

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE DESGASTE DE FERRAMENTAS DE CORTE NO TORNEAMENTO DE FERRO FUNDIDO NODULAR AUSTEMPERADO.

Valter Vander de Oliveira¹

Prof. Marcelo Teixeira dos Santos, Ph.D.¹

Prof. Paulo André de Camargo Beltrão, Ph.D.²

Cássio Luiz Francisco de Andrade, Ms.³

oliveira@sociesc.com.br

teixeira@sociesc.com.br

beltrao@uftpr.br

cassio@tupy.com.br

¹ Sociedade Educacional de Santa Catarina, R Albano Schmidt, 3333. Boa Vista. Joinville. Santa Catarina.

² Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Avenida Sete de Setembro, 3165. Rebouças. Curitiba. Paraná.

³ Tupy Fundições Ltda, R Albano Schmidt, 3333. Boa Vista. Joinville. Santa Catarina.

Resumo: O ferro fundido austemperado (ADI), Austempered Ductile Iron, tem sido aplicado com sucesso na manufatura de bloco de motores, virabrequins, uma vez que os blocos em ferro fundido nodular perlítico não conseguem suportar as elevadas cargas dos motores modernos. Este material também tem sido aplicado em engrenagens, com diversos tipos e tamanhos, bem como roletes de correntes, podendo ser empregado em vários segmentos da indústria mecânica, principalmente na indústria automobilística, devido as suas propriedades e suas vantagens técnicas e a combinação entre a resistência e a ductilidade que pode ser obtida neste material. A principal limitação técnica do ferro fundido nodular austemperado é atribuída a sua usinabilidade ser relativamente baixa no estado austemperado. Este problema se deve ao endurecimento por deformação que ocorre pela transformação da austenita, característica da microestrutura do nodular austemperado, a qual afeta as etapas do processo de produção sendo comum realizar o desbaste da peça antes do tratamento térmico e a usinagem de acabamento logo na seqüência. Este artigo descreve um estudo realizado sobre o comportamento do desgaste de três materiais aplicados como ferramenta de corte (metal duro, cerâmica e CBN) no processo de torneamento externo do ADI através da análise comparativa do tempo de vida das ferramentas em função da velocidade de corte, empregando como critério para final da vida da ferramenta o desgaste de flanco de 0,3 mm. As ferramentas de metal duro, revestidas com uma camada de óxido de alumínio apresentaram o melhor desempenho entre as ferramentas ensaiadas devido a combinação da resistência a abrasão da cobertura e a tenacidade do substrato de carboneto de tungstênio.

Palavras-chave: Processo de Torneamento, Ferro Fundido Nodular Austemperado (ADI), Desgaste de Flanco e Craterização.

1. INTRODUÇÃO

Conforme Goldberg et al ⁽⁷⁾, o ferro fundido nodular austemperado é um material aplicado em substituição aos outros ferros fundidos, pois apresenta como características a melhoria das propriedades mecânicas, como resistência ao desgaste, dureza, tenacidade, a facilidade de obtenção e de fabricação com um custo aceitável sendo considerada esta tecnologia ecologicamente correta. Empregado desde 1972, sua utilização vem aumentando de forma significativa principalmente na indústria automobilística nas últimas décadas.

As vantagens técnicas do ADI é a combinação entre a resistência mecânica e a ductilidade que pode ser obtida neste material, sendo este comparado à alta resistência do aço fundido. Entre outras propriedades destaca-se sua capacidade de amortecimento, resistência ao desgaste e boa condutividade térmica, sendo este menos propenso à distorção durante o tratamento térmico do que outros materiais ferrosos.

Goldberg et al ⁽⁷⁾ estimou-se a produção de ADI na América do Norte em 150.000 toneladas por ano, com uma projeção de crescimento para 2005 de 20%. Existiam cerca de 200 fundições trabalhando com o ferro fundido nodular austemperado, sendo que a maioria das peças produzidas em ADI, no mercado norte-americano, é usinada antes do tratamento térmico.

A principal limitação técnica do ferro fundido nodular austemperado é atribuída a usinabilidade relativamente baixa no estado austemperado, sendo comum realizar o desbaste antes do tratamento térmico e o acabamento final na seqüência do processo.

O desenvolvimento de novos materiais com estrutura granular mais fina melhorou a tenacidade mantendo as outras propriedades como dureza e resistência ao desgaste. Materiais como a cerâmica e o nitreto cúbico de boro (CBN) estão sendo empregados na indústria em usinagem de materiais endurecidos como o ADI devido suas propriedades, como elevada dureza a quente e resistência ao desgaste. Além disso, a tecnologia de revestimento das ferramentas de corte adquiriu fundamental importância no processo de usinagem de materiais endurecidos, onde a cobertura realiza a função de separação entre o substrato da ferramenta e o material usinado, onde o substrato pode ser tenaz e suportar choques e o revestimento, em uma camada bastante fina resiste ao desgaste, reduz o atrito na superfície de saída e age como isolante térmico do substrato. Apesar do processo de escolha do revestimento depender principalmente do material a usinar e do processo de usinagem pode-se destacar o emprego do nitreto de titânio alumínio (TiAlN) em usinagens a seco. Além destas vantagens proporcionadas pelo revestimento da ferramenta o processo de deposição da cobertura pode ser químico (CVD) ou físico (PVD) com a vantagem que no processo físico pode-se realizar a aplicação de uma nova camada várias vezes sem alterar as dimensões e o formato da ferramenta.

Diniz, et al ⁽¹⁾ apresenta um conceito inicial que para se ter à ferramenta adequada a usinagem do ferro fundido ADI tem-se que analisar uma série de situações as quais auxiliaram na escolha ideal da ferramenta para usinagem do material. Os aspectos a serem considerados nesta escolha incluem: i) o material a ser usinado por sua dureza e o tipo de cavaco; ii) as características do equipamento como potência, gama de velocidades e estado de conservação; iii) o custo da ferramenta mesmo apresentado pontos positivos, como maior vida da ferramenta e/ou maior produção, podem não apresentar em algumas situações uma relação custo/benefício razoável. Condições de usinagem como velocidade de corte, avanço e profundidade de corte devem ser vistos em operações de desbaste e acabamento. Além dessas situações ainda há formas e dimensões da ferramenta como geometria e condições da operação do tipo corte interrompido ou tipo de fixação.

Este artigo tem como objetivo comparar o desempenho e analisar o comportamento do desgaste em função da velocidade de corte entre as ferramentas de metal duro, cerâmica e CBN aplicadas como ferramentas de corte no torneamento externo na operação de acabamento do ferro fundido nodular austemperado.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para este estudo foi realizado o torneamento cilíndrico externo de um tubo de ferro fundido nodular austemperado com a seguinte composição química: C = 3,65%; Si = 2,85%; Mn = 0,18%; S = 0,005%; P = 0,027%; Cu = 0,97%; Ni = 0,04% e Mg = 0,041% conforme a especificação do fornecedor, a empresa fundição Tupy. Os ensaios sistemáticos de usinagem seguiram a metodologia da norma ISO 3685 e a identificação e classificação do material foram realizadas segundo a norma SAE J24770.

A usinagem foi realizada no torno CNC da marca FEELER, modelo FTC10 com potência instalada de 10 kW, realizou-se o estudo com três diferentes materiais como ferramenta de corte, o metal duro, a cerâmica e o nitreto cúbico de boro. Empregou-se no ensaio a ferramenta codificada segundo a norma ISO, CNMG 120408, para o metal e CNGA 120408 para as pastilhas de cerâmica e CBN. Sua forma romboidal apresenta um ângulo de quina de 80° e um raio de ponta de 0,8 mm. As pastilhas de metal duro possuíam um revestimento de óxido de alumínio, através do processo de CVD (chemical vapor deposition) e a pastilha de nitreto cúbico de boro um revestimento de nitreto de titânio. O suporte porta ferramenta foi identificado como sendo DCLNL 2020 K12, especificações estas responsáveis pelos ângulos de trabalho da ferramenta. Para o torneamento com ferramentas de cerâmica e CBN as mesmas apresentam um chanfro de 0,2 mm para proteger as arestas aumentar a resistência do gume. Para complementar as informações geométricas apresentam-se na tabela os principais ângulos da ferramenta.

Tabela 1. Ferramentas de corte no processo de torneamento - Geometria de Corte

Ferramenta	Revestimento	Classe	α_o	χ	γ	λ	ϵ	r_e
Metal duro	Al_3O_2	K15	-6	95	9	-6	80	0,8
Cerâmica	TiC	K15	-6	95	-26	-6	80	0,8
CBN	TiN	K05	-6	95	-26	-6	80	0,8

A usinagem foi realizada a seco mantendo o avanço e a profundidade de corte, variando o material da ferramenta e a velocidade de corte o ensaio. A velocidade de corte empregada foi corrigida estabelecida por recomendação do fornecedor um tempo de vida trinta minutos. A profundidade de corte aplicada foi de 1,2 mm para a geometria da ferramenta, pois a norma recomenda que a profundidade neste tipo de ensaio seja maior ou igual a duas vezes o raio de ponta da ferramenta. O avanço foi selecionado em função da recomendação do fabricante por 0,3 mm por rotação. Estabeleceram-se então dois fatores com três níveis, resultando em nove ensaios com duas repetições para a partir deles analisar o comportamento do desgaste das ferramentas, a potência de corte e o acabamento superficial.

O comprimento de usinagem foi estabelecido para que na situação mais crítica, menor diâmetro, o valor não ultrapassasse a relação de uma vez e meia o diâmetro da peça. A programação da máquina foi elaborada de forma manual para que a cada passada houvesse um intervalo de tempo para registro das medições. A máquina possui um comando Mitsubishi, Meldas 50L, e a linguagem empregada é ISO que permitiu uma maior autonomia do operador.

Foram preparados 42 corpos para o ensaio de usinabilidade e metalográfico, todos os corpos foram submetidos ao tratamento térmico de austêmpera, para a obtenção do ADI, no tratamento térmico da SOCIESC. Os corpos foram identificados e coletaram-se os dados de dureza para que devido a dispersão foram empregados para separar os corpos de prova para cada ferramenta. Utilizou-se no ensaio uma tabela de utilização dos corpos de prova, conforme a dureza que variou de 285 a 321 HB, para cada tipo de material da ferramenta. Cada uma das ferramentas trabalhou com uma faixa significativa das durezas obtidas, o primeiro experimento com a menor dureza, o segundo experimento com uma dureza intermediária e a última repetição com a maior dureza encontrada.



Figura 1. Usinagem do corpo de prova.

Os resultados do desgaste de flanco, potência de acionamento e rugosidade foram coletados a cada duas passadas para que ao término dos ensaios, fossem comparados os rendimentos das três ferramentas de corte. A norma recomenda entre seis e dez medições para cada experimento. Um ensaio preliminar determinou o número de intervalos para medição, os ajustes nos parâmetros de corte e no caso da pastilha de cerâmica resultou na seleção de uma classe mais tenaz para o experimento.

Foram empregados como critério para determinar o final da vida e avaliar o desempenho da ferramenta o desgaste de frontal ($V_b = 0,3\text{mm}$) ou o desgaste de entalhe ($V_n = 0,6\text{mm}$), outras avarias como lascas foram percebidas e também resultaram em interrupção do experimento. As medições foram realizadas em um microscópio com ampliação de 20 vezes.

3. RESULTADOS OBTIDOS

Durante a usinagem dos corpos de prova observou-se que os cavacos foram cisalhados e apresentaram-se na forma de pequenas lascas e o calor gerado pelo atrito liberava algumas fagulhas junto aos cavacos devido a dureza do material. Os ensaios realizados com a ferramenta de metal duro identificada pelo fabricante como GC3215 apresentaram uma boa resistência ao desgaste. Esta possuía um revestimento de óxido de alumínio aplicado pelo processo de deposição química. Observou-se nos primeiros dez minutos de corte um desgaste da superfície principal de corte por abrasão e na sequência também desgaste por craterização que acabou por remover parte da aresta. Durante o ensaio, observou-se também a presença de vibrações geradas por inclusões formadas por carbonetos que foram responsáveis pelo desgaste tanto de flanco quanto de craterização no ensaio diminuindo o tempo de vida da ferramenta que em alguns casos resultou em lascamento da aresta.

O ensaio com a ferramenta de cerâmica iniciado com a pastilha identificada pelo fabricante como CC650 apresentou problemas de lascamento do gume no ensaio preliminar a partir da terceira passada, as vibrações percebidas durante a usinagem foram resultantes devidos a inclusões, pontos com dureza superior a matriz na superfície da peça. Optou-se pela mudança da classe de cerâmica por uma mais tenaz, mudando de K05 para K15. A ferramenta apresentou desgaste de flanco na aresta principal e próximo a $0,3\text{ mm}$ de V_b as vibrações e potência de corte aumentavam tendo como consequência o lascamento da aresta sendo necessário repetir o ensaio algumas vezes.

Os ensaios com a ferramenta de CBN foram realizados com pastilhas identificadas pelo fabricante como CB7050 de classe K05 com revestimento de nitreto de titânio aplicado através de deposição física. O experimento apresentou resultados superiores à cerâmica, entretanto as

características do comportamento do desgaste foram semelhantes apresentando desgaste de flanco na aresta principal.

Para análise da influência da velocidade de corte cada material de ferramenta comparou-se o tempo de vida alcançado pela ferramenta até atingir o desgaste de flanco de 0,3mm.

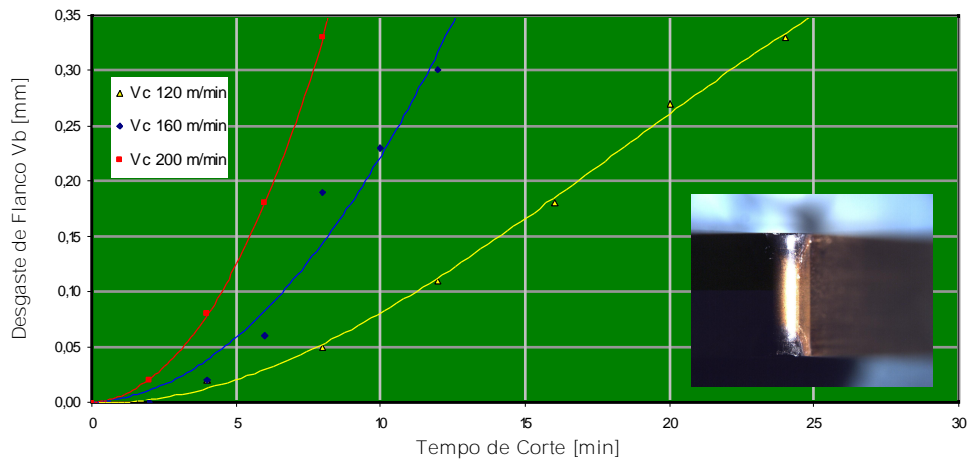


Gráfico 1. Comportamento do desgaste de flanco em ferramenta de metal duro para velocidades de corte de 120, 160 e 200 metros por minuto.

Os ensaios com pastilhas de cerâmica também foram comparados em função do tempo de vida da ferramenta, apresentando o melhor desempenho na velocidade de corte de 200m/min. As vibrações aumentavam gradativamente como o aumento do desgaste da aresta.

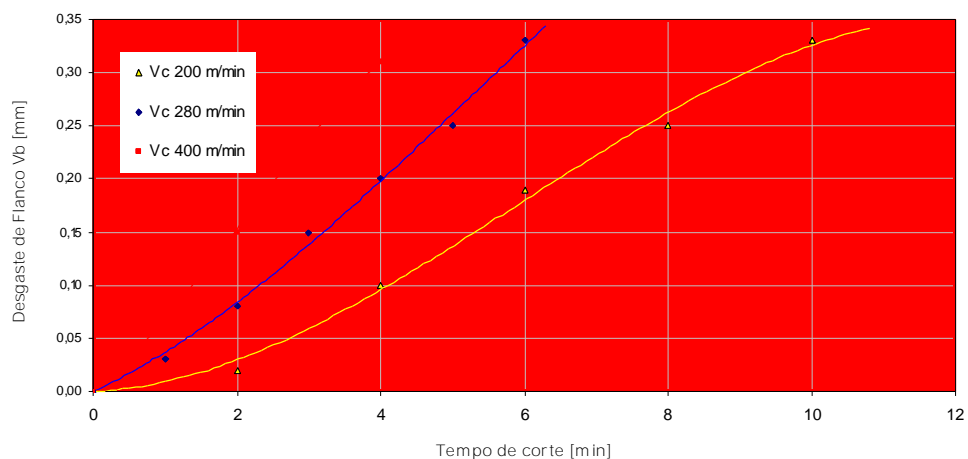


Gráfico 2. Comportamento do desgaste de flanco em ferramenta de cerâmica para velocidades de corte de 200, 280 e 400 metros por minuto.

O experimento com as pastilhas de CBN apresentaram o melhor rendimento na velocidade de corte de 200m/min. Assim como nas ferramentas de cerâmica, as inclusões na superfície da peça resultaram no desgaste da aresta. Pode-se observar o desgaste do flanco na etapa inicial da usinagem, a cobertura de nitreto de titânio também não resistia à abrasão surgindo o desgaste de craterização e por fim o lascamento da aresta. Dentre os mecanismos de desgaste observou a oxidação na superfície de saída e gradativamente o desgaste na superfície de saída.

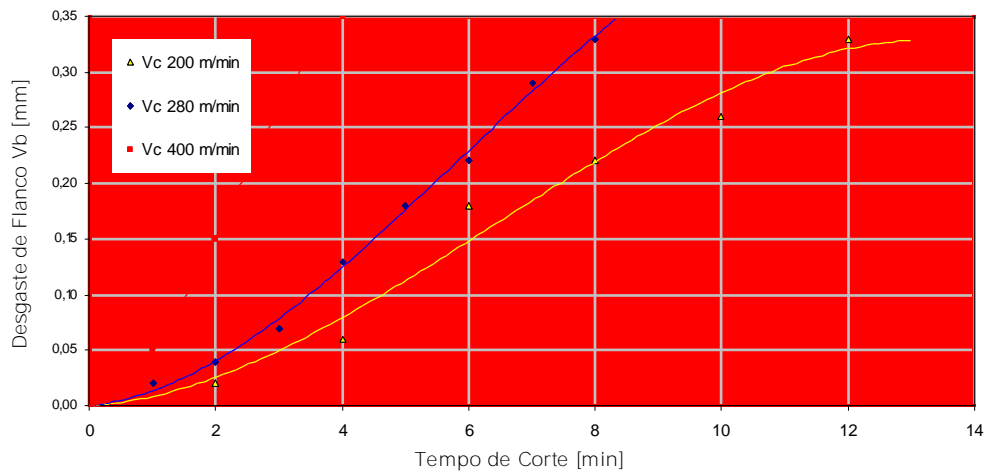


Gráfico 3. Comportamento do desgaste de flanco em ferramenta de CBN para velocidades de corte de 200, 280 e 400 metros por minuto.

Comparando o três materiais o metal duro devido a sua tenacidade e a cobertura de óxido de alumínio apresentou o maior comprimento usinado a uma velocidade de corte de 120m/min. Entretanto as ferramentas de cerâmica e CBN obtiveram uma boa taxa de remoção demonstrando o seu potencial para aplicação na usinagem de produção de peças fabricadas em ADI.

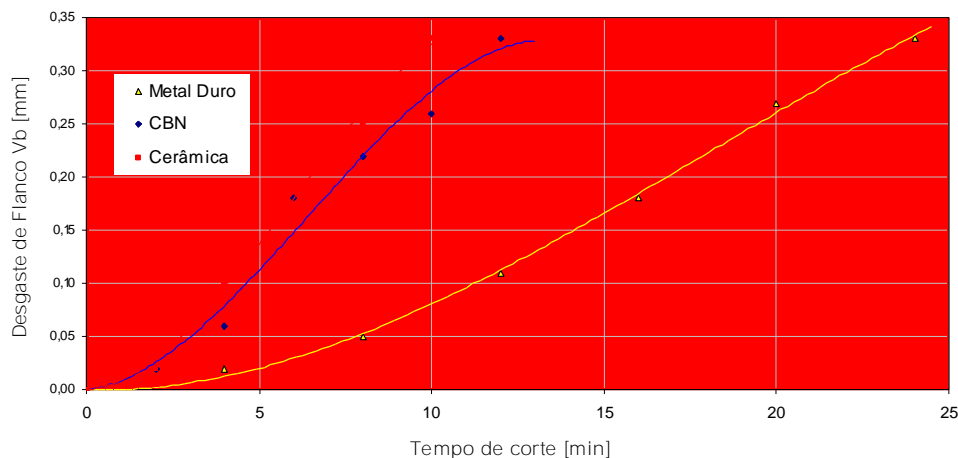


Gráfico 4. Comparação dos materiais de ferramenta utilizando os ensaios que obtiveram maior rendimento de trabalho.

O gráfico do comportamento da vida de cada ferramenta demonstra que apesar do bom desempenho da ferramenta de metal duro, a inclinação da curva de vida deste material indica que qualquer alteração na velocidade de corte tem grande significância no tempo de vida. As ferramentas de cerâmica e CBN, entretanto tem uma curva menos inclina o que representa um ótimo potencial para otimização do processo.

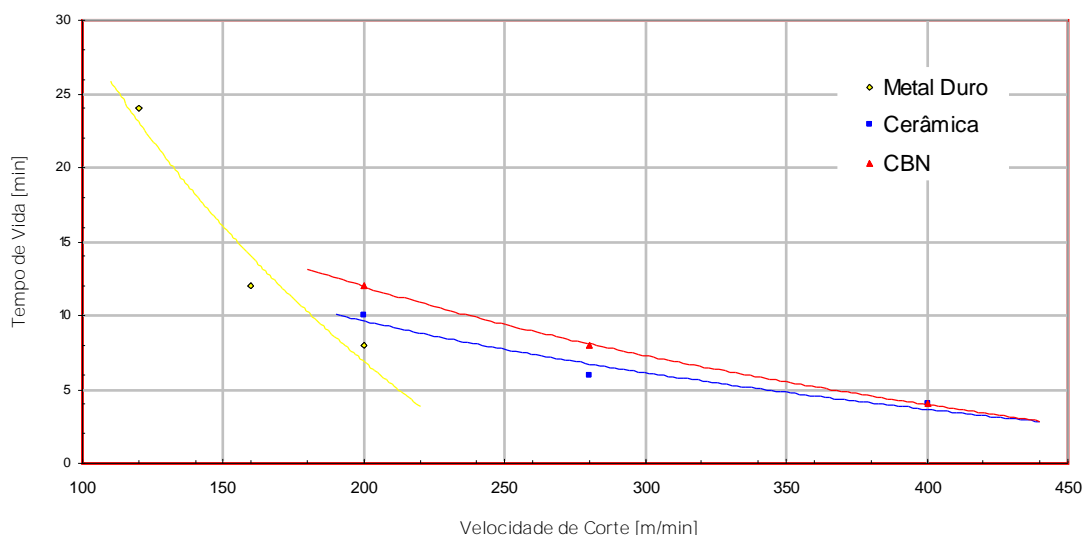


Gráfico 5. Comparação em percentuais do comprimento percorrido pelas arestas.

Dessa maneira pode-se afirmar que, nos parâmetros utilizados nos ensaios pela equipe de trabalho, a ferramenta mais adequada para a usinagem do ferro fundido nodular austemperado é a pastilha de metal duro fazendo uso da velocidade de corte de 120 metros por minuto.

4. CONCLUSÃO

O ADI é um material que tem a tendência de ser empregado na indústria, devido a suas propriedades mecânicas como ductilidade e resistência ao desgaste, permitindo seu emprego em diversas aplicações sendo um produto que pode ocupar menos matéria prima, sendo produto com tendência inclusive ecologicamente correto, entretanto sua usinabilidade relativamente baixa devido a sua estrutura apresenta uma matriz ausferrítica, causando um impacto diretamente no processo de usinagem.

Durante os ensaios notou-se a variabilidade das características de sua usinagem. O acompanhamento do desgaste da ferramenta, ou seja, a determinação da sua vida além da potencia de corte indicam que o comportamento do material apresenta uma variação durante a fase intermediária da vida da ferramenta de usinagem, sua repetibilidade esta amarrada a fatores como dureza do material, uniformidade do corte dissipação do calor da ferramenta e a diversos fatores químicos e físicos. Das ferramentas ensaiadas os insertos de metal duro obtiveram melhores rendimentos, com condições mais crítica de usinagem, devido a sua classe ser mais tenaz suportou a presença de inclusões, rechupes e vibrações do conjunto máquina ferramenta. Outro fator que justifica este melhor rendimento é a cobertura do inserto, que é de dióxido de alumínio, obtida através de deposição química CVD. Sendo que a velocidade de corte que teve melhor rendimento foi a de 120 m/min. As menores velocidades de corte produzem menos calor que provoca menos desgaste. As pastilhas de CBN material este que apresenta resistência ao desgaste elevada não suportou a intermitência, ou vibrações do processo de corte apresentando microlascas que devido à alta velocidade de corte eram pouco perceptíveis e confundiam-se ao desgaste da ferramenta, seu rendimento, entretanto foi 55% menor do que a ferramenta de metal duro, sua baixa tenacidade foi um dos fatores principais obtenção desses resultados, a geometria negativa da ferramenta e as altas velocidades de corte contribuíram para o aumento das temperaturas chegando em alguns momentos a tornar a aresta de corte incandescente, mesmo o revestimento em nitreto de titânio não suportou o atrito gerado da ferramenta com a peça removendo seu revestimento, que é depositado através de um processo físico PVD. O pior resultado aconteceu com as pastilhas de cerâmica onde a tenacidade da ferramenta nos levou inclusive a mudança de classe de K05 para K15, mesmo assim a classe substituta apresentou lascas e baixo rendimento a evidencia de altas temperaturas apresentam deformações nas pastilhas uma queima na superfície de contato de ferramenta e peça.

A importância deste projeto de forma geral foi enriquecedor no que diz respeito a conhecimento sobre usinagem de materiais endurecidos. O comportamento dos diferentes materiais da ferramenta de corte durante o processo de usinagem do ADI nos permite afirmar que o emprego de materiais como CBN para ferramentas de corte é viável tecnologicamente, apesar do seu custo ser maior a redução das etapas de produção como o tratamento térmico representa ganhos econômicos e a eliminação do tratamento térmico torna o processo ecologicamente correto.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos as empresas Sandvik e a Tupy Fundições Ltda pela ajuda no desenvolvimento do estudo.

6. REFERÊNCIAS

1. DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C; COPPINI, N. L. Tecnologia da Usinagem dos Materiais. 2 ed. São Paulo: Art Líber Ltda, 2000. 244 p.
2. FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais. 2 ed. São Paulo: Edgard Blucher. 1977. 451 p.
3. FARIAS, M.G.F.; SANTOS, M. T.; GILAPA, L.; WARMLING, G.; ARIAS, M., 2002 Metodologia de Ensaio Sistemático de Usinagem para Operações de Torneamento. Sociedade Educacional de Santa Catarina, 30 p. Joinville, Santa Catarina.
4. STEMMER, E. C., Ferramentas de Corte I. 4ª ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1995. 249 p.
5. ROHRIG, K, 2003, As propriedades, desenvolvimento e aplicações do ADI. Fundação e serviços, Aranda, nº121, p.20-37, São Paulo.
6. KEOUGH J.R. and HAYRYNEN K.L., 2000, Automotive Applications of Austempered Ductile Iron (ADI): A Critical Review. SAE Technical Paper Series, Paper no. 2000-01-0764, SAE 2000 Congress, Detroit, Michigan. 2002 World Conference on ADI
7. GOLDBERG, M., BERRY, J.T., LITTLEFAIR, G. and SMITH, G., 2002 A Study of the Machinability of an ASTM Grade 3 Austempered Ductile Iron World International Conference on Austempered Ductile Iron, Mississippi State, USA.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

ANALYSIS OF BEHAVIOR OF WEAR IN CUTTING TOOLS ON TURNING OF AUSTEMPERED DUCTILE IRON.

Valter Vander de Oliveira¹

Prof. Marcelo Teixeira dos Santos, Ph.D.¹

Prof. Paulo André de Camargo Beltrão, Ph.D.²

Cássio Luiz Francisco de Andrade, Ms.³

oliveira@sociesc.com.br

teixeira@sociesc.com.br

beltrao@cefetpr.br

cassio@tupy.com.br

¹ Sociedade Educacional de Santa Catarina, R Albano Schmidt, 3333. Boa Vista. Joinville. Santa Catarina.

² Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Avenida Sete de Setembro, 3165. Rebouças. Curitiba. Paraná.

³ Tupy Fundições Ltda, R Albano Schmidt, 3333. Boa Vista. Joinville. Santa Catarina.

Abstract: The Austempered Ductile Iron (ADI) has used with success in manufacturing of engine, crankshaft, once that the blocks in cast iron can't support the high load of modern engines. This material also has been used in gears with various kind and sizes as well as chain roulettes, could be used in various segments of mechanical industry, mainly in automobilist industry due to their proprieties, technical advantages and the combination between the resistance and the ductility that could be get from this material. According to Keough and Hayrynen (2000), the principal technical limitation of austempered ductile iron is attached to machinability is relatively low in austempered state. This problem due to harden for deformation that happen by transformation of austenite, characteristic of microstructure of ADI, which affect the steps to the process of manufacturing being common carry out the rough the part before the heat treatment and the finish machine in sequence. This article describe a study about the behavior of wear of three materials used to cutting tools (carbide, ceramic and CBN) in external turning of ADI through of comparative analysis of time of tools life in function of cutting speed, using to criterion to final of tool life the flank wear of 0,3 mm. The carbide tools covering with a layer of oxide of aluminum showed up the better performance among the tools used due to the combination of resistance to abrasion of covering and the tenacity do substrate de tungsten carbonate.

Keywords: turning process, Austempered Ductile Iron, flank wear and cratering.