

Dimensionamento de um Equipamento para Ensaio de Impacto Charpy

Maycon Douglas Leão de Almeida¹,
Edson Roberto da Silva²

RESUMO: Durante a Segunda Guerra Mundial, a fratura frágil despertou o interesse dos engenheiros devido à alta ocorrência do fenômeno em estruturas de aço soldadas de navios e tanques de guerra, notou-se uma maior incidência desse tipo de fratura nos meses de inverno. A partir desses acontecimentos foi projetado o ensaio de impacto, que é um ensaio dinâmico que fornece a energia que um material é capaz de absorver antes de romper. O trabalho teve como principal objetivo o dimensionamento de um equipamento para ensaio de impacto Charpy que forneça 150 J de energia. O trabalho conta com uma revisão bibliográfica que procurou o entendimento sobre a história e o funcionamento da máquina. Buscando facilitar o dimensionamento, o equipamento foi dividido em onze componentes, assim foi possível analisar cada componente separadamente. O martelo pendular é diretamente o componente mais importante, pois é através da sua massa que é estabelecida a energia do equipamento. Sendo assim, para obter uma energia de 150 J o martelo deve possuir uma massa de 9,85 kg com um ângulo de queda de 160° em relação ao centro da máquina. O modelo escolhido para o equipamento é bem simples e o dimensionamento foi realizado com base na energia pretendida e todos os componentes dimensionados suportam as tensões geradas pelo impacto.

Palavras-chave: Análise de materiais; teste de impacto; fratura frágil.

1. INTRODUÇÃO

Para a viabilização de qualquer projeto de engenharia, é preciso um vasto conhecimento das características, propriedades e comportamento dos materiais (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012). A determinação destas características e propriedades mecânicas de um material metálico é obtida por meio de vários ensaios mecânicos (SOUZA, 1982).

Os ensaios mecânicos são realizados por meio de aplicação de uma das formas de energia em um material (tração, compressão, flexão, impacto, torção e outros), para determinar a resistência de um material a cada um destes esforços (SOUZA, 1982).

Durante a Segunda Guerra Mundial, o fenômeno da fratura frágil despertou o interesse dos engenheiros, devido à alta ocorrência desse tipo de fratura em estruturas de aço soldadas de navios e tanques de guerra. A Figura 1 mostra um navio ancorado que se partiu ao meio devido à fragilização do material (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

¹Aluno de Graduação, Faculdade de Engenharia Mecânica, UniRV Universidade de Rio Verde, 2015, e-mail: maycondouglasda@hotmail.com

²Orientador, Professor Mestre da Faculdade de Engenharia Mecânica, UniRV Universidade de Rio Verde, 2015, e-mail: edsonroberto@unirv.edu.br.



Fonte: CALLISTER, 2015.

Figura 1: Navio que fraturou de maneira frágil pela propagação de uma trinca em seu casco.

Notou-se que esse tipo de fratura tinha maior incidência nos meses de inverno, e que problemas semelhantes já haviam ocorrido com outras estruturas metálicas (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

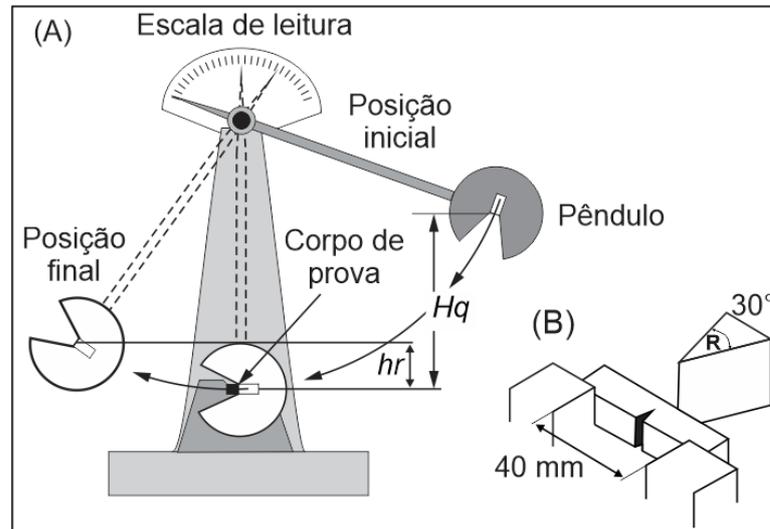
É possível notar dois tipos de fratura, a fratura frágil e a fratura dúctil. A fratura frágil nos metais é definida pela rápida propagação de trinca, ocorre com baixa absorção de energia, ou seja, nenhuma ou pouca deformação plástica, rompendo o metal de forma repentina. Já a fratura dúctil absorve muita energia antes da ruptura, pode-se observar que antes do material se romper por fratura dúctil, ele tem uma deformação plástica considerável (CALLISTER, 2015).

O ensaio de impacto é um ensaio dinâmico utilizado na análise de fraturas frágeis nos materiais, ele permite a constatação de diferenças de comportamento de materiais que não podem ser observadas em outros ensaios (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Os ensaios de impacto foram projetados e são utilizados até hoje para medir a energia que um material absorve antes de romper. Para o ensaio de impacto, o corpo de prova possui o formato de uma barra com seção transversal quadrada (CALLISTER, 2015). No ensaio de impacto Charpy o corpo de prova é apoiado horizontalmente, conforme pode ser observado no detalhe (B) da Figura 2 (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

A carga de impacto é aplicada instantaneamente através de um martelo pendular que é liberado a partir de uma posição inicial (Hq) conhecida. Após o martelo ser liberado, sua ponta se choca com o corpo de prova com um entalhe, que funciona como um concentrador de tensões. O pêndulo continua o movimento após o choque até uma altura (hr) menor que a altura inicial de liberação do martelo pendular (Hq). A energia absorvida no impacto é

determinada pela diferença de Hq e hr . O detalhe (A) da Figura 2 representa o equipamento para o ensaio de impacto (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).



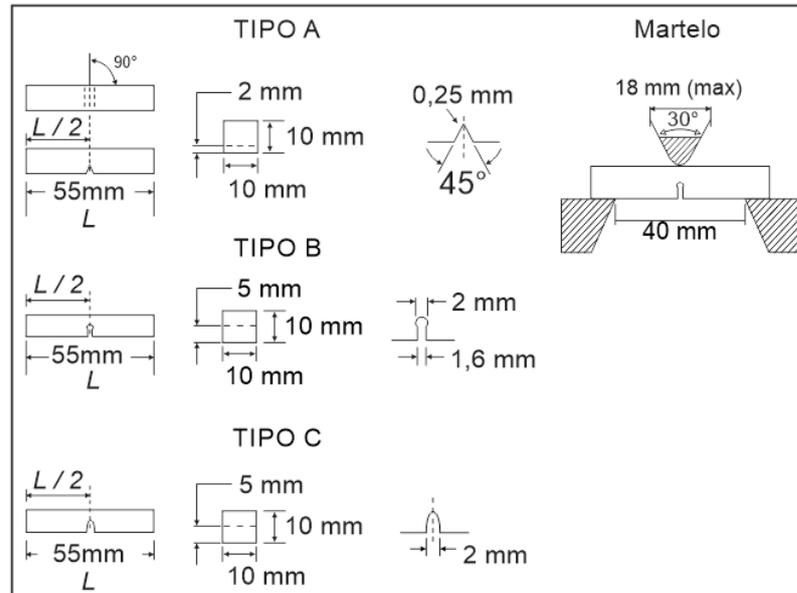
Fonte: GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012.

Figura 2: (A) Representação do equipamento de ensaio de impacto e do (B) corpo de prova do tipo Charpy.

De acordo com Souza (1982), estes ensaios visam correlacionar seus resultados com as fraturas ocorridas na prática, e de certa maneira, para evitar que aconteçam fraturas frágeis do material em serviço.

Os corpos de prova para ensaio de impacto Charpy são padronizados pela norma ASMT E-23, e são divididos em três tipos conforme a forma do seu entalhe. Assim, têm-se corpos de prova Charpy tipo A, onde o entalhe tem a forma de “V”, formando um ângulo de 45° e profundidade de aproximadamente 2 mm; tipo B, onde o entalhe cilíndrico é formado por um rasgo com um furo na extremidade, tem a forma de um buraco da chave de fechadura; e tipo C, onde o entalhe tem a forma de “U”, com diâmetro de 2 mm na ponta do entalhe e 5 mm de profundidade, como pode ser observado na Figura 3 (SOUZA, 1982).

Com essas condições padronizadas, a norma recomenda que a velocidade do martelo no momento do impacto fique entre 5 e 6 m/s. A parte que fará o choque com o corpo de prova é o cutelo, que deve possuir um ângulo de 30° e um raio de curvatura de 2 mm a 2,5 mm. A distância entre apoios é de 40 mm, isso também pode ser observado na Figura 3 (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).



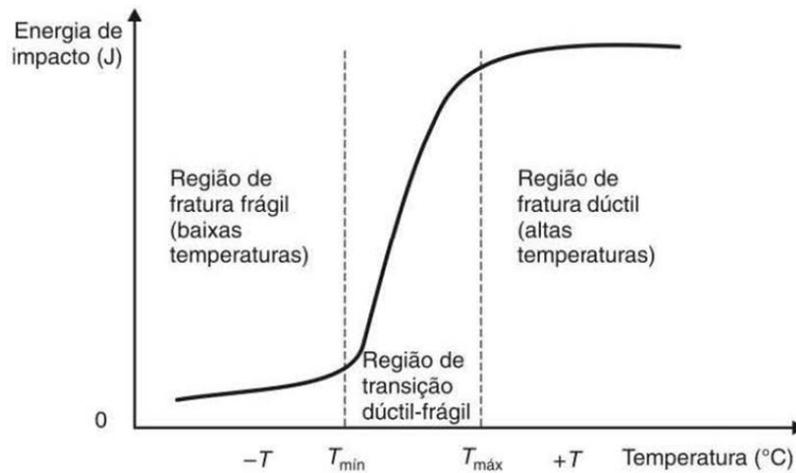
Fonte: SOUZA. 1982.

Figura 3: Corpos de prova Charpy, recomendados pela ASMT E-23 para ensaio de impacto.

Os corpos de prova tipo A são normalmente empregados para materiais de menor resistência, o tipo B para materiais de média resistência e o tipo C para materiais de alta resistência (ALVES; TANIGUTI, 2011).

A principal função do ensaio Charpy consiste em determinar se um material possui ou não uma transição dúctil-frágil com a diminuição da temperatura, e caso presente, em que faixa de temperatura ocorre esta transição. A transição dúctil-frágil está relacionada entre a absorção da energia de impacto e a temperatura do material (CALLISTER, 2015).

A temperatura de transição dúctil-frágil pode ser percebida entre -100 e $+100$ °C, dependendo da composição da liga e das condições de ensaio (SHACKELFORD, 2008). A Figura 4 representa a curva de transição do material de dúctil para frágil em relação à temperatura.

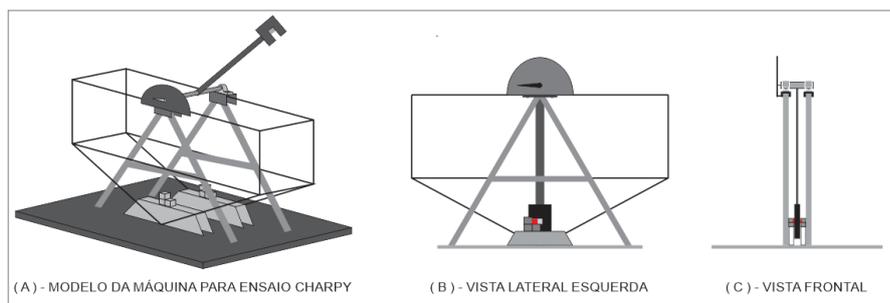


Fonte: GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012.

Figura 4: Curva resposta de ensaio de impacto para transição da temperatura dúctil frágil.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Após realizar o estudo bibliográfico, no qual se buscou o entendimento sobre o funcionamento da máquina, foi escolhido o modelo a ser projetado. A Figura 05 representa o modelo escolhido, visando facilitar o dimensionamento do mesmo.

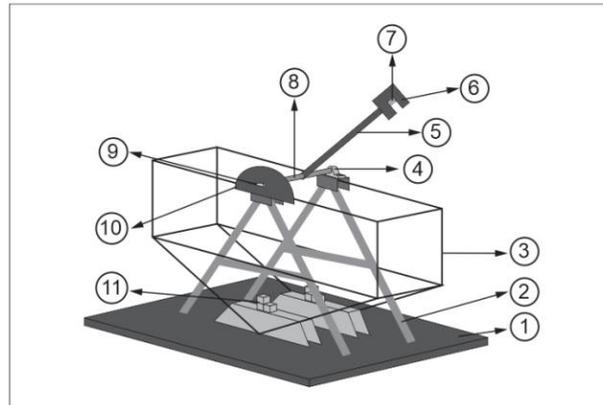


Fonte: Própria.

Figura 05: Representação do modelo da máquina de Charpy.

Pode se observar na Figura 06 que o equipamento foi dividido em 11 componentes principais, são eles:

- 1 - Base;
- 2 - Coluna;
- 3 - Suporte de segurança;
- 4 - Mancal de rolamento;
- 5 - Haste;
- 6 - Martelo;
- 7 - Cutelo;
- 8 - Eixo;
- 9 - Indicador;
- 10 - Escala;
- 11 - Encosto/apoio do corpo de prova.



Fonte: Própria.

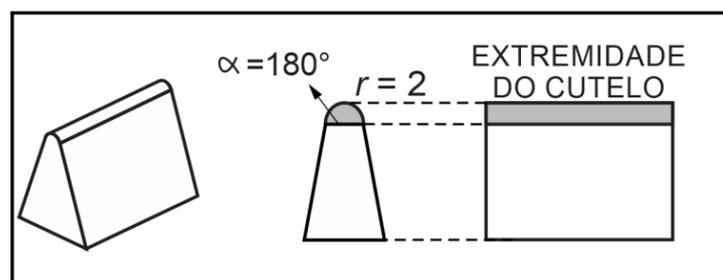
Figura 06: Representação dos principais componentes da máquina de Charpy.

Com a escolha do modelo e componentes da máquina de ensaio de impacto Charpy já definidos, são mostradas no decorrer do trabalho algumas etapas do dimensionamento da máquina.

Antes de iniciar os cálculos para o dimensionamento, foram pré-estabelecidas algumas características que o equipamento deve possuir. Algumas características são regidas por normas, como o comprimento do cutelo de 30 mm, o diâmetro da sua extremidade de 4 mm com um ângulo de 180° , e a velocidade de impacto é de 5,5 m/s. Outras características estão relacionadas com a energia pretendida do projeto, que é de 150 J, e um ângulo de queda de 160° .

a) Dimensionamento do Cutelo

Conforme Popov (2001) citado por Chitolina et al (2013), para obter a área da extremidade do cutelo que sofrerá o impacto, deve-se aplicar a equação (01). A Figura 07 representa a área da extremidade do cutelo.



Fonte: Própria.

Figura 07 – Representação da área da extremidade do cutelo.

$$A_c = \frac{\pi \cdot d \cdot \alpha}{360^\circ} \cdot l \quad (01)$$

$$A_c = \frac{\pi \cdot 0,004 \cdot 180^\circ}{360^\circ} \cdot 0,03 = 1,88 \times 10^{-4} m^2$$

Onde:

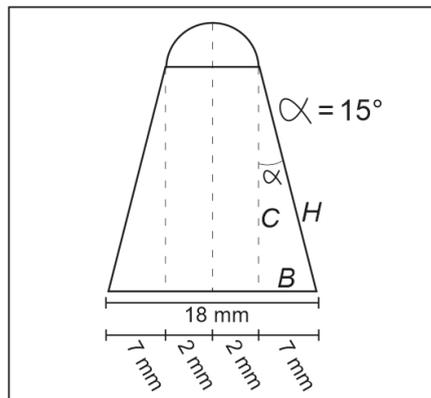
A_c - é a área de contato do cutelo com corpo de prova em m^2 ;

d - é o diâmetro da extremidade do cutelo em m ($d = 0,004$ m);

α - é o ângulo da base da extremidade do cutelo ($\alpha = 180^\circ$);

l - é o comprimento do cutelo ($l = 0,03$ m).

Para encontrar a altura do cutelo, deve-se aplicar a equação (02) na equação (03) e somar com o raio da ponta. A Figura 08 representa o cutelo.



Fonte: Própria.
Figura 08: Cutelo.

$$\text{sen } \alpha = \frac{\text{Cateto oposto (B)}}{\text{hipotenusa (H)}} \quad (02)$$

$$\text{sen } 15^\circ = \frac{7}{\text{hip}(H)} \quad \text{hip}(H) = 27 \text{ mm}$$

$$\text{cos } \alpha = \frac{\text{Cateto adjacente (C)}}{\text{hipotenusa (H)}} \quad (03)$$

$$\text{cos } 15^\circ = \frac{\text{Cat. adj. (C)}}{27} \quad \text{cat. adj. (C)} = 26 \text{ mm}$$

b) Cálculo do centro de percussão

Centro de percussão (Cp) é a distância do centro do cutelo até o centro do eixo de rotação do pêndulo e, de acordo com a norma ASTM E-23, pode-se encontrar o centro de percussão simplificando a equação da velocidade, conforme a equação (04).

$$Cp = \frac{v^2}{2 g (1 - \cos \beta)} \quad (04)$$

$$Cp = \frac{5,5^2}{2 \cdot 9,81 (1 - \cos 160^\circ)} \quad Cp = 0,8 \text{ m}$$

Onde:

v - é a velocidade de impacto ($v = 5,5 \text{ m/s}$);

β - é o ângulo de queda do martelo ($\beta = 160^\circ$).

c) Cálculo da massa do martelo.

Para encontrar a massa do martelo, utiliza-se a equação (05) da energia potencial, que também pode ser chamada de energia de impacto. A energia pretendida neste projeto é de 150 J. Conforme Halliday et al (2014), a equação em que se obtêm a energia potencial é:

$$E = m_m \cdot g \cdot Cp \cdot (1 - \cos \beta) \quad (05)$$

$$150 = m_m \cdot 9,81 \cdot 0,8 \cdot (1 - \cos 160) = 9,85 \text{ kg}$$

Onde:

Ei - é a energia de impacto ($Ei = 150 \text{ J}$);

m_m - é a massa do martelo em kg;

g - é a aceleração da gravidade ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$);

d) Definição do material do cutelo

Segundo Collins (2006) citado por Chitolina et al (2013), para dimensionar o

material do cutelo é necessário saber qual a tensão que a área do cutelo sofrerá no momento do impacto e, para isso, é preciso saber a altura de queda do cutelo, a deformação estática do material e a força de impacto.

A altura de queda (h) pode ser encontrada utilizando a equação (06) (JUVINALL; MARSHEK, 2008).

$$h = \frac{v^2}{2g} \quad (06)$$

$$h = \frac{5,5^2}{2 \cdot 9,81} \quad h = 1,54 \text{ m}$$

Norton (2013) observa que a deformação estática (δ_{est}) do material resulta na aplicação da força peso e é calculada a partir da equação para uma deformação de uma barra tracionada, a equação (07) representa a deformação estática do material.

$$\delta_{est} = \frac{P_m \cdot L_c}{A_c \cdot E} \quad (07)$$

$$\delta_{est} = \frac{(9,85 \cdot 9,81) \cdot 0,03}{1,88 \times 10^{-4} \cdot 207 \times 10^9} = 7,45 \times 10^{-8} \text{ m}$$

Onde:

P_m - é o peso do martelo em N;

L_c - é o comprimento do cutelo em m ($L_c = 0,03 \text{ m}$);

E - é o modulo de elasticidade do material ($E_{aço} = 207 \text{ GPa}$) (CALLISTER, 2015).

A força de impacto (Fi) ou carga de impacto é representada pela equação (08) (GERE, 2003; JUVINALL, MARSHEK, 2008).

$$Fi = P_m \cdot \sqrt{\frac{v^2}{g \cdot \delta_{est}}} \quad (08)$$

$$Fi = (9,85 \cdot 9,81) \cdot \sqrt{\frac{5,5^2}{9,81 \cdot 7,45 \times 10^{-8}}} = 621,7 \text{ kN}$$

A tensão (σ) que o cutelo sofrerá na sua extremidade é dada através da equação (09) que é o resultado da força aplicada no momento do impacto em relação à área (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

$$\sigma = \frac{Fi}{Ac} \quad (09)$$

$$\sigma = \frac{621,7 \times 10^3}{1,88 \times 10^{-4}} = 3,31 \text{ GPa}$$

A tensão admissível (σ_{adm}) do material escolhido SAE 4340 é de 1620 MPa (CALLISTER, 2015). Reutiliza-se a equação (09) para calcular a força que o cutelo exerce sobre o corpo de prova em função da tensão admissível do material (CHITOLINA; ANTON, 2013).

$$\sigma_{adm} = \frac{Fi}{Ac} \quad Fi = 1620 \times 10^6 \cdot 1,88 \times 10^{-4} \quad Fi = 304,56 \text{ kN}$$

O centróide (c) do corpo de prova coincide com o seu centro geométrico e é representado pelas equações (10) (BEER; JOHNSTON, 2005).

$$c = \frac{b_{cp}}{2} \quad (10)$$

$$c = \frac{0,055}{2} = 0,0275 \text{ m}$$

Onde:

b_{cp} - é o comprimento da base do corpo de prova em m ($b_{cp} = 0,055$ m).

O momento (M) é representado pela equação (11), conforme (CHITOLINA;

ANTON, 2013).

$$M = \frac{F_i \cdot c}{2} \quad (11)$$

$$M = \frac{304,56 \times 10^3 \cdot 0,0275}{2} = 4187,7 \text{ N.m}$$

O momento de inércia (I_{cp}) da seção transversal retangular do corpo de prova é dado na equação (12) (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

$$I_{cp} = \frac{a \cdot b^3}{12} \quad (12)$$

$$I_{cp} = \frac{0,01 \cdot 0,008^3}{12} = 4,26 \times 10^{-10} \text{ m}^4$$

Onde:

a - é a altura da seção transversal do corpo de prova ($a = 0,01 \text{ m}$);

b - é o comprimento da base da seção transversal do corpo de prova ($b = 0,008 \text{ m}$).

A equação (13) representa a tensão máxima (σ_{max}) que o martelo aplica sobre o corpo de prova (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

$$\sigma_{max} = \frac{M \cdot c}{I_{cp}} \quad (13)$$

$$\sigma_{max} = \frac{4187,7 \cdot 0,004}{4,26 \times 10^{-10}} = 39,32 \text{ GPa}$$

e) Dimensionamento da Haste

Para haste foi escolhida uma barra comercial de 12,7 x 50,8 mm com 600 mm de comprimento. Para encontrar a massa da haste através da densidade do material escolhido,

utiliza-se a equação (14) (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2014).

$$m_h = V_h \cdot \rho \quad (14)$$

$$m_h = (0,0127 \cdot 0,0508 \cdot 0,6) \cdot 7,85 \times 10^6 \quad m_h = 3000 \text{ g} \quad m_h = 3 \text{ kg}$$

Onde:

m_h - é a massa da haste em kg;

V_h - é o volume de material da haste em m^3 ;

ρ - é a densidade do material ($\rho_{aço} = 7,85 \times 10^6 \text{ g/m}^3$) (CALLISTER, 2015).

O momento de inércia (I_h) da seção transversal da haste é dado pela equação (12).

$$I_h = \frac{a \cdot b^3}{12} \quad I_h = \frac{0,0127 \cdot 0,0508^3}{12} = 1,39 \times 10^{-7} \text{ m}^4$$

Onde:

a - é a altura da seção transversal da haste ($a = 0,0127 \text{ m}$);

b - é a base da seção transversal da haste ($b = 0,0508 \text{ m}$).

A deformação estática (δ_{est}) que ocorre no material no momento do impacto é dada pela equação (15) (JUVINALL; MARSHEK, 2008).

$$\delta_{est} = \frac{P_h \cdot L_h^3}{48 \cdot E \cdot I_h} \quad (15)$$

$$\delta_{est} = \frac{(3 \cdot 9,81) \cdot 0,6^3}{48 \cdot 207 \times 10^9 \cdot 1,39 \times 10^{-7}} = 4,6 \times 10^{-6} \text{ m}$$

Onde:

P_h - é o peso da haste em N;

L_h - é o comprimento da haste em m ($L_h = 0,6 \text{ m}$);

A deformação ou deslocamento do material no momento do impacto é dado pela

equação (16) (JUVINALL; MARSHEK, 2008).

$$\delta = \sqrt{\frac{\delta_{est} \cdot v^2}{g}} \quad (16)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{4,6 \times 10^{-6} \cdot 5,5^2}{9,81}} = 3,8 \text{ mm}$$

Onde:

δ - é a deformação ou deslocamento do material em m.

A força de impacto (Fi) é dada pela equação (08).

$$Fi = Ph \cdot \sqrt{\frac{v^2}{g \cdot \delta_{est}}} = (3 \cdot 9,81) \cdot \sqrt{\frac{5,5^2}{9,81 \cdot 4,6 \times 10^{-6}}} = 24,1 \text{ kN}$$

Para obter a tensão máxima atuante na haste no momento do impacto, utiliza-se a equação (09).

$$\sigma = \frac{Fi}{Ah} = \frac{24,1 \times 10^3}{(0,0127 \cdot 0,0508)} = 37,35 \text{ MPa}$$

Onde:

A_h - é a área transversal da haste em m^2 .

f) Dimensionamento da coluna

Para coluna foi escolhido um tubo circular de 1,05 m de comprimento, com diâmetro externo de 33,4 mm e interno de 26,6 mm.

Para dimensionar a tensão que a coluna estará exposta, utiliza-se a fórmula de Euler. Como a coluna está engastada na parte inferior e livre na parte superior, o índice de esbeltez é obtido através da equação (17) (BEER; JOHNSTON, 2005).

$$lf = 2 \cdot l \quad (17)$$

$$lf = 2 \cdot 1,05 = 2,1 \text{ m}$$

Onde:

lf - é o índice de esbelteza em m;

l - é o comprimento da coluna em m ($l = 1,05 \text{ m}$).

A área da seção transversal do tubo é dada pela equação (18).

$$A_t = \frac{\pi (D^2 - d^2)}{4} \quad (18)$$

$$A_t = \frac{\pi (0,0334^2 - 0,0266^2)}{4} = 3,2 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Onde:

A_t - é a área da seção transversal do tubo em m^2 ;

D - é o diâmetro externo do tubo em m ($D = 0,0334 \text{ m}$);

d - é o diâmetro interno do tubo em m ($d = 0,0266 \text{ m}$).

O momento de inércia (I_t) da seção transversal do tubo é dado na equação (19), de acordo com (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

$$I_t = \frac{\pi (D^4 - d^4)}{64} \quad (19)$$

$$I_t = \frac{\pi (0,0334^4 - 0,0266^4)}{64} = 3,65 \times 10^{-8} \text{ m}^4$$

A equação (20) representa a carga crítica (σ_{cr}) na qual o material estará exposto (BEER; JOHNSTON, 2005).

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_t}{lf^2 \cdot A_t} \quad (20)$$

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 207 \times 10^9 \cdot 3,65 \times 10^{-8}}{2,1^2 \cdot 3,2 \times 10^{-4}} = 52,84 \text{ MPa}$$

g) Dimensionamento do eixo

Para dimensionar o eixo através da tensão admissível do material, utiliza-se a equação (21) (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005). O momento é o peso do conjunto haste e martelo, multiplicado pelo centro de percussão da máquina. O material selecionado SAE 1045 possui uma tensão admissível de 310 MPa (NORTON, 2013).

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 M}{\pi \cdot \sigma_{adm}}} \cdot F_s \quad (21)$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot ((12,85 \cdot 9,81) \cdot 0,8)}{\pi \cdot 310 \times 10^6}} \cdot 2 = 0,03 \text{ m} \quad d = 30 \text{ mm}$$

Onde:

d - é o diâmetro da barra circular em m;

M - é o momento em Nm (peso do conjunto Haste e martelo x centro de percussão);

σ_{adm} - é a tensão admissível do material (aço liga SAE 1045 $\sigma = 310$ MPa);

F_s - é o fator de segurança ($F_s = 2$).

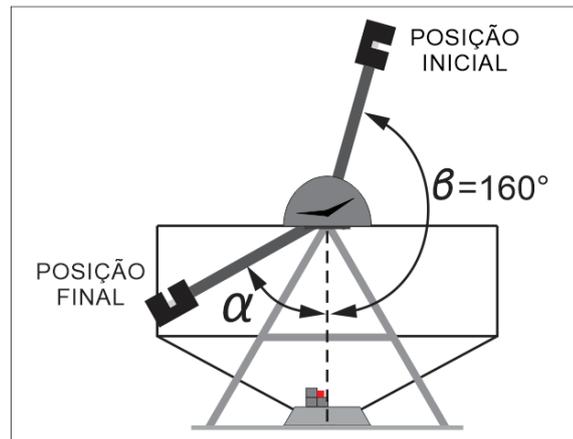
h) Dimensionamento do encosto/apoio do corpo de prova

Utilizando a equação (09) e mantendo a força F encontrada na mesma, dividindo-a por 2 (dois), pois são dois apoios, para o encosto/apoio do corpo de prova e sabendo que as seções são quadradas, tem-se que:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \frac{304560}{2} = 310 \times 10^6 \cdot a^2 \quad a = 22 \text{ mm}$$

i) Funcionamento

O funcionamento da máquina é bem simples, a posição inicial do martelo encontra-se a 160° em relação ao centro da máquina, como pode ser observado na Figura 09.



Fonte: Própria.

Figura 09: Representação do funcionamento da máquina de Charpy.

Com o martelo na posição correta, posiciona-se o corpo de prova nos apoios na parte inferior da máquina. O corpo de prova deve ser centralizado com o rasgo de costa para o impacto do martelo. Após fratura do corpo de prova, o martelo continuará o movimento até uma altura final, onde o indicador marcará o ângulo de subida ou ângulo de rebote do martelo.

Para medir a energia absorvida pelo material durante o impacto, aplica-se a equação (22) (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

$$E_i = m_m \cdot g \cdot \{ [C_p \cdot (1 - \cos \beta)] - [C_p \cdot (1 - \cos \alpha)] \} \quad (22)$$

Onde:

α - é o ângulo de subida do martelo ou ângulo de rebote.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os cálculos envolvendo as partes dimensionadas da máquina estão no tópico que antecede este.

a) Cutelo

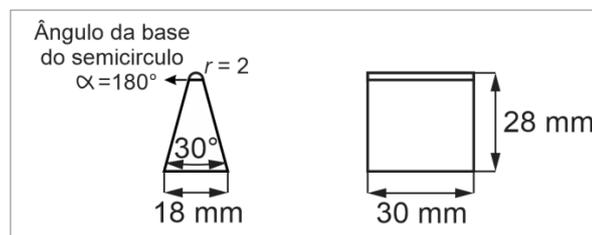
O cutelo possui algumas medidas padronizadas pela ASTM E 23, como o comprimento de 30 mm, o ângulo da base da extremidade de 180° , o diâmetro da extremidade em 4 mm e o ângulo interno de 30° Graus.

Utilizando a equação 01, foi possível encontrar a área do cutelo que entra em contato com o corpo de prova, que foi de $1,88 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ e para encontrar a altura do cutelo, aplica-se a equação 02 na equação 03, chegando a um valor de 26 mm, assim, somando com o raio da extremidade, tem-se um cutelo com 28 mm de altura.

A determinação do material utilizado no cutelo teve início na aplicação da equação 06 na equação 07, na qual se encontrou uma deformação de $7,45 \times 10^{-8} \text{ m}$. A força do impacto foi obtida através da equação 08, sendo de 621,7 kN, e a tensão na qual o cutelo estaria exposto foi encontrada na equação 09, sendo uma tensão de 3,31 GPa.

Como não foi encontrado um material que resista a tensão calculada no projeto, então, foi escolhida uma liga de aço SAE 4340, temperado em óleo e revenido a 315°C em que seu limite de escoamento é de 1620 MPa (CALLISTER, 2015).

Utilizando novamente a equação 09 e o limite de escoamento do material escolhido para determinar a força que o martelo fornece, sendo esta de 304,56 kN, a tensão que o martelo gera no corpo de prova é obtida com a aplicação das equações 10, 11 e 12 na equação 13, gerando então uma tensão de 39,32 GPa, que é suficiente para romper o corpo de prova, sem danificar o material do cutelo. A Figura 10 representa o cutelo com suas medidas.

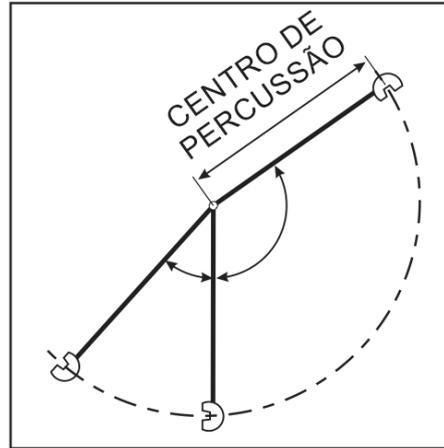


Fonte: Própria.
Figura 10: Dimensões do cutelo.

b) Centro de percussão

Sabe-se que o centro de percussão é a distância do centro do cutelo até o centro do eixo de rotação do pêndulo, como pode ser observado na Figura 11, utilizando a equação 04,

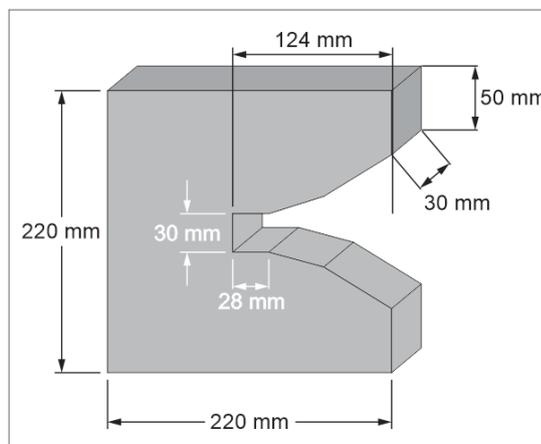
tendo como ponto de partida a velocidade de 5,5 m/s e o ângulo de queda $\beta = 160^\circ$, o centro de percussão encontrado foi de 800 mm.



Fonte: Própria.
Figura 11: Centro de percussão.

c) Massa do martelo

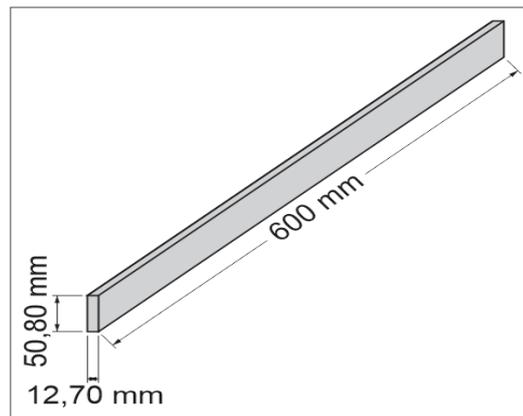
No instante do impacto do martelo com o corpo de prova, a energia cinética do martelo é transformada em energia potencial e utilizando a equação (05) foi possível encontrar a massa do martelo de 9,85 kg, que é necessária para alcançar a energia de impacto pretendida no projeto, que é de 150 J. O material escolhido foi o aço liga SAE 1020. A Figura 12 representa o martelo com suas medidas.



Fonte: Própria.
Figura 12: Representação das dimensões do martelo.

d) Haste

Para a haste foi escolhida uma barra chata comercial de 12,7 x 50,8 mm com um comprimento de 600 mm, como pode ser observado na Figura 13, o material aço liga SAE 1020 com módulo de elasticidade de 207 GPa.



Fonte: Própria.

Figura 13: Representação das dimensões da haste.

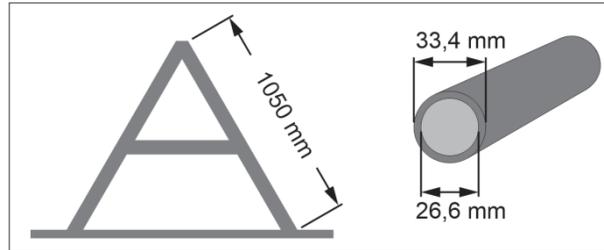
Primeiramente, foi necessário encontrar a massa da haste e com a equação 14, foi definida a massa da haste, sendo essa de 3 kg. Com a aplicação das equações 12 e 15 na equação 16, foi encontrada uma deformação de 3,8 mm, considerada aceitável, pois há uma folga de 5 mm para cada lado entre o martelo e os encostos do corpo de prova.

Aplicando a equação 08 na equação 09 com os valores para a haste, obteve-se uma tensão de 37,35 Mpa, sendo que a tensão admissível para o material escolhido é de 210 MPa, sendo assim aceitável.

e) Coluna

A forma geométrica das colunas foi definida visando reduzir o peso da máquina, à facilidade de encontrar o material no mercado com menor custo e também o fácil manuseio do mesmo. Desse modo, a forma escolhida foi a tubular, montada em forma de “A” de ambos os lados com um ângulo interno de 30°.

Para a coluna, foi escolhido um tubo circular comercial com $l = 1,05$ m de comprimento, um diâmetro externo de $D = 33,4$ mm, um diâmetro interno de $d = 26,6$ mm, e a espessura da parede é de $e = 3,38$ mm, como representado na Figura 14.



Fonte: Própria.

Figura 14: Representação da coluna

Com a aplicação das equações 17, 18 e 19 na equação 20, obteve-se uma tensão crítica de 52,84 Mpa, e o material escolhido foi um aço liga SAE 1020, com uma tensão admissível de 210 Mpa. Sendo assim, a coluna atende aos esforços exigidos.

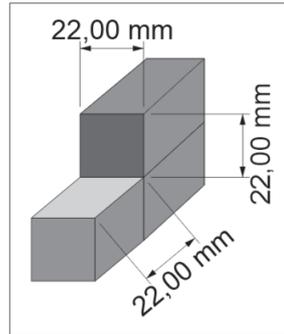
f) Eixo

Para o eixo foi escolhido um material aço liga SAE 1045, que possui um limite de escoamento de 310 MPa, conforme (NORTON, 2013).

Para encontrar o diâmetro mínimo do eixo, é necessário saber a massa do conjunto haste e martelo, essa massa é de 12,85 kg. Partindo da equação 21, utilizando a tensão admissível do material e um fator de segurança igual a 2, obteve-se um diâmetro de 30 mm.

g) Apoio/encosto do corpo de prova

Foi definido que a forma geométrica das seções do apoio/encosto do corpo de provas seria quadrada, tendo como base a equação 09, utilizando a força que o martelo fornece ao corpo de prova, que é de 304,56 kN, dividida por 2, pois são dois apoios. Foi encontrada uma área de 22 mm para as seções do apoio/encosto do corpo de prova. A Figura 15 representa o apoio/encosto do corpo de prova.



Fonte: Própria.

Figura 15: Representação do encosto/apoio do corpo de prova.

4. CONCLUSÕES

O equipamento para ensaio de impacto Charpy foi dimensionado para fornecer uma energia de 150 J, como pôde ser observado no decorrer do trabalho, o dimensionamento foi tratado de forma objetiva e simples, facilitando o entendimento.

Para fornecer esta energia de 150 J, o martelo deve possuir uma massa de 9,85 kg e as dimensões citadas na Figura 11, um ângulo de queda de 160° e um centro de percussão de 0,8 m. Outros componentes como cutelo, haste, eixo, coluna e o apoio/encosto do corpo de prova foram dimensionados a fim de suportarem as tensões e forças geradas pelo impacto.

Levando em conta o que foi analisado para o dimensionamento do equipamento, conclui-se que o estudo cumpriu o objetivo do trabalho, pois o equipamento fornece a energia pretendida e seus componentes foram dimensionados a fim de suportarem as cargas geradas. O modelo do equipamento é bem simples, facilitando a sua construção futuramente.

5. REFERÊNCIAS

ASTM E-23: Standart test methods for notched bar impact testing of metallic materials.

ALVES, Claudemir C; TANIGUTE, Jorge; **Mecânica: Projetos e Ensaio Mecânicos**. São Paulo: Fundação Padre Anchieta, Vol 1, 2011.

BEER, Ferdinand P; JOHNSTON, Elwood Russell; **Resistência dos Materiais**. 3.ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 2005.

CALLISTER, William. D. J; RETHWISCH, David G; **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2015.

CHITOLINA, Cleber Roberto; ANTON, Fernando Menzel. **Dimensionamento e fabricação de um dispositivo para ensaio de Charpy**. 2013. 47 f. Monografia (Graduação) – Faculdade de Engenharia Mecânica, FAHOR - Faculdade Horizontina, Rio Grande do Sul, 2013. [Orientador Professor Mestre: Ricardo Ferreira Severo]. Disponível em: <http://www.fahor.com.br/publicacoes/TFC/EngMec/2013/Mec_Cleber_Fernando.pdf>. Acesso em: 23/01/2015.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime A; SANTOS, Carlos A; **Ensaio de Materiais**. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2012.

GERE, James M; **Mecânica dos Materiais**. São Paulo: 5.ed. Pioneira Thomson Learning, 2003.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl; **Fundamentos da Física**. 9.ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Vol 1, 2014.

JUVINALL, Robert C; MARSHEK, Kurt M; **Fundamentos do Projeto de Componentes de Máquinas**. 4.ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 2008.

NORTON, Robert. L; **Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada**. 4.ed. Porto Alegre, Bookman Editora Ltda, 2013.

SHACKELFORD, James F; **Ciência dos Materiais**. 6.ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2008

SHIGLEY, Josep E; MISCHKE, Charles R; BUDYNAS, Richard G; **Projeto de engenharia mecânica**. 7.ed. Porto Alegre: Bookman Editora Ltda., 2005.

SOUZA, Sérgio A; **Ensaio mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos**. 5.ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1982.