

PROJETO E ADAPTAÇÃO DE UMA MÁQUINA DE ENSAIO DE IMPACTO PARA OSSOS LONGOS DE ANIMAIS DE PEQUENO E MÉDIO PORTE

Ricardo Marinzeck Santos

José Baptista de Portugal Paulin

Antônio Carlos Shimano

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos / Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto / Instituto de Química de São Carlos, 14049-902, Ribeirão Preto, SP, Brasil.

E-mail: marinzeck.aux@auxiliadora.com.br

Resumo

As fraturas dos ossos longos são, geralmente, provocadas por esforços dinâmicos de impacto. O esclarecimento do comportamento destes ossos submetidos a testes de impacto, pode representar um avanço no conhecimento das questões que envolvem as fraturas. Os testes são realizados, normalmente, em uma máquina provida de martelo pendular que incide sobre corpos de prova. Porém, as máquinas de impacto disponíveis são projetadas para ensaiar peças com dimensões normatizadas, de acordo com o material, e não são adaptadas para materiais biológicos, que são anisotrópicos, o que impede a confecção de corpos de prova com dimensões rigorosamente padronizadas. Foi o objetivo deste trabalho, projetar, construir e testar, comparativamente a outra máquina comercialmente disponível, uma máquina de ensaio de impacto especificamente destinada a materiais biológicos, com possibilidade de variação dos vãos entre os apoios dos corpos de prova, o que flexibiliza o ensaio de acordo com as características de cada corpo de prova.

Palavras-chave: máquina de impacto, ensaio de impacto, ensaio dinâmico, ossos longos.

1 INTRODUÇÃO

O comportamento de um material, pode ser avaliado através de suas propriedades mecânicas, por meio de ensaios com a aplicação de cargas estáticas. O conhecimento de tais propriedades auxilia os profissionais dedicados a reabilitação óssea a entender o comportamento dos ossos no organismo de acordo com sua arquitetura e função e, também, se outros materiais podem ser utilizados para substituir os ossos ou parte deles, como no caso dos implantes.

A resistência mecânica dos materiais depende da forma como a carga é aplicada e da deformação resultante ocorrida. Muitos podem resistir a grandes carregamentos se as cargas forem aplicadas durante um longo período de tempo (ensaio estático). Se uma carga é aplicada repentinamente (ensaio dinâmico), o material pode falhar e parecer ter menor resistência (HORATH, 1995). Dos ensaios dinâmicos que podem ser realizados, o de impacto é o que mais se aproxima da simulação das fraturas de ossos ocasionadas por acidentes, sendo um dos primeiros ensaios empregados no estudo de fratura frágil de materiais em geral.

Devido ao fato das propriedades dos materiais dependerem da taxa de deformação, ensaios têm sido propostos e normatizados para determinar a energia requerida para romper

uma amostra de um material, quando submetida a carregamento repentino. Estes ensaios são chamados de “ensaios de impacto”.

Existem vários modelos teóricos que tentam descrever o comportamento do material quando submetido a uma carga de impacto, porém métodos experimentais ainda são necessários para se obter estas propriedades com mais exatidão. O método experimental mais fácil de ser empregado é a produção de ondas de tensão em um sólido pela colisão de uma massa, onde geralmente é utilizado um martelo de impacto.

1.1 OBJETIVO DO TRABALHO

Com o objetivo de quantificar a energia absorvida por materiais biológicos (ossos longos de animais de pequeno e médio porte), devido a um carregamento de impacto, foi desenvolvido o projeto e confeccionada uma Máquina de Ensaio de Impacto (MEI - 50), que permita o ajuste da distância entre os apoios às dimensões das peças a serem ensaiadas.

1.2 ASPECTOS TEÓRICOS DO ENSAIO DE IMPACTO

A mecânica do impacto envolve não somente a questão da tensão induzida, mas também considerações de transferência, absorção e dissipação de energia.

No projeto de estruturas e máquinas, um esforço deve ser feito para prover absorção do quanto for possível de energia através da ação elástica e secundariamente alguma forma de amortecimento para dissipá-la. Durante anos, o desenvolvimento de um ensaio de impacto para avaliar as relações de tensão e deformação de um material era feito em peças não entalhadas, dificultando a análise da região fraturada; posteriormente, com o advento da padronização dos ensaios de impacto com cargas de flexão, foram adotados os corpos de prova tipo *Charpy* e *Izod*, que possuem um entalhe como forma de precipitar a fratura naquela região.

Nos ensaios com corpos de prova entalhados, o estado de tensão em torno do entalhe é triaxial e não uniformemente distribuído ao longo do corpo de prova, suficiente para provocar uma ruptura de caráter frágil (HORATH, 1995). O ensaio de impacto em corpos de prova entalhados tem limitada significação e interpretação, sendo úteis apenas para fim de comparação dos materiais ensaiados nas mesmas condições pois provêm valores proporcionais de resistências devido ao entalhe, não fornecendo um valor acurado de resistência ao impacto (SOUZA, 1974).

A resistência ao impacto, obtida pelo ensaio de impacto em corpos de prova entalhados, é influenciada por uma série de fatores: a máquina de teste irá influenciar os resultados visto que a energia absorvida pode variar de máquina para máquina; a velocidade de impacto irá modificar naturalmente os resultados do ensaio; a forma e o tamanho do entalhe irá influenciar a resistência ao impacto, pois uma diminuição desta resistência ocorre com o aumento do tamanho do entalhe (MARIN, 1962).

Segundo a normatização existente, os itens a serem avaliados no ensaio de impacto são: fundação para fixação da máquina, apoios e suportes do corpo de prova, forma e entalhe do corpo de prova, massa pendular e velocidade de impacto da massa pendular.

Os principais requisitos de uma máquina de ensaio de impacto devem ser:

- 1) Uma massa pendular que deve fornecer energia cinética suficiente para causar ruptura do corpo de prova colocado no caminho;
- 2) Um apoio lateral e um suporte no qual o corpo de prova é colocado;
- 3) Recurso para medir a energia residual da massa móvel após a ruptura do corpo de prova.

A energia cinética é determinada pela massa do pêndulo e altura de queda a partir do centro de massa do pêndulo. O pêndulo deve ser fixado ao eixo de rotação de forma tal que

reduza o desvio lateral e a fricção na oscilação quando da queda em direção ao corpo de prova. O mecanismo de queda deve ser construído para reduzir qualquer desaceleração ou aceleração do movimento e também efeitos vibratórios.

O suporte deve ser pesado o suficiente em relação à energia de golpe, para que a energia de impacto não seja perdida devido a qualquer tipo de deformação ou de vibração das partes da máquina (HORATH, 1995).

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 MONTAGEM DA MÁQUINA DE IMPACTO

A confecção da máquina foi baseada na Norma Européia EN 10.045 – Partes 1 e 2. Para a confecção da máquina foram utilizados os materiais listados na Tabela 2.1. As cantoneiras, chapas e barras são de aço 1020.

Tabela 2.1 – Relação dos materiais utilizados na construção da máquina de impacto.

N.º	Quant.	Material	Utilização	Especificação
1	01	Chapa de aço de 1”	Base	600x350 [mm]
2	02	Cantoneira de aço	Apoios laterais	4”x4”x ½”
3	02 / 02	Chapa de aço de ¾”	Estruturas / suportes laterais	1000x1000 [mm]
4	04	Chapa de aço de 1”	Martelo / Disco	Ø300 [mm]
5	01	Barra de aço cilíndrica Ø 20 mm	Eixo	210 [mm]
6	32	Parafuso allen	Fixação das cantoneiras	½”x 1 ¼”
7	12	Parafuso allen	Fixação dos apoios	¼” x ½”
8	02	Rolamento de esferas	Eixo de rotação	17 x 35 x 10

A chapa de aço N.º 1, foi utilizada como base de sustentação das peças componentes da estrutura da máquina (Figura 2.1-A). Nela foram parafusadas as cantoneiras N.º 2, para dar sustentação ao conjunto (Figura 2.1-B). As estruturas laterais (Figura 2.1-C), obtidas da chapa N.º 3, foram cortadas utilizando-se de um pantógrafo e parafusadas junto às cantoneiras na posição vertical; em sua parte superior foram feitos furos para o acoplamento dos rolamentos, N.º 8, e do eixo de rotação, N.º 5. Desta mesma chapa foram confeccionados os suportes laterais (Figura 2.1-D), sendo soldados às cantoneiras e parafusados às estruturas laterais com a finalidade de evitar a movimentação horizontal das estruturas e para o aumento da estabilidade do conjunto. As dimensões do disco do martelo (Figura 2.1-E), obtido da chapa N.º 4, foram determinadas através do cálculo da posição do centro de massa desta peça, para que este se localizasse o mais próximo possível do elemento a ser ensaiado (o corpo de prova) e também das estruturas laterais. Na confecção do martelo foi utilizada a barra de aço circular N.º 5 como haste desta estrutura, cortada no comprimento de 202 mm, roscando o disco à

barra em uma das extremidades e, na outra, um acoplamento, de dimensões especificadas no mesmo desenho, fazendo a ligação da haste do martelo com o eixo de rotação sustentado pelos rolamentos (Figura 2.1).



Figura 2.1 – Detalhamento construtivo da máquina de impacto para ensaios de ossos longos, com o martelo em posição de descanso. A – base de sustentação de toda a estrutura. B – cantoneiras. C – estruturas laterais. D – suportes laterais. E – disco do martelo .

Os suportes e apoios dos corpos de prova foram fresados e plainados nas dimensões especificadas no projeto e fixados à estrutura lateral utilizando os parafusos N.º 7. Para o apoio do corpo de prova tomou-se o cuidado de verificar o ângulo entre a apoio vertical e o suporte (Figura 2.2) da peça que deve ser $90^\circ \pm 2^\circ$ (EN 10.045 - 1). De acordo com a mesma norma, o chanfro posterior dos apoios deveria obedecer a um ângulo de $11^\circ \pm 1^\circ$, porém, o ângulo de 45° foi adotado na confecção. Este procedimento foi tomado com o intuito de evitar que o corpo de prova (osso) ficasse preso, entre o martelo e os apoios, durante a realização do ensaio, considerando que suas dimensões não são padronizadas como as especificadas para os

ensaios de materiais não biológicos e, conseqüentemente, influenciar diretamente nos resultados dos ensaios.

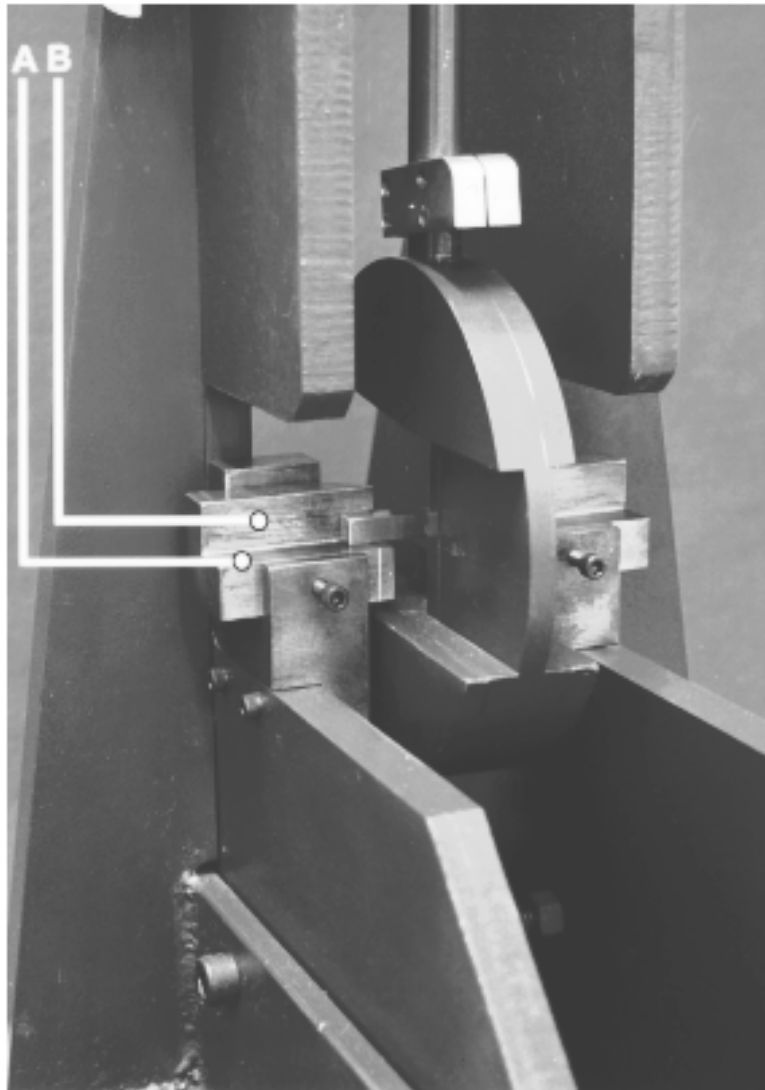


Figura 2.2 – Detalhamento dos apoios (A) e suportes (B) do corpo de prova.

2.1.1 Confeção da escala graduada

A confecção da escala do goniômetro foi executada com base em ensaio preliminar realizado em uma máquina de ensaio de impacto HECKERT - PSd 50/15, operando por sistema digital, do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística da Escola de Engenharia de São Carlos – USP.

2.1.2 Verificação do alinhamento das peças da máquina

Segundo a Norma Européia EN 10.045 - 2, algumas partes da máquina de impacto devem ser construídas com um índice fixado de tolerância para não afetar os valores das medidas nos ensaios. Por isso, na montagem da máquina, foram feitas as seguintes verificações de medida:

- 1) A máquina deve ser instalada em um plano de referência horizontal cujo desvio angular com relação ao plano vertical não deve ultrapassar 0,2 %.

- 2) O eixo de rotação do pêndulo deve ser paralelo ao plano de referência horizontal cujo desvio não deve ser maior que 0,2 %.
- 3) O pêndulo deve oscilar em um plano perpendicular ao eixo de rotação cujo desvio não pode ser maior que 0,3 %.
- 4) O pêndulo deve ser posicionado de tal forma que o centro do percussor coincida com o plano médio entre os apoios verticais, sendo que qualquer desvio não pode ser maior que $\pm 0,5\text{mm}$.
- 5) Os suportes devem ser montados paralelos a um mesmo plano. A variação das posições dos planos dos suportes não deve exceder 0,1 mm.
- 6) Os suportes devem ser montados de tal forma que quando a peça for posicionada, o seu eixo fique paralelo ao eixo de rotação com um desvio menor que 0,3 %.
- 7) Os apoios verticais devem ser posicionados no mesmo plano. A variação das posições dos planos dos apoios não deve exceder 0,1 mm.
- 8) O ângulo formado entre o plano dos apoios verticais e o plano dos suportes deve ser $90^\circ \pm 0,1^\circ$.
- 9) O ângulo entre a linha de contato do percussor e o eixo horizontal do martelo deve ser $90^\circ \pm 2^\circ$.
- 10) Nenhuma parte do pêndulo que passe entre os apoios verticais deve ser maior que 18 mm.
- 11) A resolução do indicador, r , é obtida dividindo a espessura do ponteiro pela mínima distância entre os centros de duas marcações adjacentes. Os valores recomendados para r são: 1:4, 1:5 e 1:10. A distância entre duas marcações adjacentes deve ser no mínimo 2,5 mm.
- 12) Uma divisão de escala não deve ser maior que 1 % da energia potencial inicial e deve permitir a estimativa de um incremento de no mínimo 0,25 % da energia potencial inicial.

2.1.3 Energia absorvida

Na determinação da energia absorvida pela quebra do corpo de prova, a peça ensaiada deve ser retirada de um lote cuja energia de impacto de referência seja conhecida.

Segundo a Norma Européia EN 10.045 – 2, deve-se considerar a energia total absorvida quando a peça é fraturada como sendo:

- 1) a energia requerida para quebrar a peça ensaiada;
- 2) a perda de energia interna da máquina de impacto durante a primeira metade do percurso de oscilação a partir da posição inicial.

As perdas de energia são devido a:

- 1) resistência do ar, atrito do rolamento e atrito devido à resistência ao arrasto do ponteiro. Estas perdas podem ser determinadas pelo método direto;
- 2) vibração da fundação, da estrutura da máquina e do pêndulo, para as quais nenhum método de determinação foi desenvolvido.

Para a avaliação da energia absorvida pelo corpo de prova, as seguintes energias não são levadas em consideração:

- 1) a energia absorvida pelo trabalho de deformação dos apoios verticais e o centro do percussor;
- 2) a energia absorvida pela fricção da peça ensaiada com os suportes, principalmente os apoios verticais.

2.2 ENSAIOS PARA A AFERIÇÃO DA MÁQUINA DE ENSAIO DE IMPACTO

2.2.1 Teste para corpos de prova padrão

Para a calibração da máquina de ensaio de impacto (MEI - 50) foram confeccionados, na Oficina Mecânica de Precisão da Prefeitura do Campus da USP de Ribeirão Preto, 128 corpos de prova *Charpy* - tipo C, extraídos de duas barras comerciais, uma de alumínio e outra de latão, e divididos em 2 grupos, sendo 64 peças em alumínio (Liga 6261) e as outras 64 em latão (Liga 360). Em seguida, cada grupo foi subdividido em 8 lotes de 8 peças.

Em uma máquina de ensaio de impacto HECKERT - PSd 300/150, com sistema de operação digital de leitura das energias absorvidas, do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística da EESC – USP, foi ensaiado, de acordo com o padrão DIN, para corpos de prova *Charpy* - tipo C e distância entre os apoios de 40 mm, o primeiro lote com 8 peças de alumínio e 8 de latão. Com a mesma quantidade de peças e obedecendo o mesmo padrão, o segundo lote foi ensaiado, numa máquina de ensaio de impacto HECKERT – 50, a qual opera por sistema analógico. Os demais lotes foram ensaiados na MEI - 50, no Laboratório de Bioengenharia da FMRP – USP, cujos resultados foram comparados aos dos dois primeiros lotes.

3 RESULTADOS

3.1 ENERGIA ABSORVIDA NOS ENSAIOS

Ensaio na máquina de impacto HECKERT - PSd 300/150 o primeiro lote de 16 peças, constituído por 8 em alumínio e 8 em latão, a energia absorvida média verificada foi de $(19,25 \pm 0,77)$ Joules para os corpos de prova em alumínio e, para os corpos de prova em latão, de $(18,41 \pm 0,65)$ Joules. O segundo lote contendo também 8 peças em alumínio e 8 em latão foi ensaiado na máquina HECKERT – 50, cujos valores obtidos determinaram uma energia absorvida média de $(19,46 \pm 0,63)$ Joules para os corpos de prova em alumínio e de $(16,88 \pm 0,82)$ Joules para o latão. Estes resultados foram tomados como referenciais e comparados com os resultados obtidos nos ensaios realizados na MEI - 50 com os lotes de 1 a 6 em alumínio e também de 1 a 6 em latão, como mostra a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Médias e desvios padrão das energias absorvidas pelos corpos de prova.

	HECKERT PSd 300/150	HECKERT - 50	MEI - 50
N.º de C. P.	8	8	48
ALUMÍNIO	$(19,25 \pm 0,77)$ Joules	$(19,46 \pm 0,63)$ Joules	$(19,85 \pm 0,75)$ Joules
LATÃO	$(18,41 \pm 0,65)$ Joules	$(16,88 \pm 0,82)$ Joules	$(18,00 \pm 0,69)$ Joules

N.º de C. P. – número de corpos de prova.

3.2 MATERIAL BIOLÓGICO

As dimensões (D_M – diâmetro maior e D_m – diâmetro menor) médias das tíbias e os respectivos valores das energias absorvidas (E_d – tíbia direita e E_e – tíbia esquerda) médias, medidas nos ensaios para verificação do funcionamento da MEI - 50, com aplicação de carga no sentido pósterio-anterior foram: tíbias direitas de $(0,98 \pm 0,54)$ Joules; tíbias esquerdas de $(1,07 \pm 0,61)$ Joules, cujos resultados são mostrados na Tabela 3.2. O comprimento médio das tíbias ensaiadas foi de 86 mm.

Tabela 3.2 – Valores das energias absorvidas pelas tíbias, direitas e esquerdas, no ensaio de impacto, na máquina de ensaio de impacto (MEI – 50).

Tíbia	E_d (J)	D_M (mm)	D_m (mm)	E_e (J)	D_M (mm)	D_m (mm)
Média	0,98	8,06	5,66	1,07	8,05	5,56
D. P.	0,54	0,49	0,29	0,61	0,42	0,25

D. P. → Desvio Padrão

4 DISCUSSÃO

Na calibração da máquina de ensaio de impacto (MEI – 50), através dos ensaios com corpos de prova padrão (Tabela 4.1), foi obtida uma boa precisão para o latão, apresentando um desvio percentual de 2,2% da MEI – 50, comparada à máquina de impacto HECKERT - PSd 300/150. O alumínio apresentou um desvio percentual de 3,1% em relação a mesma máquina. Estes desvios entretanto não comprometem a calibração, pois estão dentro dos limites permitidos de variação das energias absorvidas pelos corpos de prova no ensaio de impacto. Com relação às máquinas MEI – 50 e HECKERT – 50, uma precisão também considerada como boa foi verificada, onde o alumínio apresentou um desvio percentual de 2,0% e de 6,6% para o latão, considerando que o limite de desvio percentual permitido é de 10%, segundo NASSOUR (1998)⁵.

Tabela 4.1 – Desvios percentuais das máquinas de impacto para os corpos de prova de alumínio e latão.

	HECKERT PSd 300/150	HECKERT - 50	MEI - 50
HECKERT PSd 300/150	—	1,1% (Al)	3,1% (Al)
HECKERT - 50	8,3% (Latão)	—	2,0% (Al)
MEI - 50	2,2% (Latão)	6,6% (Latão)	—

⁵ NASSOUR, A. C. (1998). (USP. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística). *Comunicação pessoal*.

Nos ensaios realizados em material biológico, verificou-se o valor médio de energia absorvida de 0,98 J com desvio padrão de 0,54 J para as tíbias direitas e, para as tíbias esquerdas, 1,07 J o valor médio de energia absorvida com desvio padrão de 0,61 J. Estas variações devem-se, provavelmente, às diferenças nas propriedades geométricas e composição microestrutural dos ossos.

Os ensaios realizados em ossos expõem uma certa complexidade devido às diferenças constatadas nas propriedades geométricas, mecânicas e microestruturais, ou seja, porque o osso é um material anisotrópico.

Apesar da dispersão verificada, o estudo das propriedades mecânicas de impacto dos ossos longos ajudará esclarecer tal comportamento, dando ênfase à necessidade de se eliminar suas variáveis geométricas (irregularidades) e estudar os componentes microestruturais (minerais, fibras de colágeno, porosidade e quantidade de água) para se determinar a relação de cada um, com as propriedades dinâmicas de impacto. Porém, através deste estudo foi possível verificar a facilidade de execução dos ensaios em materiais biológicos com a adaptação da distância entre os apoios de acordo com o osso a ser ensaiado, constituindo esta a diferença básica e importante com relação às máquinas de ensaio comerciais que utilizam distâncias padronizadas entre os apoios, dificultando a adaptação à estrutura biológica. Esta alteração da distância entre os apoios possibilita o estudo de diferentes tipos de ossos.

O estudo da resistência mecânica do tecido ósseo a cargas dinâmicas têm fundamental importância no entendimento do mecanismo de fratura femoral, principalmente junto ao quadril. O desenvolvimento do projeto e confecção da máquina de ensaio de impacto possibilitará ao Laboratório de Bioengenharia da FMRP-USP apoiar futuros trabalhos na área de ensaios dinâmicos.

5 CONCLUSÃO

Os testes de verificação do funcionamento e calibração da máquina de ensaio de impacto apresentaram resultados muito satisfatórios, comprovando a validade dos objetivos, justificando a proposta de variação das distâncias entre os apoios e dos métodos construtivos empregados. No entanto, foi significativa a dispersão observada no ensaio com material biológico, o que revela a necessidade de se ter cautela no uso do ensaio de impacto para caracterizar a resistência mecânica dos materiais biológicos quando submetidos a cargas dinâmicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- EUROPEAN STANDARD, 1992. EN 10 045-1 – “Charpy impact tests on metallic materials – Part 1: Test method”, Bruxelas.
- EUROPEAN STANDARD, 1992. EN 10 045-2 – “Charpy impact tests – Part 2: Verification of the testing machine (pendulum impact)”, Bruxelas.
- HORATH, L. 1995. “Fundamentals of materials science for technologists – Properties, testing, and laboratory exercises”, Prentice Hall, New Jersey, p. 355-360.
- MARIN, J. 1962. “Mechanical Behavior of Engineering Materials”, Prentice-Hall, New Jersey, p. 237-271.
- SOUZA, A. S. (1974). Ensaios mecânicos de materiais metálicos. 3. ed. São Paulo, Edgard Blücher, p.99-109.