



**Cleber Roberto Chitolina
Fernando Menzel Anton**

**Dimensionamento e Fabricação de um Dispositivo para
Ensaio de Charpy**

Horizontina

2013

**Cleber Roberto Chitolina
Fernando Menzel Anton**

**Dimensionamento e Fabricação de um Dispositivo para
Ensaio de Charpy**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina.

ORIENTADOR: Ricardo Ferreira Severo, Mestre.

Horizontina

2013

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:
Dimensionamento e Fabricação de um dispositivo para ensaio de Charpy**

Elaborada por:

**Cleber Roberto Chitolina
Fernando Menzel Anton**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

**Aprovado em: 28/11/2013
Pela Comissão Examinadora**

**Prof. Dr. Richard Thomas Lermen
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador**

**Prof. Me. Anderson Dal Molin
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Profa. Me. Carla Beatriz Spohr
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Horizontina
2013**

DEDICATÓRIA

Dedicamos esta conquista a todos os nossos amigos, familiares e pessoas que amamos que nos incentivaram e apoiaram na realização deste trabalho.

In memoriam ao nosso Mestre Ricardo Ferreira Severo, cujos ensinamentos foram fundamentais para realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelas oportunidades.

Ao nosso orientador Ricardo Ferreira Severo pelo esforço, paciência e sabedoria nos ensinamentos durante o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os colegas, amigos, professores e colaboradores da FAHOR que nos incentivaram e nos apoiaram para a realização do presente trabalho.

“Nem tudo que se enfrenta pode ser modificado, mas nada pode ser modificado até que seja enfrentado”. (Albert Einstein)

RESUMO

O ensaio de impacto é um procedimento dinâmico utilizado para o conhecimento da energia de impacto dos materiais, tendo como um dos seus instrumentos para aferição a máquina de ensaio de impacto, a qual através de sua simplicidade é capaz de analisar corpos de prova de materiais com diversas composições químicas. Para isso, este trabalho tem como principal objetivo o dimensionamento e construção de um dispositivo de ensaio de impacto, o qual tem formato pendular e é conhecido como máquina de ensaio de impacto Charpy. O trabalho é composto de uma revisão de literatura sobre o tema, onde foram levantados os procedimentos para o ensaio, normas regulamentadoras juntamente com a pesquisa dos processos que regem o teste de impacto e quais as suas variáveis. O dispositivo de ensaio possui dezesseis componentes num total de quarenta e seis itens, sendo possível a análise do material através do ângulo de elevação. O dispositivo possui uma energia de 50 J e perdas de 7,43 J conforme a NBR NM 281-2, onde através de ensaios obteve-se a energia transferida a um corpo de prova de aço 1020 de 42,45 J, sendo assim um meio confiável para o estudo dos materiais de forma prática.

Palavras-chave: Análise de materiais; Ensaio de Charpy; Teste de impacto.

ABSTRACT

The impact rehearse is a dynamics rehearse used for the material impact energy knowledge, having as one of its tools the rehearsal impact machine, which through its simplicity is able to analyze the bodies of material in diferente chemical compositions. For that, this paper has as main goal the dimensioning and construction of a device of impact rehearsal, which has pendulum shape and it is known as rehearse machinery Charpy. The paper is composed of a literature review about the theme, where it was taken the procedures for the rehearse, regulatory norms as well as the research of process that direct the impact test and its variable. The device has 16 components in a total of 46 items, being able for analysis through the elevation angle. The same as similar results to impact rehearse machinery in the market, being a reliable way for the study of material in practical way.

Keywords: Dimensioning, Charpy, Impact.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Máquina de ensaio de impacto tipo Charpy	13
Figura 2 – Tipos de entalhe descritos pela ASTM E-23 para ensaio de impacto tipo Charpy	15
Figura 3 – Componentes da Máquina de Charpy	18
Figura 4 - Cutelo	19
Figura 5 – Triângulo Equilátero	19
Figura 6 – Descrição dos ângulos	20
Figura 7 – Cutelo sem tratamento térmico	26
Figura 8 – Centro de percussão da Máquina.....	27
Figura 9 – Dimensões do Martelo.....	28
Figura 10 – Vista Superior do conjunto martelo cutelo.....	29
Figura 11 – Complemento do martelo.....	29
Figura 12 – Haste	30
Figura 13 – Coluna da Máquina de Charpy	31
Figura 14 – Parte interna da coluna	32
Figura 15 – Conjunto mancais-rolamentos e eixo.....	33
Figura 16 – Apoio e encosto do corpo de prova.....	33
Figura 17 – Base da Máquina de Charpy	34
Figura 18 – União do eixo à haste.....	35
Figura 19 – Sistema de segurança para iniciar o teste	36
Figura 20 – Lateral com proteção	36
Figura 21 – Sistema de Medição	37
Figura 22 – Ângulo de queda e elevação.....	38
Figura 23 – Posição inicial do pêndulo	40
Figura 24 – Corpo de prova após ensaio	40

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO DA LITERATURA	13
2.1 ENSAIO DE IMPACTO	13
2.2 ENSAIO DE IMPACTO EM CORPO DE PROVA ENTALHADO	14
2.3 TÉCNICAS DE ENSAIO DE IMPACTO	14
2.4 IMPACTO	16
3 METODOLOGIA	17
3.1 PROJETO	17
3.1.1 DIMENSIONAMENTO DE ÁREA E ALTURA	19
3.1.2 DIMENSIONAMENTO DO CENTRO DE PERCUSSÃO	20
3.1.3 DIMENSIONAMENTO DA MASSA	20
3.1.4 DEFINIÇÃO DO MATERIAL	21
3.1.5 DIMENSIONAMENTO DE VOLUME	22
3.1.6 DIMENSIONAMENTO DE MASSA ATRAVÉS DA DENSIDADE	22
3.1.7 DIMENSIONAMENTO DE PERÍODO	22
3.1.8 DIMENSIONAMENTO DA TENSÃO MÁXIMA DE ESCOAMENTO	22
3.1.9 DEFLEXÃO DEVIDA AO IMPACTO	23
3.1.10 DIMENSIONAMENTO DA TENSÃO COM FATOR E SEGURANÇA	23
3.1.11 DIMENSIONAMENTO DA COMPRESSÃO DO MATERIAL	23
3.1.12 DIMENSIONAMENTO DE CORDÃO DE SOLDA	24
3.2 CALIBRAÇÃO DA MÁQUINA	24
3.2.1 CÁLCULO DO MOMENTO DO PÊNDULO	24
3.2.2 ENERGIA POTENCIAL INICIAL	24
3.2.3 PERDAS ASSOCIADAS AO ARRASTE DO PONTEIRO	25
3.2.4 PERDAS RESULTANTES DO ATRITO NOS MANCAIS E RESISTÊNCIA DO AR	25
3.2.5 ERRO DE INDICAÇÃO	25
3.2.6 CÁLCULO DA ENERGIA ABSORVIDA	25
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	26
4.1 MÁQUINA	26
4.1.1 CUTELO	26
4.1.2 CENTRO DE PERCUSSÃO E PERÍODO	27
4.1.3 MASSA DO MARTELO	28
4.1.4 HASTE	30
4.1.5 COLUNAS	30
4.1.6 EIXO, MANCAIS E ROLAMENTOS	32
4.1.7 APOIO-ENCOSTO DO CORPO DE PROVA	33
4.1.8 BASE	34
4.1.9 CONJUNTO EIXO-HASTE-MARTELO	34
4.1.10 MECANISMO DE SEGURANÇA	35
4.1.11 SISTEMA DE MEDIÇÃO	37
4.2 CALIBRAÇÃO	38
4.3 FUNCIONAMENTO	39
5 CONCLUSÕES	41
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO	43
ANEXO A – COMPONENTES DO MARTELO	46
ANEXO B – DETALHAMENTO DA BASE E COLUNAS DA MÁQUINA	47

Lista de Símbolos

Símbolo	Grandeza	Unidade
A	Área	m ²
L	Centro de Percussão	m
V	Volume	m ³
g	Gravidade	m/s ²
E	Módulo de Elasticidade do Material	N/m ²
m	Massa	Kg
h	Altura de um corpo em queda livre	m
σ_{est}	Tensão de Deformação Estática	N/m ²
Fi	Força de Impacto	N
Fe	Fator de Impacto	Adimensional
P	Peso	N
M	Momento	N/m
T	Período	segundos
σ	Tensão de Cisalhamento	N/m ²
I	Momento de Inércia	m ⁴
H	Altura de um corpo	m
γ_{st}	Deformação Estática de uma força Distribuída	N/m ²
δ	Compressão do material	N/m ²
I'	Momento de inércia da solda	m ⁻⁴
Iu	Momento polar de inércia	m ⁻³
Ap	Energia Potencial	J
Av	Erro de energia indicada	J
p	Perdas por arraste de ponteiro	J
p'	Perdas por atrito	J
E'	Erro de indicação	J
Ea	Energia Absorvida	J
J	Joules	J
N	Newton	N
Pa	Pascal	Pa

1 INTRODUÇÃO

Na Engenharia, para o projeto e manufatura de pequenos ou grandes componentes, é fundamental o conhecimento do comportamento do material mediante esforços mecânicos, ou seja, suas propriedades mecânicas em várias condições de uso. As condições de uso envolvem temperaturas, tipos de cargas e sua frequência de aplicação, desgaste, deformabilidade, impacto, dentre outras.

Estudar a composição dos materiais é de suma importância para que o projetista possa prever o comportamento do material em condições de trabalho, isto nos remete ao problema de pesquisa do trabalho, o qual direciona a compreensão quanto à ductilidade do material, e a relação de fratura dúctil-frágil.

Porém, para isso, necessita-se de meios confiáveis, que expressem com segurança os parâmetros de comportamento, determinados através de ensaios mecânicos, com isso, justifica-se o desenvolvimento de um dispositivo de ensaio de Charpy, o qual remete a compreensão sobre as fraturas e o comportamento do material em diversas situações de uso.

Conforme Souza (1982), estes ensaios visam principalmente correlacionar seus resultados com as fraturas ocorridas na prática. Com isso, sua utilidade, de uma maneira dinâmica, serve para evitar que as rupturas ocorram de caráter frágil do material em serviço.

O presente trabalho visa dimensionar e construir os elementos de uma máquina de Ensaio de Impacto Charpy, tendo como objetivo principal o dimensionamento de seus componentes de forma simples, atendendo os requisitos de segurança e de forma economicamente viável.

O projeto tem como objetivos os seguintes itens:

- Revisar a bibliográfica para o entendimento dos conceitos sobre ensaio de impacto entendendo quais as técnicas e tipos de testes necessários;
- Verificar a necessidade de algum material, componente ou processo especial para a fabricação da máquina e realização do teste;
- Verificar a existência de normas para execução do teste e segurança do equipamento;
- Definir a capacidade do dispositivo;
- Dimensionar o dispositivo;

- Selecionar materiais para a fabricação do dispositivo;
- Desenvolver projeto conceitual;
- Fabricar dispositivo de ensaio;
- Calibrar dispositivo através dos conceitos e procedimentos das normas regulamentadoras;
- Realizar testes.

O desenvolvimento de uma máquina de ensaio de impacto utilizando a metodologia de Charpy agrega muito ao conhecimento teórico – prático nas atividades de estudo sobre as propriedades dos materiais. Desta forma, também motivou a elaboração deste trabalho, a necessidade de desenvolver um equipamento confiável e de baixo custo, utilizando materiais facilmente encontrados.

Na revisão de literatura, este trabalho contempla o conceito e tipos de técnicas utilizadas para o ensaio de impacto. Na metodologia que será seguida, são apresentadas as etapas de elaboração da máquina juntamente com os cálculos aos quais foi submetida, definindo-se as equações e expressões utilizadas para o dimensionamento da máquina, juntamente com as normas regulamentadoras que regem a construção e procedimentos de aferição do equipamento.

No decorrer do projeto são visualizados os resultados obtidos através da realização dos procedimentos, apresentados na metodologia como etapas do seu dimensionamento. Ao final, é possível quantificar as perdas e avaliar os resultados obtidos através da calibração da máquina, bem como avaliar o teste.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 ENSAIO DE IMPACTO

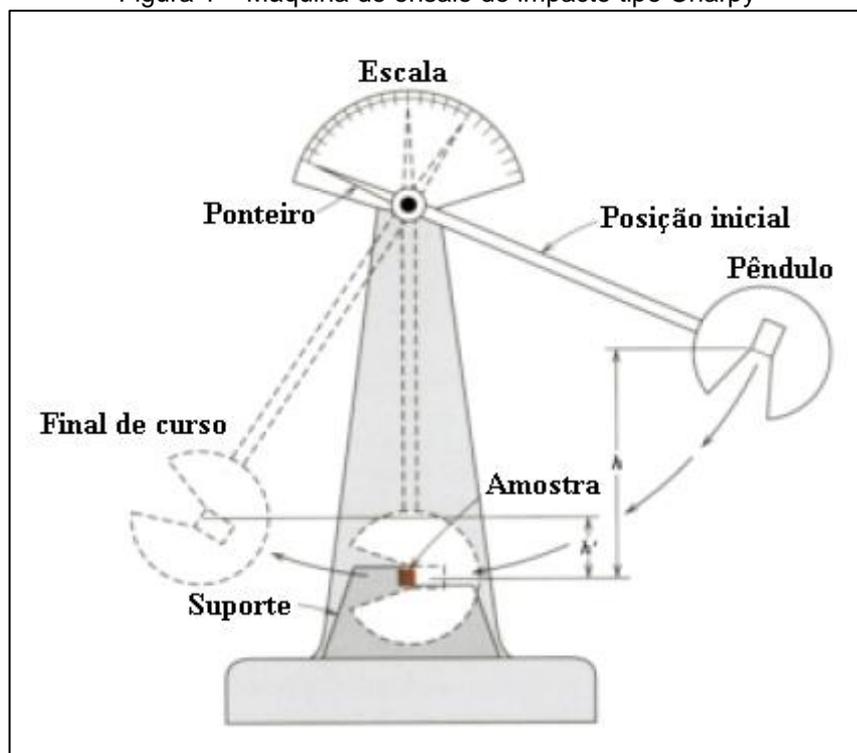
Atualmente existem diversos tipos de ensaios de impacto para as mais diversas situações e aplicações, desde impacto de baixas velocidades até o impacto a velocidades hipersônicas. Dentre estes, alguns dos mais antigos são o de Charpy e o de Izod (CALLISTER, 2002).

Os ensaios mecânicos e tecnológicos são utilizados para a determinação das propriedades dos materiais. Eles visam não apenas medir suas propriedades, mas também obter dados comparativos entre eles, além de estabelecer a influência das condições de fabricação nestes materiais e determinar a adequação deles para o emprego desejado (CHIAVERINI, 1986).

Para que o resultado de um ensaio possa refletir, com a máxima fidelidade o comportamento e propriedades de um material, é preciso que sejam observadas normas, especificações e padronizações tomadas como referência em sua execução (CHIAVERINI, 1986).

A figura 1 apresenta o desenho esquemático de um dispositivo Charpy, na qual se observam as estruturas principais do dispositivo.

Figura 1 – Máquina de ensaio de impacto tipo Charpy



Fonte: (Callister, 2002).

2.2 ENSAIO DE IMPACTO EM CORPO DE PROVA ENTALHADO

Segundo Souza (1982) o ensaio de impacto é um dos primeiros, e até hoje, mais empregados para o estudo de fratura frágil nos metais. Esse ensaio, por vezes denominado ensaio de choque, é um ensaio dinâmico usado principalmente para materiais utilizados em baixa temperatura.

A tendência de um metal se comportar de uma maneira frágil é então medida pelo ensaio de impacto. O corpo de prova é padronizado e provido de um entalhe para localizar a sua ruptura e produzir um estado triaxial de tensões, quando submetido a uma flexão por impacto produzida por um martelo pendular (Souza, 1982).

2.3 TÉCNICAS DE ENSAIO DE IMPACTO

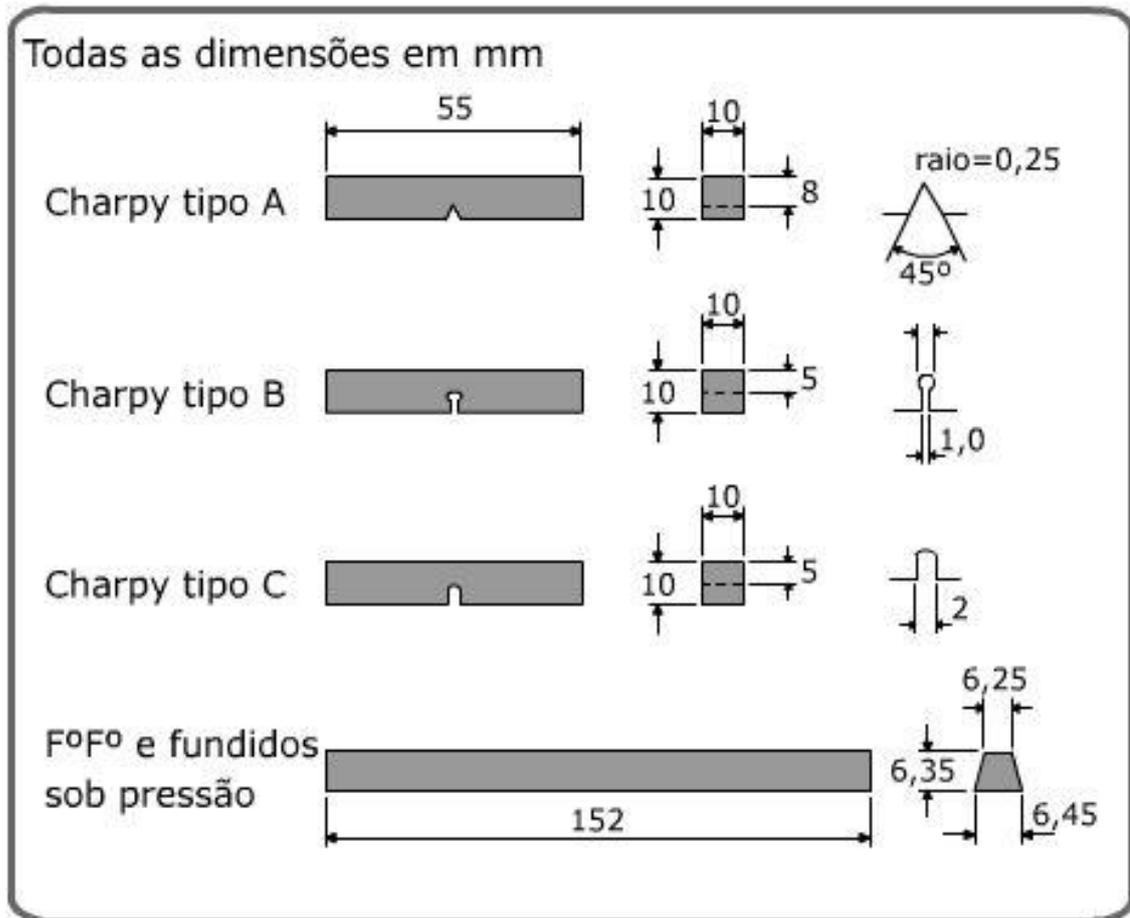
Segundo Callister (2002), dois ensaios são padronizados: as técnicas de Charpy e Izod, os quais foram concebidos e são ainda utilizados para medir a energia de impacto - algumas vezes também chamada de tenacidade ao entalhe. A técnica de Charpy do entalhe em “V” é a mais comumente usada.

Em ambas as técnicas mencionadas, o corpo de prova possui o formato de uma barra com seção reta quadrada, na qual é usinado um entalhe com formato em “V”.

Este ensaio relativamente simples consiste na colisão de um martelo pendular com um corpo de prova de seção transversal quadrada, entalhado no centro e duplamente apoiado horizontalmente na máquina de ensaio (CALLISTER, 2002).

Os corpos de prova entalhados para ensaio Charpy são subdivididos em três tipos, de acordo com a forma do entalhe: tipo A, tipo B e tipo C. Todos possuem comprimento igual a 55 milímetros e seção quadrada de 10 mm conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 – Tipos de entalhe descritos pela ASTM E-23 para ensaio de impacto tipo Charpy



Fonte: (Souza, 1982).

Para iniciar o ensaio, o martelo pendular é elevado a uma determinada altura onde adquire uma energia potencial gravitacional inicial. Quando o pêndulo é liberado, a aresta montada sobre o mesmo colide e fratura o corpo de prova exatamente no entalhe, que tem a finalidade de atuar como um ponto concentrador de tensões, e após isso continua sua trajetória até uma determinada altura, menor que a primeira, onde possui uma nova energia potencial gravitacional (CALLISTER, 2002).

A diferença entre as energias potenciais gravitacionais antes e depois do impacto representa a energia absorvida pelo corpo de prova, necessária à ruptura do mesmo (CALLISTER, 2002).

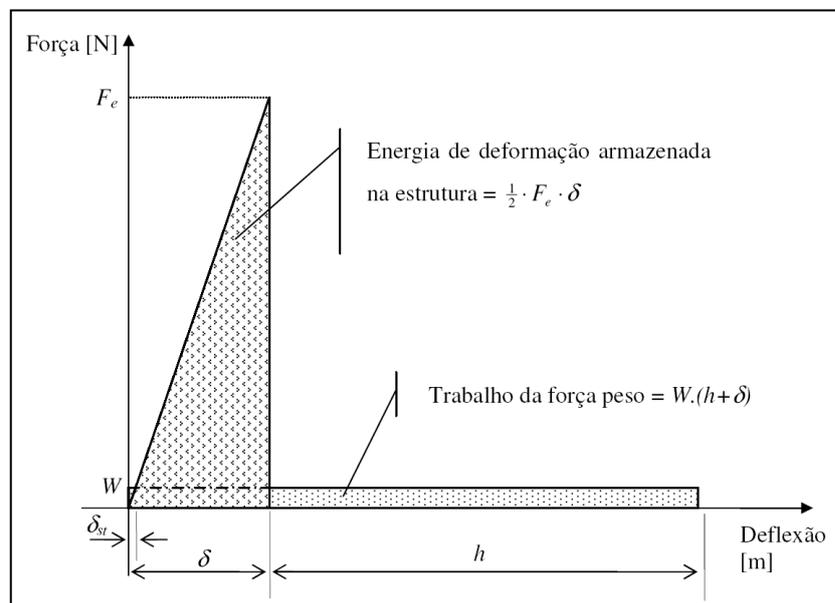
2.4 IMPACTO

Conforme Shigley, Mischke e Budynas (2005), uma força externa aplicada a uma estrutura ou peça é denominada carga de impacto, se o tempo de aplicação for inferior a um terço do menor período de vibração natural da peça ou estrutura. Do contrário, ela é chamada simplesmente de carga estática.

Na engenharia mecânica, há impactos em partes de vários tipos de máquinas, como martelos de forjamento, amortecedores da suspensão de automóveis, pistões e bielas de motores de combustão interna, caixas de câmbio (impacto torcional) (CHIAVERINI, 1986).

Segundo Collins (2006), pelo princípio de conservação da energia, a energia potencial gravitacional do peso W na altura $h+\delta$ é igual à energia de deformação elástica da estrutura. A figura abaixo mostra as energias envolvidas. Observe que a deformação estática (δ_{st}) corresponde ao peso W . A força F_e é chamada "força estática equivalente" e produz a mesma tensão e a mesma deformação que o impacto provoca na estrutura.

Figura 3 – Energias envolvidas no impacto



Collins (2006)

3 METODOLOGIA

Nesse tópico apresenta-se a forma metodológica da elaboração do projeto proposto, partindo do problema que originou este trabalho e concluindo com a concepção dos componentes necessários para a montagem e teste do conjunto.

3.1 PROJETO

Buscando fundamentar teoricamente o trabalho, foi realizado um estudo bibliográfico onde foram demonstradas as equações utilizadas para o projeto da máquina.

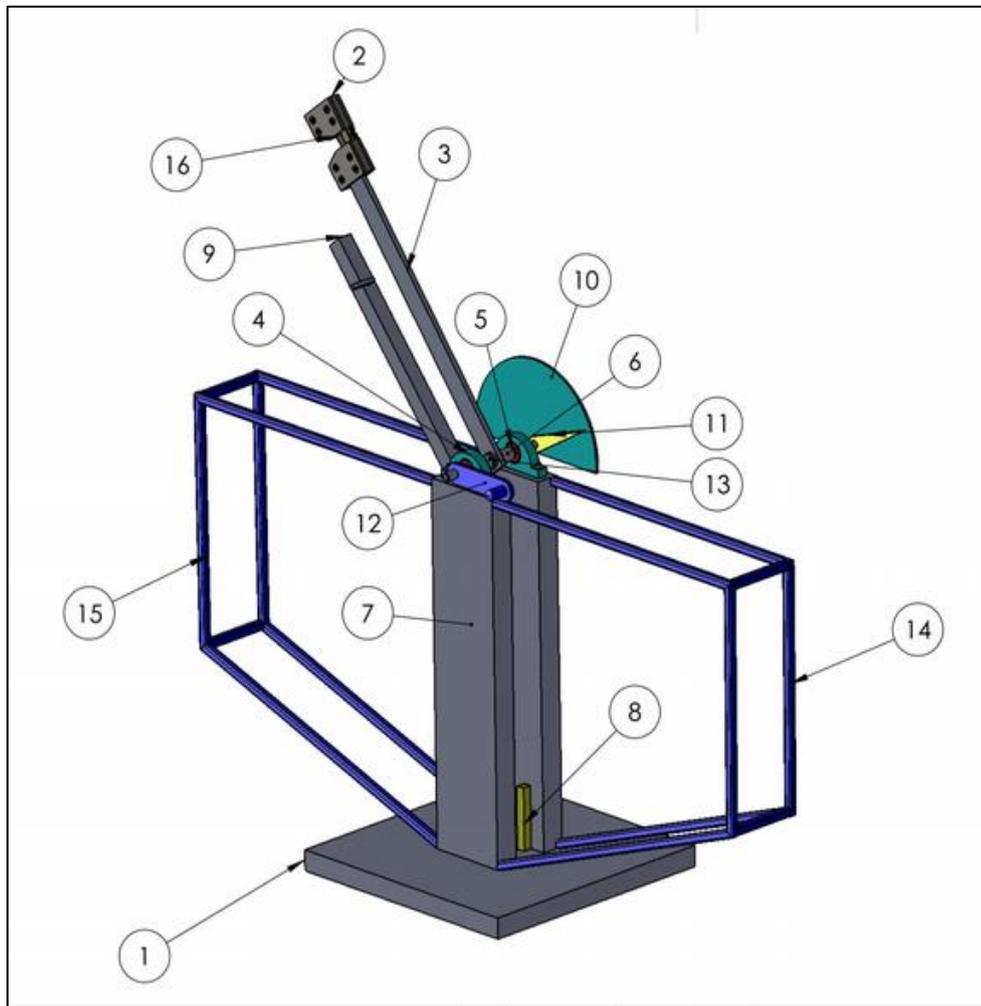
Com a conceituação teórica analisada no estudo da bibliografia e entendidos os conceitos sobre o sistema de funcionamento da máquina, foi definido o modelo de máquina a ser projetada e desenvolvida. Assim os principais componentes serão apresentados na figura 4, bem como no decorrer do trabalho são visualizadas todas as etapas, desde o dimensionamento, construção, calibração e funcionamento da mesma.

A máquina é constituída por 16 elementos sendo eles:

- Cutelo: parte fixada no martelo que entra em contato com o corpo de prova;
- Martelo: massa responsável pela força do pêndulo, a qual é soldada na haste e possui o cutelo em seu centro;
- Haste: meio de ligação entre o eixo e o martelo;
- Eixo: responsável pela sustentação do pêndulo;
- Rolamentos: são colocados os rolamentos nas extremidades do eixo a fim de diminuir perdas com atrito;
- Mancais: os mancais funcionam como suporte aos rolamentos;
- Encosto: forma o conjunto encosto-apoio do corpo de corpo de prova;
- Travamento: responsável pelo travamento do pêndulo na posição inicial;
- Indicador: formado por uma régua graduada, tem a função de indicar em graus a energia absorvida pelo material;
- Agulha: instalada no eixo, tem a função de deslocar o ponteiro do indicador para marcação da energia.
- Manivela: meio pelo qual se coloca o pêndulo na posição inicial;
- Colunas: sustentação do conjunto pêndulo, travamento e sistema de proteção;

- Sistema de Proteção: responsável pela proteção do operador e acompanhantes do teste;
- Base: sustentação de todo o dispositivo.

Figura 4 – Componentes da Máquina de Charpy



Na Tabela 1 podemos observar todos os itens que estão compreendidos com suas respectivas quantidades na máquina.

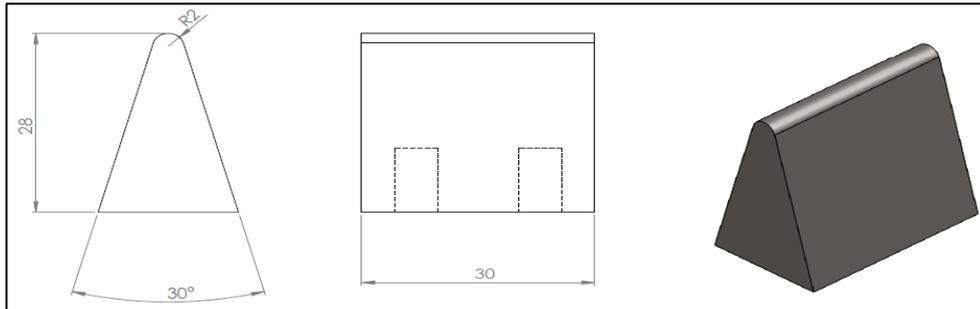
Tabela 1 – Componentes da máquina

Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	QDT.	Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	QDT.
1	Base	1	9	Travamento	1
2	Martelo	1	10	Indicador	1
3	Haste	1	11	Agulha	1
4	Mancal	2	12	Manivela	1
5	Rolamento	2	13	Bucha	2
6	Eixo	1	14	Proteção	4
7	Coluna	2	15	Policarbonato	6
8	Encosto 2	1	16	Cutelo	1

3.1.1 Dimensionamento de área e altura

Segundo Popov (2001), para se encontrar a área do cutelo deve-se aplicar a equação 1, onde o b é o valor da base da meia-circunferência da extremidade do cutelo conforme a figura 5. A Equação 2 é a área da extremidade do cutelo, sendo c a altura do mesmo:

Figura 5 - Cutelo

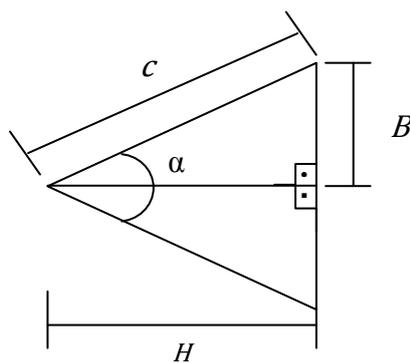


$$b = \frac{\pi \cdot d \cdot \alpha''}{360} \quad (1)$$

$$A = b \cdot c \quad (2)$$

O autor cita ainda, que para encontrarmos o “ H ” de um triângulo retângulo, devemos aplicar a equação 3 e equação 4:

Figura 6 – Triângulo Equilátero



$$\text{sen } \alpha = \frac{\text{cateto oposto } (B)}{\text{hipotenusa } (c)} \quad (3)$$

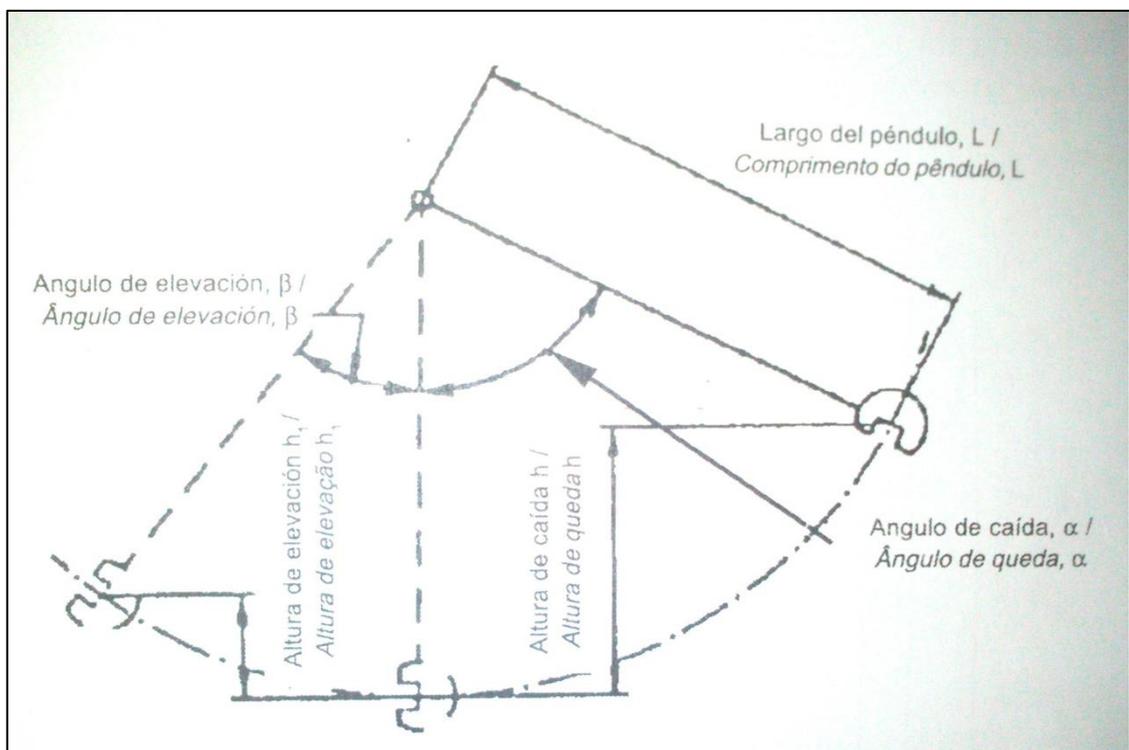
$$\text{cos } \alpha = \frac{\text{cateto adjacente } (H)}{\text{hipotenusa } (c)} \quad (4)$$

3.1.2 Dimensionamento do centro de percussão

De acordo com a NBR NM 281-2 (2003), o ponto de um corpo para o qual a ação de um impacto permanece inalterada caso a sua massa for concentrada nesse ponto é denominado centro de percussão. Conforme a equação 5, o centro de percussão L_1 é encontrado através da velocidade (v), gravidade (g) e cosseno do ângulo de queda (α).

$$L_1 = \sqrt{\frac{v}{2 \cdot g \cdot (1 - \cos \alpha)}} \quad (5)$$

Figura 7 – Descrição dos ângulos



Fonte: (NBR 281-2, 2003)

3.1.3 Dimensionamento da massa

Segundo Halliday, Resnick e Krane (1996), utiliza-se a fórmula da energia para o cálculo da massa (m) do martelo conforme a equação 6, tomando como referência a energia (E) pré-estabelecida pelo projeto e o ângulo (α) de inclinação do martelo em relação ao centro de percussão (L_1) como mostra Figura 7.

$$E = m \cdot g \cdot L_1 \cdot (1 - \cos \alpha) \quad (6)$$

3.1.4 Definição do material

Segundo Collins (2006), a fim de dimensionar o material, é necessário conhecer a tensão que a área do cutelo estará sofrendo no momento do impacto contra o corpo de prova. Para isso é necessário conhecer a altura de queda (h), a deformação estática do material (σ_{est}), o fator de impacto (Fe) e a força de impacto (Fi).

A equação 7 encontra essa altura através da velocidade de impacto (v) (COLLINS, 2006):

$$h = \frac{v^2}{2.g} \quad (7)$$

A tensão de deformação estática é dada na equação 8, através das variáveis força peso do martelo (P), comprimento do cutelo (H), área da extremidade do cutelo (A) e o módulo de elasticidade do material (E):

$$\sigma_{est} = \frac{P.H}{A.E} \quad (8)$$

O fator de impacto (Fe) é dado pela equação 9:

$$Fe = 1 + \sqrt{1 + \frac{2.h}{\sigma_{est}}} \quad (9)$$

A força de impacto (Fi) é representada pela equação 10:

$$Fi = P.Fe \quad (10)$$

A equação 11 representa a tensão (σ) sobre a extremidade do cutelo:

$$\sigma = \frac{Fi}{A} \quad (11)$$

Para encontrar a força (F) sobre a extremidade do cutelo, aplica-se a equação 12:

$$F = Fi = \sigma.A \quad (12)$$

Onde o momento (M) é dado pela equação 13:

$$M = Fi.x \quad (13)$$

Na equação 14 obtemos a tensão exercida através do momento e centróide (c), sobre o momento de inércia (I) do cutelo:

$$\sigma = \frac{M.c}{I} \quad (14)$$

3.1.5 Dimensionamento de volume

Segundo Arrivabene (1994), para se encontrar o volume (V) de um corpo deve-se conhecer primeiramente a geometria do mesmo. Para o cálculo de volume de um corpo com base quadrada, utiliza-se a equação 15, onde multiplicam-se os lados (a) pela altura (H) do corpo.

$$V = a^2 \cdot H \quad (15)$$

Para um corpo com base retangular, tem-se a equação 16, onde a e b representam os lados do corpo:

$$V = a \cdot b \cdot H \quad (16)$$

3.1.6 Dimensionamento de massa através da densidade

Segundo Popov (2001), para se encontrar a massa (m) de um corpo através da densidade, utiliza-se a equação 17, onde V é o volume do corpo e (ρ) o peso específico do material:

$$m = V \cdot \rho \quad (17)$$

3.1.7 Dimensionamento de período

Segundo NBR NM 281-2 (2003), o período de oscilação do pêndulo é igual ao comprimento do pêndulo síncrono com p , mesmo período de oscilação para a máquina de ensaio, portanto o período pode ser determinado conforme a equação 18 a partir do centro de percussão (L_1) da máquina:

$$T = \sqrt{\frac{L_1 \cdot 4\pi^2}{g}} \quad (18)$$

3.1.8 Dimensionamento da tensão máxima de escoamento

Segundo Collins (2006), para dimensionar a deformação estática (γ_{st}) de uma força peso (P) distribuída em uma barra retangular sobre o módulo de elasticidade do material (E) e momento de Inércia (I), aplica-se a equação 19, onde:

$$\gamma_{st} = \frac{P \cdot L_1^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (19)$$

Sendo o momento de inércia (I) descrito através da equação 20:

$$I = \frac{a \cdot b^3}{12} \quad (20)$$

Utilizar-se-á novamente a equação 9, porém, com o valor da deformação estática da equação 19. Aplicam-se todos os valores na equação 10, onde obter-se-á a força de impacto (F_i). Sendo o centro da barra representado por (x), o momento na barra será dado pela equação 21:

$$M = \left(\frac{F_i}{2}\right) \cdot x^2 \quad (21)$$

Depois de encontrado, o valor do momento será aplicado na equação 14, obtendo-se a tensão máxima.

3.1.9 Deflexão devida ao impacto

Conforme Collins (2006), a deflexão (δ) é formada pelo carregamento estático e pelo fator de impacto (F_e). Com isso foram aplicadas a equação 9 e a equação 19 para posteriormente aplicar-se a equação 22:

$$\delta = F_e \cdot I \quad (22)$$

3.1.10 Dimensionamento da tensão com fator e segurança

A tensão de cisalhamento (σ) de um corpo é representada pela equação 23, onde M é o momento fletor, c o centróide do corpo, F_s o fator de segurança e I o momento de Inércia do corpo (NORTON, 2007).

$$\sigma = \frac{M \cdot c \cdot F_s}{I} \quad (23)$$

3.1.11 Dimensionamento da compressão do material

Conforme Beer e Johnston Jr. (2008), a compressão (δ_p) de uma área é representada pela equação 24, sendo P a força peso, l o comprimento do material, A a área do material e E o módulo de elasticidade.

$$\delta_p = \frac{P \cdot l}{A \cdot E} \quad (24)$$

3.1.12 Dimensionamento de cordão de solda

Segundo Shigley, Mischke e Budynas (2005), a tensão da solda é dimensionada a partir da altura do cordão (h). Com isso temos equação 25, que nos trás a tensão (σ) através do Momento fletor (M), comprimento da solda (r) e momento de inércia da solda (I').

$$\sigma = \frac{Mr}{I'} \quad (25)$$

Onde o momento de inércia da solda (I') é representado pela equação 26:

$$I' = 0,707 * I_u * h \quad (26)$$

Sendo o momento polar de inércia (I_u) dado na equação 27,

$$I_u = \frac{d^3}{6} \quad (27)$$

3.2 CALIBRAÇÃO DA MÁQUINA

Conforme a NBR NM 281-2 (2003), após a fabricação, a máquina deve ser calibrada conforme indicações da própria norma. As equações 28, 29, 30, 31, 32 e 33 foram extraídas da referida norma.

3.2.1 Cálculo do momento do pêndulo

Conforme a equação 28, o momento do pêndulo é dado pelo comprimento do centro de percussão (L_1), massa do pêndulo (m) e gravidade (g).

$$M = L_1 \cdot m \cdot g \quad (28)$$

3.2.2 Energia potencial inicial

A energia potencial inicial (A_p) equivale a força do momento (M) em função do ângulo de saída (α) e da força de um ponto de aplicação (Fl_2) em função do ângulo de saída (α), como pode ser visto na equação 29:

$$A_p = M (1 - \cos \alpha) = Fl_2(1 - \cos \alpha) \quad (29)$$

3.2.3 Perdas associadas ao arraste do ponteiro

As perdas por atrito do arraste do ponteiro (p) são em função do momento (M) do pêndulo e dos ângulos de saída ($\beta_1 - \beta_2$) conforme cada lançamento:

$$p = M (\cos \beta_1 - \cos \beta_2) \quad (30)$$

3.2.4 Perdas resultantes do atrito nos mancais e resistência do ar

As perdas por atrito nos mancais e da resistência do ar (p') para as meias-oscilações são encontradas através do momento (M) e de dois lançamentos ($\beta_3 - \beta_2$) sem corpos de prova conforme a equação 31:

$$p' = \frac{1}{10} M (\cos \beta_3 - \cos \beta_2) \quad (31)$$

3.2.5 Erro de indicação

O erro de indicação (E) da máquina de ensaio de impacto, sob condições de ensaio específicas é dada pela média da realização de 5 ensaios (E_1, E_2, E_3, E_4, E_5) conforme a equação 32:

$$E = \frac{E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5}{5} \quad (32)$$

3.2.6 Cálculo da energia absorvida

O cálculo da energia absorvida é dado pela equação 33, onde a energia absorvida (Ea) é encontrada a partir da massa do martelo (m), gravidade (g), centro de percussão (L_1), ângulo de queda (α) e ângulo de elevação (β) como mostra a Figura 7.

$$Ea = m \cdot g \cdot \{[L_1(1 - \cos \alpha)] - [L_1(1 - \cos \beta)]\} \quad (33)$$

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 MÁQUINA

Todos os cálculos estão no memorial de cálculos do trabalho.

4.1.1 Cutelo

Conforme NBR NM 281-2 (2003), o cutelo do martelo possui algumas medidas padrão. O cutelo possui na sua extremidade um ângulo de curvatura (α'') de 180° , diâmetro de 4mm, com um ângulo interno de (α) 15° e coeficiente de elasticidade (E) de 207Gpa. Com estes valores é possível dimensionar a área do cutelo que sofrerá o impacto quando em contato com o corpo de prova conforme a Figura 8.

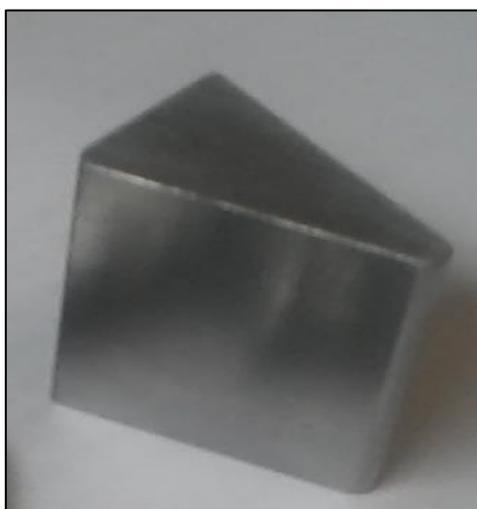
Utilizando a equação 1 e a equação 2, foi possível obter a área de contato do cutelo com o corpo de prova, tendo $1,88 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, sendo sua profundidade obtida através da equação 3 e da equação 4, em que se obteve um valor de 28 mm.

Com o dimensionamento do cutelo concluído, os autores se preocuparam com a resistência do material ao impacto.

A determinação do material iniciou-se com a união da equação 5 e equação 6, e da aplicação da equação 6 e da equação 7 na equação 8, onde se observa que a deformação estática do material seria de $3,38 \times 10^{-8} \text{ m}$.

Sua força de impacto foi descoberta através da simplificação da equação 8 e equação 9 na equação 10, sendo a força de $340,2 \times 10^3 \text{ N}$. De posse destes valores foi possível encontrar a tensão a qual o cutelo estaria exposto, no caso da máquina de Charpy, uma tensão conforme a equação 13 e equação 14 de 1,8 GPa.

Figura 8 – Cutelo sem tratamento térmico



Não obtendo material para a tensão máxima encontrada, os autores optaram por utilizar o material liga de aço SAE 4340, temperado em óleo e revenido a 315° C, em que o limite de escoamento do mesmo é de 1620 MPa (SHIGLEY, MISCHKE E BUDYNAS, 2005).

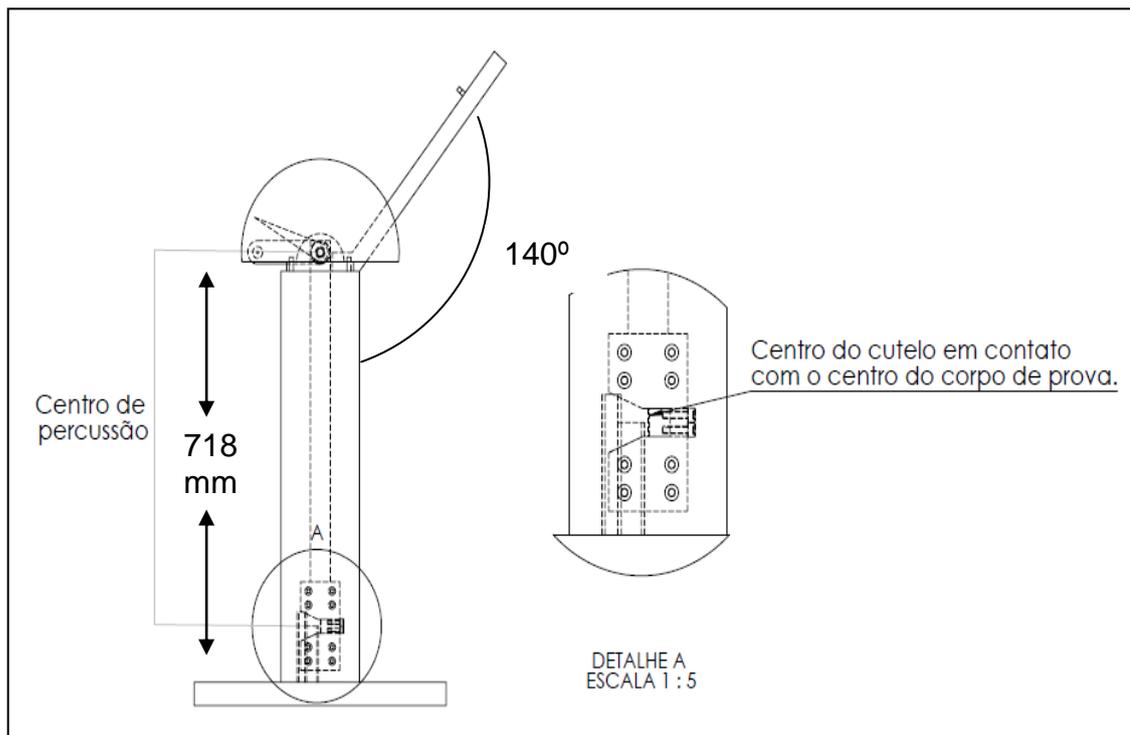
Simplificando a equação 12 e equação 13 na equação 14 e utilizando o limite de escoamento do aço SAE 4340, o martelo irá fornecer uma força de $304,56 \times 10^3$ N, gerando com isso, no corpo de prova uma tensão de 39,34 GPa, sendo esta suficiente para romper o corpo de prova sem danificar o material do cutelo.

A dureza do cutelo inicialmente era de 16 HRC, após o processo de têmpera da peça, onde a mesma foi aquecida a uma temperatura de 900°C durante 30 minutos, temperada em óleo queimado e mantida no forno durante 150 minutos a uma temperatura de 320°C. Após isto, sua dureza passou a 47 HRC, valor acima do mínimo que a norma estabelece que seja de 45 HRC.

4.1.2 Centro de percussão e Período

O centro de percussão da máquina é o local onde o martelo entra em contato com o corpo de prova apoiado, e foi encontrado a partir da equação 5, tendo como base uma velocidade de 5 m/s e um ângulo de queda (α) igual 140°, sua altura é de 718 mm, demonstrada na Figura 9.

Figura 9 – Centro de percussão da Máquina



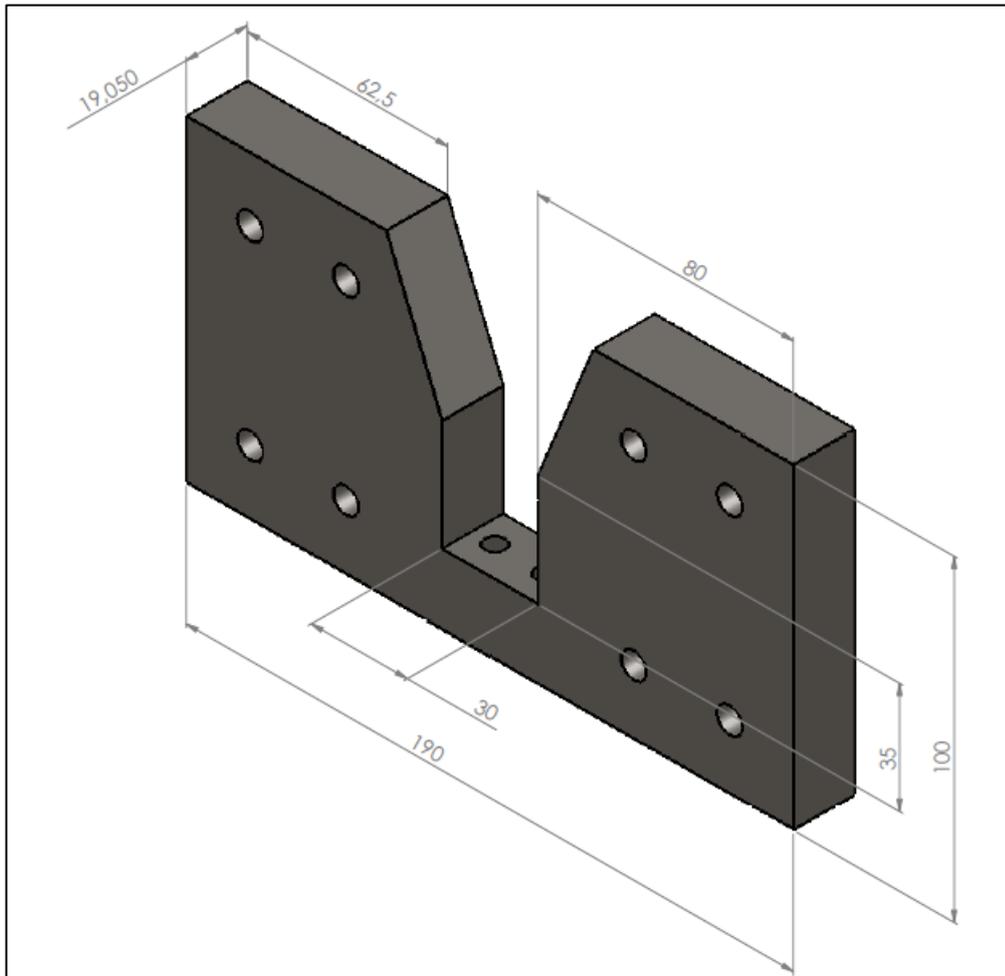
O período da Máquina de ensaio foi de 1,7 segundos, e foi obtido através da equação 18.

4.1.3 Massa do martelo

Conforme a equação 6, a energia cinética pode ser transformada em potencial. Utilizando a mesma equação e sabendo que a máquina conforme projeto é de 50 J e centro de percussão de 720 mm temos uma massa de 4 kg no martelo.

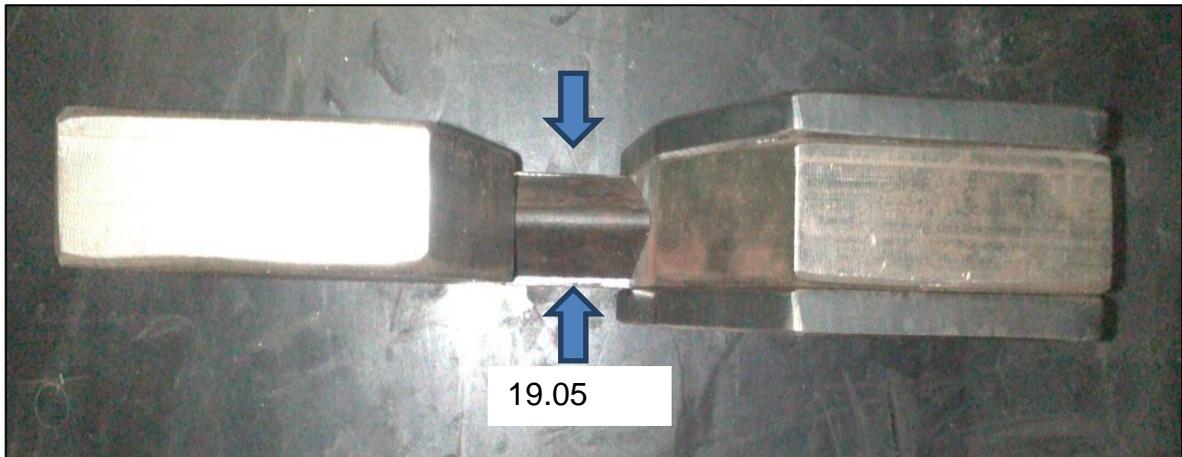
Para a construção do martelo foi utilizada uma chapa de aço SAE 1020, com as dimensões conforme a Figura 10, no entanto, a mesma não possuía a massa necessária de 4 kg para atingir a energia de 50J.

Figura 10 – Dimensões do Martelo



Porém, conforme a NBR NM 281-2 (2003), a espessura do martelo não deve ultrapassar 19,1 mm na área de contato com o corpo de prova conforme expõe a figura 11.

Figura 11 – Vista superior do conjunto martelo cutelo



Com isso, foi necessária a utilização de chapas de aço SAE 1020 com 6,35 mm e 8 mm de espessura com dimensões semelhantes do martelo, porém não unidas no centro como pode ser visto na Figura 12, devido a exigência da norma. Com o incremento das chapas o martelo passou a ter de 4 kg, peso suficiente para atingir a energia necessária de 50J.

Figura 12 – Complemento do martelo

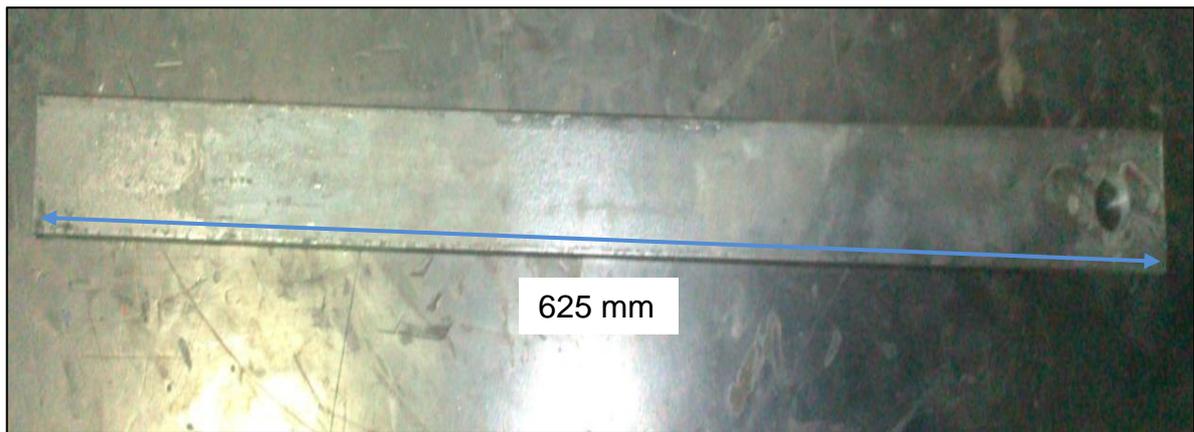


Para fixação das chapas, foram feitos furos roscados no martelo e furos chanfrados nas chapas, onde as mesmas foram fixadas com parafusos allen cabeça escareada M8 x 15 mm, assim não causando interferência do martelo.

4.1.4 Haste

Para a haste foi adotada uma barra chata comercial de 50,80 x 12,7 mm tendo um comprimento de 625 mm, como pode ser visto na Figura 13 e com uma massa de 1,70 kg. A ligação da haste com o eixo conta com o auxílio de calços, a fim de garantir o esquadro e paralelismo com o eixo.

Figura 13 – Haste



A partir da definição da geometria e do material a ser usado - optou-se pela utilização de uma barra chata, com espessura (a) 12,7 mm, largura (b) de 50,8 mm, comprimento (L) de 625 mm e módulo de elasticidade (E) de 207 GPa - foram encontradas a tensão e a deflexão sofrida pela mesma no momento do impacto.

Com a utilização da equação 19 e equação 21 na equação 14, foi encontrada a tensão (σ_{max}) de 148,67 MPa. Sendo a tensão de escoamento máxima do material de 210 MPa, observa-se que ela suportará a tensão imposta pela máquina no momento do impacto.

A deflexão é formada pela deformação estática (γ_{st}) e pelo fator de impacto (Fe). Os valores encontrados nas equações anteriores e aplicados na equação 22 resultam numa deflexão (δ) de 0,05 mm. Esta deflexão da haste foi considerada um valor aceitável pelos autores, pois a folga entre o pêndulo e os encostos do corpo de prova é de 3 mm para cada lado, portanto a deflexão não causa interferência no sistema.

4.1.5 Colunas

A determinação da forma geométrica das colunas foi dada em razão da utilização de mancais de rolamentos, desta forma sua geometria é retangular.

Figura 14 – Coluna da Máquina de Charpy



Foi estabelecida a largura das colunas de 60 mm. A partir da tensão de cisalhamento (σ) do concreto, e por meio da equação 23, foi possível descobrir o comprimento necessário da coluna para suportar a força de impacto de 2.539,49 N (aplicando-se a mesma força que o pêndulo sofre no momento do impacto).

A força foi aplicada na pior condição, incidindo totalmente sobre uma coluna. Com isso se obteve uma coluna de 200 mm de comprimento, com 60 mm de largura e 880 mm de altura em relação à base, como pode ser observado na Figura 14.

Como as colunas seriam de concreto, fez-se para mesmas uma moldura de aço SAE 1020 com as dimensões citadas acima. No interior da coluna, como pode ser observado na Figura 15 abaixo, foram soldados ferros na parte interna a fim de criar uma amarração do concreto com a parte metálica.

Figura 15 – Parte interna da coluna



4.1.6 Eixo, mancais e rolamentos

Sabendo que a massa do martelo é de 4,1 kg e da haste 1,2 kg, foi possível determinar o raio mínimo que o eixo deveria ter para suportar a massa do martelo e da haste a partir da equação 14.

Encontrou-se um raio de 5,6 mm para o eixo, sendo seu diâmetro de 10,12 mm, no entanto, optou-se por utilizar um eixo de 20 mm, devido à variedade de rolamentos disponíveis neste diâmetro.

Os mancais e rolamentos foram dimensionados a partir do eixo, no entanto, por questões econômicas dos mancais – onde é mais viável a aquisição de um mancal para rolamento com diâmetro maior, do que a aquisição de um com diâmetro menor – optou-se por um conjunto de mancal rolamento com diâmetro de 20 mm como pode ser visto na Figura 16.

Figura 16 – Conjunto mancais-rolamentos e eixo

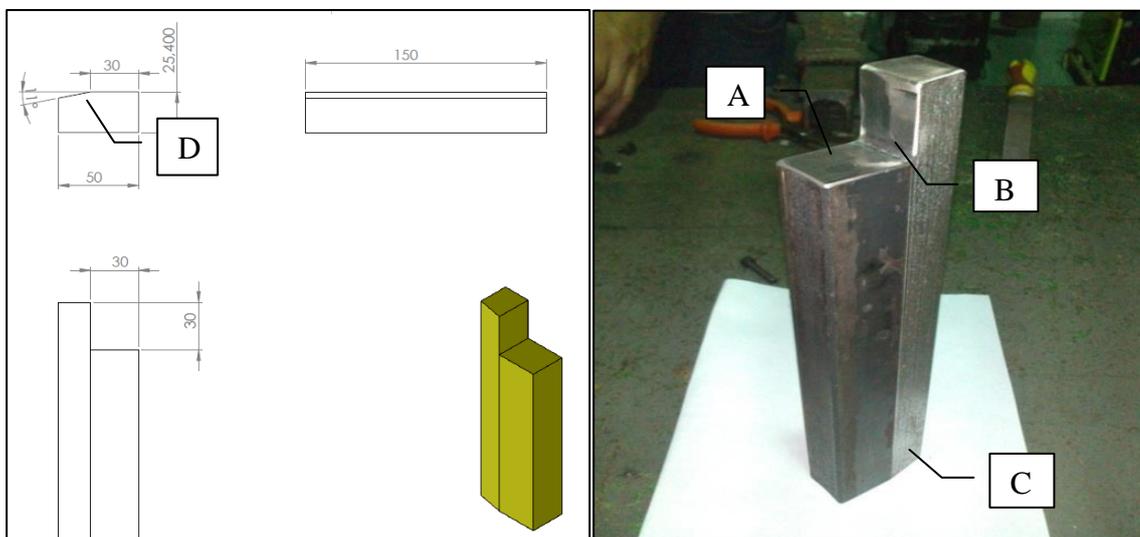


Para fixação dos mancais foi utilizada uma barra roscada, a qual foi cortada em 4 partes e dobrada em forma de “L”, sendo chumbada na coluna, assim evitando problemas na sua fixação às colunas.

4.1.7 Apoio-encosto do corpo de prova

Os apoios e encostos do corpo de prova são previstos na NBR NM 281-2 (2003), a qual cita que os planos entre os suportes não deve exceder 0,1 mm, conforme detalhe A da Figura 17, e que o ângulo entre o plano do apoio e o do suporte deve ser de $90^\circ \pm 0,10^\circ$ como mostra o detalhe B da Figura 17. O ângulo de corte dos apoios deve ser de $11^\circ \pm 1^\circ$ como demonstram os detalhes C e D da Figura 17.

Figura 17 – Apoio e encosto do corpo de prova



Diante disto, optou-se pela utilização de uma única peça, a qual foi fresada para garantir as especificações acima citadas conforme a norma.

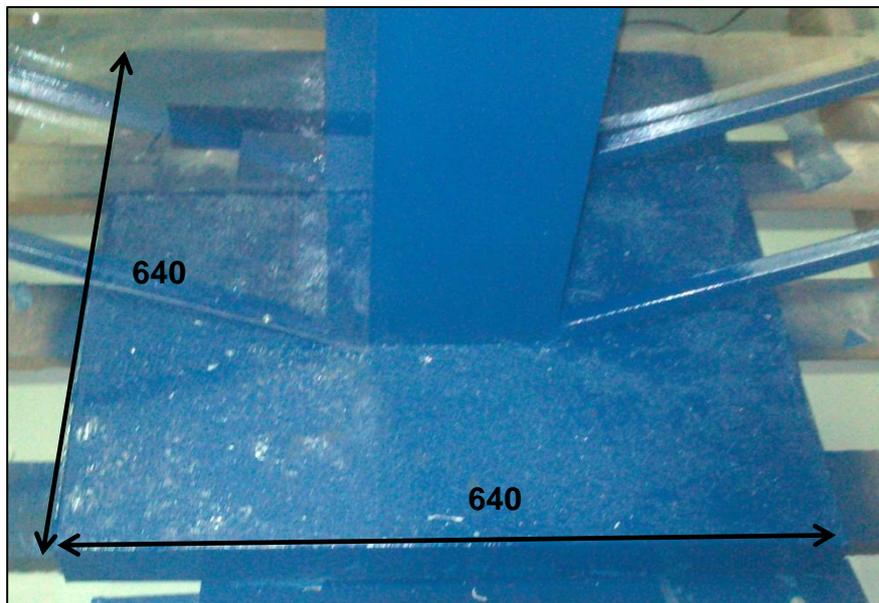
Com a utilização da equação 11 foi possível observar que o encosto do corpo de prova irá suportar a força de impacto, pois sofrerá uma tensão de impacto de 425 Mpa, sendo a tensão do aço 1020 de 207Gpa.

4.1.8 Base

Também de acordo com a NBR NM 281-2 (2003), a base deve ter 12 vezes o peso do martelo. Neste caso, optou-se por uma base quadrada com 50 mm de altura em relação ao solo.

Conhecendo a massa do martelo, foi possível descobrir a massa necessária para a base atender as especificações da norma. Com a utilização da equação 15 e equação 17, e conhecendo o peso específico do concreto de 2,4 g/cm³(CALLISTER, 2002), descobriu-se que o quadrado deve contar com 640 mm de lado.

Figura 18 – Base da Máquina de Charpy



Segundo mostra a Figura 18, a base do dispositivo de ensaio de impacto de Charpy terá como dimensões uma altura de 50 mm, e comprimento de 640 mm.

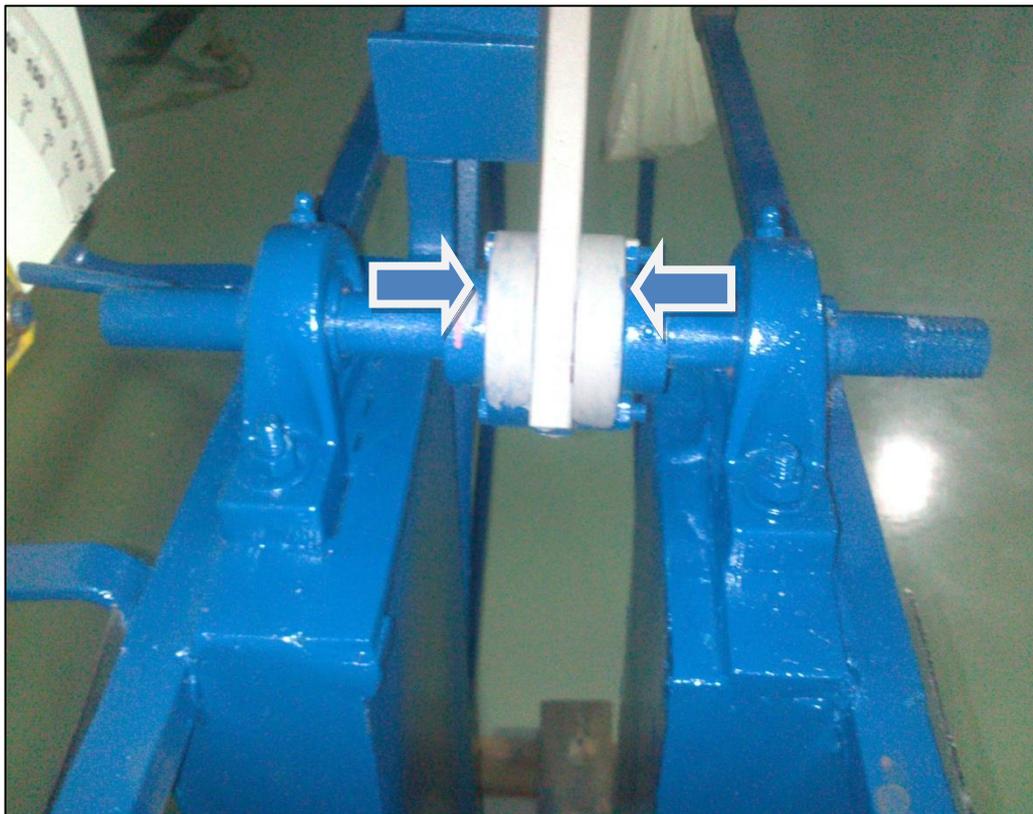
4.1.9 Conjunto eixo-haste-martelo

A união dos componentes sempre é uma parte crítica na construção de uma máquina. Para a união destes componentes utilizou-se duas técnicas - um lado foi parafusado e o outro foi soldado.

A junta parafusada ocorreu na união do conjunto eixo-haste, em que a haste foi furada com o diâmetro de 20,5 mm, para passagem do eixo, e dois furos de 6 mm para passagem dos parafusos que unem a haste às buchas.

Devido ao problema de alinhamento, na primeira tentativa foi necessária a utilização das buchas que centralizaram e garantiram o paralelismo da haste junto ao eixo. Através dos prisioneiros colocados nas buchas, foi possível fixar a haste ao eixo como pode ser visto na Figura 19.

Figura 19 – União do eixo a haste



Na união da haste com o martelo optou-se pelo processo de solda onde a mesma teve sua tensão calculada através da equação 25, chegando-se ao valor de 8,22 MPa com uma altura do cordão (h) de 5mm.

4.1.10 Mecanismo de segurança

Para a segurança na manipulação do equipamento, foi levada em consideração a utilização de um sistema de bloqueio da haste - como pode ser visto na Figura 20 onde a fechadura interrompe sua queda, esta só sendo possível após o desbloqueio do sistema através da chave.

Figura 20 – Sistema de segurança para iniciar o teste



Outra medida adotada foi a colocação de uma proteção em torno da máquina, a fim de evitar que nenhuma parte do corpo do operador possa entrar em contato com alguma parte móvel da mesma.

Figura 21 – Lateral com proteção

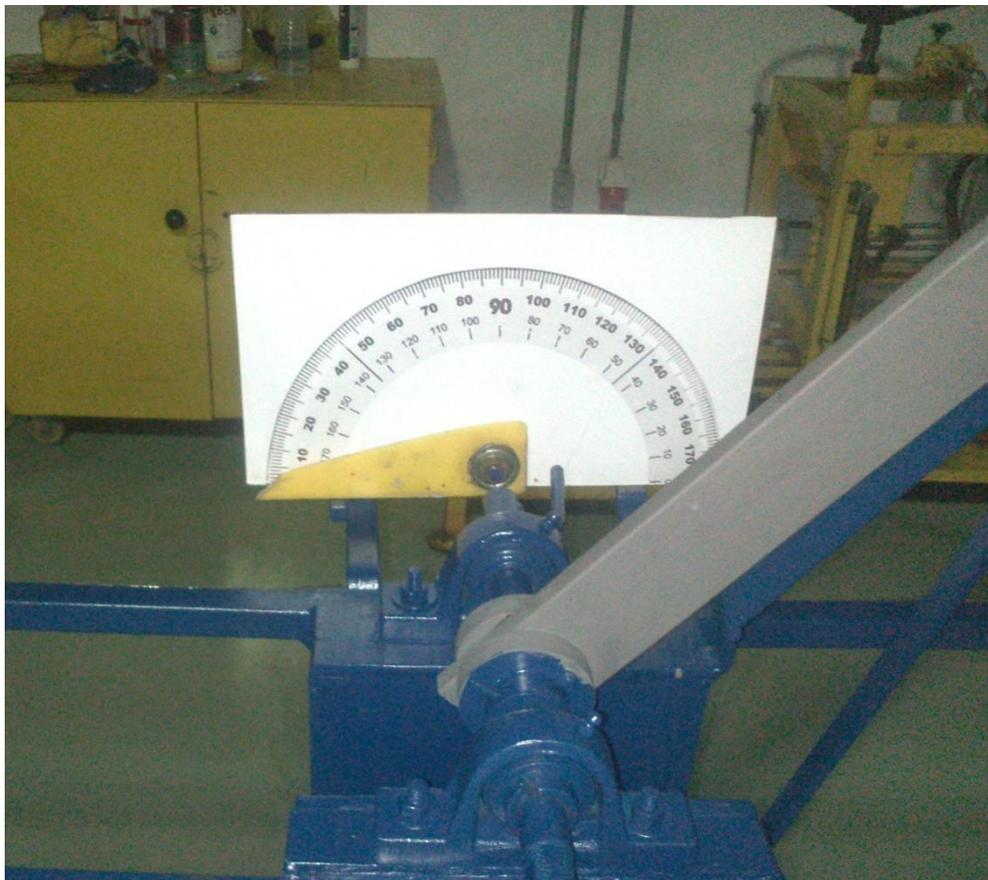


Conforme a Figura 21, uma das laterais também foi protegida colocando-se policarbonato, para que o corpo de prova não fosse projetado para fora da máquina, na tentativa de evitar um eventual acidente.

4.1.11 Sistema de Medição

O sistema de medição da máquina é composto por uma placa metálica, com escala graduada adesivada e por um ponteiro de UHMW (Polietileno de ultra alto peso molecular), conforme Figura 22.

Figura 22 – Sistema de Medição



No eixo encontra-se uma agulha, que entra em contato com o ponteiro da máquina fazendo-o girar. O mesmo não retorna com a agulha uma vez que possui um ímã na parte interna.

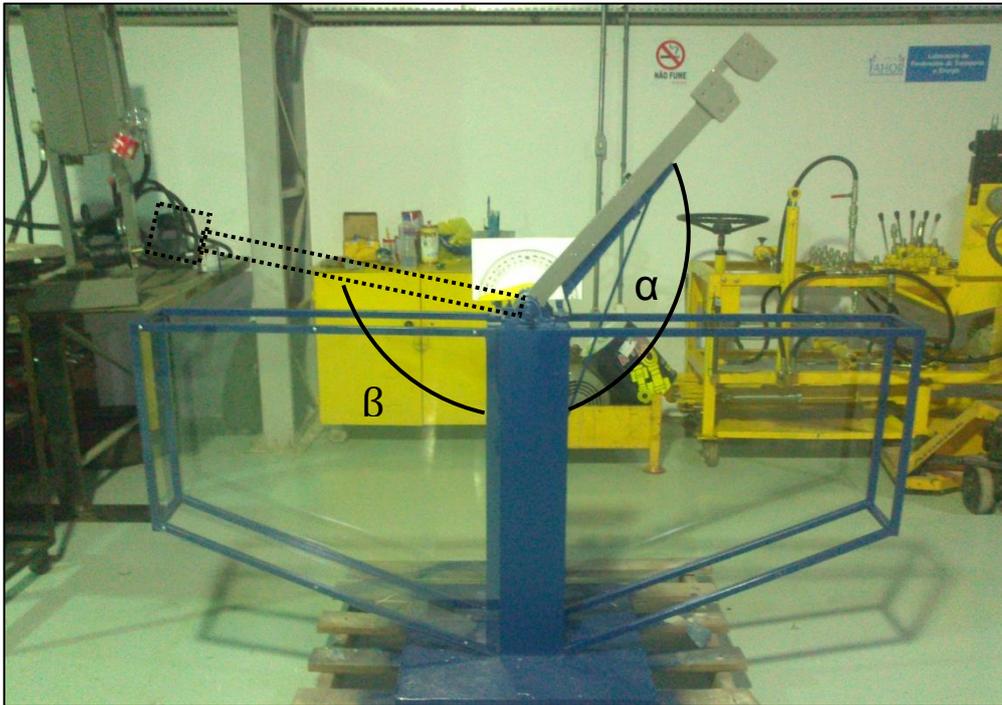
A energia absorvida pelo impacto é dada através da aplicação da equação 33, em que o ponteiro mostra o ângulo de elevação do martelo em graus.

Através deste resultado, obtém-se a energia absorvida pelo material no momento do impacto.

4.2 CALIBRAÇÃO

Primeiramente deve-se medir a energia potencial da máquina. Para isso o martelo foi colocado em 90° no ângulo de queda (α), e mediu-se a força que ele exerce de uma distância conhecida, escolhida pelos autores.

Figura 23 – Ângulo de queda e elevação



Com uma distância de 540 mm entre o centro do cutelo e o eixo, uma massa de 9,44 kg e um ângulo(α) de 90° , se obtém uma força peso de 50 J, com isso através da equação 29 é possível observar que a energia potencial da máquina permanece a mesma, sendo analisada a uma outra distância e inclinação.

As perdas ocorridas pelo arraste do ponteiro consistem em mover o ponteiro para a posição zero e deixar o pêndulo cair normalmente (ângulo de queda α), porém sem nenhum corpo de prova, para então ler o ângulo de elevação β_1 , conforme a Figura 23.

Após isso, reposiciona-se o pêndulo na posição inicial sem reposicionar o ponteiro. Então deixa-se cair novamente o pêndulo, para assim obter-se o novo o ângulo de elevação β_2 .

As perdas de atrito do arraste do ponteiro são dadas através da equação 30, onde se utiliza-se os ângulos $\beta_1(120^\circ)$ e $\beta_2(124^\circ)$. No dispositivo de ensaio obteve-se uma perda de arraste do ponteiro (p) de 1,67 J.

Outra perda, é o atrito nos mancais e da resistência do ar (p). Essa perda é calculada a partir de β_2 e β_3 . Deve-se recolocar o pêndulo na posição inicial e novamente sem reposicionar o ponteiro, deixar o pêndulo efetuar 10 meias-oscilações. Após o início da 11ª meia-oscilação, mover o ponteiro para cerca de 5% do alcance máximo (β_2) e anotar o valor de β_3 .

Conhecidos os valores de β_2 (124°) e β_3 (73°), aplicou-se a equação 31, onde foi encontrada uma perda do atrito dos mancais e resistência do ar (p) igual a 0,80 J.

O erro de indicação da máquina é obtido através do teste de 5 corpos de prova, com os quais foram realizados e obtêve-se a energia dos mesmos, conforme a Tabela 2:

Tabela 2 – Valores das energias absorvidas pelos corpos de prova

	Corpo 1	Corpo 2	Corpo 3	Corpo 4	Corpo 5
Energia (J)	47,35	47,31	47,31	47,27	47,31
Ângulo ($^\circ$)	4	5	5	6	5

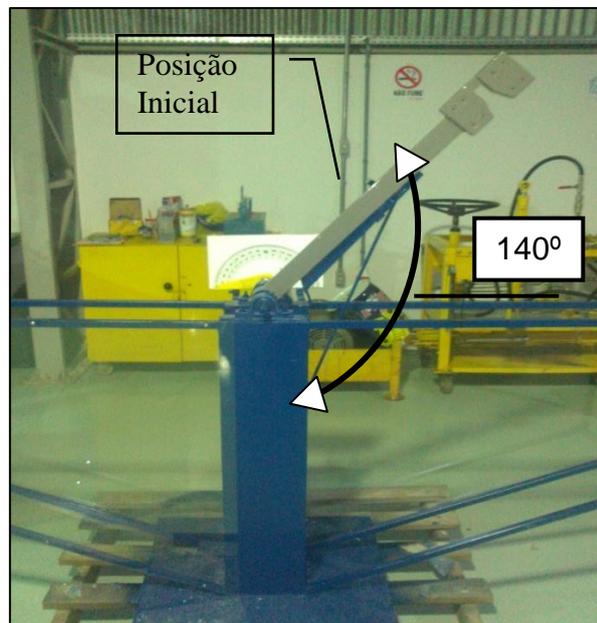
Aplicando os valores da Tabela 2 na equação 32 obtêm-se o erro de indicação, sendo “E” o valor da energia absorvida pela amostra, que conforme dados, a energia foi de $E = 47,31$ J.

4.3 FUNCIONAMENTO

O martelo primeiramente deverá estar na posição inicial de 140 graus conforme demonstra a Figura 24.

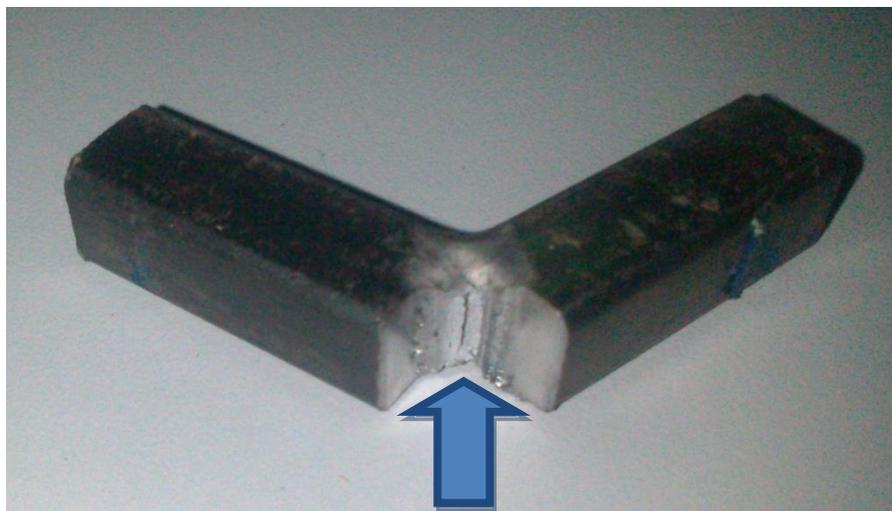
Após colocar o martelo na posição correta, posicionar o corpo de prova no centro dos dois apoios com o rasgo posicionado para o lado contrário ao contato do martelo, este é liberado para o impacto no corpo de prova, com isso, a escala graduada marcará a posição final do martelo após o impacto no corpo de prova, com isso obtêm-se o ângulo de elevação do martelo.

Figura 24 – Posição inicial do pêndulo



Aplica-se a equação 33, através da qual se tem a energia absorvida (E_a) pelo material no momento do impacto, no caso do aço SAE 1020, $E_a = 47,31$ J.

Figura 25 – Corpo de prova após ensaio



Na Figura 25 pode-se observar que o material passa da fase dúctil para frágil, porém sendo um aço SAE 1020, não rompe devido à sua energia de absorção ao impacto em temperatura ambiente ser de 180 J (SOUZA, 1982), e a força absorvida pelo corpo de prova da figura ser de apenas 47,31 J.

Porém, através da análise do corpo de prova, onde é possível ver a transição do dúctil-frágil, constata-se a eficácia do dispositivo de teste de Charpy.

5 CONCLUSÕES

Ao final deste estudo, pode-se concluir que o trabalho cumpre com o principal objetivo da bancada, proporcionando aos acadêmicos da Fahor, um instrumento de verificação da tenacidade e ductilidade dos materiais.

O dispositivo foi projetado de forma detalhada, o que facilita o entendimento, e desenvolvido através de materiais simples, com ampla comercialização, tendo como exemplo o sistema de indicação obtido através do aproveitamento de chapas, retalhos de UHMW e imã retirado de um alto-falante.

Sua energia potencial é de 50 J, e pode ser comprovada através de testes, juntamente com a analogia das informações correntes e do valor citado por Souza (1987), onde a energia absorvida por um corpo de prova de aço 1020 é de 180 J.

O dispositivo também atendeu as expectativas quanto a segurança do operador, possuindo proteções laterais, e sistema de bloqueio com chave, o que impede o começo do teste de forma indevida.

Através da NBR NM 281(2003), constatou-se que o dispositivo atende em 65 % as exigências da mesma, pois têm em sua fabricação as medidas exigidas.

Com a fabricação da máquina de ensaio de Charpy, percebem-se as inconveniências surgidas no decorrer do processo produtivo, demonstrando-se assim, a importância do planejamento no momento da fabricação de uma máquina.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os autores sugerem como proposta para um futuro trabalho, a instrumentação da máquina, onde a aquisição dos valores seria de forma digital, e não de forma analógica como a atual.

Sugere-se ainda, a realização de testes com o mesmo material em diversas temperaturas para análise da curva dúctil-frágil do material, bem como, a realização de testes com diferentes materiais, para análise do comportamento de cada um conforme a sua dureza.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2003). **NBR NM 281-2, Materiais metálicos**. Parte 2: Calibração de máquinas de ensaios de impacto por pêndulo Charpy. Rio de Janeiro, 2003.

ARRIVABENE, V. **Resistência dos materiais**. São Paulo, MAKRON Books do Brasil Editora Ltda, 1994.

BEER, P. F.; JOHNSTON, E. R. JR. **Resistência dos materiais**. 3ª Edição. São Paulo: Pearson Education do Brasil. 2008

CALLISTER, W. D. J. **Ciência e engenharia de materiais: Uma Introdução**. 5ª Edição. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2002.

CHIAVERINI, V.; **Tecnologia Mecânica**. São Paulo, Pearson, Vol.1, 2ª. Edição, 1986.

COLLINS, J. A. **Projeto mecânico de elementos de máquinas: Uma perspectiva de prevenção da Falha**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2006.

HALLIDAY, D. RESNICK, R. KRANE, KENNETH. S. **Física 1**. 4ª Edição. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1996.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas**. 2ª Edição. São Paulo, ARTMED EDITORA S.A., 2004.

POPOV, E. P. **Introdução a mecânica dos sólidos**. 5ª Edição. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA., 2001.

SHIGLEY, J. E., MISCHKE, C. R., BUDYNAS, R. G. **Projeto de engenharia mecânica**. 7ª Edição. São Paulo 2005: ARTMED EDITORA S.A., 2004.

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

APÊNDICE A – Memorial de Cálculo

MÁQUINA

Cutelo

Equação 1

$$b = \frac{\pi \cdot d \cdot \alpha''}{360} = \frac{\pi \cdot 4.180}{360} = 6,28mm$$

Equação 2

$$A = b \cdot c \\ A = 6,28 \cdot 30 = 188,49mm^2$$

Equação 3

$$\text{sen } \alpha = \frac{\text{cateto oposto (B)}}{\text{hipotenusa (c)}} \\ \text{sen } 15^\circ = \frac{9mm}{\text{hipotenusa}} = 34,77mm$$

Equação 4

$$\text{cos } \alpha = \frac{\text{cateto adjacente (H)}}{\text{hipotenusa (c)}} \\ \text{cos } 15^\circ = \frac{\text{cateto adjacente}}{34,77mm} = 33,58mm$$

Equação 7

$$h = \frac{v^2}{2 \cdot g} = \frac{5^2}{2 \cdot 9,81} = 1,27m$$

Equação 8

$$\sigma_{est} = \frac{P \cdot H}{A \cdot E} = \frac{(4,9,81) \cdot 0,03358}{1,88 \cdot 10^{-4} \cdot 207 \cdot 10^9} = 3,38 \cdot 10^{-8}$$

Equação 9

$$Fe = 1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot h}{\sigma_{est}}} = \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot 1,27}{3,38 \cdot 10^{-8}}}\right) = 340,2 \cdot 10^3 N$$

Equação 10

$$Fi = P \cdot Fe = (4,9,81) \cdot (340,2 \cdot 10^3) = 13.349,44N$$

Equação 11

$$\sigma = \frac{Fi}{A} = \frac{340,2 \cdot 10^3}{1,88 \cdot 10^{-4}} = 1,80 \cdot 10^9 Gpa$$

Equação 12

$$I = \frac{0,01 \cdot 0,008^3}{12} = 4,26 \cdot 10^{-10} \\ 1620 \cdot 10^6 = \frac{F}{A} \\ F = 304,56 \cdot 10^3 N$$

Equação 13

$$M = \frac{F \cdot c}{2} = \frac{304,56 \cdot 10^3}{2} \cdot 0,0275 = 4,19 \cdot 10^3 N$$

Equação 14

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{M \cdot c}{I} = \frac{4,19 \cdot 10^3 \cdot 0,004}{4,26 \cdot 10^{-10}} = 39,34 Gpa$$

Centro de percussão e Período

Equação 5

$$L_1 = \sqrt{\frac{V}{2 \cdot g \cdot (1 - \cos \alpha)}}$$

$$L_1 = \sqrt{\frac{5}{2.9,81 \cdot (1 - \cos 140)}} = 0,718$$

Equação 18

$$T = \sqrt{\frac{L_1 \cdot 4\pi^2}{g}} = \sqrt{\frac{0,72 \cdot 4 \cdot \pi^2}{9,81}} = 1,7 \text{ segundos}$$

Massa do martelo

Equação 6

$$\begin{aligned} E &= m \cdot g \cdot L_1 \cdot (1 - \cos \alpha) \\ 50 &= m \cdot 9,81 \cdot 0,72 \cdot (1 - \cos 140) \\ m &= 4kg \text{ Erro! Indicador não definido.} \end{aligned}$$

Haste

Equação 19

$$y_{st} = \frac{P \cdot L_1^3}{48 \cdot E \cdot I} = \frac{(1,7 \cdot 9,81) \cdot 0,72^3}{48 \cdot 207 \cdot 10^9 \cdot 1,3874 \cdot 10^{-7}} = 4,51 \cdot 10^{-6}$$

Equação 20

$$I = \frac{a \cdot b^3}{12} = \frac{0,0127 \cdot 0,0508^3}{12} = 1,3874 \cdot 10^{-7}$$

Equação 21

$$M = \frac{F_i}{2} \cdot x^2$$

Equação 13

$$F_i = 751,46 \cdot 1,7 \cdot 9,81 = 12532,09N$$

Equação 14

$$\sigma_{\max} = \frac{M \cdot c}{I} = \frac{12532,09 \cdot 0,3225 \cdot 0,0254}{1,3874 \cdot 10^{-7}} = 148,67 \text{ MPa}$$

Equação 22

$$\delta = F_e \cdot l = 751,46 \cdot 1,3874 \cdot 10^{-7} = 0,05mm$$

Equação 9

$$F_e = 1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot h}{\sigma_{est}}} = \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot 1,27}{4,51 \cdot 10^{-6}}}\right) = 751,46N$$

Colunas

Equação 23

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{M \cdot c \cdot F_s}{I} \\ 40 \cdot 10^6 &= \frac{1269,75 \cdot 0,4175}{\frac{a \cdot b^3}{12}} \\ 40 \cdot 10^6 &= \frac{1269,75 \cdot 0,4175}{\frac{0,05 \cdot b^3}{12}} \\ b^3 &= 7,98 \cdot 10^{-3} \\ b &= \sqrt[3]{7,98 \cdot 10^{-3}} = 200mm \end{aligned}$$

Eixo, mancais e rolamentos

Equação 14

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{M \cdot c}{I} \\ 210 \cdot 10^6 &= \frac{50,81 \cdot r^4}{\pi \cdot r^4} \\ r^3 &= \frac{203,24}{659,73 \cdot 10^6} = 6,75mm \\ r &= 6,75 \cdot \text{coeficiente de segurança } 2 = 13,5mm \end{aligned}$$

Apoio-encosto do corpo de prova

Equação 11

$$\delta p = \frac{P \cdot l}{A \cdot E} = \frac{340,2 \cdot 10^3}{0,00762} = 425 \text{ MPa}$$

Base

Equação 15

$$V = a^2 \cdot H$$

Equação 17

$$\begin{aligned} m &= v \cdot p \\ 48000 &= 5 \cdot a^2 \cdot 2,4 \\ a^2 &= \frac{48000}{12} = 4000 \\ a &= \sqrt{4000} = 63,24 \text{ cm} = 632,4 \text{ mm} \end{aligned}$$

Conjunto eixo-haste-martelo

Equação 25

$$Iu = \frac{d^3}{6} = \frac{0,0508^3}{6} = 2,18 \cdot 10^{-5}$$

$$\begin{aligned} I' &= 0,707 \cdot Iu \cdot h \\ I' &= 0,707 \cdot 2,18 \cdot 10^{-5} \cdot 0,05 = 7,72 \cdot 10^{-7} \end{aligned}$$

Sistema de Medição

Equação 33

$$Ea = m \cdot g \cdot \{[L_1(1 - \cos \alpha)] - [L_1(1 - \cos \beta)]\}$$

CALIBRAÇÃO

Equação 28

$$M = L_1 \cdot m \cdot g = 0,72 \cdot 4,9,81 = 28,2528 \text{ N}$$

Equação 29

$$\begin{aligned} A_p &= M (1 - \cos \alpha) = Fl_2(1 - \cos \alpha) \\ A_p &= 9,440 \cdot 0,54 \cdot 9,81(1 - \cos 90^\circ) = 50 \text{ J} \end{aligned}$$

Equação 30

$$\begin{aligned} p &= M (\cos \beta_1 - \cos \beta_2) \\ p &= 28,2528 \cdot (\cos 120^\circ - \cos 124^\circ) = 1,67 \text{ J} \end{aligned}$$

Equação 31

$$\begin{aligned} p' &= \frac{1}{10} M (\cos \beta_3 - \cos \beta_2) \\ p' &= \frac{1}{10} 28,2528 (\cos 73^\circ - \cos 124^\circ) \\ p' &= 0,80 \end{aligned}$$

Equação 32

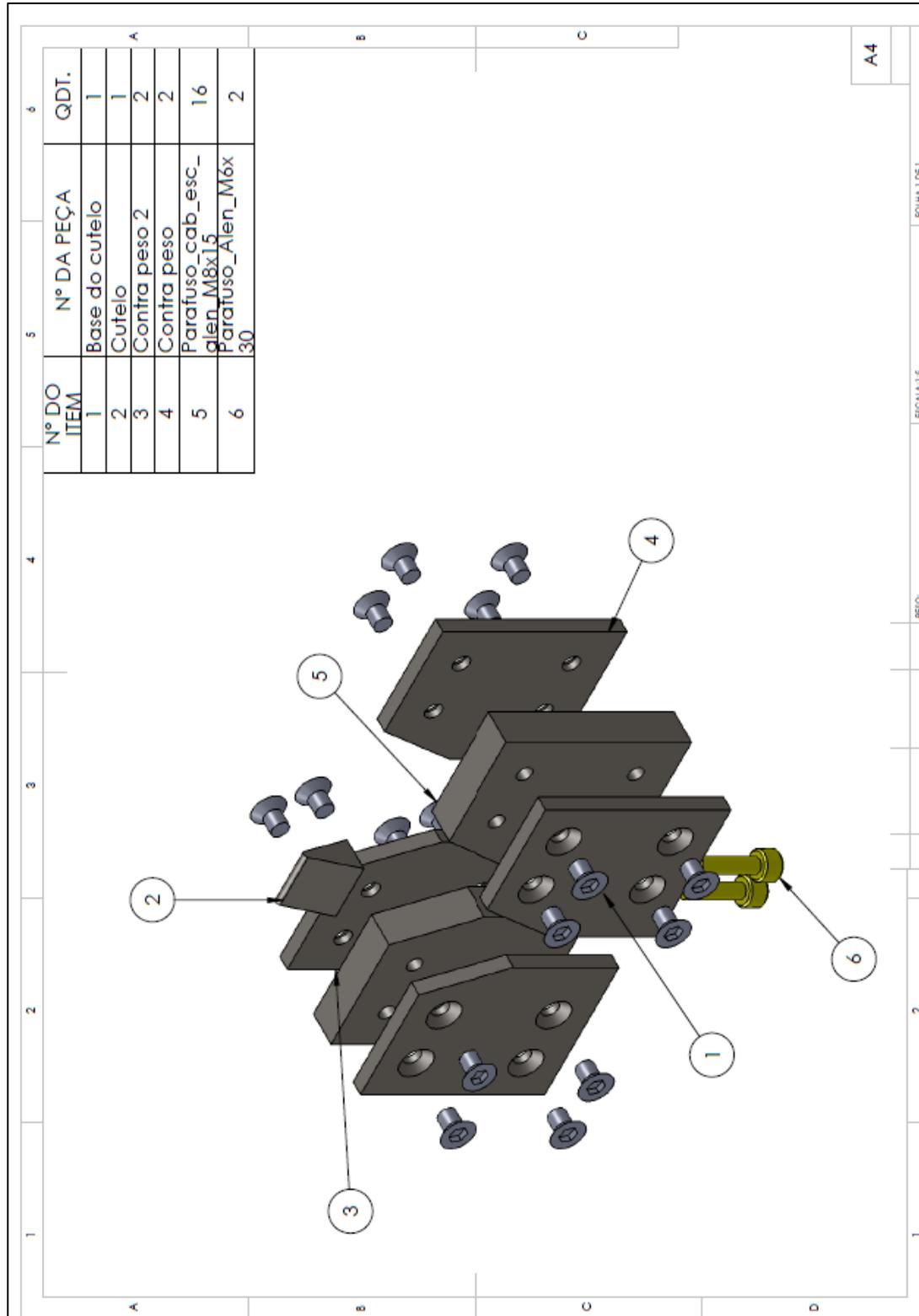
$$\begin{aligned} E &= \frac{E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5}{5} \\ E &= \frac{47,35 + 47,31 + 47,31 + 47,27 + 47,31}{5} = 47,3 \end{aligned}$$

FUNCIONAMENTO

Equação 33

$$\begin{aligned} Ea &= m \cdot g \cdot \{[L_1(1 - \cos \alpha)] - [L_1(1 - \cos \beta)]\} \\ Ea &= 4,9,81 \cdot \{[0,72(1 - \cos 140^\circ)] - [0,72(1 - \cos 5^\circ)]\} \\ Ea &= 49,78 - 2,47 = 47,31 \end{aligned}$$

ANEXO A – COMPONENTES DO MARTELO



ANEXO B – DETALHAMENTO DA BASE E COLUNAS DA MÁQUINA