaxial test machine used in the test. The values of load and maximum supported stress found through the graphs were similar comparing the samples.

***Keywords:*** *Traction test, clamps, Aquiles tendon.*

## INTRODUÇÃO

Os tendões são componentes anatômicos que ligam os músculos estriados aos ossos e são essenciais aos movimentos, tendo como finalidade transmitir força ao esqueleto. Segundo Young Min *et al.* (2013) a biomecânica do tendão é determinada por fatores estruturais, como o conteúdo das fibras de colágeno, a orientação e a densidade de produção das fibras. Neste trabalho os autores apresentam um estudo como diferentes posições da imobilização do tendão de Aquiles lesionado afeta a reabilitação, onde afirmam que o tendão de Aquiles é uma das áreas mais afetadas por atividades esportivas. Durante as práticas de atividades esportivas excessivas forças provenientes de atividades repetitivas e extenuantes são impostas ao tendão, podendo causar o enfraquecimento biomecânico e levá-lo à ruptura.

As propriedades mecânicas dos tendões vêm sendo estudadas utilizando metodologias que envolvem o alongamento das amostras até a ruptura. Estudos indicam que as propriedades mecânicas do tendão de Aquiles variam a partir das condições físicas do indivíduo, sendo o esporte um grande influenciador. De acordo com Heinemeier & Kjar (2011) e Young *et al.* (2013) as características viscoelásticas de tecidos biológicos podem ser avaliadas através de ensaios biomecânicos, que tem a função de identificar a força que o tecido pode suportar em função do alongamento mediante um gráfico de carga-posição, por meio do qual se pode estimar um gráfico de tensão-deformação.

A partir do gráfico de tensão-deformação, Maganaris *et al.* (2008) identifica quatro regiões diferentes as quais são usadas para analisar a biomecânica no tendão de Aquiles Fig. (1). A região I, referida como “toe”, é caracterizada pelo não alongamento do tecido, ocorrendo o alinhamento das fibras. Na região II, ou região “linear”, o carregamento provoca alongamento nas fibras já alinhadas, iniciando o rompimento de alguns filamentos ao final desta região. O alongamento continua na região III, onde o rompimento de grande quantidade de fibras é inevitável, levando à região IV onde ocorre o a falha completa.

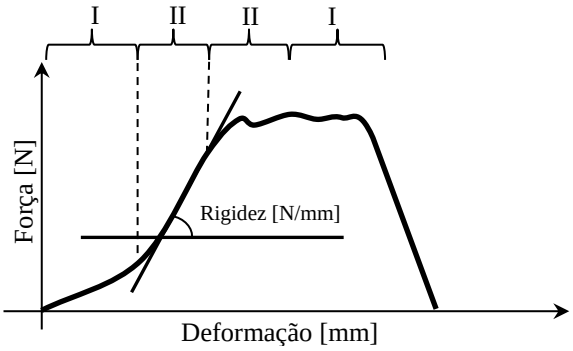



**Figura 1.** Gráfico típico de tensão-deformação para tendões, enfatizando as quatro regiões características

Apesar da importância do entendimento sobre o presente tema, a literatura ainda é escassa quando se refere sobre análise da função tendínea tanto em ratos quanto em humanos. Matsumoto *et al.* (2003) aponta como uma das razões da falta de dados a dificuldade da realização dos testes nos tendões, devido ao escorregamento das amostras e rasgos no local de fixação durante o teste.

Neste sentido o presente estudo tem como objetivo desenvolver um projeto de mordentes adequados para a realização dos testes de tração em amostras do tendão de calcâneo de ratos, permitindo a obtenção precisa dos gráficos de tensão-deformação para as amostras a serem avaliadas.

## METODOLOGIA

### Desenvolvimento das Garras

Devido à grande dificuldade de fixação das amostras biológicas aos mordentes convencionais de uma máquina de ensaio de tração, foi necessário um desenvolvimento de um projeto de garras especiais para este tipo de procedimento em plataforma CAD. É importante salientar que ao contrário de matérias convencionais da engenharia, amostras em tendão calcâneo não seguem uma distribuição de áreas de seção constante ao longo do corpos de prova e também não possuem uma norma específica sobre como preparar tal corpo de prova devido à dificuldade da anatomia deste segmento. Young Min *et. al.* (2013) propôs um modelo de garra para este tipo de ensaio, no entanto, dependia de ajustes via parafusos e chaves para fixar o tendão, o que pode ser uma tarefa exaustiva no caso de ensaio de uma grande quantidade de amostras. Neste sentido o presente projeto das garras foi concebido considerando apenas um aparafuso o qual controla o ajuste em pinça para auxiliar no movimento de fixação das amostras. Este parafuso horizontal conecta as duas partes da garra que seguram o corpo de prova, onde o giro odo parafuso permite abrir e fechar as pinças facilmente e rapidamente (Fig. 1a). O modelo foi manufaturado em aço inoxidável 304, conforme ilustrado na Fig. (1b) para evitar a contaminação das amostras durante o ensaio. Os mordentes foram projetados de maneira a serem conectados a uma célula de carga de 200 N e acoplados aos mordentes padrões da máquina de ensaio universal Instron-3801, conforme ilustrado na Fig. (1c), disponível no laboratório de materiais da Universidade de Brasília, Campus Gama.

a) b) c)

**Figura 2.** Desenvolvimento das mordentes biomecânicos.

**Obtenção dos Gráficos de Tensão-Deformação**

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados 96 ratos Wistar, com peso médio de 250g (3 meses de idade). Os animais foram mantidos em biotério central na Universidade Católica de Brasília, UCB, e permaneceram agrupados em gaiolas plásticas, com livre acesso à água e ração peletizada, com controle de luminosidade (ciclo claro/escuro de 12h) e de temperatura. Os experimentos foram conduzidos seguindo as recomendações éticas do Guide for Care and Use of Laboratory Animal. Todos os procedimentos experimentais foram realizados com os animais anestesiados (injeção intraperitonial de solução de xylazina 12 mg/Kg/peso corporal e ketamina 95 mg/Kg/peso corporal). Todo o tecido com exceção do tendão calcâneo foi removido, restando o músculo superior e a pata como forma de apoio para a fixação nas garras como mostrado na Fig. (2).

**Figura 3.** Garras com amostra pronta para ensaio

As amostras foram fixadas nos mordentes com o auxílio de uma pinça cirúrgica e o teste foi realizado a uma velocidade de 1,5 mm/min. O comprimento inicial e a espessura dos tendões foram medidos com um paquímetro digital sendo realizadas dez medidas, considerando-se a média entre elas. A máquina de ensaio de tração fornece os valores de incremento de força por alongamento de cada amostra ensaiada, adquirindo-se uma curva de força-deslocamento. Por meio das propriedades dimensionais da amostra é possível obter a curva tensão-deformação e calcular o limite de resistência a tensão e o módulo de elasticidade para cada tendão, sabendo que a tensão gerada na amostra é igual a força imposta sobre ela dividida pela área da seção transversal da amostra, e a deformação é o deslocamento no ensaio, dividido pelo comprimento inicial do tecido. O módulo de elasticidade é o coeficiente angular da reta obtida fazendo uma regressão linear da zona elástica da curva tensão-deformação.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As amostras foram ensaiadas na máquina de ensaio universal, obtendo-se os gráficos de carga-posição. Para obter os gráficos de tensão-deformação utilizou-se o comprimento inicial e a espessura média, conforme valores apresentados na Tab. 1. Os valores da área da seção transversal dos corpos de prova utilizados para encontrar a tensão foram estimados considerando a área de uma seção circular.

**Tabela 1.** Propriedades estruturais das amostras

| Amostras | Comprimento Inicial (mm) | Diâmetro Médio (mm) |
|---|---|---|
| 01 | 2,00 | 2,03 |
| 02 | 2,00 | 2,01 |
| 03 | 1,80 | 1,93 |
| 04 | 1,20 | 1,94 |

A Fig. (4) apresenta os gráficos de força-deslocamento obtidos no ensaio de tração para as quatro amostras.

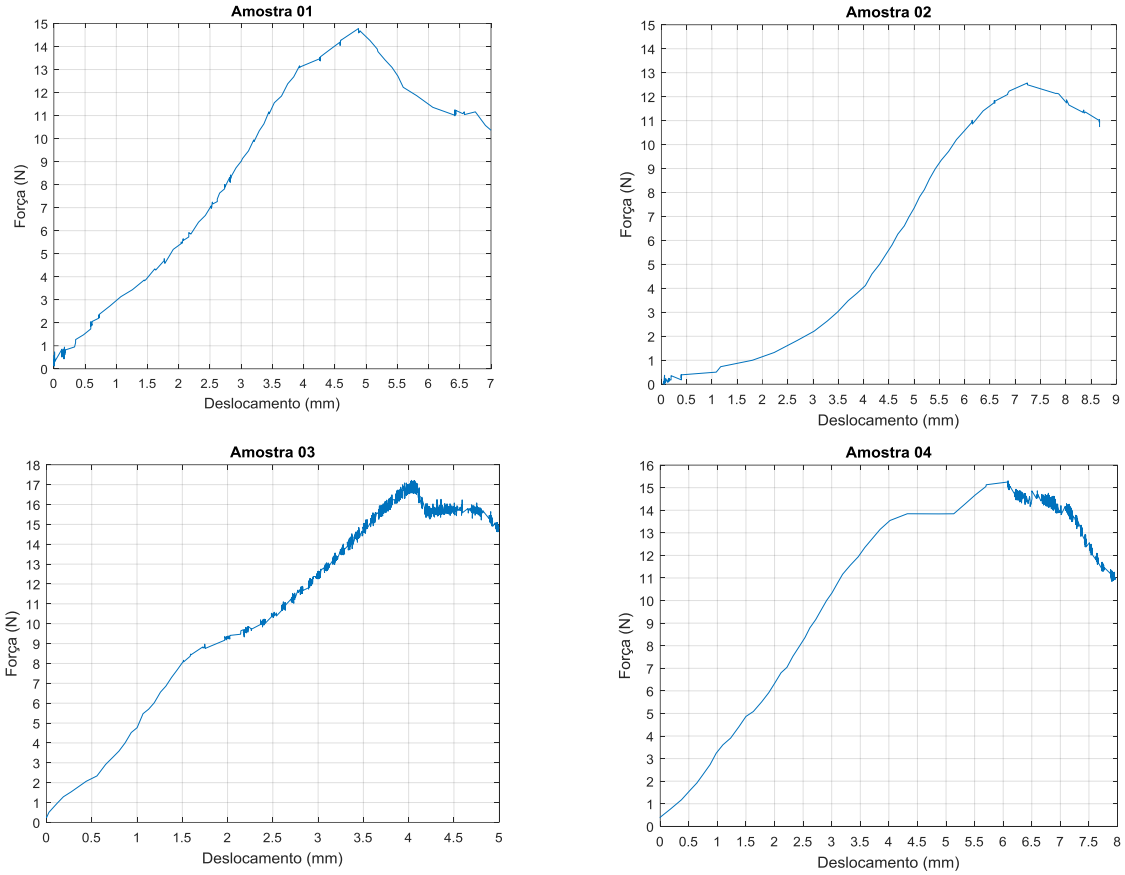
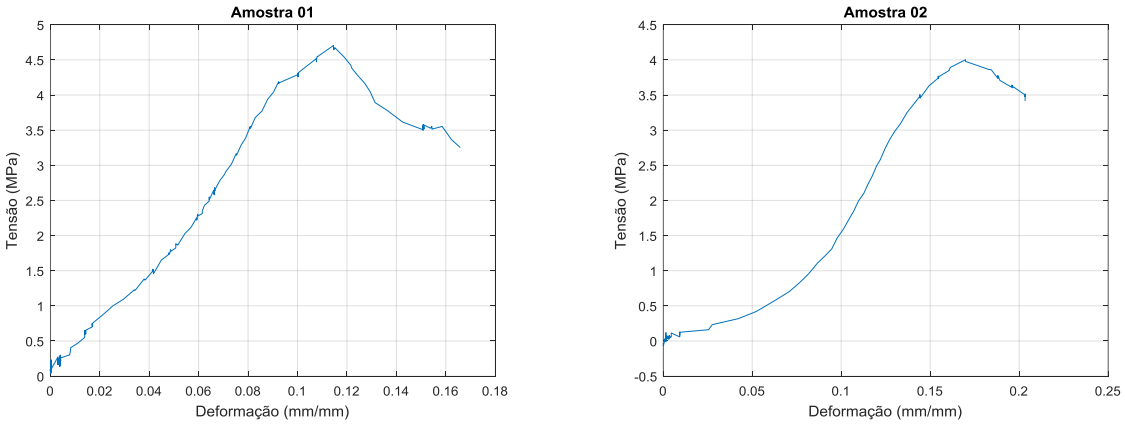



**Figura 4.** Gráficos de Força-Deslocamento

Em seu estudo, Young Min *et. al.* (2013) encontrou uma força de 29,33 +- 3,38 N para o grupo de controle, enquanto o valor de carga máxima encontrada neste estudo foi de 17,2191 N. Por outro lado, é possível perceber a presença das quatro regiões características do tendão de Aquiles discutidas por Maganaris *et al.* (2008) nos gráficos de força-deslocamento. Os gráficos de tensão-deformação estão representados na Fig. (5).



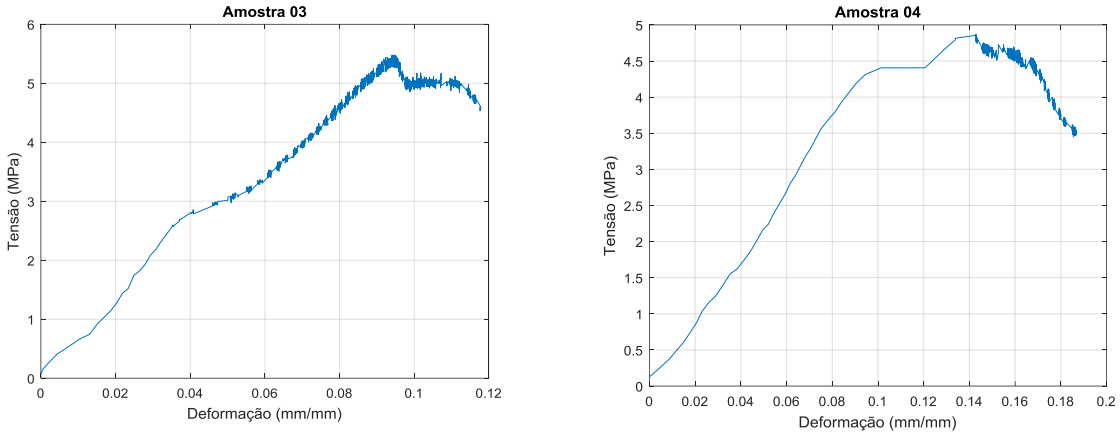



**Figura 5.** Gráficos de Tensão-Deformação

A curva de tensão-deformação é semelhante à curva de Carga-Posição, mas reflete as propriedades intrínsecas do material ao invés das propriedades estruturais do tendão (Magnaris *et al.* 2008). A partir dos gráficos é possível observar a presença de duas diferentes fases: a fase elástica e a fase plástica. A fase elástica dos tecidos corresponde a parte linear do gráfico, onde é possível observar uma linha reta, correspondente a fase em que o corpo retorna ao seu estado inicial após cessar o efeito da carga. A fase plástica é observada pela curva que se inicia logo após a reta, correspondendo ao rompimento parcial das fibras de colágeno até o rompimento total do tecido.

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos para a carga e a tensão máximas que as amostras conseguiram suportar, a deformação correspondente a estes valores e o módulo de elasticidade.

**Tabela 2.** Propriedades Mecânicas das amostras obtidas através do ensaio biomecânico

| Amostra | Força Máxima (N) | Tensão Máxima (MPa) | Deformação Máxima (mm/mm) | Módulo de Elasticidade (MPa) |
|---|---|---|---|---|
| 01 | 14,7796 | 4,7045 | 0,1145 | 52,0432 |
| 02 | 12,5719 | 4,0018 | 0,1699 | 43,5282 |
| 03 | 17,2191 | 5,4810 | 0,0941 | 79,1890 |
| 04 | 15,3046 | 4,8716 | 0,1429 | 50,7023 |

O valor máximo de tensão foi observado na amostra 03, sendo de 5,4810 MPa, resultado semelhante ao apresentado por Oliveira *et al.* (2011) que faz uma comparação entre um grupo de controle saudável e um grupo diabético, no qual foi necessária uma tensão de 5,48 +- 2,24 MPa para o rompimento do tecido no grupo de controle. Em contrapartida, a deformação máxima encontrada foi de 16,99% na amostra 02 e um módulo de elasticidade de 79,1890 MPa para a amostra 03, valores altos se comparados a Oliveira *et al.* (2011) que encontrou em seu estudo um módulo de elasticidade de 113,62+-34,40% e um módulo de elasticidade de 10,17+-4,90 MPa para o grupo de controle.

Os mordentes confeccionados para o ensaio responderam significativamente, visto que nenhum dos corpos de prova ensaiados deslizou durante o experimento. Além disso, o tempo gasto para a fixação da amostra nas garras foi mínimo se comparado a um estudo que afirma que se gastou mais tempo no alinhamento e preparação dos tendões que no ensaio propriamente dito (Oliveira, 2016).

## CONCLUSÃO

Dado o exposto, foi possível mensurar a força, a tensão e a deformação máximas que um tendão calcâneo de rato consegue suportar, além do módulo de elasticidade do material. A análise de tecidos biológicos é mais complexa em relação a outros materiais, uma vez que não há valores padrões para as características mecânicas do material, como nos aços, por exemplo. Diversos fatores podem influenciar nos resultados, como o peso e idade do animal, a forma com que a amostra foi obtida ou quanto tempo ficou exposta ao ambiente. Entretanto, o mordente e os métodos utilizados para a execução deste experimento demonstraram desempenho significativo, resultando em maior simplicidade na execução no processo tanto de fixação das amostras quanto na análise propriamente dita.

## REFERÊNCIAS

Heinemeier, K., & Kjaer, M. (2011). In vivo investigation of tendon responses to mechanical loading. *J Musculoskelet Neuronal Interact*, 115-123.

Maganaris, C. N., Narici, M. V., & Maffulli, N. (2008). Biomechanics of the Achilles tendon. *Disability and Rehabilitation*, 1542-1547.

Matsumoto, F., Trudel, G., Uhthoff HK, H., & Backman, D. (2003). Mechanical Effects of Immobilization on the Achilles' Tendon. *Arch Phys Med Rehabil*, 84:662-7.

Oliveira, A. S. (2016). Ensaio Biomecânicos do Tendão Calcâneo de Ratos por meio de Máquina Multiaxial. Brasília.

Oliveira, R. R., de Lira, K. D., Silveira, P. V., Coutinho, M. G., Medeiros, M. N., Teixeira, M. H., & de Moraes, S. A. (2011). Mechanical Properties of Achilles Tendon in Rats Induced. *Annals of Biomedical Engineering*, 1528-1534.

Young Min, J.-H. S.-H. (2013). Effect of the position of imoobilization upon the tensile properties in injuried Achilles tendon of rat. *Annals of Rehabilitation Medicine*, 1-9.

**ANEXO**

CEUA Universidade Católica de Brasília

CERTIFICADO

Certificamos que o projeto intitulado "**Lesões músculo-tendíneas e sua relação com a regeneração tecidual e remodelamento da matriz extracelular**", protocolo nº **028/15** sob a responsabilidade de Rita de Cássia Marqueti Durigan - que envolve a produção, manutenção e/ou utilização de animais do filo Chordata, subfilo Vertebrata (exceto o homem), para fins de pesquisa científica (ou ensino) – encontra-se de acordo com os preceitos da Lei nº 11.794, de 8 de outubro de 2008, do Decreto nº 6.899, de 15 de julho de 2009, e com as normas editadas pelo Conselho Nacional de Controle da Experimentação Animal (CONCEA), e foi aprovado pela COMISSÃO DE ÉTICA NO USO DE ANIMAIS (CEUA/UCB) DA Universidade Católica de Brasília, em reunião de 18 / 11 / 2015.

| | |
|---|---|
| **Vigência do projeto** | 30 de julho de 2019. |
| **Espécie / linhagem** | *Rattus norvergicus* / Wistar |
| **Nº de Animais** | 140 |
| **Peso / Idade** | 200g / 2 Meses |
| **Sexo** | Masculino |
| **Origem** | Biotério do Laboratório de Processos Básicos (UCB) |

Brasília, 18 de Novembro de 2015.

Secretaria da Comissão de Ética
Em Uso de Animais (CEUA/UCB)
Universidade Católica de Brasília
(61) 3356-9492

**DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE**

O autor é o único responsável pelo material impresso contido neste artigo.

**ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO**

Assinalar aqui, com um X, a seção 'área de conhecimento do trabalho'.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
(X) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos

( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

# *Automação Industrial*

# HidroDim: UMA FERRAMENTA PARA DIMENSIONAMENTO PARCIAL DE SISTEMAS HIDRÁULICOS INDUSTRIAIS

**Ian Leitão Ferreira[1]; André Pimentel Moreira[1]; Evaldo Correia Mota[1]; Danielle Alves Barbosa[1]**
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará[1]
Av. Treze de Maio, 2081, Benfica. Fortaleza - CE
ianlferreira2013@gmail.com; apmoreira@ifce.edu.br; evaldom@ifce.edu.br; danielle@ifce.edu.br

**RESUMO:** O dimensionamento é uma etapa crucial no projeto de um sistema hidráulico, visando a redução de perdas de carga e variações indesejadas de temperatura. O HidroDim foi desenvolvido para auxiliar os estudantes de Engenharia e profissionais da indústria na etapa do dimensionamento de sistemas hidráulicos industriais estacionários e móbil. Este artigo tem como objetivo apresentar as funcionalidades do programa e o equacionamento utilizado em seu desenvolvimento. HidroDim apresenta a flexibilidade no dimensionamento dos parâmetros de fluxo volumétrico e pressão da bomba hidráulica, que podem ser estipulados manualmente ou calculados através das especificações dos atuadores. O dimensionamento dos componentes do sistema hidráulico tais com atuadores, dutos, bomba e reservatório é obtido com base no desenvolvimento realizado nas equações apresentadas. As telas do programa são apresentadas com as instruções de uso. Dois testes são realizados utilizando valores retirados de exemplos da literatura para comparação e validação dos resultados.

**Palavras-Chave:** dimensionamento de sistemas hidráulicos, linguagem de programação, escoamento de fluidos

***ABSTRACT:*** *Sizing is a crucial step in the design of a hydraulic system, with the objective of reducing load losses and undesired temperature variations. HidroDim was developed to help Engineering graduates and industry professionals to the accomplishment of the sizing of stationary and mobile industrial hydraulic systems. This article presents the functionalities of the software and the equations used in its development. The software has flexibility in the sizing of volumetric flow and pump pressure parameters, which can be stipulated manually or calculated through the actuator specifications. The sizing of the hydraulic system components, such as actuators, ducts, pump and fluid reservatory based on the development carried out and the formulas presented. The program screens are displayed with the instructions of use. Two tests are performed using values taken from literature examples for results comparison and validation.*

***Keywords:*** *hydraulic-systems sizing, programming language, fluid flow*

## INTRODUÇÃO

A tecnologia dos acionamentos óleo-hidráulicos está presente numa variedade de aplicações do cotidiano, desde acionamentos mais simples, como acionamento de monta-cargas ou maquinaria agrícola, até acionamentos mais complexos, como de prensas hidráulicas. O denominador comum é a transmissão de energia através de um fluido (DA SILVA; SANTOS, 2016).

Observa-se então a importância desses sistemas, devido à grande utilização na indústria em geral e a larga gama de aplicações. Desta forma é importante o estudo aprofundado quanto ao funcionamento e dimensionamento de sistemas hidráulicos para sua correta utilização e o desenvolvimento de novas tecnologias mais eficientes e robustas para a área.

Segundo Da Silva e Santos (2016), a hidráulica hoje é indispensável quando se trata das técnicas mais modernas utilizadas para transmissão e controle de movimentos. Capaz de garantir movimentos de diversos tipos (rotativos ou lineares), que exijam ou não forças elevadas, com velocidade e forças constantes.

Comparando-se com outras formas de transmissão de energia, os sistemas hidráulicos destacam-se também por permitir a redução da inércia de movimentos e do tempo de resposta do sistema, grande robustez e durabilidade dos equipamentos (pouca manutenção exigida e custos relativamente baixos) e ainda por possibilitar a associação a circuitos de comando de outros tipos, como elétricos ou pneumáticos.

De forma análoga, existem alguns fatores limitantes da exploração de todo potencial desses sistemas. Aquecimento, perdas de carga e de energia nas tubulações, assim como fugas internas ou variações na temperatura e viscosidade do fluido hidráulico.

A partir desses fatores justifica-se a importância do dimensionamento adequado dos sistemas hidráulicos para o seu correto funcionamento, visando reduzir as perdas de carga e de potência, evitar um aumento de temperatura que possa alterar a compressibilidade do fluido ou comprometer a estrutura das tubulações.

Existe uma vasta gama de programas disponibilizados por fabricantes e outros desenvolvedores que são excelentes ferramentas para simulação e monitoramento de sistemas hidráulicos e pneumáticos. Porém, não se pode afirmar o mesmo em relação a programas para o dimensionamento destes sistemas.
Com base no cenário apresentado, este trabalho tem como finalidade introduzir um programa didático para dimensionamento parcial de sistemas hidráulicos estacionários industriais, abrangendo o dimensionamento de atuadores, tubulação, bomba hidráulica e o reservatório. Podendo também ser utilizado em sistemas hidráulicos móveis. O programa foi desenvolvido em linguagem VBA (Visual Basic for Applications) utilizando-se a plataforma Microsoft Visual Studio 2017.

## REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

Os sistemas hidráulicos são sistemas de transmissão de energia caracterizados pelo uso de fluído hidráulico como elemento para distribuição da pressão de forma homogênea através de todos os seus componentes. Um circuito hidráulico básico é composto por uma ou mais bombas hidráulicas responsáveis pela pressurização do fluido, reservatórios para armazenamento do fluido pressurizado, um sistema de dutos ou tubulações para circulação, válvulas para comando e atuadores que são responsáveis por converter pressão em força de trabalho.
De acordo com Fialho (2004), o fluido hidráulico é a substância utilizada para transmissão de energia dentro dos sistemas hidráulicos. O fluido, geralmente óleo de alta viscosidade, é capaz de escoar pelo sistema de dutos e tubulações e assumir a forma do seu recipiente, distribuindo de forma homogênea a força por todo seu volume e em todas as direções.
A pressão é definida como sendo a força distribuída sobre uma determinada unidade de área, ou seja, nos sistemas hidráulicos, é a força exercida pelo fluido na superfície dos recipientes por onde ele circula. Pelo sistema internacional de unidades (SI), a unidade de medida de pressão é dada em N/m², porém usualmente nos sistemas industriais e prediais utiliza-se Bar, que também será utilizado nos cálculos para o dimensionamento deste trabalho.
Na Figura 1, ilustra-se a relação de pressão em um cilindro hidráulico genérico, em que a relação entre a pressão na câmara do cilindro hidráulico, a força e a área do pistão são dadas pela Eq. (1).

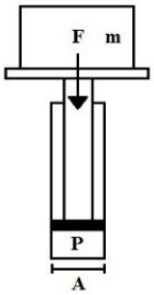



**Figura 1.** Relação de pressão em um cilindro hidráulico
Fonte: adaptado de Fialho (2004)

$$P = \frac{F}{A} \tag{1}$$

Em que,

P – pressão na câmara [N/m²];
F – força exercida pela massa [N];
A – área do pistão [m²].

A vazão ($Q$) é o volume do fluido que percorre o sistema (o volume de fluido que é disponibilizado pela bomba) em uma determinada unidade de tempo (Eq. (2)), que também pode ser obtida calculando o produto entre a velocidade de escoamento do fluido e a seção transversal da tubulação (Eq. (3)). A unidade no SI é m³/s, mas usualmente utiliza-se l/min.

$$Q = \frac{V}{t} \tag{2}$$

$$Q = v.A \tag{3}$$

Em que,

$V$ – volume do fluido disponibilizado pela bomba [m³];
$t$ – tempo [s];
$v$ – velocidade do escoamento [m/s];
$A$ – área da secção da tubulação [m²].

A viscosidade é uma das propriedades consideradas mais importantes de um óleo lubrificante ou hidráulico. É definida como sendo a resistência oferecida pelo fluido à realização de movimento ou escoamento. A viscosidade é dada pela relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento do fluido (Fialho, 2004).
No estudo de Neves (2005), é descrito que os óleos de alta viscosidade têm melhores propriedades lubrificantes, pois são compostos de moléculas maiores que tem maior capacidade de manter a separação entre as superfícies metálicas. Conclui então que o óleo hidráulico de baixa viscosidade é usado para penetração e refrigeração em superfícies metálicas e o óleo de alta viscosidade é usado geralmente em lubrificação

**Dimensionamento dos atuadores hidráulicos**

O dimensionamento correto dos atuadores tem grande importância para o funcionamento do sistema hidráulico, pois permite obter a força e velocidade de avanço desejada, a pressão de trabalho estimada e os diâmetros de pistão e da haste que garantam a segurança do processo.
O diâmetro do pistão é obtido a partir de uma relação entre a força de avanço desejada do atuador e a pressão de trabalho estimada, como mostrado na Eq. (4). A força de avanço é definida pelo projetista e a pressão de trabalho estimada é dada pela pressão nominal e uma perda de carga adotada.
Os detalhes das forças de atrito nos atuadores não são bem documentados, em parte porque há considerável dependência de fatores que são difíceis de estimar. A contribuição dominante para o atrito, sem dúvida, vem do conjunto de vedação, incluindo o limpador ou o anel raspador. O atrito depende muito do tipo de vedação, acabamentos de superfície e circunstâncias operacionais, e existe uma variabilidade significativa associada a efeitos relacionados à temperatura e ao desgaste para confundir ainda mais o problema (HUNT; VAUGHAN, 1996). Assim, neste trabalho as perdas serão consideradas em 15%, Eq. (5), conforme sugerido em Fialho (2004).

$$Dp = \sqrt{\frac{4.Fa}{\pi.Ptb}} \tag{4}$$

$$PTb = PN - 0{,}15.PN \tag{5}$$

Em que,

$Dp$ – diâmetro do pistão [cm];
$Fa$ – força de avanço do pistão [N];
$PTb$ – pressão de trabalho estimada [N/m²];
$PN$ – pressão nominal [N/m²].

Em termos de aplicação real, o valor de $Dp$ calculado é considerado como o valor mínimo de referência e, portanto, deve-se consultar o catálogo do fabricante utilizado e selecionar um valor ligeiramente maior que esteja disponível. Por se tratar inicialmente de um programa didático, o valor calculado de $Dp$ pela Eq. (4) é o adotado para os demais passos do dimensionamento.
O diâmetro da haste do atuador é calculado utilizando-se o critério de Euler para deformação por flambagem. Esta forma de calcular o diâmetro é altamente indicada para projetos, pois garante o diâmetro mínimo seguro para o tipo de aplicação e de acordo como tipo de fixação dos atuadores.
Para Fialho (2004), a flambagem é o fenômeno de encurvamento de peças onde a dimensão da seção transversal é considerada bem pequena em relação ao seu comprimento. O diâmetro da haste pode então ser obtido pela Eq. (6).

$$dh = \sqrt[4]{\frac{64.S.\lambda^2.Fa}{\pi^3.E}} \tag{6}$$

Em que,

$E$ – módulo de elasticidade de Young ou módulo de elasticidade do aço [N/cm²];
$\lambda$ – comprimento livre de flambagem [cm].
$Fa$ – força máxima de avanço (força de avanço) [N];
$S$ – coeficiente de segurança [adimensional];
$dh$ – diâmetro da haste [cm].

De acordo com Fialho (2004), com os valores de *Dp* e *dh* é possível calcular as áreas transversais do pistão, da haste e da coroa circular, através da Eq. (7), Eq. (8) e Eq. (9), respectivamente. Na Equação (10) é possível determinar o valor da pressão de trabalho.

$$Ap = \frac{\pi}{4}.Dp^2 \tag{7}$$

$$Ah = \frac{\pi}{4}.dh^2 \tag{8}$$

$$Ac = Ap - Ah \tag{9}$$

$$PTb = \frac{Fa}{\pi.{}^{Dp^2}/_4} \tag{10}$$

Em que,

*Ap* – área transversal do pistão [cm²];
*Ah* – área transversal da haste [cm²];
*Ac* – área da coroa circular [cm²].

Segundo Fialho (2004), quando é fornecida uma vazão qualquer para um cilindro de duplo efeito, na tomada de saída do fluido, haverá uma vazão que pode ser maior ou menor que a vazão de entrada. Portanto, para se dimensionar a bomba, torna-se necessário realizar a verificação quanto à existência de vazão induzida.
Para obter as vazões induzidas de avanço e retorno utilizam-se as Eq. (11) e Eq. (12), respectivamente.

$$Qia = va.Ac \tag{11}$$

$$Qir = vr.Ap \tag{12}$$

Em que,

*Qia* – vazão induzida de avanço [cm³/min];
*Qir* – vazão induzida de retorno [cm³/min].

O passo a passo de dimensionamento dos atuadores aqui demonstrado tem como intuito final apenas obter o valor da vazão do sistema e das vazões induzidas, portanto, serão desconsiderados os demais elementos componentes do atuador, que são devidamente dimensionados pela literatura como base para o desenvolvimento deste programa.

**Dimensionamento da bomba hidráulica**

Para Fialho (2004), após o dimensionamento dos atuadores pode-se dimensionar a bomba usando como referência para o valor de sua vazão ($Q_B$) [cm³/min], o somatório da maior vazão induzida calculada para o conjunto de atuadores do sistema, conforme a Eq. (13).

$$\sum_1^n Qir \geq Q_B > \sum_1^n Qia \tag{13}$$

Ainda segundo Fialho (2004), para concluir a escolha da bomba é necessário que a mesma satisfaça a seguinte condição: *PB* (pressão da bomba) ≥ *PTb* + *ΔP* (Perda de carga da linha). O cálculo das perdas de carga somente poderá ser realizado após a etapa de dimensionamento das tubulações, portanto, será demonstrado neste momento apenas o cálculo das demais especificações da bomba. A potência absorvida pela bomba hidráulica é estimada pela Eq. (15).

$$Vg = \frac{1000.Q_B}{n.\eta v} \tag{14}$$

$$N = \frac{Q_B.P.n}{95490.\eta mh} \tag{15}$$

Em que,

*Vg* – deslocamento volumétrico [cm³/rotação];
*n* – rotação [RPM];

$\eta v$ – rendimento volumétrico [0,91 e 0,93]
$Q_B$ – fluxo volumétrico ou vazão da bomba [l/min].
$\eta mh$ - rendimento mecânico-hidráulico da bomba [0,82 a 0,97];

**Dimensionamento das tubulações**

De acordo com Fialho (2004), o dimensionamento das tubulações de um sistema hidráulico é determinado pelo cálculo do número de Reynolds (*Re*), que se trata de um parâmetro que define o tipo de escoamento do fluido no interior da tubulação.
Para Carvalho e Silva (2011), não só a velocidade é importante para caracterizar o regime de escoamento, mas também o diâmetro da canalização e o fluido escoante. Para dutos de seções lineares, o cálculo de *Re* é dado pela Eq. (16).

$$Re = \frac{v.dt}{\upsilon} \tag{16}$$

Em que,

$v$ – velocidade de escoamento do fluido na tubulação [cm/s];
$dt$ – diâmetro interno da tubulação [cm];
$\upsilon$ – viscosidade do fluido [St].

Ainda segundo Carvalho e Silva (2011), obtendo o valor de *Re*, pode-se classificar o escoamento do fluido conforme apresentado na Tab. 1.

**Tabela 1. Tipos de escoamento do fluido internamente aos dutos**

| Limites de Escoamento | |
|---|---|
| Escoamento Laminar | Re ≤ 2000 |
| Escoamento Indeterminado | 2000 < Re ≤ 4000 |
| Escoamento Turbulento | Re > 4000 |

De acordo com Fialho (2004), o escoamento do fluido em sistemas hidráulicos deve fluir apresentando um comportamento laminar, pois o comportamento turbulento representa maior perda de carga no sistema, gerando assim um maior aquecimento nas tubulações, devido aos elevados atritos internos. Para obter a menor perda de carga possível e garantir o escoamento laminar do fluido, algumas condições devem ser observadas.

- Comprimento de tubulação não superior a algumas dezenas de metros;
- Vazões compreendidas entre os limites de 20 a 200 l/min;
- Pouca variação de temperatura.

Ainda de acordo com Fialho (2004), caso as condições mencionadas anteriormente sejam atendidas, podem ser utilizadas no dimensionamento das tubulações as velocidades recomendadas na Tab. 2.

**Tabela 2.** Velocidades de escoamento recomendadas

| Tubulação | Velocidade de Escoamento Recomendada |
|---|---|
| Retorno | 300 cm/s |
| Sucção | 100 cm/s |
| Pressão | * |

De acordo com Fialho (2004), a velocidade da tubulação de pressão, em cm/s, é determinada pela Eq. (17).

$$Vp = 121{,}65.P^{(1/3{,}3)} \tag{17}$$

Com as velocidades recomendadas e o valor da vazão máxima do sistema, utiliza-se a Eq. (18) para determinar o diâmetro interno das tubulações de sucção, pressão e retorno (FIALHO 2004).

$$dt = \sqrt{\frac{Q}{0{,}015.\pi.v}} \tag{18}$$

**Perdas de carga**

Em todo e qualquer sistema de transmissão de força e de energia existem perdas de carga. Em um sistema hidráulico, as perdas de carga podem ser minimizadas. Segundo Carvalho e Silva (2011), no regime laminar, a perda de carga deve-se unicamente à resistência oferecida pela camada mais lenta àquela mais rápida que lhe é adjacente. No regime turbulento, além do fenômeno descrito acima, existe ainda perda de energia nos choques moleculares oriundos do movimento desordenado das partículas. A perda de carga pode ser distribuída ou localizada.

De acordo com Fialho (2004), a perda de carga distribuída se dá por dissipação de energia térmica. O fluido à circular pelos dutos, naturalmente forma camadas que escoam com velocidades relativas diferentes, ou seja, deslizando umas sobre as outras, gerando assim atrito.

Ainda pelo mesmo autor acima citado, perda de carga localizada é gerada dentro das singularidades presentes no sistema de dutos. Estas singularidades devem ser evitadas (entende-se por isto, que se utilize apenas o mínimo necessário), pois possuem um maior atrito interno, causam perda de velocidade de escoamento e podem acumular bolhas de ar ou detritos, caso estejam mal posicionadas.

Os fabricantes disponibilizam tabelas que representam as perdas de carga localizadas das singulares através de um comprimento equivalente a ser adicionado à formula do cálculo de perdas de carga apresentada na Eq. (19).

$$\Delta P = \psi . \frac{5.Lt.\rho.v^2}{dt.10^{10}} \tag{19}$$

Em que,

$\Delta P$ – perdas de carga [N/m²];
$Lt$ – comprimento da tubulação (comprimento retilíneo + comprimento equivalente de singularidades [m];
$\rho$ – massa específica do fluido [kg/m³];
$\psi$ – fator de atrito.

**Tabela 3.** Fator de atrito

| | |
|---|---|
| Ψ = 64/Re | Para tubos rígidos e temperatura constante |
| Ψ = 75/Re | Para tubos rígidos e temperatura variável ou tubos flexíveis e temperatura constante |
| Ψ = 90/Re | Para tubos flexíveis e temperatura variável |

**Perdas térmicas**

Segundo Fialho (2004), análise de perdas térmicas é de extrema importância no dimensionamento de um sistema hidráulico. O calor propaga-se pelas tubulações, todo o sistema e aumenta a temperatura do fluido em circulação. Portanto obtendo estes valores e realizando uma análise empírica ou através de cálculos, pode-se tornar necessário a instalação de aletas no reservatório ou o uso de trocadores de calor. O cálculo da perda térmica (q) [Kcal] é dada pela Eq. (20).

$$q = 1{,}434.\Delta P.Q_B \tag{20}$$

**Dimensionamento do reservatório**

De acordo com Renner (2010), o emprego primário do reservatório é no armazenamento do fluido utilizado no sistema hidráulico dimensionado de acordo com a necessidade para a aplicação. Outras funções do reservatório são: dissipação de calor gerado no sistema hidráulico, filtrar e dar suporte a outros componentes de controle e segurança do sistema.

Palmieri (1997), destaca que o fluido utilizado num sistema hidráulico qualquer deve ser armazenado de tal forma que ele nunca seja insuficiente ou excessivo. Segundo Fialho (2004), o volume do fluido armazenado no reservatório deve ser o suficiente para suprir o sistema por um período de no mínimo três minutos antes que haja o seu retorno, completando um ciclo. A partir dessa afirmação, conclui-se que o volume do reservatório deve ser no mínimo igual a três vezes a vazão da bomba em l/min.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O programa para dimensionamento de sistemas hidráulicos (HidroDim) apresentado neste artigo foi desenvolvido em linguagem *Visual Basic for Applications* (VBA) que é uma implementação do *Visual Basic* da Microsoft em todos os programas do pacote Office.

O ambiente de desenvolvimento utilizado foi o Microsoft Visual Studio 2017, que fornece diversos objetos e formulários da plataforma Windows, especialmente designado para programação em linguagens como VBA, C, C++, entre outras. Para validar o programa, foram utilizados dois exemplos hipotéticos mencionados em Fialho (2004) com as especificações apresentadas nas Tab. 4 e Tab. 5.

**Tabela 4.** Dados para o exemplo 1

| Exemplo 1 | |
|---|---|
| Q | 60 l/min |
| P | 120 bar |
| υ | 0,45 St |
| ρ | 881,1 kg/m³ |

**Tabela 5.** Dados para o exemplo 2

| Exemplo 2 | |
|---|---|
| PN | 150 bar |
| PTb | 60 bar |
| $L_1$ | 5 m com diâmetro interno de 1,3 cm |
| $L_2$ | 1 tê de saída bilateral, 2 tês de passagem direta, 2 curvas de 90º de raio longo, 2 cotovelos de 90º de raio médio |
| Q | 45 l/min |
| Ψ | 75/Re (tubos rígidos e temperatura variável) |
| ηmh | 0,87 |
| ηv | 0,92 |
| n | 1800 RPM |

**Fluxograma**

Na Figura 3 é ilustrado o fluxograma explicativo da sequência de passos realizado pelo HidroDim.

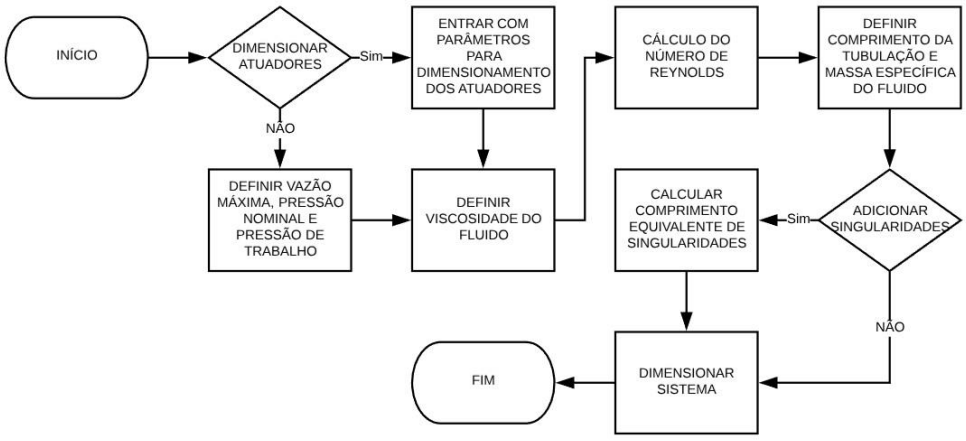



**Figura 3.** Fluxograma de funcionamento do HidroDim

**Programa desenvolvido**

A tela inicial do programa possui campos para o preenchimento dos os valores da vazão máxima desejada, da pressão nominal do sistema, a viscosidade do fluido e a pressão de trabalho, como apresentado na Fig. 4.

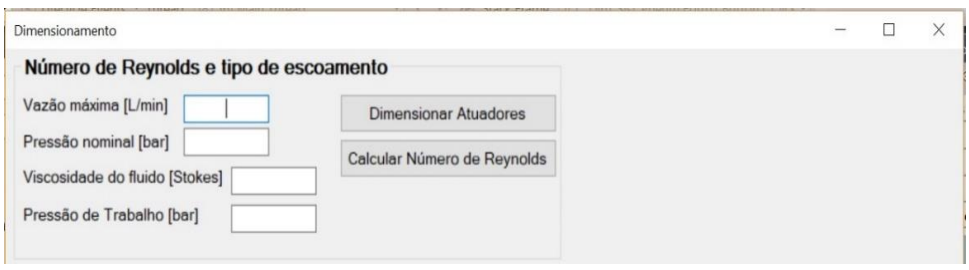



**Figura 4.** Tela inicial de entrada de dados

O programa possui uma versatilidade para obtenção dos valores de vazão máxima, pressão nominal e pressão de trabalho. Estes valores podem ser definidos e fornecidos manualmente pelo projetista, assim como é possível obter tais valores a partir do dimensionamento dos atuadores. Ao clicar no botão "Dimensionar Atuadores" uma nova tela é mostrada, onde será realizado este dimensionamento.

Ao inserir os valores desejados e clicar em dimensionar, a vazão dos atuadores é então calculada e mostrada para o usuário. É disponibilizada ainda a opção de adicionar os valores de vazões já definidas de outros equipamentos do sistema para serem somadas com a vazão dos atuadores.

Com os valores da vazão máxima, da pressão nominal e da viscosidade do fluido já definidos, é possível obter então o valor para o número de Reynolds e definir o regime de escoamento para as linhas de sucção, de pressão e de retorno do sistema.

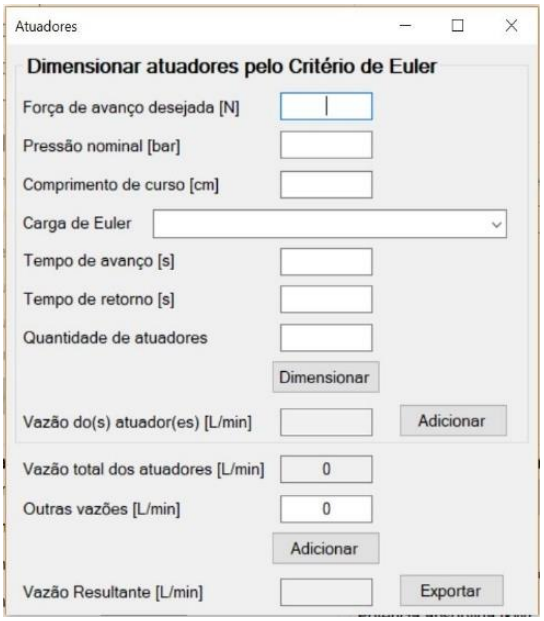



**Figura 5.** Tela de dimensionamento de atuadores

## RESULTADOS

Utilizando os dados fornecidos na Tab.4, os diâmetros das tubulações são obtidos a partir da Eq. (18) e os respectivos números de Reynolds a partir da Eq. (16). A literatura apresenta escoamento laminar nas tubulações de sucção, pressão e retorno sendo 844,4, 1845,3 e 1426,7, respectivamente. Aplicando os mesmos valores no programa, obtêm-se os valores vistos na Fig. 6.

O passo seguinte é o dimensionamento do sistema de dutos para definir os diâmetros internos das tubulações de sucção, retorno e pressão. Para isto é necessário definir primeiramente a pressão de trabalho desejada. Em seguida define-se o comprimento da tubulação retilínea, a massa específica do fluido, o tipo de tubulação, o regime de variação de temperatura, as velocidades de escoamento e especificar as singularidades presentes. Para isto serão utilizados os dados apresentados na Tab. 5. O comprimento equivalente das singularidades calculado pelo programa é apresentado na Fig. 7.

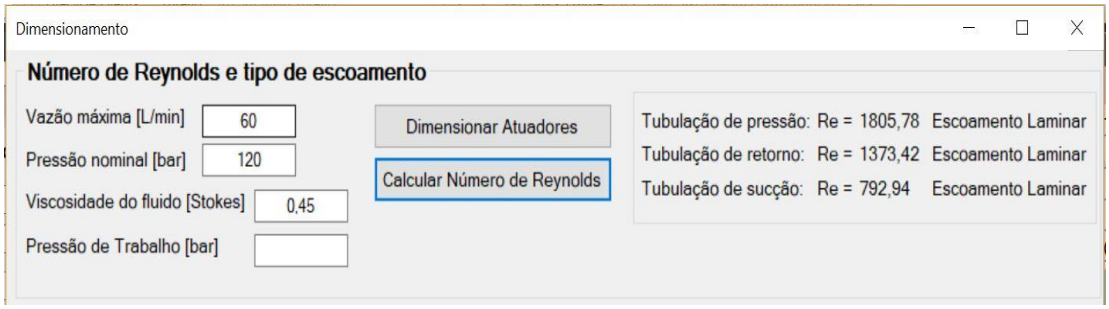



**Figura 6.** Resultados para o número de Reynolds e tipo de escoamento obtidos pelo programa

**Figura 7.** Comprimento equivalente das singularidades calculado pelo programa

A tela apresentada na Fig. 7 é exibida ao clicar no botão "Adicionar/Alterar Singularidades", presente na Figura 7, após o cálculo, é possível exportar o valor encontrado que será adicionado ao comprimento total equivalente do sistema. O resultado obtido na literatura do somatório do comprimento equivalente (319,99 cm), utilizando como referência neste trabalho são apresentados na Tab. 7.

**Tabela 7.** Comprimento equivalente de singularidades fornecido pela literatura.

| Comprimento equivalente $L_2$ (cm) | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Diâmetro (cm) | Cotovelo 90º de raio médio | Curva 90º de raio longo | Tê de passagem direta | Tê de saída bilateral |
| 1,91 | 59,99 | 30,00 | 40,01 | 140,00 |

Desta forma, utilizando a viscosidade do óleo do tipo SAE-10 apresentada na Tab. 5, o preenchimento dos dados de especificação da linha é ilustrado conforme Fig.8.

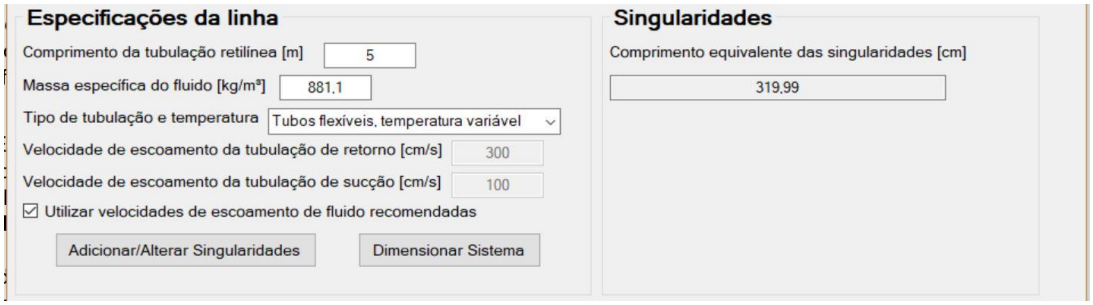



**Figura 8.** Especificações da linha

Selecionando o botão "Dimensionar Sistema", o programa realiza o cálculo e apresenta os resultados vistos na Fig. 9.

**Figura 9.** Resultados para o dimensionamento da linha, segundo programa

Realiza-se agora uma comparação com os valores calculados na literatura. No exemplo, não é calculado o diâmetro das linhas, porém, observa-se que o programa calcula o valor de 1,31 cm para o diâmetro da linha de pressão, valor praticamente igual aos 1,3 cm de diâmetro especificado no problema.

A pressão nominal mínima atende as especificações previamente definidas de que a pressão nominal da bomba (150 bar) deve ser superior a pressão de trabalho somada às perdas de carga (64,72 bar).
A Tabela 8 apresenta um resumo dos valores dimensionados pelo programa e os mesmos valores calculados através das fórmulas manualmente, assim como os respectivos erros percentuais apresentados.

**Tabela 8.** Comparação dos valores obtidos

| Componentes e perdas | Cálculo manual | HidroDim | Erro percentual |
|---|---|---|---|
| Re da tubulação de pressão | 1845,3 | 1805,78 | 2,14% |
| Re da tubulação de retorno | 1426,7 | 1373,42 | 3,73% |
| Re da tubulação de sucção | 844,4 | 792,94 | 6,09% |
| Comprimento equivalente de singularidades | 319,99 cm | 319,99 cm | 0% |
| Diâmetro da linha de pressão | 1,3 cm | 1,31 cm | 0,77% |
| Comprimento equivalente da linha | 8,19 m | 8,2 m | 0,12% |
| Perda de carga distribuída + localizada | 4,0 bar | 4,72 bar | 18% |
| Perdas térmicas | 258,12 Kcal/h | 304,42 Kcal/h | 17,94% |
| Pressão nominal mínima | 64, 0 bar | 64,72 bar | 1,13% |

## CONCLUSÃO

O programa HidroDim apresenta interface simples e de fácil manuseio. Desenvolve o passo a passo das diversas etapas de dimensionamento de um sistema hidráulico apresentado na literatura, desde o dimensionamento de atuadores, passando pela determinação dos diâmetros das linhas e o cálculo das perdas até a definição de algumas especificações da bomba e do reservatório.
Quanto à fiabilidade dos resultados, de acordo com o caráter educacional ao qual o programa foi designado, observa-se na Tab. 8, que os valores obtidos pelo programa apresentaram resultados idênticos ou com erros percentuais próximos de zero para os valores dos comprimentos equivalentes de singularidades e da linha, assim como para o diâmetro da tubulação. O número de Reynolds obtido para os três tipos de tubulação apresentou erros que variam entre 2 à 6% em relação ao valores teóricos obtidos. Quanto ao valor das perdas de carga e perdas térmica, foram encontrados erros em torno de 18%, considerado grande e que se deu principalmente por questões de arredondamentos e do valor da velocidade de escoamento do fluido na linha de pressão adotado.
Para a finalidade didática ao qual foi desenvolvido, de auxiliar acadêmicos de engenharia no estudo do conteúdo de acionamentos hidráulicos e afins na resolução de exercícios de dimensionamento de sistema hidráulico, o programa apresentou desempenho e resultados aceitáveis e precisos.
Pode-se ainda ressaltar possíveis melhorias em alguns pontos deficientes deste programa: a ausência dos valores comerciais dos diâmetros das tubulações, fator preponderante para os pequenos erros nos resultados; as perdas de carga causada pelas válvulas do sistema, que não são definidas; e as demais especificações da bomba e do reservatório, que não são calculados pelo programa.

## REFERÊNCIAS

CARVALHO, Daniel Fonseca de; SILVA, Leonardo Duarte Batista da. **Fundamentos de Hidráulica.** 2011. Disponível em: <http://www.ufrrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/IT503 cap 7 - 2011p.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2018.

FIALHO, Eng. Arivelto Bustamante. **Automação Hidráulica:** Projetos, Dimensionamento e Análise de Circuitos. 2. ed. São Paulo: Érica, 2004. 284 p.

HUNT, T.; VAUGHAN, N. **The Hydraulic Handbook.** 9. ed. Langford Lane, Kidlington, Oxford: Elsevier Advanced Technology, 1996. 781 p. ISBN 1 856172503.

MICROSOFT. **Introdução ao VBA no Office.** 2018. Disponível em: <https://msdn.microsoft.com/pt-br/vba/office-shared-vba/articles/getting-started-with-vba-in-office>. Acesso em: 20 jan. 2018

NEVES, C. A. **Melhoria na Estação de Tratamento de Efluentes de uma Empresa Metal Mecânica de Produção de Componentes Hidráulicos.** 2005. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Ambiental e Tecnologias Limpas, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

PALMIERI, A. C. **Manual de Hidráulica Básica.** 10. ed. Porto Alegre: Albarus Sistemas Hidráulicos Ltda, 1997.

PARKER. **Tecnologia Hidráulica industrial:** Apostila M2001-4 BR. Jacareí: Parker Hannifin Ind. Com. Ltda., 2014.

RENNER, R. **Projeto e Construção de uma Unidade de Potência e Condicionamento Hidráulico.** 2010. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Tecnologia, Universidade Regional do Noroeste do Rio Grande do Sul, Panambi, 2010.]

SILVA, António Ferreira da; SANTOS, Adriano Almeida. **Automação Óleo-Hidráulica:** Princípios de Funcionamento. Porto: Publindústria, 2016. 218 p.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção ‘área de conhecimento do trabalho’.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
(X) Automação Industrial
( ) Energia
( ) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 27 à 31 de agosto de 2018 – Brasília, DF

# A INFLUÊNCIA DA INTERNET DAS COISAS NA INTERNET 4.0, INDUSTRIA 4.0 E NO COTIDIANO

**Daniela Garcia Rodrigues**
Universidade Federal de Goiás
Av. Universitária, n.º 1488 - quadra 86 - bloco A - 3º piso - Setor Leste Universitário, Goiânia - Goiás - CEP: 74605-010
daniela@engmecanica.grad.ufg.br

**RESUMO:** O desenvolvimento de novas tecnologias está transformando a indústria e a Internet, chegando numa convergência. Através da interconexão de "coisas" por meio da união do mundo físico e digital, criou-se a Internet das Coisas (IoT), que é o pilar da Industria e Internet 4.0. Esse artigo apresenta as fases das revoluções industriais e da Internet, como uma está influenciando positivamente a outra, citando dois exemplos de aplicações industriais no Brasil e mais um exemplo prático de uma automação simples de uma área de trabalho.

**Palavras-Chave:** Internet 4.0, Industria 4.0, IoT, Automação

***ABSTRACT:*** *The development of new technologies is transforming industry and the Internet, reaching into a convergence. The interconnection of "things" through the union of the physical and digital world, the Internet of Things (IoT) was created, being the pillar of Industry and Internet 4.0. This paper presents the phases of industrial revolutions and the Internet, as one is positively influencing the other, citing two examples of industrial applications in Brazil and another practical example of simple automation of a desktop.*

***Keywords:*** *Internet 4.0, Industry 4.0, IoT, Automation*

## INTRODUÇÃO

A indústria e a Internet estão em transformação numa velocidade nunca vista, impulsionadas pelo desenvolvimento técnico-científico com a criação de novos equipamentos cada vez mais evoluídos e ágeis. Pode-se citar como uma dessas evoluções a IoT (*Internet of Things*), base da última revolução industrial e da Internet.

Indústria: tem a finalidade de transformar matérias primas em vários tipos de produtos, utilizando para isso força humana, máquinas e energia.

Internet: grande conjunto de redes de computadores interligadas pelo mundo inteiro, de forma integrada, viabilizando a conectividade independentemente do tipo de máquina que seja utilizada, fazendo com que os usuários a ela conectados usufruam de serviços e informação de alcance mundial.

### Fases das revoluções industriais: da primeira à terceira

A primeira revolução industrial iniciou-se no século XVIII na Inglaterra, se espalhando pela Bélgica e França. Chegou aos Estados Unidos em meados do século XIX e no final do século na Alemanha, Itália e Japão. Teve como base a transformação da energia em força mecânica com a criação das caldeiras e máquinas a vapor, impulsionando as indústrias manufatureiras e os transportes aquaviários/ferroviários.

A segunda revolução iniciou-se por volta de 1870 nos Estados Unidos, seguido pela Alemanha, Itália, Inglaterra, França, Japão e Rússia. Se caracteriza pela troca da energia a vapor pelo petróleo e eletricidade e do ferro pelo aço. A produção era padronizada em série e em massa e se deu início aos cartéis e das multinacionais.

A terceira revolução industrial iniciou-se na década de 70 no Japão, conhecida como Revolução Técnico-Científica-Informacional. Tem como base a alta tecnologia de ponta, com a criação de novas ligas metálicas, progressos na eletrônica, uso da energia atômica, desenvolvimento da biotecnologia e da conquista espacial. A globalização tomou lugar da divisão imperial e iniciou-se a criação dos tecnopolos.

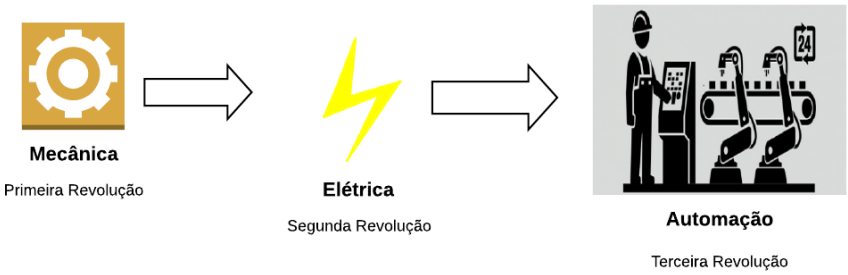



**Figura 1.** Pilares das Revoluções Industriais

**A quarta revolução industrial ou Indústria 4.0**

A quarta revolução industrial, também chamada de Revolução 4.0 ou Industria 4.0 traz uma tendência à automatização total das fábricas - seu nome vem, na verdade, de um projeto de estratégia de alta tecnologia do governo da Alemanha, trabalhado desde 2013 para levar sua produção a uma total independência da obra humana (PERASSO, 2016).

A Indústria 4.0 está sendo motivada por três grandes mudanças no mundo industrial produtivo: avanço exponencial da capacidade dos computadores; imensa quantidade de informação digitalizada; e novas estratégias de inovação. Com isso pretende-se tornar a manufatura um processo flexível, decentralizado, com eficiência de recursos, produtos individualizados com períodos curtos de desenvolvimento da produção (LASI et al.,2014).

Portanto, segundo Steinmetz (2018), alguns benefícios da Industria 4.0 são: redução de custos, aumento da segurança, personalização, economia de energia, redução de erros, aumento da qualidade, etc. A tecnologia base para toda esta revolução é o uso de IoT e M2M (*Machine to Machine*). Além disso, a Industria 4.0 engloba outros conceitos como *Cyber Physical Systems* (combinação de elementos computacionais e físicos) e *Smart Factory* (integração vertical e os sistemas de fabricação em rede).

Um dos pilares da Indústria 4.0 é o uso da internet não apenas para conectar máquinas, dispositivos, sensores e pessoas, mas também para criar novas funcionalidades. Dentre essas funcionalidades, pode ser citada o uso da internet como fonte de dados/informações para os produtos criados (BASSI, 2017).

**Evolução da Internet: da 1.0 até a 3.0**

A internet 1.0 se caracteriza pela primeira comunicação entre computadores, com o surgimento do envio de mensagens entre eles, o e-mail, isso nos anos 70.

A internet 2.0 se dá quando a rede passa a ser conhecida a nível mundial, nos anos 90, com a introdução de fóruns. O *layout* era basicamente texto e gráficos, já que os monitores eram basicamente monocromáticos e os modens lentos.

A internet 3.0 já se dá nos anos 2000 e é motivada pelos recursos tecnológicos. Nessa fase, o usuário participa ativamente da rede, criando conteúdos através de *blogs* e redes sociais. Utilização de novos dispositivos como *smartphones*, *tablets*, *netbooks* e outros dispositivos mais potentes que muitos computadores existentes.

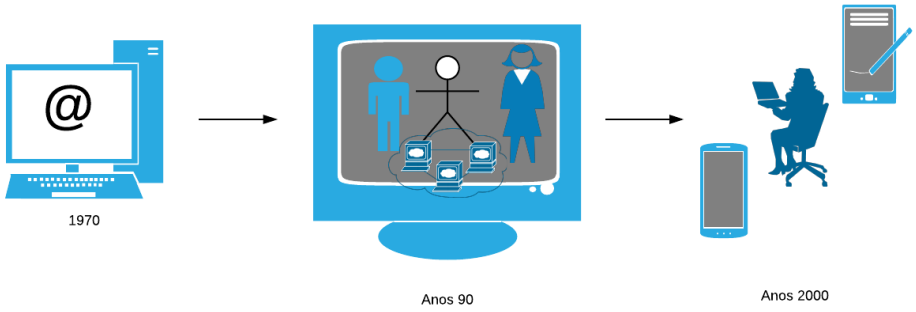



**Figura 2.** Internet 1.0 até 3.0

**Internet 4.0**

A Internet 4.0 pode ser chamada de Internet Industrial (IIoT - *Industrial Internet of Things*), sendo uma aplicação particular da IoT (*Internet of Things*).

Considerando que a Internet das coisas (IoT) abrange tudo - consumidor, indústria, empresa e comercial - a Internet industrial leva uma visão mais focada concentrando-se na energia, cuidados de saúde, fabricação, setor público, transporte e indústria relacionada a sistemas. Existem muitos sistemas industriais implantados hoje que estão

interligados e combinam uma mistura de sensores, atuadores, componentes lógicos, e redes para permitir que eles se interliguem e funcionem. A diferença com a abordagem da Internet Industrial é que esses sistemas industriais (ISs) tornam-se sistemas de Internet Industrial (IISs) à medida que se tornam conectados à Internet e se integram com sistemas empresariais, com o objetivo de melhorar fluxo e análise do processo de negócios (Alexandre *apud* Gilchrist, 2017).

Uma das características atraentes do conceito Internet das coisas é a promessa de usar dispositivos habilitados para a Internet todos os dias como pontos finais para acessar dados industriais (Wollschalaeger *et.al*, 2017).

**IoT (Internet of Things ou Internet das Coisas)**

Uma definição de IoT sugerida por Faccione Filho *apud* Minerva *et al* (2016): A IoT compreende uma rede complexa, adaptativa e autoconfigurável, que interconecta "coisas" à Internet por meio de protocolos de comunicação normatizados. As "coisas" interconectadas têm representação física ou virtual no mundo digital, capacidade de atuação/sensoriamento, funcionalidade de programação e identificação única. Tal representação contém informações da identidade, status, localização e informações privadas ou sociais relevantes da "coisa". A "coisa" oferece serviços, com ou sem intervenção humana, por meio de identificação única, coleta de dados, comunicação e capacidade de atuação. A exploração dos seus serviços se dá pelo uso de interfaces inteligentes e pode ser feita de qualquer lugar, a qualquer tempo e com segurança.

A ideia básica do IoT será permitir uma conexão autônoma e segura de troca de dados entre dispositivos e aplicações do mundo real onde o IoT vai incorporar alguma inteligência em objetos conectados à Internet para se comunicar, trocar informações, tomar decisões, invocar ações. Tende assim fornecer serviços surpreendentes que o torna em crescente popularidade para as instituições acadêmicas, indústrias, bem como governos uma vez que tem o potencial de trazer significativos benefícios pessoais, profissionais e econômicos (SILVA, 2017).

Internet das Coisas tem sido amplamente utilizada em problemas em que é necessário interagir com dispositivos físicos, como sensores, atuadores, máquinas, entre outros. A adoção da IoT possibilita a "união" entre mundo físico e o virtual de forma que exista uma profunda interação, cooperação, compartilhamento de informações e um melhor "compartilhamento de conhecimento" entre os objetos desses dois mundos (STEINMETZ *apud* YAO, 2017)

De acordo com Atzori *et al* (2010), o conceito de IoT é classificado de acordo com três visões: a primeira visão seria orientada à Internet, a segunda orientada aos objetos genéricos (aptos a integração futura) e a terceira é a visão semântica (que fornece suporte à representação e ao armazenamento das informações).

**Figura 3.** Tipos de visões sobre IoT de acordo com Atzori *et al* (2010)

**Exemplos de Aplicação da Indústria 4.0 no Brasil**

**a) SANEAGO**

A Saneago é uma empresa prestadora de serviços públicos na área de saneamento, que opera em um ambiente regulado. A entidade responsável pela regulação é a Agência Goiana de Regulação, Controle e Fiscalização de Serviços Públicos – AGR.

Engajada no combate às perdas de água, a área de automação industrial da companhia vem desenvolvendo desde 2010, o Controlador Lógico Programável (CLP), um dispositivo inteligente de baixo custo que possibilitou a criação do painel de automação industrial da empresa para o controle remoto a distância das unidades de serviço de água e esgoto em Goiás (SANEAGO, 2016).

Em 2017, a Saneago também finalizou a automação em 225 dos seus municípios de atuação (exceto Guarinos, com o qual fechou contrato nesse ano). Desse modo, as unidades passaram a receber a supervisão e o controle de consumo de água em tempo real, com a possibilidade de controle de bombas e coleta de dados de sensores de níveis de reservatórios também à distância. Toda a tecnologia empregada foi de desenvolvimento próprio, a baixo custo (PORTAL TRATAMENTO DE ÁGUA, 2018).

Ainda segundo o Portal Tratamento de água (2018), as inovações desenvolvidas foram primordiais também para que a Saneago pudesse ganhar relevância no mercado em que atua. Os resultados desse trabalho puderam ser percebidos com a redução dos índices de perdas nos sistemas de abastecimento de água operados. Atualmente, Goiás é o Estado brasileiro com o menor índice de perdas na distribuição de água no País, com 30,8%.

**b) Cimento Itambé**

A Cimento Itambé atua na Região Sul do Brasil há mais de 40 anos, produzindo e comercializando cinco tipos de cimento.

No caso da Planta de fabricação de cimento da Itambé, existem diversas aplicações de tecnologia com o conceito 4.0. Entre eles, sistemas inteligentes que supervisionam temperatura, pressão, nível de ruído e potência dos motores. A robótica também está presente no envasamento dos sacos e no carregamento dos caminhões com as sacarias de cimento (SANTOS, 2018).

Os sacos vazios são alimentados por uma máquina-robô, que faz o enchimento até o peso da embalagem e, automaticamente, despeja os sacos. Uma balança, conhecida como *checkweigher*, confere a pesagem. Caso o saco não atinja a tolerância solicitada pela norma técnica, descarta o saco para reprocessamento, envia um sinal ao bico que carregou este saco e o ajusta automaticamente sem necessidade de calibração e intervenção humana. Os sacos devidamente cheios, com pesagem correta e datados, são conduzidos por correias transportadoras até a paletizadora. Trata-se de outro robô que empilha os sacos sobre um palete de madeira. Quando o palete está com a quantidade certa de sacos de cimento, o palete cheio é conduzido pela máquina até uma extremidade onde ficará à disposição para ser pego pela empilhadeira (SANTOS, 2018).

De acordo com Santos, (2018), o seminário da *World Cement* de 2018 concluiu que as fábricas de cimento tendem a melhorar a produtividade em, no mínimo, 10% quando entrarem efetivamente em processos de indústria 4.0.

## METODOLOGIA

O método utilizado para a fundamentação teórica foi a pesquisa básica bibliográfica, contendo os termos “Industria 4.0”, “Industry 4.0”, “Quarta Revolução Industrial”, “Fourty Industrial Revolution” e “Internet 4.0”. Foram excluídos trabalhos incompletos e em línguas que não sejam português e inglês.

Para exemplificação na facilidade de instalação e utilização de componentes IoT, utilizou-se a automação de uma área de trabalho composta por um interruptor de lâmpada, um ventilador, caixinhas de som do tipo home theater e uma fita composta de lâmpadas de led. Neste exemplo, a automatização pode ser acessada em qualquer produto da plataforma Apple que contenha o sistema operacional iOS 10 ou superior.

**Materiais**

- 1 Raspberry Pi 3 model B;
- 1 Amazon Echo 1ª Geração;
- 1 Módulo de Relé 5V 2 canais SRD-05VDC-SL-C;
- 1 Micro Servo 9g SG90 TowerPro;
- 1 Módulo WiFi NodeMcu ESP8266 ESP-12;
- 1 Sensor de Umidade e Temperatura AM2302 DHT22;
- Controlador WiFi para Fita de LEDs AL-LC01 Arilux

**Softwares**

- Sistema Operacional Linux Raspbian;
- Servidor Open Source Homebridge;

**Procedimento Experimental**

O primeiro passo foi a configuração da Raspberry, com a instalação do sistema operacional e posterior instalação do servidor, que seu acesso permitirá que se consiga controlar os dispositivos conectados na Raspberry em qualquer local que possua acesso à internet.

A Raspberry foi conectada em um roteador por meio de um cabo de rede, para que ela tenha acesso a internet. Diretamente na Raspberry foram conectados o sensor de umidade e temperatura e o módulo de relé, através de suas portas GPIO (figura 4). O sensor coleta dados de umidade e temperatura enquanto o relé serve para controlar o ventilador em um canal e as caixinhas de som pelo outro.

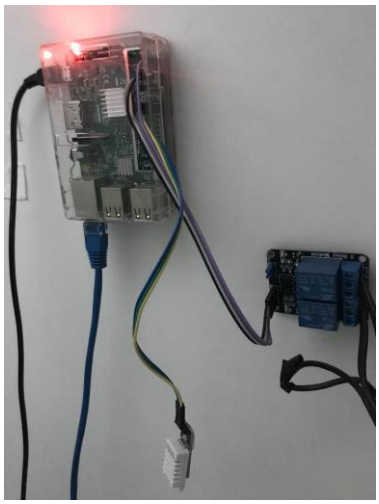


**Figura 4.** A Raspberry em uma caixinha de proteção, conectada em um roteador pelo cabo azul. Conectadas nela, um sensor de umidade e temperatura (componente branco) e o relé (componente azul)

**Figura 5.** O ventilador está conectado no primeiro canal do relé e a caixinha de som ao segundo, através de seus cabos de energia

A automatização do interruptor da lâmpada foi feita através de um micro servo instalado na caixinha do interruptor, aonde o mesmo é conectado num NodeMcu, como mostrado na figura 6, para se ter uma conexão entre o servo e a Raspberry.

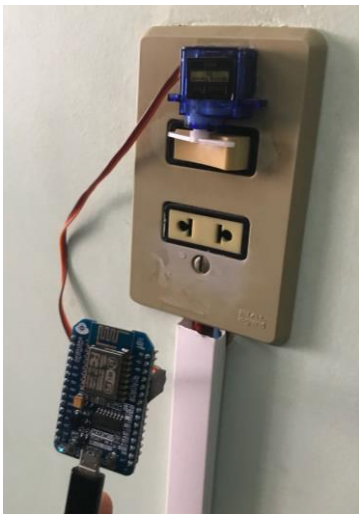


**Figura 6.** Micro Servo controlando um interruptor e conectado a um NodeMcu

Na fita de lâmpadas de led foi instalado um módulo WiFi para fitas de led, que possui a mesma função do dispositivo NodeMcu.

**Figura 7.** Controlador WiFi para fitas de led conectado na saída da fita

Por fim, temos o Amazon Echo, que é um assistente virtual que interpreta comandos de voz. É uma torre que está sempre ouvindo e responde ao comando “Alexa”. Já possui embutido vários componentes, um deles é um módulo WiFi que se comunica com a Raspberry para ativá-la.

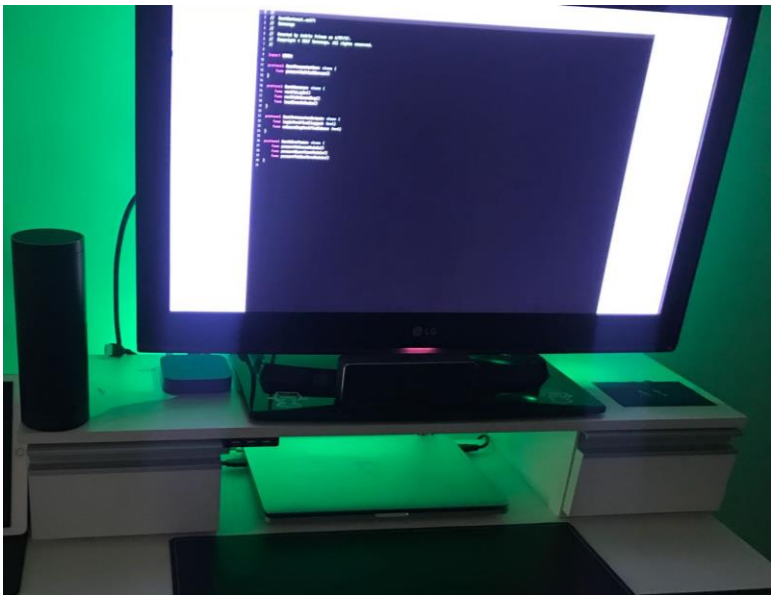


**Figura 8.** Um exemplo de comando da Amazon Echo (torre cilíndrica preta do lado esquerdo). Quando se diz "*Alexa, turn on the led strip*", ela aciona a Raspberry que envia um sinal para o controlador WiFi da fita de led ligando-a (iluminação verde)

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As três primeiras revoluções industriais trouxeram a produção em massa, as linhas de montagem, a eletricidade e a informatização.

A indústria 4.0 se foca na melhoria contínua em termos de eficiência, segurança, produtividade das operações e especialmente no retorno do investimento. São várias as tecnologias e tendências evoluindo e sendo consideradas como os principais pilares da indústria inteligente.

Há grandes desafios para a indústria, principalmente a brasileira, na parte econômica. Essa quarta revolução industrial é uma grande oportunidade para essas industrias. Os impactos sobre a produtividade, a redução de custos, o controle sobre o processo produtivo, a customização da produção, dentre outros, apontam para uma transformação profunda nas plantas fabris.

No exemplo citado da SANEAGO, ela conseguiu se tornar a empresa com menor desperdício de água reconhecida no Brasil com a adoção de técnicas utilizadas na Indústria 4.0. Já na empresa de Cimentos Itambé, por enquanto foi percebido o aumento da produção de cimento por meio da automatização.

Com a miniaturização dos componentes eletrônicos e diminuição de custos de fabricação ficou mais fácil o acesso a esses componentes, tanto por parte de pessoas jurídicas como físicas, fazendo com que a automatização se torne um processo mais difundido.

### Automatização da Área de Trabalho

Utilizando um aplicativo chamado Casa que já vem nativo em um produto Apple contendo o sistema operacional iOS 10 ou superior, consegue-se acessar a Raspberry em qualquer local que possua internet, como mostrado na figura 9:

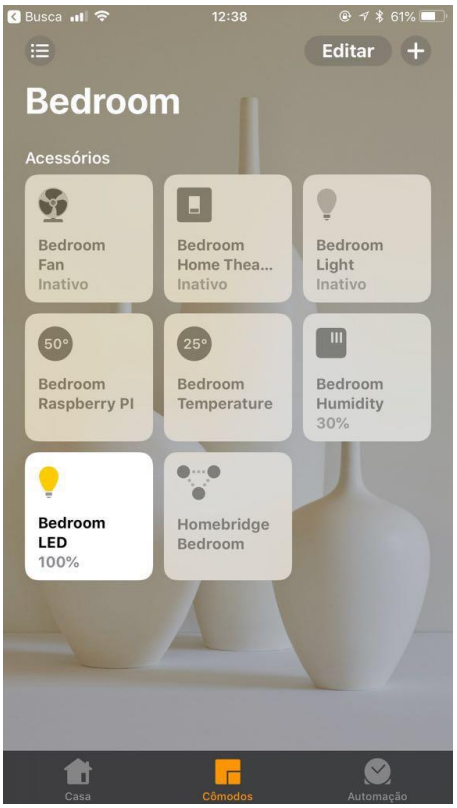



**Figura 9.** Tela de acesso aos componentes instalados na Raspberry

No caso da figura 9, está demonstrando que o ventilador, a caixinha de som e a lâmpada estão desligados. A temperatura atual do processador da Raspberry está em 50ºC, a temperatura do ambiente está a 25ºC e a umidade está 30%. A fita de lâmpadas led está ligada com 100% de sua iluminação. Esse aplicativo além de mostrar a condição dos componentes, também pode controlá-los.

O próximo passo da automatização da área de trabalho é a compra de um umidificador de ar para que quando o sensor de umidade apontar um valor de 50% ou menos, ativar esse umidificador.

## CONCLUSÃO

Com a melhoria da tecnologia, consegue-se criar diferentes tipos de dispositivos que conseguem se comunicar entre si, sendo esse o pilar da Internet das Coisas (IoT). Essas tecnologias também podem ser utilizadas em indústrias, fazendo com que os equipamentos se comuniquem mutualmente e também possam ser controlados a distância, sem que o operador esteja fisicamente no mesmo local do equipamento.

Essa fusão de tecnologias trouxe melhorias ao processo de produção, com maior volume, menor desperdício e maior qualidade, já que todo o processo e equipamentos estão sendo acompanhados em tempo real.

Um dos problemas que deve ser enfrentados tanto pela Industria 4.0 e Internet 4.0 é a mão de obra qualificada, já que essas são tendências recentes e o atual processo de ensino não oferece as competências necessitadas.

A operação de automatização da área de trabalho proposta como exemplo mostrou que com um pouco de conhecimento e acesso a poucos componentes eletrônicos se mostrou eficaz. Infelizmente a maior parte dos passos para chegar a automatização veio de conhecimento obtido em outros países, em outras línguas.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Núcleo de Robótica Pequi Mecânico pela oportunidade de ser uma participante desse grupo, tendo assim contato com a robótica e as novas tecnologias empregadas atualmente.

Agradeço ao Alliston Carlos pela confiança e que se tornou o meu parceiro de automatização/IoT, permitindo fazer experiências em seu espaço pessoal.

## REFERÊNCIAS

Alexandre, I. R., 2017, Nó IIoT para dispositivos legados. 25/07/2018 <http://www.politecnica.pucrs.br/conclusao/files/20172-isaac-da-rosa-alexandre-VOLUME-2614.pdf>

Atzori, L., Iera, A., Morabito, G., 2010, The internet of things: A survey. 12/08/2018. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128610001568>

Bassi, L., 2017, Industry 4.0: Hope, hype or revolution?, IEEE. Research and Technologies for Society and Industry (RTSI), 2017 IEEE 3rd International Forum on. [S.l.], 2017. p. 1–6.

Faccioni Filho, M., 2016, Internet das Coisas: livro digital. Palhoça, UnisulVirtual, 2016. 12/08/2018 <https://www.researchgate.net/profile/Mauro_Fazion_Filho/publication/319881659_Internet_das_Coisas_Internet_of_Things/links/59c038d5458515e9cfd54ff9/Internet-das-Coisas-Internet-of-Things.pdf>

Lasi, H., 2014, Industry 4.0. Business & Information Systems Engineering, Springer, v. 6, n. 4, p. 239–242, 2014.

Steinmetz, C., 2018. Uma abordagem para a Integração de Sistemas Industriais Aplicando o Conceito de Internet das Coisas e de Modelos Semânticos no Contexto da Indústria 4.0, Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, BR-RS, 2018.

Perasso, V., 2016, O que é a 4ª revolução industrial - e como ela deve afetar nossas vidas. 11/08/2018 <https://www.bbc.com/portuguese/geral-37658309>

Portal Tratamento de Água, 2018, Goiás é o Estado brasileiro com menor índice de perdas de distribuição de água. 11/08/2018. <https://www.tratamentodeagua.com.br/goias-menor-indice-de-perdas/>

SANEAGO, 2016, Com tecnologia própria, Saneago monitora abastecimento em 225 municípios goianos. 11/08/2018. <http://www.saneago.com.br/2016/noticias.html?id=743&origem=index>

Santos, A., 2018. Indústria 4.0 está pronta para atuar na produção de cimento. 11/08/2018. <http://www.cimentoitambe.com.br/industria-4-0-esta-pronta-para-atuar-na-producao-de-cimento-2/>

Silva, L. J., 2017, Internet das Coisas. Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade do Sul de Santa Catarina, BR-SC, 2017.

Wollschalaeger, M., Sauter, T., Jasperneite, J., 2017, The Future of Industrial Communication: Automation Networks in the Era of the Internet of Things and Industry 4.0. IEEE Industrial Electronics Magazine (Volume: 11, Issue: 1, March 2017).

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

A autora é a única responsável pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção ‘área de conhecimento do trabalho’.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
(X) Automação Industrial
( ) Energia
( ) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

# PROTOTIPAGEM DE UM EQUIPAMENTO PARA AUTOMAÇÃO DO ABASTECIMENTO E CONTROLE DE ARMAZENAMENTO DE GRÃOS EM SILOS

**Isadora Ferreira Caixeta; Murilo Caixeta Machado; Rodrigo Hiroshi Murofushi**
Centro Universitário de Patos de Minas
R. Major Gote, 808 - Caiçaras, Patos de Minas - MG, 38700-207
isadorafcaixeta@unipam.edu.br

**RESUMO:** O projeto consiste no desenvolvimento de uma tecnologia que forneça um funcionamento automatizado aos silos de estocagem, realizando o controle de nível de grãos em seu interior em busca de conseguir um processo com maior qualidade, fornecendo mais comodidade e melhores qualidades de trabalho aos funcionários do local, além do foco na economia quanto à energia e desgaste de equipamentos.

**Palavras-Chave:** Agricultura, Automação, Silo.

***ABSTRACT:*** *The project consists in the development of a technology that provides an automated operation of storage silos, performing grain level control in the interior in order to achieve a process with higher quality, providing more comfort and better working qualities to the employees of the working station, as well as the focus on energy savings and equipment wear.*

***Keywords:*** *Agriculture, Automation, Silo.*

## INTRODUÇÃO

No início dos anos 60, a região central do Brasil passou por uma série de modificações na zona rural. As tecnologias aplicadas ao campo, alimentadas pelo aumento da disponibilidade de matéria prima e de fontes energéticas, proporcionaram uma evolução na forma de produção e na organização produtiva rural como um todo. Com a implantação de máquinas para facilitar e até mesmo automatizar várias etapas do plantio, cultivo e colheita, a indústria rural se tornou mais produtiva e eficiente (MELO, 2005).

Com o passar do tempo os agricultores passaram a ver os resultados do seu investimento, uma simples máquina era capaz de substituir o trabalho de dezenas de operários, gerando maior produtividade e consequentemente lucro. Ao passo que como demonstrado por Nunes (2007), nos últimos anos vivenciamos, em âmbito mundial, um êxodo rural constante, ou seja, uma migração da população rural para a zona urbana; que por sua vez implica numa menor disponibilidade de mão de obra no setor agrário. Porém, não obstante a esse êxodo, a produção rural tem crescido cada vez mais e hoje supera em mais que o dobro a produção da década de 60, como pode ser analisado na Fig (1):

| Produto | 1961 | 1970 | 1980 | 1990 | 2000 | 2005 | Var. % 2005/1961 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Arroz | 215.654.697 | 316.384.298 | 396.871.255 | 518.229.077 | 599.097.676 | 618.440.644 | 186,8 |
| Cana-de-açúcar | 447.977.522 | 608.616.105 | 734.589.630 | 1.053.280.735 | 1.252.291.571 | 1.291.685.924 | 188,3 |
| Carnes (total) | 71.343.133 | 100.623.729 | 136.678.927 | 179.939.905 | 235.096.410 | 265.428.707 | 272,0 |
| Feijão | 11.228.313 | 12.629.727 | 13.711.771 | 17.449.341 | 16.859.908 | 18.747.741 | 67,0 |
| Fumo | 3.573.815 | 4.663.176 | 5.258.295 | 7.137.437 | 6.678.927 | 6.564.017 | 83,7 |
| Laranja | 15.946.492 | 24.922.858 | 40.004.524 | 49.654.470 | 64.147.270 | 59.672.201 | 274,2 |
| Leite (mil litros) | 344.185.940 | 391.758.948 | 465.559.150 | 542.533.887 | 579.614.725 | 629.101.719 | 82,8 |
| Milho em grão | 205.004.683 | 265.831.145 | 396.623.388 | 483.336.300 | 592.790.116 | 701.666.160 | 242,3 |
| Soja em grão | 26.882.808 | 43.696.887 | 81.039.568 | 108.453.156 | 161.406.339 | 214.347.289 | 697,3 |
| Trigo | 222.357.231 | 310.741.644 | 440.204.101 | 592.309.008 | 586.059.624 | 629.566.041 | 183,1 |

**Figura 1.** Tabela de produção mundial dos principais produtos agropecuários entre 1961 e 2005 em toneladas (FAO, 2006).

Para que esta tendência de produção continue crescendo à uma taxa constante é necessário investir cada vez mais no projeto de maquinários e tecnologias capazes de automatizar processos inerentes as atividades agrícolas (EBERHARDT; VOLLRATH, 2016). Com essa necessidade, um processo pouco explorado e trabalhado é o de silagem de grãos, que em vários locais, ainda encontra-se sendo executado de maneira manual e pouco eficiente. Um exemplo de silo pode ser observado a seguir, na Fig (2).

**Figura 2.** Silos de estocagem de grãos

Para armazenamento de grãos, biomassa, cereais e outros materiais, utiliza-se grandes silos que fazem o estoque do material ainda a granel, com a finalidade de armazená-lo ou realizar algum processo intermediário. Durante o processo de silagem, é necessário realizar um controle de nível de material no interior do silo com o intuito de evitar uma sobrecarga, essa que gera uma parada forçada do equipamento de transporte ainda carregado, o impossibilitando de recomeçar e na maioria das vezes acarretando na necessidade de descarregar a esteira ou elevador de forma manual, agregando ainda mais gastos ocasionados por este problema comum a todos os silos (BERRIE, 2013).

É neste contexto que o presente artigo tem como objetivo: melhorar o processo de controle dos materiais contidos nos silos, através da prototipagem de um dispositivo que consiga, de forma segura e eficiente, controlar o processo de abastecimento e armazenamento dos grãos, haja visto que o processo manual além de acarretar em despesas relativas a atraso e mão de obra, ainda apresenta um risco aos trabalhadores envolvidos, gerando insalubridade.

## METODOLOGIA

São muitos os fatores que se deve levar em consideração na hora de se projetar uma máquina. Alonço (2004) lista alguns destes fatores: funcionalidade, segurança, confiabilidade, facilidade de montagem e manutenção dentre várias outras. Sendo assim, no decorrer deste artigo, foi averiguado o padrão de qualidade desejado para o produto desenvolvido e implementado a sua adequação junto as normas técnicas e regulamentadoras vigentes no país, afim de garantir o sucesso do mesmo.

Para esse artigo, foram utilizados diferentes tipos de pesquisa, sendo elas: pesquisa bibliográfica, de campo e experimental. Após o tratamento dos dados colhidos em ambas as pesquisas, foi criado o protótipo de um equipamento de silagem.

### Pesquisa Bibliográfica

Os silos, por se tratarem de um ambiente enclausurado e de grandes dimensões, apresentam riscos consideráveis aos trabalhadores. Riscos esses, que devem ser levados em consideração e remediados durante o projeto de um equipamento que atue nesse ambiente.

No Brasil a regulação de segurança vigente são as Normas Regulamentadoras (NR's) cuja aplicação é obrigatória pelas empresas privadas e públicas e pelos órgãos públicos da administração direta e indireta, bem como pelos órgãos dos Poderes Legislativo e Judiciário, que possuam empregados regidos pela Consolidação das Leis do Trabalho – CLT (SILVA et al, 2017).

Estas normas, são, por sua vez, subdivididas em índices. A este artigo as que melhor competem ser explanadas são as: NR-33 por se tratar de um espaço confinado, NR-35 que disserta sobre o trabalho em altura, a NR-10 que trata instalações e serviços que envolvam eletricidade e a NR-12 o qual lista normas referente a segurança no trabalho em máquinas e equipamentos (SAMPAIO, 1998).

Além da necessidade de regular o equipamento nas normas de segurança é necessário também projetar e adequar o mesmo a uma determinada norma técnica. Entende-se por normas técnicas, um conjunto de documentos, geralmente compilados por uma organização oficial, que padroniza, estabelecendo regras e diretrizes para determinado produto, processo, material ou serviço (KOPPEL, 2011). Quanto ao Brasil as normas que se aplicam são as propostas pela Associação Brasileiras de Normas Técnicas, ABNT (MARSDEN, 2014).

### Pesquisa de Campo

A melhor forma de se iniciar o projeto de um equipamento é analisar o local onde o mesmo será aplicado, entender as necessidades das indústrias envolvidas e compreender a logística envolta na atuação do mesmo (SILVA et al, 2017).

Com essa finalidade foi analisado o problema de armazenamento em silos instalados e em funcionamento, através de visitas técnicas as propriedades agrícolas da região do Alto Paranaíba em Minas Gerais. A metodologia utilizada durante a visita técnica se deu como: entrevista a gerência, entrevista aos operários, análise dimensional dos equipamentos e infraestrutura do silo e análise de banco de relatórios de falhas. Através dessa metodologia foi possível ter uma visão geral do problema a ser estudado ao abranger tanto o conhecimento estratégico e financeiro, explanado pela gerência, quanto dos problemas enfrentados pelos operários no exercício de seu ofício. Desta forma foi possível criar uma visão muito mais ampla e integral das dimensões e funcionalidades que o equipamento à ser projetado deveria ter.

**Pesquisa Experimental**

Com base nos resultados obtidos por meio da visita técnica, foram utilizados softwares CAD, CAE e CAM, ferramentas computacionais estas, cujo objetivo é auxiliar o engenheiro, a desenhar, validar, testar e manufaturar o produto (NARAYAN, 2008). Com intuito de conseguir otimizar o projeto, ao analisar as dimensões e funcionamento do projeto em ambiente virtual, tais métodos computacionais proporcionaram economia de verba e tempo que seria gasto remediando erros em um protótipo físico.

Em seguida ao projeto assistido por computador, se deu a reprodução em escala reduzida do equipamento, em caráter de prototipagem. Com a estrutura metálica pronta foi feito a montagem dos componentes auxiliares e eletrônicos, assim como da programação responsável por automatizar o processo de estocagem, ao processar as informações colhidas pelos sensores

Para o controle de todo o processo, o Arduino foi utilizado como plataforma de integração entre os motores, sensores e o programa desenvolvido. A programação foi feita em linguagem C++, para receber a leitura dos valores enviados pelos dois sensores e, de acordo com estes, manda um sinal para os relés com objetivo de ligar ou desligar os motores.

O fluxograma abaixo representa o raciocínio do programa que o Arduino executa.

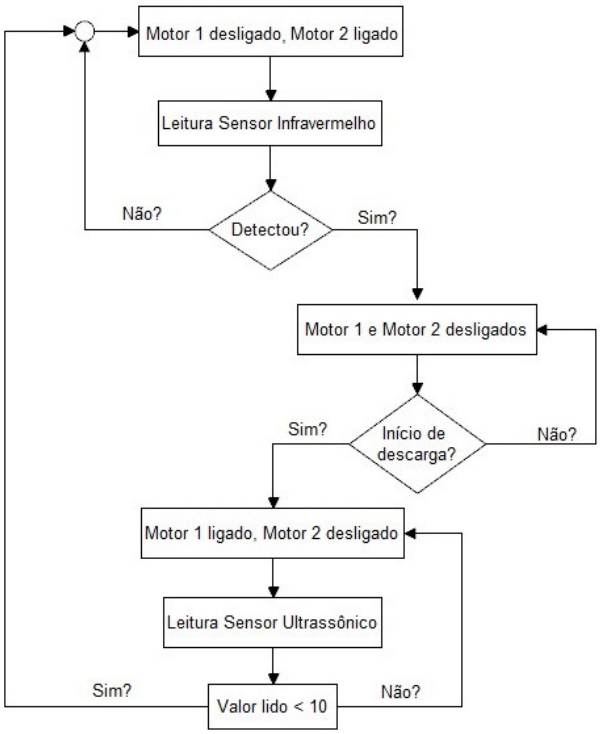



**Figura 3.** Fluxograma que mostra a lógica de funcionamento do sistema

**RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Foi comprovado, por relato dos gerentes operacionais dos silos, que há uma necessidade constante de interromper o maquinário de abastecimento, afim de que um funcionário verifique, de forma manual, o nível de preenchimento. Essa ação além de atrasar o processo de abastecimento, gera riscos aos funcionários.

A partir da exposição de tal problemática, pelos colaboradores foi-se projetado o equipamento e dimensionados seus componentes, testando-os e validando os conceitos da teoria, como aplicabilidade e as instalações eletrônicas.

Baseando-se na pesquisa bibliográfica e experimental para a criação do protótipo, foi-se utilizado, conforme ilustrado na Fig (4), aço 1020 para a construção da estrutura do silo e de dois recipientes: o de alimentação e o de armazenamento. Para a simulação do processo de transporte, o grão utilizado no experimento foi a soja.

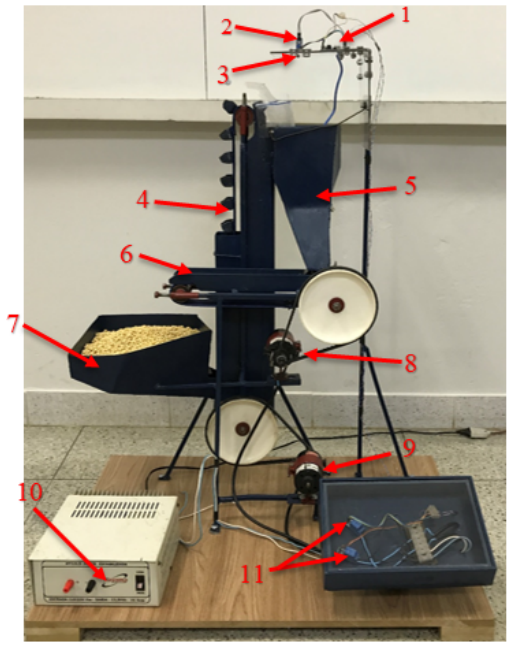



**Figura 4.** Protótipo e seus dispositivos

Portanto, identificando cada componente utilizado pela numeração indicada na Figura 4, temos:

1. Arduino UNO;
2. Sensor infravermelho;
3. Sensor Ultrassônico;
4. Elevador de caneco;
5. Recipiente 1L (simula o silo);
6. Esteira transportadora;
7. Recipiente 3L (simula o local de carga e descarga);
8. Motor 1 (promove o funcionamento da esteira transportadora);
9. Motor 2 (promove o funcionamento do elevador de caneco);
10. Fonte alimentadora 12V.

O transporte do grão se deu por uma esteira, passando posteriormente por um elevador de caneco, para tais movimentos necessitou-se da utilização de dois motores, um para cada equipamento, sendo o controle de ativação e desativação destes realizado através de relés. O sistema de controle e os sensores foram posicionados no topo do recipiente de armazenamento, para a coleta de dados. Segundo Boumans (1985), o sensor ultrassônico, por ser um equipamento que não exige contato com o material, fornece uma melhor leitura do nível limite de materiais sólidos.

O processo executado no protótipo foi projetado de forma a obter um ciclo infinito, onde o grão sai da alimentação, se encaminha até a estocagem e, no momento de descarregar, a esteira leva o grão de volta ao recipiente de alimentação, simulando dessa forma a realidade continua de armazenagem da indústria.

Sendo o equipamento controlado por um micro controlador, este irá ativar ou desativar os motores de acordo com o nível do grão que será controlado pelos sensores. Evitando-se desta forma o desperdício de material e o monitoramento presencial de um funcionário, que pode ser alocado para uma função produtiva.

Como uma melhoria do processo, o sensor ultrassônico informa quando o nível estiver próximo ao máximo, para que a rosca sem fim pare, cortando o fornecimento de soja ao elevador, com o elevador ainda em funcionamento, ao atingir o nível máximo do silo, o elevador está vazio, evitando problemas de sobrecarga no sistema de partida do silo, assim, houve um ganho de tempo e uma menor manutenção das correias do motor do elevador de caneco. İşiker e

Canbolat (2009) e Yigit (2018), relatam em suas pesquisas a importância de uma medição apurada do nível de material no silo, ao colher e processar corretamente os dados gerados pelos sensores.

## CONCLUSÃO

O protótipo executou o controle do estoque como previsto, sendo possível manter sempre o silo abastecido sem o risco de ocorrerem derramamentos ou paradas inesperadas por superlotação, acarretando assim, em um menor esforço por parte dos motores e, consequentemente, um menor desgaste dos mesmos e uma economia de energia, além de proporcionar maior segurança aos colaboradores dos silos, ao executar uma tarefa, que antes, era feita manualmente e gerava insalubridade aos trabalhadores, por seu risco inerente.

Com o sucesso do protótipo infere-se a eficiência da implementação de um maquinário de igual configuração e tamanho real. Tal projeto consegue alcançar seu objetivo ao conseguir projetar um equipamento de grande dimensão e complexidade, em uma escala muito menor, poupando assim, um grande investimento.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu querido companheiro Hugo por acreditar e principalmente por fazer acontecer e realizar um sonho. Sem a sua determinação, conhecimento e apoio incondicional não haveria, nem a possibilidade, de finalização deste. Ao meu colega Murilo Caixeta e aos mentores Rodrigo Hiroshi e Janaína Aparecida pela confiança e conhecimentos repassados. Ao curso de Engenharia Mecânica pela abertura de espaço e suporte para a realização do congresso.

## REFERÊNCIAS

Alonço, A. S. et al., 2004, “Metodologia de projeto para a concepção de máquinas agrícolas seguras”.

Berrie, P.G., 2013, “Sensors for automated food process control: an introduction”. Robotics and Automation in The Food Industry, [s.l.], p.36-74.

Boumans, G., 1985 “Silo Automation and Controls”. In: Developments in Agricultural Engineering, 4. ed. [s. l.], Elsevier, Cap. 9. p. 367-382.

Eberhardt, M., Vollrath, D., 2016, “The Effect of Agricultural Technology on the Speed of Development”, World Development, [s.l.], v. 109, p.483-496.

FAO – Food and agriculture organization, 2006, “The world agricultural production”. 14 Julho 2018 <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>.

İşiker, H.; Canbolat, H. , 2009. “Concept for a novel grain level measurement method in silos”. Computers And Electronics In Agriculture, [s.l.], v. 65, n. 2, p.258-267.

Koppel, Moshe; Schler, Jonathan; Argamon, Shlomo. Authorship attribution in the wild. Language Resources and Evaluation, v. 45, n. 1, p. 83-94, 2011.Marsden, A., Shahtout, A., 2014, “International Organization for Standardization”. In: Clinical Laboratory Management, Second Edition. American Society of Microbiology, p. 447-450.

Melo, R. F., 2005, “Análise do desenvolvimento rural na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba”. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Economia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Narayan, K. L., 2008, “Computer Aided Design and Manufacturing”. New Delhi, Prentice Hall of India.

Nunes, S. P. , 2007, O desenvolvimento da agricultura brasileira e mundial e a idéia de Desenvolvimento Rural. “Boletim eletrônico, DESER–Departamento de Estudos Socioeconômicos Rurais”, p. 1-15.

Sampaio, J. C. A., 1998,Manual de aplicação da NR 18. São Paulo: Pini.

Silva, H. C. L., 2017 - v. 3, n. 3 (2017), “Estudo da Adaptação de uma Indústria de Estrutura Metálicas à NR-18”: Revista CENAR 2017 ISSN 2525-6424

Vilela, P. S. C., Vidal, F. J. T., 2003, Automação Industrial. “Redes Para Automação Industrial”. Natal, p. 1-5.

Yigit, E., 2018, “A novel compressed sensing based quantity measurement method for grain silos”. Computers And Electronics In Agriculture, [s.l.], v. 145, p.179-186.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

O autor é o único responsável pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção ‘área de conhecimento do trabalho’.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
(X) Automação Industrial

( ) Energia
( ) Fabricação Mecânica e Materiais
( ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

# *Gestão de Manufatura*

# Análise de viabilidade econômica atrelada a engenharia de manutenção para instalação de melhorias em equipamentos: estudo de caso aplicado em uma siderurgia do estado do Pará

**Nomes dos autores: Alex Fagundes Brito; Victor Rodrigues Matos; Isaias de Oliveira Barbosa Junior; Jéssica Pollyanna V.W.Rodrigues; Luiz Allan Pinho Dutra.**
Instituição: Universidade do Estado do Pará; Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará.
Endereço: Folha 17, Quadra 04, Lote Especial, s/n.º - Nova Marabá, PA, 68505-080, Unidade 2, Faculdade de Engenharia Mecânica – Marabá-PA.
E-mail para correspondência: isaiasbjunior@unifesspa.edu.br; jessicapollyanna@unifesspa.edu.br.

**RESUMO:** Na empresa analisada foi identificado que a aplicação da engenharia de manutenção é feita sem as devidas análises podendo comprometer sua produção e aumentando os custos com manutenção. A partir desse problema foram usadas ferramentas, como cálculo de indicadores, entrevista com a equipe de manutenção, dados do histórico dos equipamentos, análise do modo e efeito de falhas, 5 porquês para criar um plano de ação, indicadores de viabilidade econômica para identificar os retornos do investimento e a rede PERT/CPM para verificar se houve ganho de tempo nas atividades. Com a resolução dos cálculos de indicadores econômicos/manutenção e o uso dessas ferramentas foi possível identifica se o investimento foi rentável, quais as adaptações necessárias no plano de manutenção e propor soluções para os problemas em implementações de melhorias para assim conseguir reduzir os custos de manutenção.

**Palavras-Chave**: Engenharia de Manutenção, Melhorias e Viabilidade Econômica.

***ABSTRACT:*** *In the analyzed company it was identified that the application of maintenance engineering is done without due analysis, which can compromise its production and increase maintenance costs. From this problem, tools such as indicator calculation, interview with the maintenance team, equipment history data, mode and effect analysis of failures, 5 why to create an action plan, economic viability indicators to identify investment returns and the PERT / CPM network to verify if there was gain in time in the activities. With the resolution of the calculations of economic indicators / maintenance and the use of these tools it was possible to identify if the investment was profitable, what adaptations were necessary in the maintenance plan and to propose solutions to the problems in implementations of improvements in order to be able to reduce the costs of maintenance.*

***Keywords:*** *Maintenance Engineering, Improvements and Economics Viability.*

## INTRODUÇÃO

Ao falar da importância estratégica da manutenção é importante conceituar o que é manutenção. Para Xenos (1998) manutenção é realizar e assegurar tudo que for preciso para manter os equipamentos desempenhando suas funções para o qual foi projetado, em um nível desejado. Kardec e Nascif (2009) complementam dizendo que manutenção é a garantia de disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos e instalações de modo a atender sistemas produtivos (bens ou serviços), com segurança e preservação do meio ambiente a custos adequados

Segundo Nogueira et al. (2012), quando a manutenção é bem estruturada pode ser considerada uma fonte de lucro e diferencial, pois possibilita ganhos em produtividade, disponibilidade e qualidade. Concomitantemente, surgiu à necessidade de redução na probabilidade de falhas em produtos, o que resultou numa ênfase crescente em sua confiabilidade.

Como também, Kardec & Nascif (2009) dizem que devido a esse ambiente competitivo é preciso que todos tenham a melhoria contínua em mente e que a empresa tem que objetivar a realização das melhores práticas em gestão estratégica da manutenção para garantir a confiabilidade dos equipamentos, onde, ferramentas como FMEA, RCM, benchmarking, metodologia PDCA e TPM auxiliarão para o alcance deste objetivo.

Segundo Francisco (2017), no estado do Pará o extrativismo mineral é a principal atividade econômica. Esse segmento baseia-se na exploração da bauxita, ferro, manganês, calcário, ouro e estanho. O alumínio e o minério de ferro são os principais produtos de exportação.

Com isso, viu-se a oportunidade da instalação de uma usina siderúrgica integrada de fabricação de aços longos com a utilização de uma linha de produção automatizada. A produção de aço é feita através do ferro gusa, que é produzido no alto-forno, depois dessa etapa o ferro gusa no estado líquido vai para a aciaria, onde é feito o refino do aço inserindo

suas principais propriedades, originando o lingote em forma de tarugo que é moldado na laminação, formando os seus principais produtos, como os vergalhões que podem apresentar diversos diâmetros.

Devido possuir um sistema de produção de bateladas (lotes), a manutenção de seus equipamentos é de suma importância para atender a demanda de seus produtos. A empresa adota diversos tipos de manutenção em seus equipamentos e máquinas, como: corretivas planejadas, preditivas, preventivas, detectivas e a engenharia de manutenção, que acompanha os indicadores de manutenção e dar suporte ao pessoal responsável na proposição de melhoria de equipamentos e de novos fluxos de atividades de manutenção.

Com essas dificuldades enfrentadas, torna-se cada vez mais difícil manter-se competitivo. Portanto, é preciso que na linha de produção não ocorra paradas ou quebras de equipamentos inesperadas. Logo, o gerenciamento eficaz da manutenção é de suma importância, pois está diretamente ligado à função produção e ganho de competitividade da organização.

Este trabalho estudou uma empresa siderúrgica no Pará que é a única no ramo de aço laminados na região e vende seu produto para todo o Brasil. O objetivo do projeto é analisar a viabilidade econômica de implantação de melhorias em maquinário com foco na engenharia de manutenção, buscando a redução de custos e perdas de produção. Como também, determinar se os índices de eficiência e disponibilidade da máquina aumentaram ou diminuíram após a melhoria, definir se o investimento é rentável e propor através da análise de dados melhoria no plano de manutenção.

## METODOLOGIA

A abordagem metodológica utilizada para este trabalho foi o estudo de caso. Segundo Cauchick *et al (*2010) o estudo de caso é um tipo de pesquisa com base empírica, em que, investiga um dado fenômeno em contexto real através de uma análise de um ou mais casos, onde as fronteiras entre fenômeno e o contexto não estão claramente definidas. Essa abordagem, de acordo com os mesmos autores permite a ampliação do conhecimento e desenvolvimento de novas teorias.

Os dados coletados em uma pesquisa podem ser primários ou secundários. Os dados do presente estudo são classificados como primários. Para Malhotra (2001), dados primários são aqueles coletados para fins diferentes do problema em pauta e dados secundários são os originados do pesquisador para solucionar o problema da pesquisa.

### Procedimento experimental

Os documentos analisados foram do período entre julho de 2017 e abril de 2018, usados para verificar o histórico de falhas, tempo de operação e gráficos da máquina. Levando em consideração as paradas do equipamento, tempo de manutenção, reparo e troca. Analisou-se os gráficos de vibrações e ruídos, gerados pela equipe de preditiva, mostrando a deterioração da máquina e como esta afetava a vida útil dos componentes da mesma.

As entrevistas foram presenciais não estruturadas visando conhecer o processo de manutenção do equipamento em avaliação, bem como, os problemas relacionados à atividade de manutenção e seus custos. As pessoas envolvidas nestas entrevistas foram: doze mecânicos que são separados em níveis de I a IV de acordo com sua capacitação técnica, um planejador de manutenção formado com pós-graduação em manutenção, que é responsável por planejar e passar as atividades, o líder de área com formação em engenharia de produção e o projetista com formação técnica que são os responsáveis pela melhoria aplicada na máquina Pinch Roll 3 - PR03.

### Ferramentas Aplicadas

Após a coleta de dados foi calculado os indicadores de manutenção - confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade - com esses indicadores pôde-se mostrar e avaliar o desempenho das máquinas e das atividades de manutenção. A disponibilidade é a capacidade de um equipamento estar apto para fazer certa função em um instante ou intervalo de tempo. E a manutenibilidade serve para mostrar se o tempo de reparo planejado é suficiente ou não para a manutenção.

A análise do modo e efeito de falha indicou qual a criticidade do problema, sendo que a que apresenta maior priorização no (NPR) é o que deve ser corrigido primeiro. Assim, essa ferramenta gerou a informação se a aplicação da melhoria foi realmente priorizada corretamente em relação a outras falhas.

As ferramentas de qualidade serviram para o controle e soluções de problemas, o Diagrama de Pareto evidenciou os principais problemas, o Fluxograma mostrou o fluxo das atividades, podendo haver adaptações conforme a exigência da melhoria e o brainstorming que foi usado para desenvolver ideias sobre possíveis modificações no plano de manutenção preventivo e preditivo.

O Método PERT/CPM foi aplicado para poder encontrar o caminho crítico da atividade antes e após a melhoria, a fim de verificar se houve impacto no tempo de manutenção do equipamento. Por se tratar de uma melhoria em implantação, o diagrama da atividade não estará bem estruturado, portanto essa ferramenta foi importante para que não ocorra desperdício de tempo no instante das revisões e preventivas.

Os indicadores de viabilidade econômica utilizados neste trabalho foram referentes à viabilidade de projetos de investimento, onde se gerou através dos dados técnicos do plano de manutenção o fluxo de caixa do projeto de melhoria aplicado na PR03.

Com o fluxo de caixa projetado, elaboraram-se os cálculos de análise de investimento de projetos através dos métodos do Payback, Valor Presente Líquido (VPL) com sua análise de cenários, Taxa Interna de Retorno Simples (TIR), Índice de Lucratividade (IL) e Taxa de Rentabilidade (TR). Através dos resultados obtidos por cada técnica foi definido se a melhoria foi eficiente ou não.

**Equações governantes**

Abaixo, os indicadores mais utilizados em manutenção, que, segundo Kardec e Nascif (2009) dividem-se em indicadores de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade.

Kardec e Nascif (2009) expressam confiabilidade, através da seguinte equação:

$$R\,(t) = e^{-\lambda t} \tag{1}$$

Onde:

R (t) = confiabilidade a qualquer tempo
e = base dos logaritmos neperianos (e = 2,718)
λ = taxa de falhas
t = tempo previsto de operação

Para a obtenção da taxa de falhas (λ), segundo Kardec e Nascif (2009) apresenta a expressão 2:

$$\lambda = \frac{Número\ de\ falhas}{(unidades\ testadas) \times (número\ de\ horas\ de\ teste)} \tag{2}$$

Kardec e Nascif (2009) definem disponibilidade como a capacidade de o item estar disponível para uso, disponibilidade pode ser classificada em três tipos: Disponibilidade inerente; Disponibilidade técnica e Disponibilidade operacional.

$$Disponibilide\ Inerente\ (\%) = \frac{TMEF}{TMEF+TMPR} \times 100 \tag{3}$$

Onde:

TMEF = Tempo médio entre falhas
TMPR = Tempo médio para reparos

Em que:

$$TMEF = \frac{1}{\lambda} \tag{4}$$

$$TMPR = \frac{1}{\mu} \tag{5}$$

$$\mu = \frac{\text{Número de reparos efetuados}}{Tempo\ total\ de\ reparo\ da\ unidade} \tag{6}$$

$$Disponibilidade\ Técnica\ (\%) = \frac{TMEM}{TMEM+TMPR_{Ativo}} \times 100 \tag{7}$$

Onde:

TMEM = Tempo médio entre manutenções.
$TMPR_{Ativo}$ = Tempo médio para reparos – corretivos e preventivos

$$Disponibilidade\ Operacional\ (\%) = \frac{TMEM}{TMEM+TM_P} \times 100 \tag{8}$$

Onde:

$TM_P$ = Tempo médio de paralizações (em inglês MDT – *Mean Down Time*para reparos – corretivos e preventivos (ou em inglês $MTTR_{Active}$ – Mean Time To Repair Active).

Kardec e Nascif (2009) definem manutenibilidade como a probabilidade de realizar o reparo de um equipamento em um determinado tempo t. A equação 7 apresenta tal fórmula:

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \tag{9}$$

Em que:

M (t) = a função manutenibilidade, que representa a probabilidade de que o reparo comece no tempo t = 0 e esteja concluído, satisfatoriamente, no tempo t (probabilidade da duração do reparo).
E = base dos logaritmos neperianos (e = 2,718)
μ = taxa de reparos (número de reparos efetuados / total de horas de reparo do equipamento)
t = tempo previsto de reparo.

O estudo de viabilidade econômico-financeiro deve ser baseado pelos seguintes indicadores financeiros: *Payback*, VPL e TIR. Von e Kochhann (2015) citam os principais critérios de análise de viabilidade empregados sobre o fluxo de caixa do projeto como: O *Payback* determina o período de tempo necessário para que a cooperativa recupere o valor inicialmente investido. A fórmula para o VPL é, segundo Blank e Tarquin (2008) representada pela equação 8.

$$\text{VPL} = \frac{\text{PV0}}{(1+\text{i})^0} + \sum_1^{\text{N}} \frac{\text{CF}}{(1+\text{i})^{\text{N}}} \quad (10)$$

Onde: PV0: Valor do investimento inicial; CF: Valor do fluxo de caixa em um período; N: período; I: Taxa mínima de atratividade.

A Taxa Interna de Retorno (TIR), segundo Mokrzycki (2012) e Blank &Tarquin (2008) é a taxa que zera o VPL, buscando encontrar uma taxa intrínseca de rendimento. “Investimentos onde a TIR é maior que a TMA são considerados rentáveis” .

Segundo Rego (2016), o índice de lucratividade (IL) irá determinar qual projeto é mais lucrativo quando possui VPL’s iguais e mesma taxa de atratividade, sendo que, estes investimentos possuem tamanhos diferentes. A fórmula do índice de lucratividade é demonstrada na equação 9.

$$IL = \frac{\left[\frac{CF_1}{(1+i)^1} + \frac{CF_2}{(1+i)^2} + \cdots + \frac{CFN}{(1+i)^N}\right]}{VPI} = \frac{\sum VP}{VPI} \quad (11)$$

Em que: CF: Fluxo de caixa em um determinado período; N: Período; VPI: Valor do investimento.

De acordo com Leismann (2016) a análise de cenários permite avaliar o comportamento do projeto em diferentes momentos, proporcionando ao tomador de decisão saber a amplitude de viabilidade do projeto de investimento, ou seja, determinar o risco.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A empresa estudada possui metas de produção todo mês. Produz vinte e quatro horas por dia no setor de laminação, a fim de atender a demanda elástica. Através disso, os equipamentos de linha de produção terão que ter um alto grau de disponibilidade, ou seja, quebras mínimas de equipamentos. Isso porque, a quebra de máquinas gera sucatas que atrasam a produção e ocasionam perda de insumos, no caso o tarugo fabricado no setor de aciaria.

O equipamento que passou por melhoria foi o Pinch Roll, um redutor que é acionado por força motriz responsável por dar impulso à barra para que ela chegue ao seu destino final, nele estão presentes três sistemas, o de lubrificação para os rolamentos; o de acionamento que é o que vai receber o movimento que são os eixos, acoplamento e engrenagens; e por último o sistema de ajuste de luz onde se encontra as panelas, discos e buchas.

As falhas que deram ideia para a melhoria foram às falhas nas buchas do sistema de luz responsável por fixar as panelas com os discos no eixo, quando essas buchas não fazem sua função elas desacoplam, ocasionando parada na linha de produção. Notou-se durante o estudo que alguns dos desacoplamentos ocorridos consistiam da forma que era realizada a instalação dessas buchas hidráulicas, devido não ser dada pressão padrão em sua instalação, gerando assim o desacoplamento da mesma.

Após um mês do ocorrido das falhas a liderança da área de manutenção chegou com um projeto elaborado por eles onde os envolvidos eram o líder e o projetista, sem nenhum estudo aprofundado do mesmo, ou seja, sem uma reunião para discutir sobre o projeto com os demais envolvidos, bem como, dados que comprovassem a necessidade da melhoria, analise de viabilidade econômica e se as prioridades dos recursos disponíveis eram realmente necessárias naquele equipamento.

A melhoria foi aplicada na área de equipamentos de retos da siderúrgica, nesta área constam os seguintes equipamentos: o Pinch Roll 5, Pinch Roll 3, Freios de Barra 1 e 2. A média de tempo de setup nessa área (linha de retos) era de três horas devido à dificuldade na retirada dos discos e montagem dos novos à laminar, pois a retirada e montagem dos novos tinha que ocorrer por aquecimento. Este procedimento estava ligado apenas ao equipamento denominado Pinch Roll, em função disso, foi desenvolvido a melhoria para reduzir o tempo de troca (setup) de modo a tornar mais simples a sua manutenção.

Com a aprovação da melhoria foi iniciado o desenvolvimento de protótipo apenas para o Pinch Roll 3 (PR-03) em dezembro de 2017.

Com as informações coletadas sobre o tempo produção da máquina, paradas não programadas, número de falhas que foram necessárias à atuação corretiva, foi calculado os indicadores de manutenção. O histórico de dados emitidos para a realização dos cálculos foi de julho de 2017 a novembro de 2017 que seriam os dados antes da aplicação da melhoria e dezembro de 2017 a abril de 2018 dados após a melhoria. Na realização dos cálculos foram excluídas as horas de paradas preventivas, revisões para pequenos ajustes, tempo de troca de bitola, paradas não relacionadas ao equipamento melhorado, foram excluídas também as paradas elétricas por se tratar apenas de equipamento de funcionamento mecânico, bem como, equipamento parado por tipo de produção (linha de retos ou linha de bobina).

No equipamento antes da instalação do protótipo em um período de 5 meses obteve-se os dados da Tabela 1:

**Tabela 1.** Cálculo de indicadores de manutenção

| | |
|---|---|
| Tempo total de operação (TO) | 2367 horas |
| Tempo de parada (TP) | 12,13 horas |
| N° de Paradas (N) | 6 |

Dando início no cálculo de confiabilidade foi necessário calcular a taxa de falhas (ʎ), conforme a Equação 2, que consiste no número total de falhas do equipamento pelo tempo de total de operação. Com o valor da taxa e através da Equação 1 obteve-se os valores da confiabilidade para 1 dia de produção com apenas a revisão (23 horas), 15 dias (324 horas) e para 1 mês (648 horas).

**Tabela 2**: Cálculo de confiabilidade

| Taxa de falha (ʎ) | Tempo (horas) | R = e^(-ʎt) | Confiabilidade |
|---|---|---|---|
| 0,002547911 | 23 | R=e^(-0,002547911x23) | 0,9430 = 94% |
| 0,002547911 | 324 | R=e^(-0,002547911x324) | 0,4380 = 44% |
| 0,002547911 | 648 | R=e^(-0,002547911x648) | 0,1919 = 19% |

A partir dos dados da Tabela 2, verifica-se uma queda gradativa da confiabilidade devido ao aumento do tempo analisado, como se trata de uma empresa que tem o seu tempo de operação muito elevado à confiabilidade desse equipamento se encontra baixa havendo a necessidade de intervenção para melhorar a confiança desse equipamento.

Como foram utilizadas apenas paradas corretivas calculou-se a disponibilidade inerente (DI) baseando-se na Equação 4 e através do tempo médio entre falhas (TMEF) e o tempo médio de reparos (TMPR). O TMEF é obtido pelo inverso de ʎ e o TMPR calcula-se a partir da divisão do tempo de parada pelo número de falhas. Segue abaixo a Tabela 3 com os resultados dos cálculos realizados.

**Tabela 3**: Resultados obtidos

| TMEF | TMPR | DI |
|---|---|---|
| 392,478 horas | 2,021 horas | 99% |

O tempo médio entre falhas do equipamento foi 392,478 horas e o tempo médio de reparo em caso de parada seria de 2,021 horas para o consertado. A disponibilidade ficou em 99% refletindo o percentual que seria disponível se não houvesse tempo perdido ou paradas.

Além disso, para calcular a manutenibilidade e considerando a Equação 9 foi necessário encontrar a taxa de reparo (μ) junto com o tempo médio de reparo (TMPR), segue abaixo os resultados dos cálculos.

**Tabela 4**: Resultados de manutenibilidade

| Tempo (horas) | Taxa de reparo (μ) | Manutenibilidade |
|---|---|---|
| 2,021 | 6/12,3 = 0,4946 | 63% |
| 4 | 6/12,3 = 0,4946 | 86% |
| 6 | 6/12,3 = 0,4946 | 95% |

Os resultados de manutenibilidade encontrado mostra o percentual de a manutenção ser eficiente naquele intervalo de tempo, durante o intervalo de 2,021 horas o percentual da manutenção ser eficiente é de 63%, no intervalo de 4 horas esse percentual sobe para 86% e aumentando para 6 horas a mesma sobe para 95% mostrando quanto maior esse intervalo, maior é a facilidade para se fazer o reparo.

O Diagrama de Pareto foi usado para priorizar o sistema que mais apresentavam falhas no equipamento Pinch Roll 3. O equipamento possui 3 tipos de sistemas, o de lubrificação, o de acionamento e o de ajuste de luz, a melhoria proposta se encontra no sistema de ajuste de luz, então foi feito o Pareto de falhas entre esses sistemas para verificar se o sistema melhorado foi realmente o correto.

Ao analisar o diagrama de Pareto de maneira macro percebe-se que a ação tomada em cima do sistema de ajuste de luz foi correta e o setor onde se encontra a melhoria (corte a quente) situa-se na posição 6, isso mostra que os recursos presentes na empresa deveriam ser investidos no que possuem maior grau de falhas, ou seja, bloco e intermediário. Como pode ser visto na Figura 1.

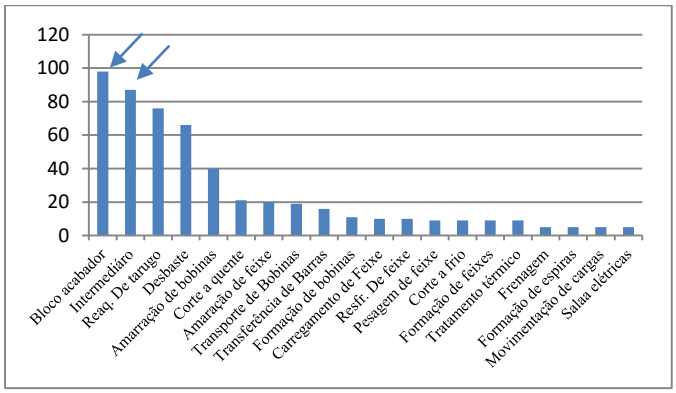



**Figura 1**: Área de laminação

Foi feito a análise dos modos de falha e seus efeitos – FMEA, essa ferramenta foi usada para determinar a causa e efeito da falha encontrada no equipamento Pinch Roll 3 onde foi instalado a melhoria. O índice de risco (NPR) foi encontrado a partir de entrevistas com os mecânicos responsáveis pela inspeção no equipamento, para identificar a frequência, gravidade e detectabilidade com as notas atribuídas a cada um foi calculado o NPR da falha.

Logo, a falha que deu origem a melhoria foi a seguinte: Desacoplar a bucha - quando ocorre toda linha de produção para e pode danificar o sistema de acionamento. Como é mostrado na Tabela 5 abaixo, a frequência para ocorrência de falha de bucha hidráulica, em uma escala de 0 a 9, é nota 5, considerada pequena, pois o número de falhas ocorridas foram poucas; a gravidade da falha é nota 9, o que é extremamente grave isso ocorre por que a linha de produção e obrigada a parar e se ocorrer o desacoplamento da bucha ela pode estar ferindo algum colaborador por se tratar de um equipamento de alta rotação  e a detectabilidade é nota 10, improvável, pois não há como prever quando essa bucha irá perder a pressão. Com isso, o cálculo do NPR é feito multiplicando-se esses valores, o que gera um valor de 450, que é um índice muito alto.

**Tabela 5**: Classificação de falhas com base em Índice de Risco (NPR)

| Componente do NPR | Classificação | Peso |
|---|---|---|
| Frequência da ocorrência (F) | Improvável | 1 |
| | Muito Pequena | 2 a 3 |
| | Pequena | 4 a 6 |
| | Média | 7 a 8 |
| | Alta | **9 a 10** |
| Gravidade da Falha (G) | Apenas perceptível | 1 |
| | Pouca importância | 2 a 3 |
| | Moderadamente grave | 4 a 6 |
| | Grave | **7 a 8** |
| | Extremamente grave | 9 a 10 |
| Detectabilidade (D) | Alta | 1 |
| | Moderada | **2 a 5** |
| | Pequena | 6 a 8 |
| | Muito Pequena | 9 |
| | Improvável | 10 |
| Índice de Risco (NPR) | Baixo | 1 a 50 |
| | Médio | 50 a 100 |
| | Alto | 100 a 200 |
| | Muito Alto | **200 a 1000** |

Portanto, a causa raiz foi analisada com as seguintes perguntas e respostas: 1. Por que parou o Pinch Roll 3? Porque a bucha desacoplou; 2. Por que a bucha desacoplou? Porque a bucha perdeu a pressão; 3. Por que a bucha perdeu a pressão? Porque houve erro no projeto; Por que houve erro no projeto? Porque não foram testadas a longo prazo.

Então a ação a ser feita foi fazer um melhor estudo na aquisição de novos equipamentos, propor um novo método de fixação dos discos mais confiável, pois as buchas necessitam de um ambiente mais limpo para que não ocorra

a contaminação do sistema hidráulico além de atrasar o tempo de troca de discos. Essa melhoria deve ser bem estruturada levando a opinião de todos os envolvidos com o equipamento para que haja o mínimo de erros possíveis.

Para identificar o caminho crítico e modificações ocorridas no fluxo de atividades, devido a aplicação da melhoria, foram desenvolvidas as redes PERT/CPM. Segue abaixo a Tabela 6 com as letras referentes a cada atividade a ser realizada pelo mecânico.

**Tabela 6**: Fluxo de atividades

| Atividade | Tipo de atividade |
|---|---|
| A | Limpar discos e buchas |
| B | Montar discos nas buchas |
| C | Lavar peças para a área |
| D | Aquecer discos |
| E | Montar discos novos na panela |
| F | Bloquear equipamento |
| G | Desmontar tampa da panela |
| H | Sacar discos desgastados |
| I | Limpar panela |
| J | Aplicar graxa na panela |
| L | Montar as tampas com discos novos |
| M | Ajustar luz dos discos |
| N | Desbloquear equipamento |

Despois de analisar as etapas da atividade foram cronometradas cada uma delas em minutos para desenvolver a rede PERT/CPM. Segue abaixo a rede na Figura 2.

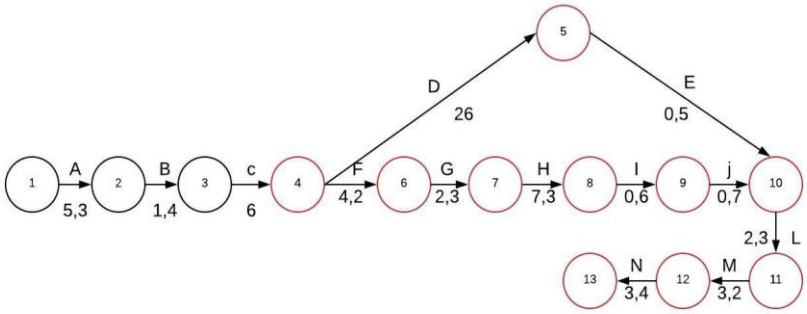



**Figura 2**: Rede PERT/COM – Troca de discos Pich Roll 3 antes da melhoria

A rede mostra que o caminho crítico são as atividades A, B, C, D, E, L, M e N levando um tempo de 48 minutos. Os círculos em vermelho indicam as atividades que só podem ser feitas com o equipamento parado. Contabilizando somente as atividades do caminho crítico em vermelho esse tempo de atividade cai para 35,4 minutos.

Analisando a rede após a aplicação da melhoria percebeu-se que algumas atividades foram excluídas reduzindo para um total de 11, como segue na Tabela 7 abaixo:

**Tabela 7**: Fluxo de atividades reduzidas

| Atividade | Tipo de atividade |
|---|---|
| A | Limpar discos e buchas |
| B | Aquecer discos |
| C | Montar discos novos na panela |
| D | Levar peças para a área |
| E | Bloquear equipamento |
| F | Desmontar tampa da panela |
| G | Montar as tampas com discos novos |
| H | Desbloquear equipamento |

| | |
|---|---|
| I | Ajustar luz dos discos |

Verificando as etapas das atividades com a melhoria já instalada foi cronometrado o tempo em minutos novamente e montado a rede PERT/CPM. Exposto na Figura 3, abaixo:

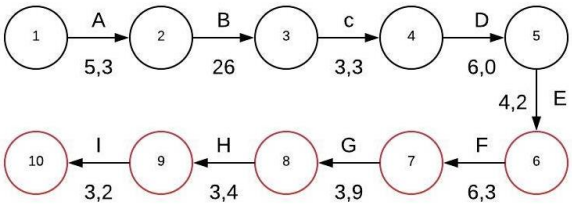



**Figura 3**: Rede PERT/CPM Atualizada – Troca de discos após a melhoria

Percebe-se que toda a rede ficou crítica e que houve a exclusão de 4 atividades em relação à primeira rede, o tempo total em minutos ficou em 63 minutos, sendo que os círculos em vermelhos são as atividades que irão ser feitas quando o equipamento estiver parado. Contabilizando somente o caminho em vermelho a atividade cai para 16,8 minutos.

O estudo de viabilidade econômica seguiu quatro etapas: 1. Definir o tempo e o valor de ganho de produção com a melhoria; 2. Determinar o valor de investimento do projeto; 3. Construir o fluxo de caixa; 4. Cálculo e análise dos indicadores de viabilidade econômica.

A etapa 1 ocorreu com base nos dados disponibilizados pelo setor de manutenção referente ao número de paradas programadas no equipamento (câmbios) dentro do mês no ano de 2017 e do setor de PCP com a informação do preço do vergalhão e a quantidade média produzida por hora pela área onde está sendo realizado a melhoria.

Com o auxílio dos dados do setor de engenharia de manutenção foi possível desenvolver a Tabela 8 que informa o número de paradas (câmbios) realizadas no equipamento em questão para manutenção e a sua respectiva projeção na proposta de melhoria com base no protótipo desenvolvido.

**Tabela 8**: Número de paradas do Equipamento

| Câmbios | Quantidade / Mês (Sem melhoria) | Quantidade / Mês (Com melhoria) |
|---|---|---|
| Janeiro/17 | 4 | 4 |
| Fevereiro/17 | 4 | 4 |
| Março/17 | 4 | 4 |
| Abril/17 | 4 | 4 |
| Maio/17 | 4 | 4 |
| Junho/17 | 4 | 4 |
| Julho/17 | 4 | 4 |
| Agosto/17 | 4 | 4 |
| Setembro/17 | 4 | 4 |
| Outubro/17 | 4 | 4 |
| Novembro/17 | 4 | 4 |
| Dezembro/17 | 4 | 4 |
| Total de Câmbios em 2017 | 48 | 48 |
| Tempo (Min) / Câmbio | 180 | 60 |
| Tempo Total (Minutos) | 8.640 | 2.880 |
| Tempo Total (Horas) | 144 | 48 |
| Tempo Total (Dias) | 6 | 2 |

Com o auxílio da Tabela 8, os dados acima indicam um ganho total de produção no ano de 96 horas (considerando a diferença entre o tempo total de horas sem melhoria igual a 144 horas e o tempo total de horas com melhoria em 48 horas), pois se espera realizar os câmbios em no máximo uma hora (60 minutos) conforme a tabela acima na célula Tempo (Min)/Câmbio da coluna Quantidade/Mês (com melhoria). Segundo dados coletados com a área de PCP da siderúrgica tem-se uma produção 50 toneladas por hora de operação no setor onde se está aplicando a melhoria e que o valor unitário da tonelada recebido no momento é de R$ 200,00, mas que pode variar devido ao mercado.

Caso os dados acima do projeto se mantenham, em um ano a organização terá um ganho de produção de R$ 960.000,00 que é equivalente a R$ 80.000,00 por mês (período de 12 meses), sendo que este foi o único estudo e análise de viabilidade do projeto que a organização realizou para definir se o investimento seria aceito ou não em termos econômicos.

A segunda etapa do estudo de viabilidade consistiu na definição do valor de investimento do projeto de melhoria, ou seja, quanto à empresa terá que abrir mão para realizar o projeto. Através do acompanhamento no desenvolvimento da melhoria elaborou-se um cronograma simples para determinar os custos ocorridos, chegando-se a conclusão de que será preciso R$ 221.995,76. Tal valor contempla o custo com o desenvolvimento do protótipo e o material necessário para aplicação nas demais máquinas que precisarão da melhoria e de peças de reposição para 1 ano. O cronograma é apresentado na Tabela 9.

**Tabela 9**: Cronograma de melhorias

| Cronograma do projeto de melhoria | | | R$ 221.995,76 |
|---|---|---|---|
| Data | Ação Realizada | Responsáveis | Valor |
| Set./17 | Desenvolvimento do protótipo: Desenho | Projetista e Equipe de Manutenção | - |
| Out./17 | | | - |
| Nov./17 | Confecção e orçamento do protótipo | Área de Suprimentos | R$ 12.000,00 |
| Dez./17 | Teste do protótipo e adequações: ocorreu mudança de fabricante para aquisição de material | Equipe de manutenção, área de suprimentos e Projetista. | - |
| Jan./18 | | | |
| Fev./18 | Autorização da diretoria para compra de material para confecção da melhoria para as outras máquinas | Gerente de do setor de Suprimentos e Manutenção | - |
| | Compra de material para aplicação. | Suprimentos | R$ 209.995,76 |
| Mar./18 | - | - | - |
| Abr./18 | Previsão de chegada das peças | - | - |
| Mai./18 | Instalação da melhoria na área de Linhas de Reto | - | - |
| Jun./18 | - | - | - |

Observa-se um fluxo de caixa convencional - uma saída e diversas entradas - e que as técnicas como TIR, VPL, IL e TR são válidas para análise da mesma.

Em função disso, realizou-se os cálculos de viabilidade econômica utilizando-se de indicadores como VPL, TIR, PGTO, IL,TR, Payback simples e Payback descontado, a análise de cenários do VPL para saber quais cenários o investimento permaneceria viável, e estudo de correlação para determinar o tipo de relação dos cenários de investimento em relação a taxa de juros, sendo essa, a 4° etapa do estudo de viabilidade do projeto.

O cálculo de viabilidade econômico-financeira do projeto foi realizado com apoio do Office Excel 2010. Ressalta-se que a taxa de atratividade (TA) utilizada neste trabalho foi de 10% que é a taxa média aplicada no mercado, pois a organização não disponibilizou o seu custo capital, que segundo Leismann (2016) é o retorno mínimo que ela precisa do investimento. A Tabela 10 apresenta o resumo dos cálculos dos indicadores de viabilidade.

**Tabela 10**: Cálculo de Viabilidade

| T | Valores do fluxo de Caixa | Payback (simples) | Payback descontado | VP |
|---|---|---|---|---|
| 0 | -R$ 221.995,76 | -R$ 221.995,76 | -R$ 221.995,76 | -R$ 221.995,76 |
| 1 | R$ 80.000,00 | -R$ 141.995,76 | -R$ 149.268,49 | R$ 72.727,27 |
| 2 | R$ 80.000,00 | -R$ 61.995,76 | -R$ 83.152,78 | R$ 66.115,70 |
| 3 | R$ 80.000,00 | R$ 18.004,24 | -R$ 23.047,60 | R$ 60.105,18 |
| 4 | R$ 80.000,00 | R$ 98.004,24 | R$ 31.593,48 | R$ 54.641,08 |
| 5 | R$ 80.000,00 | R$ 178.004,24 | R$ 81.267,18 | R$ 49.673,71 |
| 6 | R$ 80.000,00 | R$ 258.004,24 | R$ 126.425,10 | R$ 45.157,91 |
| 7 | R$ 80.000,00 | R$ 338.004,24 | R$ 167.477,75 | R$ 41.052,65 |
| 8 | R$ 80.000,00 | R$ 418.004,24 | R$ 204.798,34 | R$ 37.320,59 |
| 9 | R$ 80.000,00 | R$ 498.004,24 | R$ 238.726,15 | R$ 33.927,81 |
| 10 | R$ 80.000,00 | R$ 578.004,24 | R$ 269.569,61 | R$ 30.843,46 |
| 11 | R$ 80.000,00 | R$ 658.004,24 | R$ 297.609,12 | R$ 28.039,51 |
| 12 | R$ 80.000,00 | R$ 738.004,24 | R$ 323.099,59 | R$ 25.490,47 |

De acordo com indicadores calculados, em uma taxa de 10% o projeto será economicamente viável, pois o VPL foi maior que 0, taxa de rentabilidade está maior que 1, índice de lucratividade maior que 1, TIR maior que a TA (taxa de atratividade). Quanto ao prazo de retorno do investimento, ocorrerá para o Payback simples no terceiro período e para Payback descontado no quarto período. Sendo que o projeto se pagará em 12 parcelas de R$32.580,83 pelo sistema

price. Observa-se que dos indicadores gerados o índice de lucratividade foi igual a 245,54% isso demonstra que o projeto é altamente lucrativo, pois de acordo com Assaf Neto (1992) o IL mostra quanto a empresa consegue apurar de volta para cada 1 real investido no projeto.

## CONCLUSÃO

O estudo buscou analisar uma melhoria que estava sendo aplicada em uma siderúrgica atrelando a Engenharia de Manutenção à Viabilidade Econômica para reduzir os erros tanto na elaboração do projeto como em custeios desnecessários. Para iniciar, foram identificados os indicadores de manutenção como confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade do equipamento antes e após a melhoria. Com os cálculos realizados, viu-se que a melhoria deu 100% de aproveitamento dentro do tempo estudado que foi de cinco meses, ocorrendo nenhuma falha durante os testes.

Para verificar as falhas ocorridas nos equipamentos foram utilizadas algumas ferramentas. Com isso, foi possível analisar a melhoria aplicada para sanar os problemas que vinham ocorrendo, mas um dos erros cometidos se encontrou durante a elaboração da melhoria, pois não foi perguntada a opinião dos demais trabalhadores envolvidos com o equipamento, gerando uma dificuldade durante a instalação da melhoria e sendo necessária a modificação do protótipo.

No trabalho os objetivos específicos foram alcançados, pois, houve aumento nos índices de eficiência e disponibilidade da máquina em melhoria, que representou ganho de tempo para produção no período em estudo que tornou assim o investimento viável. Logo, o objetivo geral “Analisar a viabilidade de implantação de melhorias em maquinário com foco na engenharia de manutenção, buscando a redução de custos e perdas de produção” foi atingido.

Apesar dos objetivos geral e específicos terem sido alcançados encontrou-se dificuldades para elaboração da presente pesquisa. Uma das dificuldades foi relacionado a empresa não possuir um histórico de aplicação de melhorias pela área de manutenção, que inviabilizou a análise do indicador de custo equivalente para quando a organização tiver projetos concorrentes. Além disto, a não disponibilização de dados referentes à distribuição dos custos de manutenção e taxa de custo capital que a organização utiliza para avaliar os investimentos que ela aplica. Outro fator é relacionado ao tempo para gerar dados confiáveis do protótipo de melhoria no maquinário desenvolvido.

## REFERÊNCIAS

AÇO BRASIL. Mercado Interno Para O Aço Não Retoma Em 2017. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/siderurgiaemfoco/Aco_Brasil_Informa_Ago_17.pdf> Acesso em 02 de novembro de 2017.

CBCA premia vencedores do 10º Concurso para Estudantes de Arquitetura. Disponível em: <www.cbca-acobrasil.org.br/noticias-detalhes.php?cod=7446> Acesso em: 15 de Maio de 2018.

FRANCISCO, Wagner de Cerqueira. Economia do Pará. Disponível em: <http://brasilescola.uol.com.br/brasil/economia-para.htm>. Acesso em: 02 de novembro de 2017.

GALERA, Juliana. Custos Industriais. 2017. Disponível em: <http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/6852/material/Aula%202%20-%20Custos%20Industriais%20-%20conceitos.pdf>. Acesso em: 08 de novembro de 2017.

KARDEC, A.; NASCIF J. Manutenção: função estratégica. 3ª edição. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobrás, 2009.

MALHOTRA, Naresh K. Pesquisa de Marketing: Uma Orientação Aplicada. 3. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

NOGUEIRA, Cassio Silva Guimarães et al. Manutenção Industrial: Implementação Da Manutenção Produtiva Total (TPM). Belo Horizonte, v. 5, n. 1, p. 175-197. (2012). Editora UniBH. Disponível em:<http//ww.unibh.br/revistas/exacta/ > Acesso em: 02 de novembro de 2017.

XENOS, Harilaus. Gerenciando a Manutenção Produtiva – Belo Horizonte: Editora DG, 1998.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

**ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO:** GESTÃO DE MANUFATURA

# PROJETO CONCEITUAL DE UM PROTÓTIPO DE MICROGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NAS TUBULAÇÕES DE ÁGUA PREDIAIS

**Beatriz Guilliod Bianchi**
**Elaine Tavares de Souza**
**Karen Rodrigues Faria Rosa**
**Francisco Jarmeson Silva Bandeira**
Centro Universitário Augusto Motta - UNISUAM
Av. Paris, 84 - Bonsucesso, Rio de Janeiro - RJ, 21041-020
francisco.bandeira@souunisuam.com.br

**RESUMO:** Este trabalho apresenta o desenvolvimento do projeto de uma micro central de geração de energia elétrica utilizando a energia potencial disponível nas tubulações verticais de água predial, contemplando as etapas de um projeto conceitual, sendo possível a fabricação do protótipo e realização de testes de validação. Uma das grandes tendências na engenharia é a busca por sistemas de geração de energia a partir de fontes alternativas e economicamente viáveis. O objetivo deste trabalho é utilizar metodologias de projeto de produto para o desenvolvimento de uma micro central hidroelétrica utilizando a energia potencial – cinética disponível nas tubulações de água nos edifícios residenciais.
**Palavras-Chave:** Metodologia de projeto, Projeto conceitual, Geração de energia, Energias alternativas.

***ABSTRACT:*** *This paper presents the design of the development of a central micro power generation using the potential energy available in vertical pipes building water, contemplating the steps of a conceptual design, it is possible to manufacture the prototype and conducting validation tests. One of the major trends in engineering is the search for power generation systems from alternative and economically viable sources. The objective of this work is to use product design methodologies for the development of a micro hydroelectric plant using potential - kinetic energy available in water pipes in residential buildings.*
***Keywords:*** *Project methodology, Conceptual design, Power generation, Alternative energies.*

## INTRODUÇÃO

O processo de desenvolvimento dos centros urbanos necessita de fontes de geração de energias. Um conceito chamado *Energy Harvesting* (colheita de energia), vem ganhado força, pois consiste em um processo que converte a energia presente no ambiente, em energia elétrica para alimentar dispositivos eletrônicos autônomos de baixa potência. Algumas dessas fontes já são amplamente utilizadas, como por exemplo, a energia solar, eólica, força das marés e etc.

Os conceitos de microgeração e minigeração consistem em um processo que permite o usuário instalar pequenos geradores de fontes renováveis em sua unidade consumidora. A energia gerada é descontada da energia consumida. O que diferencia os dois conceitos é a quantidade de energia gerada. O sistema de microgeração, abordados neste trabalho, são centrais geradoras de energia elétrica cuja potência instalada é de até 100 kW.

O presente estudo tem por objetivo utilizar metodologias de projeto de produto para o desenvolvimento de uma micro central hidroelétrica utilizando a energia potencial – cinética disponível nas tubulações de água seguindo um projeto preliminar.

As etapas do projeto conceitual estão detalhadas nas seções posteriores, abordando desde a busca por sistemas de microgeração com maior eficiência até a análise da melhor concepção do produto, comparando com dados experimentais para este modelo de geração. A partir da percepção do projeto, foi possível elaborar um protótipo mais seguro e adequado para atender a necessidade do público alvo.

## METODOLOGIA

A metodologia utilizada na elaboração deste projeto deve apresentar uma integração do processo global de projeto com as demais fases de produção da micro central de produção, o planejamento de fabricação e a fabricação propriamente dita. Com esta integração de todas as fases, que destacamos como sendo Projeto, Planejamento, Fabricação, pode-se aplicar os conceitos da engenharia de forma mais detalhado em cada etapa.

Bandeira (2013) utilizou uma metodologia estruturada e adequada ao planejamento do produto proposta por Pahl&Beitz (1996), que baseia-se em um modelo consensual que divide o processo em quatro etapas, sendo elas: Classificação das Necessidades, Projeto Conceitual, Projeto Preliminar e Projeto Detalhado. Uma forma mais detalhada é proposta por Pahl et al. (2005), onde a execução do planejamento é realizada por fases de planejamento e concepção

do produto, sendo subdivididas em diversas atividades específicas para cada fase. Assim, optou-se por utilizar a metodologia proposta por Pahl&Beitz (1996).

O Planejamento do produto inicia com o projeto Conceitual, logo em seguida o Projeto Preliminar, conforme ilustrado na figura 2. Cada fase da etapa de Planejamento e Projeto terá seções reservadas para cada etapa devido à complexidade de cada uma.

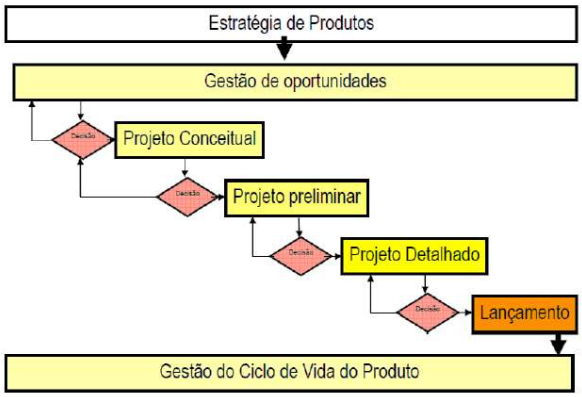



**Figura 1.**As principais etapas do processo de desenvolvimento de produtos. Fonte: Neto (2009)

O projeto conceitual é a etapa de conceituação do produto, consistindo em apresentar as necessidades de criação do produto desejado, mostrando que o produto criado seja útil e possa atender as necessidades apresentadas. O projeto preliminar é elaborado para caracterizar tecnicamente o produto. Faz parte desta etapa o projeto, o anteprojeto e o estudo de viabilidade do mesmo. O projeto detalhado apresenta o projeto definido do produto. Neste trabalho, não será abordado as etapas de projeto detalhado.

Vale mencionar que o ciclo de vida de um produto vai muito além das quatro etapas citadas anteriormente, tendo em vista que essas etapas consistem no processo de criação do produto. Segundo Neto (2009) além da gestão de oportunidades, projeto conceitual, preliminar e detalhado, o produto ainda passa pelas etapas de planejamento da produção e lançamento, crescimento, maturidade, declínio e morte do produto, em que essas duas últimas etapas ocorrem devido o surgimento de outro produto ou até mesmo a não utilidade do mesmo no mercado. A Figura 3 ilustra o ciclo de vida completo de um produto.

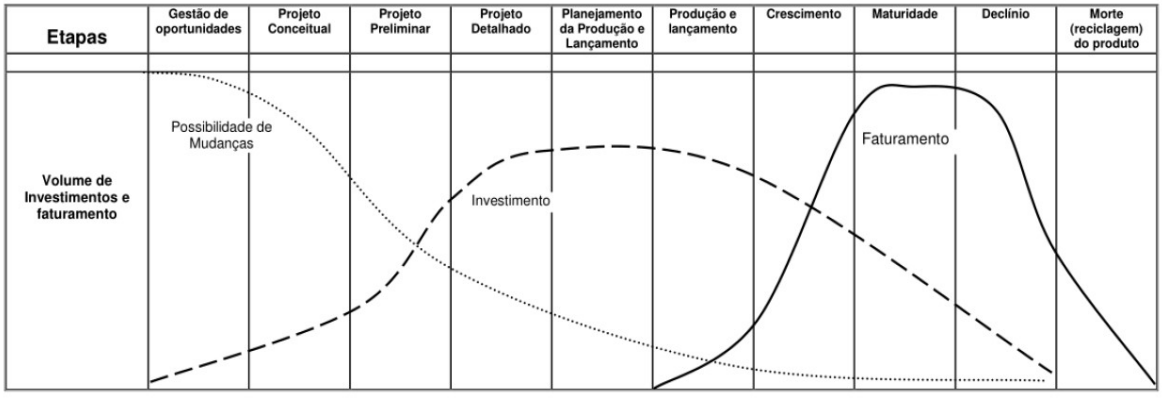



**Figura 2**. O ciclo de vida completo de um produto Fonte: Neto (2009)

**Projeto Conceitual**

A engenharia do produto corresponde a uma área de conhecimento da engenharia mecânica, que estuda o processo de elaboração do projeto, definida como uma transformação entre os diferentes estados de informação, ou seja, é uma série de transformações que resolve um problema de projeto ao passar de um estado inicial de conhecimento para um estado final desejado.

Numa visão similar, segundo Almeida (2000, p. 2, apud Fiod, 1993), o processo de projeto engloba as fases de: planejamento e concepção; que corresponderiam à etapa e a uma definição para o projeto conceitual, como sendo a fase inicial do processo de projeto de um produto que envolve as atividades de estudo com uma sequência a ser obedecida no processo de projeto e de forma reservada para a especificação exata da necessidade e para a obtenção sistemática de possíveis soluções para a necessidade levantada.

Bandeira (2013) define “conceito” como sendo uma formulação de uma ideia por palavras e definições, Neto (2009, apud Philip Kotler, 1998) diz que “conceito de produto é uma versão elaborada da ideia do produto expressa em

termos significativos para o consumidor". Segundo Neto (2009, apud Rozenfeld et al, 2005), projeto conceitual trata-se da transformação de informações em soluções de produtos através da criação, busca representação e seleção. Esta definição de projeto conceitual ser estabelecida como referência para o desenvolvimento do mesmo, dividindo em quatro etapas, sendo elas: Busca, Criação, Representação e Seleção.

**Projeto Conceitual – Etapa 1 - Busca**

A etapa de busca o consiste em realizar um referencial bibliográfico sobre trabalhos encontrados na literatura em que possam ser moldes para o desenvolvimento do produto.

Sabe-se que o petróleo e a energia elétrica foram extremamente relevantes para o desenvolvimento tecnológico e econômico do mundo, entretanto torna-se necessário pesquisar outras fontes de energia menos nocivas ao meio ambiente, afim de proporcionar um desenvolvimento sustentável. A fig. 3 abaixo é possível observar diversas formas de se gerar energia elétrica utilizando recursos naturais como ventos, água, sol, ondas, entre outras. Mas existe uma preocupação ambiental com um intuito de buscar uma geração limpa, assim denominadas energias renováveis.

| Energia primária | | | | Brasil | Mundo |
|---|---|---|---|---|---|
| Total, bilhões de tep | | | | 0,193 | 10,7 |
| Participação das fontes (%) | Não-renováveis | Fósseis | Petróleo | 43,6 | 35,3 |
| | | | Gás natural | 6,6 | 20,9 |
| | | | Carvão | 6,8 | 24,1 |
| | | Nuclear | | 1,8 | 6,4 |
| | | | Subtotal | 58,7 | 86,6 |
| | Renováveis | Tradicionais | Biomassa tradicional | 19,0 | 9,4 |
| | | Convencionais | Hidráulica | 15,3 | 2,1 |
| | | Modernas, "novas" | Biomassa moderna | 6,9 | 1,2 |
| | | | Outras: solar, eólica etc. | < 0,1 | 1,7 |
| | | Subtotal | | 41,3 | 14,4 |

**Figura 3**. Energia primária no Brasil e no mundo em 2003. Fonte: IEA

Podemos analisar que o Brasil possui uma forte base hidráulica em sua matriz elétrica, as características físicas, geográficas e a grande disponibilidade de recursos hídricos, foram determinantes para que o país fosse hoje, o terceiro maior potencial hidráulico do mundo. Em termos absolutos, os cinco maiores produtores desse tipo de energia são Canadá, China, Brasil, Estados Unidos e Rússia (Queiroz, 2013). De acordo com Queiroz (2013) em 2025 a capacidade de produção de energia hidrelétrica será menor do que a demanda, dessa forma torna-se necessário utilizar fontes de geração alternativas e renováveis para atender a população.

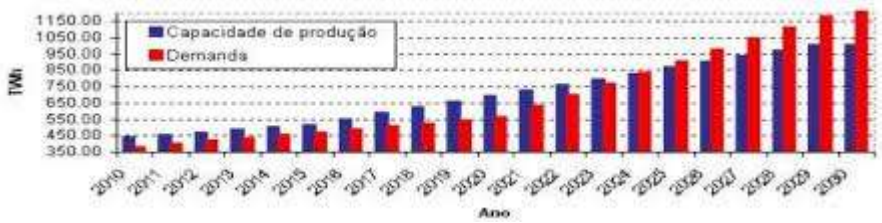



**Figura 4.** Demanda de energia hidrelétrica para fonte hidráulica Fonte: Queiroz (2013)

A microgeração tem sido uma estratégia de geração de energia em diversos países, pois é uma forma de melhorar a segurança energética e reduzir as emissões de dióxido de carbono da geração. O Reino Unido tem como exemplo de governantes interessados nas energias renováveis, optando por introduzir uma tarifa de alimentação para microgeração, fornecendo às famílias uma taxa de retorno de 5-7%. Estes incentivos contribuem no desenvolvimentos na indústria de microgeração, fornecendo os tão necessários subsídios que permitirão uma ampla implantação, e com isso a redução dos custos e uma melhor conscientização do público. O rótulo de "microgeração" refere-se a um conjunto altamente diversificado de tecnologias, que mostram diferenças marcantes na produção, custo eficácia e adequação.

Os sistemas de microgeração mais encontrados estão relacionados com a conversão de energia solar e energia dos ventos. Bonow et al (2014) realiza uma pesquisa bibliográfica a respeito do uso de tecnologia para aproveitar o potencial de fontes de energia elétrica no meio urbano, onde o mesmo propõe o aproveitamento do fluxo de água através das tubulações de uma instalação predial residencial.

A integração de energias renováveis nos edifícios é um desafio já que para ser realmente eficiente, se faz necessário à incorporação de um sistema que capte a energia e a transforme numa fonte de energia que seja útil para o edifício. Na realidade a colocação de, por exemplo, painéis solares na cobertura do edifício não é por si só uma medida

eficiente de energia, pois se não tivermos em conta a eficiência do edifício esta pode nem ser suficiente para comportar a energia da iluminação do mesmo, e por entendimento, talvez nem do resto dos sistemas. Por isso, uma integração dos sistemas de energias renováveis em edifícios podem os tornar eficientemente energéticos.

**Projeto Conceitual – Etapa 2 – Criação**

A etapa de criação consiste em definir parâmetros técnicos fundamentais para a concepção do produto.

Svick (2013) realizou um estudo em um prédio vertical, construído nos anos 80, classe média alta, com 19 (dezenove) andares, sendo 2 (dois) andares de garagem no subsolo, 1 (um) piso térreo com as dependências de uso comum, e 16 (dezesseis) andares com 2 (dois) apartamentos por andar, no total de 32 (trinta e dois) apartamentos, onde residem aproximadamente 127 moradores.

Existem vários estudos relativos ao consumo de água potável no Brasil. A tabela 1 abaixo ilustra o consumo médio predial diário por habitante. Assim, pode-se determinar a quantidade de energia gerada pelo protótipo apresentado

.

| Prédio | Consumo (litros/dia) | Unidade |
|---|---|---|
| **Serviço doméstico** | | |
| Apartamentos | 200 | per capita |
| Apartamentos de luxo | 300 a 400 | per capita |
| | 200 | quarto de empregada |
| Residência de luxo | 300 a 400 | per capita |
| Residência de médio valor | 150 | per capita |
| Residências populares | 120 a 150 | per capita |
| Alojamentos provisórios de obras | 80 | per capita |
| Apartamento de zelador | 600 a 1000 | apartamento |
| **Serviço público** | | |
| Edifícios de escritórios | 50 a 80 | ocupante efetivo |
| Escolas (internatos) | 150 | per capita |
| Escolas (externatos) | 50 | aluno |
| Escolas (semi-internatos) | 100 | aluno |
| Hospitais e casas de saúde | 250 | leito |
| Hotéis com cozinha e lavanderia | 250 a 350 | hóspede |
| Hotéis sem cozinha e lavanderia | 120 | hóspede |
| Lavanderias | 30 | kg de roupa seca |
| Quartéis | 150 | per capita |
| Cavalariças | 100 | cavalo |
| Restaurantes e similares | 25 | refeição |
| Mercados | 5 | $m^2$ |
| Postos de serviço | 100 | automóvel |
| | 150 | caminhão |
| Rega de jardins | 1,5 | $m^2$ |
| Cinemas e teatros | 2 | lugar |

**Tabela 1.** Estimativa consumo médio predial diário por habitante, Fonte: Svick (2013) aput Enedir Ghisi, 2004

Os principais elementos da micro central hidroelétrica são a turbina e o gerador. As subseções a seguir abordaram esses equipamentos.

**Turbinas Hidráulicas**

As turbinas hidráulicas são equipamentos fundamentais na geração de energia hidroelétricas. Estes equipamentos são responsáveis pela conversão da energia cinética em energia elétrica pelos geradores. Existem diversos modelos de turbina, podendo ser de escoamento axial ou radial, e o tipo dependerá da diferença de cotas, tipo de fluido e direção do escoamento para obter uma melhor eficiência. A tabela abaixo ilustra a relação entre o tipo de turbina e a diferença entre cotas.

| Tipo de Turbina | Diferença entre cotas - m ($\Delta z$) |
|---|---|
| Turbina Pelton (TP) | 20 - 500 |
| Turbina Francis (TF) | 2 - 150 |
| Turbina Michel-Banki (TMB) | 1,5 - 150 |
| Turbina Kaplan, tipo "S"ou Sifão (TS) | 0,8 - 5 |

**Tabela 2.** Tipo de turbina e a diferença entre cotas

A carga manométrica de uma turbina $H_T$, pode ser obtida a partir da equação da energia aplicada em dois pontos e diante da presença de uma turbina, tal expressão é dada segundo Brunetti (2009) pela equação (1) abaixo.

$$H_T = \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + (z_2 - z_1) + \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2g} \quad (1)$$

onde: ”p” é pressão; ”v” é a velocidade e ”z” a carga potencial.

Se as pressões $p_1$ e $p_2$ forem iguais, a equação para a carga manométrica da turbina pode ser simplificada, sendo composta apenas pelos termos da energia potencial e cinética. A equação da energia simplificada e mostrada na equação (2).

$$H_u = \Delta z + \frac{v_e^2 - v_s^2}{2g} \tag{2}$$

O rendimento total da turbina ($\eta_t$) é dado pela relação entre a potência efetiva no eixo da turbina $P_t$ e a potência hidráulica disponível $P_H$, conforme a equação (3).

$$\eta_t = \frac{P_t}{P_H} \tag{3}$$

**Gerador**

Geradores são equipamentos responsáveis pela conversão de energia mecânica em energia elétrica. Os geradores podem ser do tipo de corrente alternada (CA) e de corrente contínua (CC). A geração de energia ocorre quando há uma alteração no fluxo magnético decorrente de movimentos rotativos, as tensões são geradas quando um campo magnético gira em torno dos enrolamentos. Nos motores e geradores no geral a parte móvel é chamada de rotor e a parte fixa chamada de estator.

A tensão CA é usada na maioria das aplicações, devido à facilidade com que o seu valor pode ser modificado com o auxílio de transformadores, possibilitando aumento da tensão para melhorar a transmissão. Os geradores elementares de CA e de CC têm o mesmo princípio de funcionamento, diferenciando-se apenas na forma como coletam a tensão induzida na armadura (que é sempre alternada).

**Projeto Conceitual – Etapa 3 – Representação**

Nessa etapa buscou-se representar todos os tipos possíveis de modelos para a criação da micro central de geração elétrica, objetivando obter a melhor configuração baseado nos parâmetros técnicos especificados a partir das necessidades estabelecidas bem como modelos encontrados na literatura.

O Sistema de microgeração é uma fonte de geração alternativa eficiente. Segundo Oliveira (2018) o Brasil investe menos de 1% na produção de energia deste tipo de geração, o incentivo para o desenvolvimento desses tecnologia como fontes alternativas de energia é insignificante.

Svick (2013) realizou um estudo do potencial de geração de energia elétrica do sistema de esgoto em um prédio vertical para um possível aproveitamento para a geração de energia elétrica, utilizando um sistema de geração (turbina mais gerador) comercialmente encontrado no mercado.

Kock (2014) desenvolveu um estudo de uma micro usina hidrocinética de custo reduzido direcionada a geração de energia elétrica para agricultores.

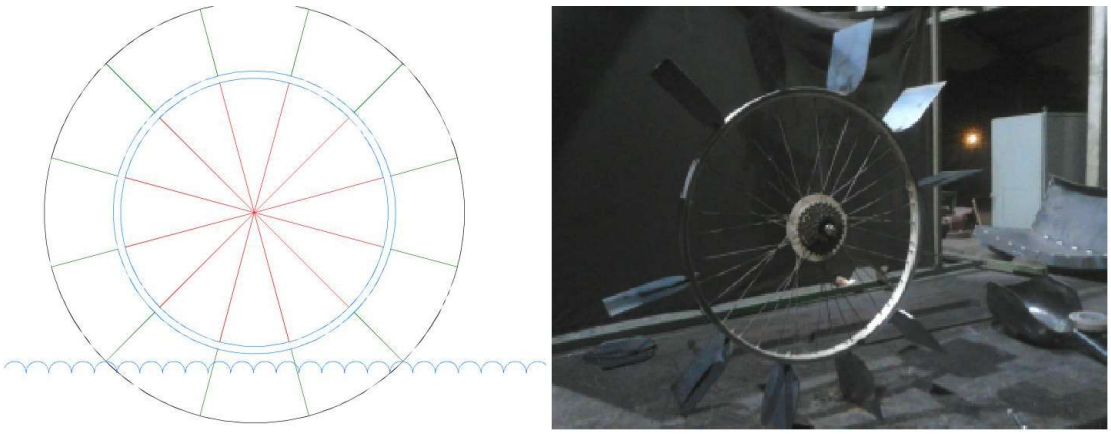


**Figura 5.** Modelo de Microgeração usado por Kock (2014)

Rodrigues (2007) Realizou um estudo de simulação numérica e otimização de uma turbina hidrocinética utilizada na geração de energia em pequenas comunidades no interior do Brasil. O modelo da turbina simulada por Rodrigues (2007) é ilustrada na fig. 6.

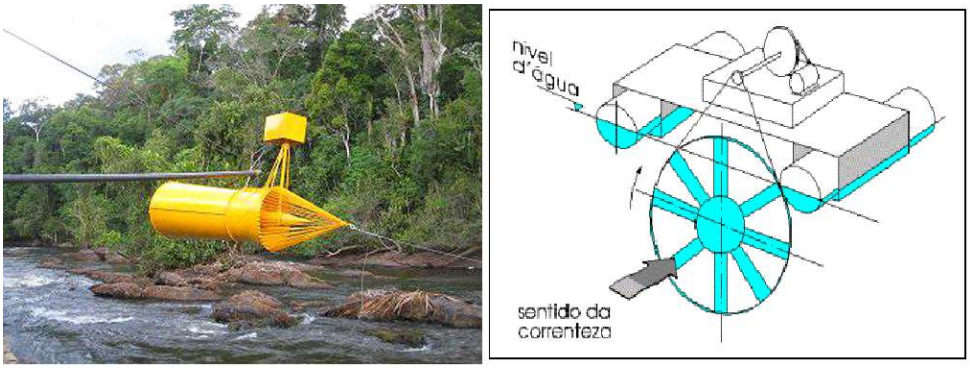



**Figura 6.** Modelo de Micro geração usado por Rodrigues (2007)

Macintyre (1983) aborda que as primeiras fontes de geração de energia elétrica foram através do uso da roda d'água e basicamente, os sistemas de microgeração retornam para modelos que utilizam o mesmo princípio.

Bonow et all (2014) realizou uma pesquisa bibliográfica a respeito de uso de tecnologias para aproveitamento a energia potencial pluviométrica para geração de energia elétrica, usando uma turbina do tipo Michel – Banki.

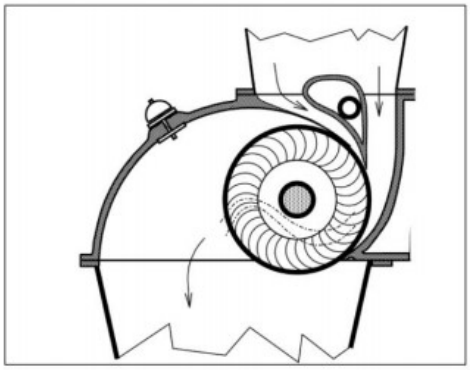


**Figura 7.** Modelo da Turbina Michel – Banki usada por Bonow et all (2014)

Oliveira et al (2018) discorre uma proposta inovadora para contribuir com as alternativas de geração de energia elétrica. Trata-se de pequenas turbinas instaladas nas tubulações. A conversão da energia potencial e cinética ocorre através da capacidade de rotação das pás de uma turbina provocando o escoamento da água. A turbina está acoplada a um gerador, produzindo energia elétrica.

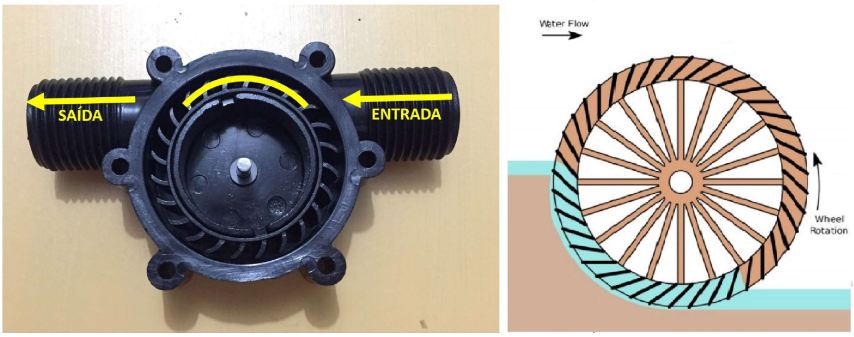



**Figura 8.** Modelo do sistema utilizado por Oliveira et al (2018)

**Projeto Conceitual – Etapa 4 - Seleção**

A etapa de seleção do processo conceitual consiste em escolher o melhor modelo a ser desenvolvido para o produto baseado nas referências encontradas nas etapas anteriores.

A partir dos conceitos obtidos nas seções de busca, criação e representação, chega-se a definição de qual o melhor modelo de microgeração mais adequado para converter a energia potencial e cinética disponíveis nas tubulações de água prediais. O modelo de Oliveira (2018) foi selecionado por destacar quatro principais vantagens desta alternativa de geração:

- ✓ A não dependência das condições climáticas, como o sol na energias solar e o vento na eólica;
- ✓ Não haver impactos no meio ambiente;
- ✓ Não interferir quimicamente e biologicamente na qualidade da água.
- ✓ Produto experimentalmente testado para a mesma finalidade pretendida.

## PROTÓTIPO DO PRODUTO

O protótipo do produto foi concebido pelo projeto conceitual e encontra-se em fases de testes preliminares no laboratório de hidráulica presente no Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM). Segundo Junior (2007), as turbinas hidrocinéticas não são novos recursos tecnológicos e sim uma revisitação desta tecnologia, o que pode proporcionar grandes avanços na geração da energia alternativa e para a geração de energia elétrica sustentável. Existem diversos modelos de turbinas hidrocinéticas, Rodriguez (2007) apresenta os modelos mais comuns e observa-se que alguns modelos "novos" retornam ao princípio de funcionamento da roda d'água, assim optou-se por utilizar no protótipo três tipos de turbinas ilustrados na fig. 9 abaixo.

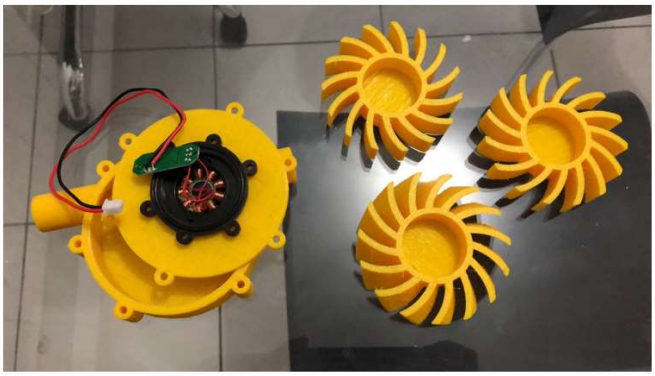


**Figura 9.** Modelo do protótipo em fase de testes.

O protótipo de microgeração hidro proposto é constituído de um rotor concêntrico de fluxo radial, sendo que na entrada do sistema de microgeração há uma redução de área com a finalidade de aumentar a velocidade do jato incidente na turbina, semelhante ao modelo da turbina Pelton, conforme mostrado na figura 9. A turbina é composta por 15 pás, o líquido é aprisionado no espaço formado entre as hélices e a carcaça cilíndrica sendo conduzido até o ponto de descarga da turbina.

A turbina fica acoplada magneticamente ao suporte do estator e o fluxo do campo magnético é gerado por um ímã e, nesse caso, a tensão gerada é diretamente proporcional à velocidade de rotação do rotor. A figura 9 ilustra a turbina composta com uma carcaça cilíndrica e um estator. A turbina é acoplamento magneticamente com o estator.

O microgerador selecionado é capaz de gerar 12V e 10W. No interior do suporte da turbina existe um ímã permanente. O microgerador é responsável por gerar uma corrente alternada. O circuito possui um retificador formado por diodos, um capacitor para minimizar as quedas entre os semi ciclos e um diodo zenner para fornecer uma tensão em 12 Volts.

## CONCLUSÃO

A descentralização da produção de energia elétrica se encontra em fase de crescimento e adaptação para a sociedade. O aproveitamento dos pequenos potenciais energéticos no meio urbano pode atenuar a demanda das grandes centrais energéticas, além de aproveitar os recursos inicialmente desperdiçados.

As metodologias de projeto de produto são uma ferramenta útil para o desenvolvimento correto de novos modelos de geração. As etapas de busca e criação são cruciais para um melhor dimensionamento e concepção de um produto, tornando-se improvável a elaboração de qualquer produto sem elas.

O aproveitamento energético do escoamento de uma tubulação de água em um edifício é uma ideia de grande utilidade no meio urbano. Parte de um princípio de aproveitamento de uma energia anteriormente desperdiçada através da própria água de abastecimento de uma instalação e do uso doméstico da água nos mais diversos andares de um prédio, para alimentar a microturbina com a finalidade de produzir uma parcela da eletricidade.

Os dados apresentados por Oliveira (2018) consistem em dados gerados por uma primeira etapa deste projeto em que foi possível observar que é capaz obter uma geração de energia através do escoamento de água nas tubulações prediais conforme ilustrado na figura 10. A turbina e o gerador são os elementos principais pela transformação da energia potencial e cinética em energia elétrica. O modelo utilizado por Oliveira (2018) foi adquirido comercialmente e

apresentou baixo rendimento, isso ocorre devido a parâmetros da turbina e do gerador. No presente trabalho utilizaram-se as metodologias de projeto na fase de projeto conceitual para conceber um novo produto com uma melhor eficiência.

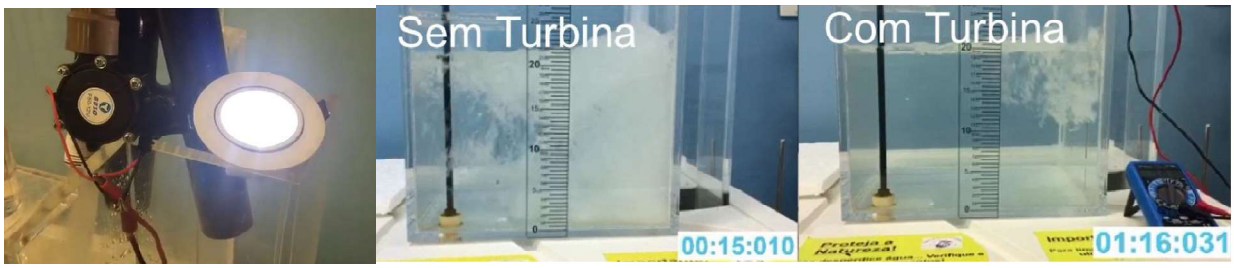



**Figura 10**. Testes com o sistema de microgeração proposto por Oliveira (2018)

Observou-se que a micro central hidroelétrica reduziu a vazão me 80%, na figura 10 é notável a diferença entre os turbilhões provocados pela turbulência devido a velocidade da queda de água no reservatório. A turbina deve ser instalada no subsolo dos edifícios e quanto maior a altura do prédio maior será a capacidade de geração através da micro central hidroelétrica.

## REFERÊNCIAS

Almeida, F. J. D., 2000, "Estudo e Escolha de Metodologia para o Projeto Conceitual.", Revista de Ciências & Tecnologia. V.8, Nº 16 – pp 31-42.

Bandeira, F. J. S., 2013, "Projeto de um protótipo de um veículo motorizado para coleta de lixo reciclável no município de Tucuruí – Pará.", Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Pará – UFPA.

Bonow, A. A., Ibanez, G. B, Neto, T. P.,2014, "O uso do potencial hidráulico predial para microgeração de energia elétrica". Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.

Brunetti, F., 2008, "Mecânica dos Fluidos". 2a ed, ed. Pearson Prentice Hall, São Paulo.

Harvet, A.; Brown, A., Hettiarachi, P., Inversin, A., 1998, "Micro-hydro design manual: a guide to small scale power shemes". London, IT.

Henn, E. A. L., 2006, "Máquinas de Fluido". 2a ed, Santa Maria, Editora UFSM.

Meier, U., 1985, "Local experience with micro-hydro tecnology". 3a ed. St. Gallen: SKAT Publ.

Mello JR, A. G. D., 2000, "A Turbina de Fluxo Cruzado (Michell - Banki) Como Opção Para Centrais Hidráulicas de Pequeno Porte". Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Junior, Antônio C. P. B. et all. Turbina Hidrocinética Geração 3. ANEEL, 2007.

Kock, J., 2014, "Micro central Hidrelétrica com Turbina Hidrocinética". Trabalho de Conclusão de Curso - TCC, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UFPR, Pato Branco - PR, 2014.

Mancityre, A. J., 1990, "Manual de Instalações Hidráulicas e Sanitárias". Rio de Janeiro: Guanabara

PAHL, G. & BEITZ, W., "1996", "Engineering Design – a systematic approach. Translated by Ken Wallace and Lucienne Blessing". Berlin, Springer Verlag,

Oliveira, T. M. D., 2017, "Microgeração de energia elétrica através do escoamento de água nas tubulações principais dos edifícios." Trabalho de Conclusão de Curso - TCC, Centro Universitário Augusto Motta - UNISUAM, Rio de Janeiro – RJ.

Queiroz R., Grassil P., Lazzare K., Koppe E., Tartas B. R. e Kemerich P. D. D. C., 2013, "Geração de energia elétrica através da energia hidráulica e seus impactos ambientais. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental – REGET e-ISSN 2236 1170 - v. 13, p. 2774- 2784.

Rodriguez, Ana P. S. P., 2007, "Parametrização e Simulação Numérica da Turbina Hidrocinética - Otimização Via Algoritimos Genéricos". Brasília. 2007

Silva, E. C. P. D; Santos, E. C. M. D; Silva, R. M. D; Filho, E. F. D. N; Ferreira, I. E. C., 2010, "Uma análise dos incentivos que podem favorecer o uso da energia renovável no Brasil." XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção - ENEGEP, São Carlos, SP.

Silva, Teófilo R. M. D., 2011, "Construção de um Protótipo Hidrocinético em Escala Reduzida para Geração de Energia Aplicado a Educação". Universidade Federal do Pará. Pará.

Silva, Marina M. D. D., 2007, "Análise de Filtros Passivos de Harmônicos de Conversores CA/CC de Seis Pulsos." Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Rio de Janeiro.

Svick, F. S. R., 2013, "Estudo do potencial de geração de energia elétrica do sistema de esgoto em um prédio vertical". Trabalho de Conclusão de Curso - TCC, Universidade Regional do Noroeste do estado do Rio Grande do Sul - UNIJUÍ. Ijuí - RS.

**DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE**

O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(veis) pelo material impresso contido neste artigo.

**ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO**

Assinalar aqui, com um X, a seção 'área de conhecimento do trabalho'.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( X ) Energia
( ) Fabricação Mecânica e Materiais
( X ) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( )Termociências e Mecânica dos Fluidos

**XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 27 à 31 de agosto de 2018 – Brasília, DF**

# **Proposição de um Plano de Manutenção por meio da Análise RAM:** Um estudo de caso em uma fábrica de embalagens plásticas no estado do Pará

**Nome dos autores: Leonardo Rodrigues de Freitas; Nilza Cristina de Sousa Lima; Isaías Barbosa de Oliveira Júnior; Luiz de Souza Silva; Victor Rodrigues Ribeiro.**
Instituição: Universidade Federal do Pará; Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará.
Endereço: Folha 17, Quadra 04, Lote Especial, s/n. º - Nova Marabá, PA, 68505-080, Unidade 2, Faculdade de Engenharia Mecânica – Marabá-PA.
E-mail para correspondência: isaiasbjunior@unifesspa.edu.br; victorribeiroufpa@gmail.com; luizsouza0022@gmail.com;

**RESUMO:** No cenário atual das empresas, para que as organizações mantenham altos níveis de produtividade, os planos de manutenção devem estar sempre atualizados. A empresa estudada foi uma fábrica de embalagens plásticas que trabalha em 3 turnos, permanecendo 24 h por dia trabalhando, o que torna necessário um alto nível de disponibilidade dos seus equipamentos, porém ela não possui qualquer plano de manutenção ou históricos de manutenção previamente realizadas. Com isso, este trabalho buscou propor um plano de manutenção para os equipamentos críticos da empresa utilizando o método RAM – ou CDM – pretendendo melhorar a confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade das máquinas, reduzindo o número de paradas inesperadas, utilizando como auxílio o método de análise de falhas (FMEA) e ferramentas da qualidade. Após o cálculo dos indicadores de manutenção e da análise de falhas, observaram-se os problemas apresentados pelas máquinas analisadas, assim, tornou-se possível a proposição do plano de manutenção preventiva por meio do método 5W2H.

**Palavras-Chave:** Manutenção, Indicadores, RAM.

***ABSTRACT:*** *In the current scenario, to organizations maintain high levels of productivity and reduce costs in this regard, the maintenance sector needs to work on the preparation of preventive maintenance to eliminate or reduce these problems. The company studied was a factory of plastic packaging that works in 3 shifts, staying 24 hours a day working, which makes necessary a high level of availability of its equipment, but it does not have any maintenance plans or maintenance histories previously performed. With this in mind, this work aimed to propose a maintenance plan for the critical equipment of the company using the RAM method - or CDM - aiming to improve the reliability, availability and maintenance of the machines, reducing the number of unexpected stops, using the Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) and quality tools as an aid. After the calculation of the maintenance indicators and the failure analysis, the problems presented by the analyzed machines were observed, thus, it became possible to propose the preventive maintenance plan through the 5W2H method.*

***Keywords:*** *Maintenance, Indicators, RAM.*

## INTRODUÇÃO

De acordo com as contas nacionais trimestrais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) divulgadas em junho 2017, é possível verificar que, em relação a 2016, houve o crescimento de 8,1% na produção física do setor de manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos, apesar do estado de crise que o país enfrentava. Em decorrência disso, em 2016 esse setor foi destacado pelo Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE) como promissor para o trabalho no ano de 2017, visto que apresenta uma tendência de crescimento.

A Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos (ABRAMAN) apresentou no documento nacional de 2013 que 34,02% dos custos de manutenção são referentes ao pessoal, visto que a "qualidade e a produtividade de manutenção são fortemente afetadas pela capacitação das pessoas envolvidas", afirma a associação. Esse documento aponta que 39,85% do pessoal próprio de manutenção possui mão de obra qualificada, com tendência de crescimento de pessoal com nível superior e técnico (que em 2013 apresentaram, respectivamente 6,76% e 15,48%). Os demais custos além do pessoal, são referentes ao material (21,96%), serviços contratados (27,5%) e outros (16,52%). Isto posto, o custo de manutenção corresponde a 4,69% do faturamento bruto da indústria. Partindo desse ponto, é fundamental que numa indústria haja um gerenciamento da manutenção, sendo estabelecida por meio da condução das atividades de rotina dos serviços e da implementação de melhorias. Para isso, os planos de manutenção são o conjunto de informações necessárias para a orientação perfeita da atividade de manutenção preventiva. Através do registro de dados

relativos a avarias dos equipamentos/instalações, bem como respectiva análise dos mesmos, é possível orientar as tomadas de decisões mais adequadas à manutenção da empresa em questão.

É nesse contexto que este trabalho se enquadra, uma vez que dentre as técnicas e métodos existentes para a análise de um plano de manutenção, tem-se o estudo da confiabilidade (ou fiabilidade), disponibilidade e manutenibilidade (CDM, ou em inglês RAM – *Reliability, Availability e Maintainability*), que permite uma análise desses indicadores de manutenção, bem como suas interações, qualitativa e quantitativa do grau de confiabilidade que as máquinas e equipamentos possam funcionar como requerido a um LCC (*Life Cicle Cost)* – Custo de Ciclo de vida – definido.

O objeto de estudo deste trabalho foi uma fábrica de embalagens plásticas que não possui nenhum tipo de planejamento ou controle das manutenções, ou registros das atividades realizadas, onde faz-se apenas manutenções corretivas. Pensando nisso, buscou-se responder os seguintes problemas: Como elaborar e implantar um plano de manutenção que seja coerente com a realidade econômica e tecnológica de uma fábrica de embalagens plásticas, que não possui planejamento e gestão de manutenções? Como melhorar a confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade dos equipamentos críticos da fábrica para garantir a redução dos custos provenientes da manutenção?

## METODOLOGIA

A elaboração deste trabalho foi feita no período de 08 meses, entre abril e novembro do ano de 2017. O estudo de caso aplicou-se a uma empresa produtora de sacolas e embalagens plásticas, localizada na cidade de Castanhal, estado do Pará. O projeto teve como limitação a elaboração de um plano de manutenção compatível com as características da empresa, a partir da análise RAM para os equipamentos previamente selecionados. Para isso, foram realizadas as seguintes tarefas: 1) Realização de visitas e entrevistas para o reconhecimento da estrutura, do processo produtivo, da organização do ambiente, do sistema de manutenção atual da empresa, dos colaboradores responsáveis pelo manuseio dos equipamentos e determinação dos equipamentos a serem estudados; 2) Seleção dos equipamentos a serem observados: aqueles mais carentes de um plano de manutenção segundo os dados coletados; 3) Aplicação de um formulário para coleta informações acerca das manutenções dos equipamentos selecionados no período aproximado de 25 semanas; 4) Diagnóstico da situação do setor de manutenção atual por meio da análise dos indicadores confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade; 5) Diagnóstico das falhas potenciais do equipamento crítico e causas raiz; 6) Avaliação resultados obtidos e proposição do plano de manutenção para os equipamentos selecionados por meio da elaboração de um cronograma de manutenção preventiva.

Na identificação dos equipamentos, foram considerados aqueles cuja uma parada ocasionada por falha/defeito causaria grande impacto, seja ele nos prazos de entrega, setor financeiro ou na relação com o cliente. Após a determinação desses ativos, foram coletados os dados referentes às suas paradas, sendo isso feito por meio da aplicação de um formulário, pois empresa não possui um histórico das manutenções realizadas, onde o técnico preencheu informações como: hora de parada, hora de início da manutenção, duração de manutenção, hora de retomada da atividade, qual a falha/defeito apresentado, qual a medida ou manutenção realizada para voltar à ativa e qual o custo gerado. A aplicação se deu em todos os turnos e dias de funcionamento do equipamento, com duração aproximada de 25 (vinte e cinco) semanas, sendo recolhidos ao final do período.

## ANÁLISES E MODELOS DE MANUTENÇÃO

Entre os autores da área de manutenção, é possível observar diversos modelos, tendo como destaque: TPM – *Total Productive Maintenance* (Manutenção produtiva total); RCM – *Reliability Centered Maintenance* (Manutenção centrada na confiabilidade); TQM – *Total Quality Maintenance* (Manutenção com qualidade total); análise RAM – *Reliability, Availability, Maintainability* (Confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade); RBM – *Risk Based Maintenance* (Manutenção baseada no risco). Dentre esses, será abordado o RCM, TPM e RAM, visto que os dois primeiros, segundo Borges (2013), têm sido aplicados com êxito na indústria a nível mundial e, o ultimo, por se tratar da metodologia utilizada neste estudo.

### RCM – *Reliability Centered Maintenance*

O RCM (*Reliability Centered Maintenance*) ou MCC (Manutenção centrada na confiabilidade) é uma filosofia usada para determinar o conjunto de procedimentos a serem desenvolvidos a fim de qualquer um dos ativos físicos continuem a exercer e cumprir suas funções, bem como diagnosticar os fatores contribuem para a não fiabilidade e tomar as medidas necessárias para a fiabilidade (FERRAZ, 2009).

### TPM – *Total Productive Maintenance*

A *Total Productive Maintenance* ou Manutenção Produtiva Total surgiu no Japão no início dos anos 70, tendo grande expansão nos anos 80. Nele, o grande foco é a manutenção dos equipamentos com participação do pessoal da produção, fazendo uso assim de uma manutenção autônoma, pois considera que não há quem conheça melhor o equipamento que aquele que o opera. Esse modelo é uma evolução do TQM, a partir do momento que os conceitos

originais deste foram alterados e a Função Manutenção passou a ser integrante e fundamental do programa de qualidade. Dessa maneira, está orientada para a melhoria contínua (BORGES, 2013).

**RAM – *Reliability, Availability and Maintenance***

Como citado anteriormente, a otimização da disponibilidade, confiabilidade e manuteniblidade geram a obtenção de custos menores. Na série histórica é possível observar que estes dois últimos indicadores têm sido o foco na quarta geração da manutenção que perdura até os dias atuais. Esses três conceitos quando integrados, constituem a análise RAM, que pode ser aplicada em qualquer fase do ciclo de vida de um equipamento ou de um sistema, embora na fase de projeto seja mais fácil e simples de aplicar. Ela tem como objetivo fornecer uma ferramenta de gestão com a qual se possa coordenar e assegurar todo o ciclo de vida de um sistema e dispor ferramentas analíticas para medir a performance do sistema produtivo (BORGES, 2013).

***Reliability* (Confiablidade)**

A grande procura da atualidade por produtos e sistemas de alto desempenho a custos reduzidos aliada à necessidade da redução da probabilidade de falhas, resulta em uma atenção maior para a confiabilidade, sendo considerada um parâmetro de eficiência para a produção. Sua definição é a probabilidade de um equipamento exercer sua função para o qual foi direcionado em um determinado período de tempo (t), mantendo sua qualidade de trabalho durante sua vida útil. Para isso, a manutenção é voltada para a eliminação de falhas, fazendo uso da análise do modo de falhas (FMEA, assim como no RBM) e identificando a causa-raiz das mesmas (FABRO, 2003; FERRAZ, 2009; CAJAZEIRA, 2012).

Considerando que a taxa de falhas (λ) seja constante ao longo do tempo $t$ e que $t \geq 0$, Kardec e Nascif (2009) apresentam a Equação 1 para a determinação da confiabilidade de um equipamento ou produto:

$$R\,(t) = e^{-\lambda t} \tag{1}$$

Onde:

R (t) = confiabilidade a qualquer tempo
e = base dos logaritmos neperianos (e = 2,718)
λ = taxa de falhas
t = tempo previsto de operação

Para a obtenção da taxa de falhas (λ), segundo Kardec e Nascif (2009) apresenta a expressão 2:

$$\lambda = \frac{Número\ de\ falhas}{(unidades\ testadas) \times (número\ de\ horas\ de\ teste)} \tag{2}$$

***Maintainability* (Manutenibilidade)**

Souza (2008) traz uma síntese de diversos autores sobre o conceito de manutenibildade, afirmando ser a capacidade do produto, expressa por uma probabilidade de ser convenientemente reparado, ou seja, colocar o bem avariado no estado considerado operacional num período de tempo conveniente sob condições operacionais e ambientais especificadas por uma equipa ou operador habilitado.

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \tag{3}$$

Onde:

M (t) = a função manutenibilidade, que representa a probabilidade de que o reparo comece no tempo t = 0 e esteja concluído, satisfatoriamente, no tempo t (probabilidade da duração do reparo).
E = base dos logaritmos neperianos (e = 2,718)
μ = taxa de reparos (número de reparos efetuados / total de horas de reparo do equipamento)
t = tempo previsto de reparo.

Para a melhoria da manutenibilidade, alguns requisitos devem ser considerados, como: Qualitativos (como a acessibilidade, padronização e simplicidade de operação); quantitativos (tempo médio de intervenções do tipo corretivo, preventivo e preditivo, expectativa de recursos de manutenção e tempos médio e máximo de indisponibilidade); suporte logístico à disposição para o cumprimento da missão da manutenção; capacitação de pessoal (planos de treinamento) (KARDEC e NASCIF, 2009).

***Availability* (Disponibilidade)**

A obtenção de informações a respeito da confiabilidade e manutenibilidade de um sistema ou de seus componentes, traz a possibilidade de prever problemas durante o uso dos equipamentos, logo, permite o conhecimento

da disponibilidade, viabilizando o planejamento e adaptação de estratégias de manutenção adequadas (CAJAZEIRA, 2012).

Kardec e Nascif (2009) classifica a disponibilidade em: i) inerente ou intrísceca; ii) técnica e iii) operacional. 1-Disponibilidade Inerente ou intrísceca: somente o tempo de reparo do equipamento é levado em consideração, excluindo do TMPR todos os demais tempos.

$$Disponibilide\ Inerente\ (\%) = \frac{TMEF}{TMEF+TMPR} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

TMEF = Tempo médio entre falhas (ou em inglês MTBF – *Mean Time Between Failures*).
TMPR = Tempo médio para reparos (ou em inglês MTTR – *Mean Time To Repair*).

Sendo que:

$$TMEF = \frac{1}{\lambda} \quad (5)$$

$$TMPR = \frac{1}{\mu} \quad (6)$$

$$\mu = \frac{\text{Número de reparos efetuados}}{Tempo\ total\ de\ reparo\ da\ unidade} \quad (7)$$

2-Disponibilidade técnica: A TMPR também não considera os tempos adicionais de logística, esperas, atrasos, etc., mas inclui as manutenções tanto corretivas quanto preventivas. É definida pela expressão:

$$Disponibilidade\ Técnica\ (\%) = \frac{TMEM}{TMEM+TMPR_{Ativo}} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

TMEM = Tempo médio entre manutenções (ou em inglês MTBM – *Mean Time Between Maintenance).*
$TMPR_{Ativo}$ = Tempo médio para reparos – corretivos e preventivos (ou em inglês $MTTR_{Active}$ – Mean Time To Repair Active).

3-Disponibilidade operacional: representação mais real da disponibilidade, incluindo o TMPR e todos os demais tempos: esperas, atrasos, paradas para manutenções preventivas ou inspeções, deslocamentos e outros que contribuem para que os equipamentos ou os sistemas fiquem indisponíveis. É representada pela equação:

$$Disponibilidade\ Operacional\ (\%) = \frac{TMEM}{TMEM+TM_P} \times 100 \quad (9)$$

Onde:

$TM_P$ = Tempo médio de paralizações (em inglês MDT – *Mean Down Time*para reparos – corretivos e preventivos (ou em inglês $MTTR_{Active}$ – Mean Time To Repair Active).

## CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA

A empresa estudada neste trabalho é uma fábrica de plásticos que está a cerca de 30 anos no mercado, estando localizada na cidade de Castanhal, no estado do Pará. Ao longo desses anos, a empresa passou por diversas expansões a fim de agregar novas linhas de produtos e melhorar a capacidade produtiva com ajuda de maquinários novos e mais modernos. Como produto, a empresa produz sacolas e embalagens plásticas que são feitas sob encomenda. Dentre os vários tipos de embalagens fabricadas, é possível destacar o PEBD (polietileno de baixa densidade), PEAD (polietileno de alta densidade), BOPP (película de polipropileno biorientada) e PET (polietileno tereftalato). É válido ressaltar que a fábrica trabalha desde beneficiamento do polietileno, para o surgimento do plástico, até o corte e solda da embalagem.

### Maquinário

Para a escolha das maquinas de estudos foram necessárias entrevistas com os operadores que revelou duas máquinas: refiladora e impressora. A primeira foi destacada por ser a última do processo produtivo e por requerer uma enorme precisão no seu funcionamento. Qualquer falha poderia ocasionar em uma enorme perda. Dentro do grupo de refiladoras, foi selecionada a que mais requeria manutenção em comparação às demais. Já a impressora foi destacada por ser a máquina com maior custo de manutenção, visto que a maioria dos reparos são feitos pela assistência técnica da

marca. E, para selecionar uma das impressoras, levou-se em consideração a de maior porte, logo, a de manutenção mais custosa.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Análise dos indicadores - Refiladora

Realizados os cálculos e analisados os resultados, verificou-se que a realidade atual da refiladora corresponde ao que foi descrito pelo técnico da manutenção durante a entrevista. A confiabilidade da refiladora para 24 horas de operação é boa (93,74%), apesar de apresentar ainda uma pequena probabilidade de que haja uma parada dentro desse período. Contudo essa probabilidade aumenta muito quando se verifica a confiabilidade para 540 horas, pois esta cai para 22,12%.

Sendo a refiladora uma máquina que requer uma grande precisão em seu funcionamento, essa baixa confiabilidade é preocupante, pois dentro do período de solicitação de entrega de um cliente, esse equipamento poderia vir a falhar ou cometer erros em pelo menos uma vez.

Quando se trata do tempo médio de reparo da refiladora, atualmente as 36,83 horas disponibilizadas para esse serviço não são suficientes garantir que essa máquina seja reparada, pois a manutenibilidade para esse tempo é de 63,21%. Para que se houvesse uma maior certeza de que o reparo fosse efetuado com sucesso, 84 horas teriam que ser disponibilizadas – o que aumentaria a manutenibilidade para 89,78%.

Porém, o aumento dessa manutenibilidade ocasionaria na redução da disponibilidade operacional atual da máquina. Atualmente, ela possui 88,73% do seu tempo disponível para operar, o que já é um pouco abaixo do ótimo. E, caso se aumentasse as horas de reparo para 84 horas, haveria uma redução de aproximadamente 12% da disponibilidade – queda para 76,50%, o que provocaria a perda de sua capacidade produtiva. Quanto aos custos de manutenção, a refiladora durante as 24 semanas de observação apresentou R$ 2.879,89, onde os valores gastos são referentes às peças do estoque e também a pequenos reparos efetuados pelo técnico da fábrica, no qual o custo do reparo foi calculado com base no rateamento do salário do técnico pelo tempo gasto para o serviço.

### Análise dos indicadores – Impressora de oito cores

Após todos os cálculos e observação dos resultados, foi possível verificar que a impressora de oito cores está em um estado bom, sendo possível melhorar. A sua confiabilidade para um dia é alta, mas o mesmo não é possível dizer para um mês, onde há uma queda de quase 70% da confiabilidade, o que revela a grande probabilidade dessa máquina ter pelo menos uma parada no período de um mês.

Apesar da grande probabilidade dessa máquina falhar no período de um mês, verifica-se que o tempo médio de manutenção é baixo. Para que a manutenibilidade aumentasse de 68,10% a 89,83 e fosse considerada ótima, seria preciso disponibilizar cerca de 4,7 horas para a manutenção, o que é ainda é bom tempo, pois não requer grandes paralisações e não perde tanta disponibilidade.

A disponibilidade operacional da impressora apresentou uma taxa excelente de 98,90%. Isso foi possível graças ao baixo tempo médio para manutenção de aproximadamente 2,35 horas e também à rápida ação do técnico da manutenção em reparar a impressora, que iniciou as reparações quase que no momento da parada. E, mesmo que se aumentasse o tempo médio de reparo para 4,7 de modo a aumentar a manutenibilidade, a disponibilidade operacional sofreria uma redução pequena de aproximadamente 1%, mantendo-se elevada. a impressora foi selecionada por ser a máquina que apresenta maior custo de manutenção, embora esse custo tenha sido apenas de R$ 633,61 para os sete reparos – valor inferior ao que foi gasto com a refiladora nos sete reparos.

Outro fato a ser destacado são os tempos desse último reparo. A espera das peças durou cerca de 1035 horas e, após sua chegada, a manutenção ocupou em torno de 45 horas. Apesar da máquina não precisar ficar parada durante esse tempo, pois apenas duas cores requisitavam manutenção, outras impressoras tiveram que assumir o trabalho para que o pedido fosse atendido, sobrecarregando o trabalho nos dispositivos auxiliares.

## DIAGRAMA DE ISHIKAWA

Com os resultados dos indicadores, percebem-se as possibilidades de paradas de ambas as máquinas analisadas. Tendo isso em vista e analisando de uma forma geral os problemas, foram elaborados dois diagramas de Ishikawa apresentados a seguir (Figuras 7 e 8), empregando o método 4M para ajudar a encontrar a causa raiz dos problemas. Utilizou-se como possíveis causas os fatores: “material”, “método”, “máquina” e “mão de obra”, apontando para os efeitos de parada da refiladora e parada da impressora respectivamente.

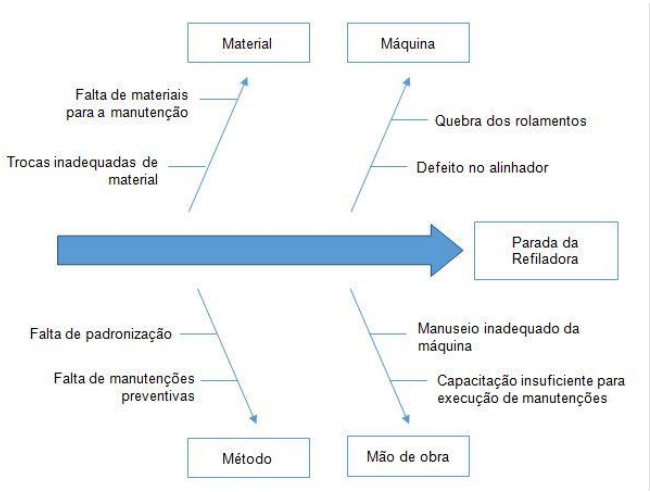



Figura 1: Diagrama de Ishikawa da refiladora

**1-Material:** Devido ausências de materiais para a manutenção no estoque, algumas vezes são utilizadas peças antigas e usadas até que novas cheguem, ocasionando uma maior frequência de falhas;
**2-Método:** A falta de um padrão no tamanho das embalagens fabricadas pode ser apontada como uma possível causa de parada da refiladora, assim como a ausência de manutenções preventivas;
**3-Máquina:** Pelo fato do uso constante da máquina, ocorre o desgaste natural da mesma, o que acarreta quebras nos rolamentos e defeitos no alinhador;
**3-Mão de obra:** Há pouca capacitação dos operadores para execução das manutenções, sendo que até em procedimentos simples acaba sendo necessária a vinda do técnico de manutenção para solucionar o problema. Outra causa possível são os manuseios inadequados da máquina.

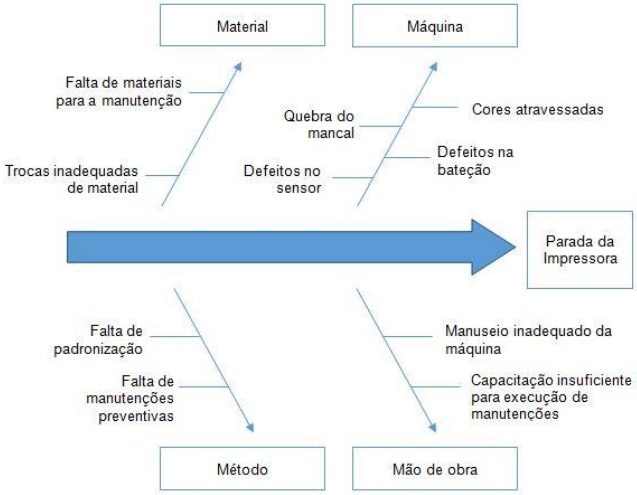



Figura 2: Diagrama de Ishikawa da impressora de oito cores

**1-Material:** Assim como na refiladora, algumas ausências de materiais para a manutenção no estoque obrigam a utilização de peças antigas e usadas até que novas cheguem;
**2-Método:** A falta de um padrão nas imagens e cores impressas na embalagem, assim como a ausência de manutenções preventivas podem ocasionar defeitos nos componentes;
**3-Máquina:** Também como na refiladora, há um desgaste natural devido o uso constante, o que acarreta quebras no mancal, defeitos no sensor e na bateção e atravessamento de cores;
**4-Mão de obra:** Na impressora também há pouca capacitação dos operadores para execução das manutenções, dessa forma é necessária a vinda do técnico de manutenção para solucionar os problemas, assim o mesmo fica sobrecarregado devido ser o responsável pela manutenção de todas as máquinas. Outra causa possível é o manuseio inadequado da máquina.

**FMEA – Refiladora**

Dentre os defeitos apresentados pela refiladora, foi possível verificar que grande parte deles geram uma parada completa da máquina e por isso tem alta gravidade. Muitos deles estão relacionados a uma mesma peça. É válido

ressaltar que, durante o período de coleta, sete defeitos foram observados, porém, dois deles eram iguais. Desse modo, na Tabela 1 a seguir, observa-se apenas seis defeitos e o peso dado a cada componente do NPR (índice de riscos)

Tabela 1: Defeitos da refiladora e pesos dos componentes do NPR

| Causa da parada/Defeito ou falha apresentado | Freq. da ocorrência | Gravidade da Falha | Detectabilidade | NPR |
|---|---|---|---|---|
| **Placa do alinhador danificada** | 2 | 10 | 1 | 20 |
| **Alinhador com defeito** | 7 | 9 | 1 | 63 |
| **Mau contato no fio do alinhador** | 2 | 5 | 4 | 40 |
| **Rolamento do mancal quebrado** | 1 | 2 | 6 | 12 |
| **Rolamento quebrado** | 1 | 8 | 6 | 48 |
| **Sensor do alinhador com defeito** | 1 | 10 | 1 | 10 |

Então, foi calculado a média aproximada dos NPRs de 32 e todos os defeitos acima disso foram destacados para a realização de uma melhor análise. Desse modo, foram três os defeitos em destaque: i) Alinhador com defeito; ii) mal contato no fio do alinhador; iii) rolamento quebrado.

Tabela 2: – Causa raiz do alinhador com defeito

| **Por que o alinhador deu defeito?** |
|---|
| Porque o rolamento travou |
| **Por que o rolamento travou?** |
| Porque não houve lubrificação da máquina nem limpeza dos trilhos |
| **Por que não houve lubrificação e limpeza?** |
| Porque não há manutenção preventiva nem autônoma |
| **Por que não houve essas manutenções?** |
| Porque os operários não são capacitados e nem há plano de manutenção |
| **Porque os operários não são capacitados?** |
| Por que os treinamentos oferecidos são insuficientes |

Ação: capacitação dos operários para realizar lubrificação e limpeza da máquina.

Tabela 3: Causa raiz do mal contato no fio do alinhador.

| **Por que houve mal contato no fio do alinhador?** |
|---|
| Porque a fiação antiga ficou desgastada |
| **Por que houve desgaste da fiação?** |
| Porque foram usados por muito tempo |
| **Por que usaram a fiação por muito tempo?** |
| Porque não houve a troca da fiação ao longo dos meses |
| **Por que não houve a troca da fiação?** |
| Porque não houve manutenção preventiva |

Ação: Realização de soldas na fiação.

Tabela 4: Causa raiz do rolamento quebrado

| **Por que o rolamento quebrou?** |
|---|
| Porque foi muito usado por muito tempo |
| **Por que usaram muito o rolamento?** |
| Porque foi reutilizado quando não havia um rolamento novo para substituir |

| **Por que não havia um rolamento novo no estoque?** |
|---|
| Porque não há um controle do estoque |
| **Por que não há controle de estoque?** |
| Porque não existe planejamento de qualquer atividade relacionada às manutenções |

Ação: Realização de um controle de estoque

**FMEA – Impressora de oito cores.**

Durante o período de coleta de dados, a impressora de oito cores passou por sete paralisações para reparos, porém, dois deles eram iguais e, por isso, abaixo na Tabela 3 somente seis defeitos são apresentados.

Tabela 5: Defeitos da impressora e pesos dos componentes do NPR

| Causa da parada/Defeito ou falha apresentado | Freq. da ocorrência | Gravidade da Falha | Detectabilidade | NPR |
|---|---|---|---|---|
| **Quebra do Mancal 6ª cor** | 2 | 3 | 1 | 6 |
| **Mangueira Rompida** | 6 | 3 | 1 | 18 |
| **Sensor com Defeito** | 2 | 9 | 2 | 36 |
| **Mal contato no sensor** | 2 | 5 | 3 | 30 |
| **Defeito na bateção 5ª cor** | 1 | 8 | 1 | 8 |
| **Sensor de encosto 7ª cor queimado** | 8 | 8 | 1 | 64 |

Assim como na refiladora, foi calculada a média aproximada dos NPRs para destacar aqueles defeitos acima desse valor e então encontrar suas causas raízes, a qual resultou em 28. Foram eles: i) sensor com defeito; ii) mal contato no sensor; iii) sensor de encosto 7ª cor queimado.

É válido ressaltar que a impressora possui seis sensores para cada cor, o que resulta uma grande quantidade dessa peça na composição da máquina, justificando a quantidade de defeitos envolvendo sensores. Porém, mesmo possuindo fins diferentes, verificou-se que a causa dos mesmos se assemelha e por isso suas ações são as mesmas. Assim sendo, no Quadro a seguir, encontra-se a análise dos 5 porquês direcionada aos três defeitos com o NPR acima da média.

Tabela 6: Causa raiz do rolamento quebrado

| **Por que o sensor deu defeito?** |
|---|
| Porque houve um desgaste natural do sensor até falhar |
| **Por que houve desgaste do sensor até falhar?** |
| Porque foi usado por muito tempo |
| **Por que foi usado por muito tempo?** |
| Porque não houve a troca do sensor ao longo dos meses |
| **Por que não houve a troca do sensor?** |
| Porque não houve manutenção preventiva |

Ação: realização de manutenção preventiva.

**PROPOSTA DO PLANO DE MANUTENÇÃO**

A partir das informações coletadas das análises dos indicadores, aliado à análise geral das causas com o diagrama de Ishikawa e mais a aplicação do FMEA e dos 5 porquês para encontrar as causas raízes dos problemas com o NPR acima da média, foi possível elaborar o plano de manutenção a ser proposto com a ferramenta 5W2H, apresentadas abaixo.

Tabela7: Plano de manutenção proposto para a impressora de oito cores e refiladora.

| 5W | | | | | 2H | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **What?** | **Who?** | **Where?** | **When?** | **Why?** | **How?** | **How Much?** |
| O que? | Quem? | Onde? | Quando? | Por quê? | Como? | Quanto? |
| Capacitação dos operários para a realização da lubrificação e limpeza das máquinas | Técnico de manutenção da empresa | Na sala de treinamentos da empresa | Nos contra-turnos dos funcionários a cada seis meses | Para que o técnico de manutenção não sofra sobrecarga de serviços; Para evitar paradas desnecessárias. | Por meio de palestras | Valor da diária do técnico de manutenção da empresa |
| Lubrificação e limpeza da máquina | Os operadores da refiladora | Na refiladora | A cada 15 dias | Reduzir paradas não programadas da máquina durante o mês | Desobstrução dos trilhos e aplicação do lubrificante | 30min |
| Inspeção geral da máquina | Técnico de manutenção da empresa | Na refiladora | A cada 15 dias | Reduzir de paradas não programadas da máquina durante o mês | Solda da fiação e peças ou troca, se necessário | 30min |
| Controle de estoque | Técnico de manutenção da empresa | No depósito | Ao término de cada manutenção preventiva | Diminuir tempo de parada da máquina devido ao tempo de espera de peças | Realização de um inventário | 1h |
| Lubrificação e limpeza da máquina | Técnico de manutenção da empresa | Na impressora de oito cores | A cada 30 dias | Reduzir de paradas não programada da máquina durante o mês | Eliminação das impurezas e aplicação do lubrificante | 30min |
| Inspeção geral da máquina | Técnico de manutençao da empresa | Na impressora de oito cores | A cada 30 dias | Reduzir paradas não programadas da máquina durante o mês | Solda da fiação e peças ou troca, se necessário | 2 turnos |
| Treinamento do técnico de manutenção da empresa | Técnico especializado | Na sala de treinamentos da empresa | Assim que possível | Redução do tempo médio de reparos e aumentar a manutenibilidade | Por meio de palestras | R$ 8.000,00 |

As medidas sugeridas direcionadas especificamente à refiladora fazem referência à implantação de revisões periódicas, isto é, manutenções preventivas que possam vir a reduzir a probabilidade de paradas da máquina durante o mês que, conforme apresentado anteriormente na análise dos indicadores, acontece pelo menos uma vez ao mês. Assim, no cenário atual da máquina, essas revisões devem acontecer a cada 15 dias, devido a que os seus defeitos geram parada completa da máquina e afetam sua precisão, o que é inaceitável. Não muito diferente da refiladora, a proposta para impressora sugere que a máquina também deva passar por manutenção preventiva, onde as mesmas verificações que a refiladora passa seriam feitas na impressora. Contudo, para que os operadores possam realizar tais lubrificações e limpezas nas duas máquinas, sugere-se que o técnico de manutenção repasse instruções de como fazê-lo. A partir delas, espera-se que os operadores entendam a importância de conservar bem a máquina e a sua responsabilidade em fazê-lo, assemelhando-se a uma manutenção autônoma.

## CONCLUSÃO

O método RAM, onde se obtém os valores de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade, foi utilizado e assim foi possível avaliar o desempenho das máquinas escolhidas e, junto com ferramentas da qualidade, foi possível propor um plano de manutenção preventiva para a empresa. Dessa forma, pode-se afirmar que o objetivo geral de propor um plano de manutenção para os equipamentos críticos de uma fábrica de embalagens plásticas, utilizando o método RAM, buscado por este trabalho, foi alcançado. Mesmo alcançando os objetivos, algumas situações limitaram o trabalho. Dentre elas, pode-se citar a falta de dados de manutenções anteriores da empresa, o que gerou a necessidade de se realizar observações e coletas dos mesmos, acarretando assim outra limitação: a falta de um tempo maior para a coleta dos dados. O ideal é que haja um período maior de coletas para que os resultados dos indicadores sejam mais precisos, evitando “pontos fora da curva”.

## REFERÊNCIAS

ABRAMAN. Associação Brasileira de Manutenção, Documento Nacional 2013. Disponível em: <http://www.abraman.org.br/>. Acesso em 22/05/2017.

BORGES, C. S. de A. P. Proposta de implementação de um novo modelo de organização e gestão da manutenção na Adega cooperativa de Covilhã. Dissertação (Mestrado em Engenharia e gestão industrial) – Universidade da Beira interior, Covilhã, 2013.

CAJAZEIRA, Caroline Leite Barbosa. Estudo dos Fatores RAM na Fase de Operação e Manutenção de Aerogeradores. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Universidade do Minho, Portugal, 2012.

FABRO, Elton. Modelo para planejamento de manutenção baseado em indicadores de criticidade de processo. Dissertação (Mestrado em Engenharia de produção) - Programa de pós-graduação da em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Cataria, Florianópolis, 2003.

FERRAZ, A. J. V. B. Influência da manutenção nos consumos energético de sistema AVAC. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2009.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Contas Nacionais trimestrais, 2017 Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/pib/pib-vol-val_201701_3.shtm>. Acesso em 11/06/ 2017.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. Manutenção: função estratégica. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. Os negócios promissores em 2017, dez. de 2016. Disponível em: <http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/a315d30f98d8993b07dda11b82ec6f46/$File/7504.pdf>. Acesso em 11/06/2017

SOUZA, Rodrigo de Queiroz. Metodologia e desenvolvimento de um sistema de manutenção preditiva visando à melhoria da confiabilidade de ativos de usinas hidrelétricas. 2008. 226 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos) - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
( ) Fabricação Mecânica e Materiais
(X) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos

# REALIZAÇÃO DO APPCC EM UMA FÁBRICA DE MOLHO DE PIMENTA

**Kassio Felipe da Costa Serra**[1]
**Amaurilio Vital Gomes Junior**[2]
Universidade Estadual do Maranhão - UEMA
Cidade Universitária Paulo VI, Av. Lourenço Vieira da Silva, nº 1000 - Bairro: Jardim São Cristóvão CEP 65055-310 – São Luís/MA.
kassio_s@hotmail.com, amauriliojr@hotmail.com.

**RESUMO:** A Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle (APPCC) foi desenvolvida pela Pillsbury Company no século passado, mais precisamente na década de 50, devido a uma necessidade da NASA com a alimentação de tripulantes nas viagens espaciais. A análise consiste na adaptação do conceito de modos de falha onde identifica pontos no processo de produção que podem ocorrer falhas e que possam propiciar a contaminação dos alimentos. Com a identificação dos potenciais perigos nos pontos do processo de produção, chamados de pontos críticos, é possível proporcionar o controle do mesmo fazendo com que a segurança do produto final não seja comprometida. A partir deste momento, com o surgimento da APPCC, é possível através desta análise identificar os fatores associados ao processo, insumos, matéria prima e ingredientes com a finalidade de asseverar a qualidade do produtor até a entrega ao consumidor. Esse trabalho tem como objetivo demostrar o desenvolvimento de uma Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle – APPCC, que será utilizado para o processo de produção do molho de pimenta garantindo a segurança alimentar.

**Palavras-Chave:** APPCC, processo, segurança alimentar.

**ABSTRACT:** *Hazard Analysis and Critical Control Points (HACCP) was developed by the Pillsbury Company in the last century, more precisely in the 1950s, because of a NASA need to feed crew members in space travel. The analysis consists of the adaptation of the concept of fault modes where it identifies points in the production process that can occur faults and that can lead to food contamination. By identifying the potential hazards at the points of the production process, called critical points, it is possible to provide control of the hazards so that the safety of the final product is not compromised. From this moment, with the appearance of HACCP, it is possible through this analysis to identify the factors associated with the process, inputs, raw material and ingredients with the purpose of assuring the quality of the producer until the delivery to the consumer. This work aims to demonstrate the development of a Hazard Analysis and Critical Control Points - HACCP, which will be used for the production process of the pepper sauce guaranteeing food safety.*

***Keywords:*** *HACCP, process, food security.*

## INTRODUÇÃO

A qualidade é considerada um conceito humano, logo foi vista com responsabilidade. O controle de qualidade visa a melhoria de processos podendo ser adotado em diversos sistemas e organizações garantindo que produtos e serviços cheguem sem defeito para os clientes. O controle de qualidade foi dividido nas seguintes áreas por sequência:

a) Inspeção.
b) Controle estatístico da qualidade.
c) Garantia da qualidade.
d) Gestão estratégica da qualidade.

A definição de qualidade está fundamentada na adequação ao uso; conformidade com os requisitos; baixa variabilidade; satisfação e fidelização dos clientes e na totalidade dos recursos e características de um produto ou serviço que afetam sua capacidade de satisfazer explícita ou implicitamente as necessidades dos clientes (COLLETO, 2012).

Segundo Paladini (2004, p. 31) a “Qualidade é a condição necessária de aptidão para fim a que se destina”.

A garantia da qualidade passa a ser de primordial importância para que se estabeleça uma relação de confiança entre consumidor e produtor. Essa garantia está baseada em atividades (controle de qualidade de um produto ou serviço) que resguardem o consumidor de falhas (COLLETO, 2012).

A qualidade tem seu papel cada vez mais forte nas empresas, o que torna seu conceito mais utilizado no interior das organizações. A satisfação do cliente é a base da sobrevivência da empresa, eliminando os fatores que desagradam o cliente e antecipar as suas necessidades.

O processo de implantação de sistemas de gestão agrega valor à cultura organizacional, desenvolvendo competências relacionadas com o planejamento, atuação proativa, capacidade de trabalho em equipe e melhoria da confiabilidade dos sistemas produtivos (SILVA, KOVALESKI e GAIA, 2012).

A qualidade tem sido um dos pontos mais relevantes em todos os segmentos da indústria estando vinculada a bens, produtos, processos e serviços. Fator de grande importância assume papel de padronização e de destaque entre as empresas. Hoje, qualidade não é vista somente como um diferencial entre as companhias, mas um requisito para a permanência em um mercado cada dia mais competitivo e exigente. A busca para o sucesso de uma organização está na utilização de metodologias que envolvam ferramentas da qualidade. Empresas que não tiverem preocupação com a garantia da qualidade poderão ficar às margens do mercado consumidor. (DIAS, 2014).

Com o aumento população e da produção de alimentos, foi se tornando algo importante, a qualidade do produto consumido deve ter um compromisso em relação à higiene e segurança alimentar. Uma empresa de ramo alimentício deve seguir varias regras a fim de garantir a segurança da saúde dos clientes.

O sistema de Analise de Perigos e Pontos Críticos de Controle (APPCC) é método preventivo contra a contaminação dos alimentos, feito através de analise e inspeção dos produtos.

A pimenta possui um valor nutricional rica em vitaminas A, B1, B2, C, E entres outras, que ajuda na digestão e a reduzir o colesterol, mas está sujeito a sofrer contaminações de agentes físicos, químicos e biológicos em virtude pela falta de higiene, no sistema operacional na cadeia de produção.

## APPCC

O conceito de APCC permite um estudo sistemático para identificar os perigos, avaliar a probabilidade de acontecerem durante o processamento, a distribuição ou o uso do produto e definir meios para controlá-los (ILSI, 1997). Ele oferece uma segurança de que a higiene e a segurança alimentar esta seguindo de maneira eficiente tendo elas como foco principal.

A montagem do Plano APPCC é complexa. Exige tempo, planejamento, paciência e muito cuidado. Ao implantar essa prática na empresa é essencial que haja boa comunicação interna. Envolver a equipe faz parte do processo e garante a eficácia do plano. (NASCIMENTO, 2017).

O sistema ajudar a identificar todos os riscos e aqueles previstos antecipadamente permitindo o controle do produto final a custo razoável e diminuindo o desperdício.

O êxito do APPCC auxilia na prevenção de doenças alimentares.

## Procedimento experimental

Para a realização da APPCC é necessário que as sete etapas seguintes sejam adotadas respectivamente.

- A formação da equipe responsável pela elaboração do APPCC, de nível funcional e não hierárquico onde tem a função de definir os objetivos principais e o campo de estudo, analisa as dificuldades e o trabalho necessário, garante os meios necessários para a realização da análise e recolhe os dados e informações em seu inventário estabelecendo assim um plano de reuniões.
- Identificar a empresa na qual vai ser feita a análise.
- Fazer a listagem do estabelecimento como edificações, instalações, equipamentos, utensílios, transportes, para que se possa fazer o levantamento de todos os meios e recursos utilizados;
- Capacitação técnicas dos funcionários, para que possam se adaptar a implantação da APPCC;
- Descrição do produto, mantendo assim o conhecimento sobre a característica do produto;
- Criação do diagrama operacional do processamento;
- Aplicação dos sete Princípios do APPCC

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a elaboração do APPCC, ficou definida a equipe que cada integrante dever ter o senso de liderança e convencimento para possibilitar a implementação do conhecimento do programa no setor.

A análise realizada desde o período da colheita até a estocagem do produto final como mostrado na Figura 1.

Antes da lavagem, ocorrem duas etapas: a primeira é a pré-lavagem, antes da seleção, que é feita para retirada de 90% agentes físicos (metais, plásticos, terra). A seleção é feita rigorosamente e as partes inapropriadas são descartadas. A etapa seguinte é a lavagem, na qual reduz o número de microrganismos restantes.

A pimenta é levada para câmara de resfriamento onde se tem o controle da temperatura e da umidade.

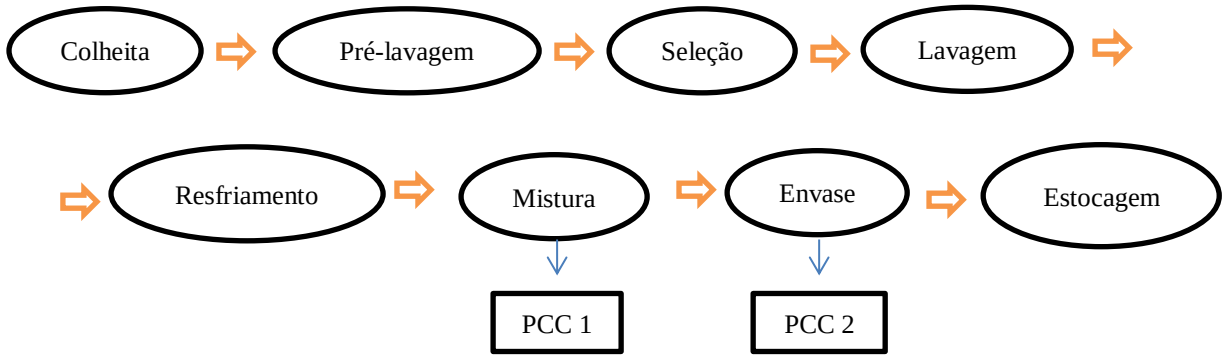



**Figura 1.** Fluxograma do processo com os Pontos Críticos de Controle

Para o todos os tipos de perigos devem ser listados e sua consequência avaliada. Com isso, identifica os PCC na etapa da mistura e da envase conforme mostrado na tabela 1. Adota um PCC físico no processo na mistura caso haja uma falha na inspeção com consequência de materiais físicos no produto.

Para o envase o PCC químico, deve ocorrer a correta execução de limpeza do equipamento e registrada. Se houver deficiência durante o sua execução, então o lote da pimenta é retirado, descartado e registrado.

**Tabela 1.** Plano de Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle para o processo de produção

| PCC | PCC 1 | PCC 2 |
|---|---|---|
| Tipo de Perigo | Físico | Químicos |
| Perigo | Presença de corpos estranhos | Presença de detergente e desinfetante |
| Causa | Deficiência no controle pelos funcionários | Deficiência no controle pelos funcionários |
| Medida preventiva | Inspeção visual | Enxague durante o processo final de limpeza |
| Monitoramento | No inicio e durante no processo | Durante no processo de limpeza |
| Registro | Planilhas do programa | Planilhas do programa de limpeza |

## CONCLUSÃO

Quando o tema é segurança alimentar são tomadas medidas para diminuir os riscos de contaminação e garantir que os produtos cheguem aos consumidores sem apresentar nenhum risco. Verificar e monitorar todos os pontos do processo que podem gerar a contaminação produto é capaz de prevenir e consertar essas falhas. Na falta deste programa o controle do processo é inviável.

Vários desafios são encontrados, os funcionários têm o papel principal para a execução exata para uma boa produção.

Como apresentados os PCCs cada um tem sua diferença. Na mistura deve se atentar para pequenos de corpos estranhos. No envase deve fazer a inspeção do equipamento depois da limpeza, pois ele é agente principal de contaminação.

A criação do APPCC no processo de fabricação do molho de pimenta foi um sucesso no controle de perigos físicos e químicos apresentados, permitindo controle da qualidade e transmitindo segurança no produto oferecido aos consumidores.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Pimenta Nippon pelo apoio no trabalho realizado.

## REFERÊNCIAS

CESAR, F. I. G. Ferramentas Gerenciais Da Qualidade.1°. ed. São Paulo: Biblioteca24horas, Seven System International Ltda., 2013.

COLLETO, D. Gerenciamento da segurança dos alimentos e da qualidade na indústria de alimentos. 2012. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia de Alimentos. Universidade Federal do Rio

Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/72762/000870926.pdf?sequence=1>. Acesso em: 07 jun. 2018.

DIAS, Ellen Caroline. APPCC como ferramenta da qualidade na indústria de alimentos. 2014. 56 f. Monografia (Especialização em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2014. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/5946/1/PG_CEEP_2014_1_07.pdf Acesso em: 07 de junho de 2018.

ILSI (International Life Science Institute): A simple guide to understanding and applying the hazard analysis critical control point concept. 2nd edition, 1997.

MARSHALL JUNIOR, I. et al. Gestão da qualidade. 8. ed. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2006.

NASCIMENTO, Amanda. A importância dos planos APPCC para a segurança dos alimentos. 2017. Artigo. Disponível em: <http://www.bloggestaodaqualidade.com.br/a-importancia-dos-planos-appcc-para-a-seguranca-dos-alimentos/> Acesso em: 07 de junho de 2018

PALADINI, E. P. Gestão da qualidade: teoria e pratica. 2. Ed. São Paulo: Atlas, 2004.

SILVA, L. C. S; KOVALESKI, J. L; GAIA. S. Gestão da qualidade do produto no processo de produção industrial: um estudo de caso em uma indústria de bebidas. Revista de Engenharia e Tecnologia, Ponta Grossa, v.4, n.1, p.55-67, abr. 2012. Disponível em: <http://revistas2.uepg.br/index.php/ret/> . Acesso em: 07 jun. 2018.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.

## ÀREA DE CONHECIMENTO DO TRABALHO

Assinalar aqui, com um X, a seção ‘área de conhecimento do trabalho’.

( ) Acústica, Vibrações e Dinâmica
( ) Automação Industrial
( ) Energia
( ) Fabricação Mecânica e Materiais
(x) Gestão de Manufatura
( ) Mecânica Computacional
( ) Mecânica dos Sólidos
( ) Otimização e Análise
( ) Projeto de Máquinas
( ) Termociências e Mecânica dos Fluidos