



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



NAYANE CRISTINA DOS SANTOS CAMPOS

**DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE EQUIPAMENTODE
ENSAIO DE DESGASTE POR ABRASÃO E IMPACTO PARA
CLASSIFICAÇÃO DE MATERIAIS DE PLACAS DE CHUTES**

OURO PRETO - MG
2021

NAYANE CRISTINA DOS SANTOS CAMPOS

nayane.csc@aluno.ufop.edu.br

campos98.nc@gmail.com

**DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE EQUIPAMENTO
DE ENSAIO DE DESGASTE POR ABRASÃO E IMPACTO PARA
CLASSIFICAÇÃO DE MATERIAIS DE PLACAS DE CHUTES**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheira Mecânica.

Professor orientador: DSc. Vinícius Carvalho Teles

Professor coorientador: DSc. Jose Jimmy Penagos

**OURO PRETO – MG
2021**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C198d Campos, Nayane Cristina dos Santos .
Desenvolvimento e construção de equipamento de ensaio de
desgaste por abrasão e impacto para classificação de materiais de placas
de chutes. [manuscrito] / Nayane Cristina dos Santos Campos. Nayane
Campos. - 2021.
79 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Vinicius Teles.
Coorientador: Dr. Jose Penagos.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Desgaste Abrasão - Impacto. 2. Projetos de Máquinas. 3. Ensaios
laboratorial. I. Campos, Nayane. II. Penagos, Jose. III. Teles, Vinicius. IV.
Universidade Federal de Ouro Preto. V. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Nayane Cristina dos Santos Campos

Desenvolvimento e construção de equipamento de ensaio de desgaste por abrasão e impacto para classificação de materiais de placas de chutes

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Mecânica

Aprovada em 10 de Dezembro de 2021

Membros da banca

Doutor - Vinícius Carvalho Teles - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutor - José Jimmy Penagos - Instituto Tecnológico Vale
Doutor - Diogo Antonio de Sousa - Universidade Federal de Ouro Preto
Mestre - Túlio Miorini Vieira Alves Rodrigues

Vinícius Carvalho Teles, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 18/12/2021.



Documento assinado eletronicamente por **Vinícius Carvalho Teles, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/12/2021, às 10:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0260159** e o código CRC **34C87B05**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.013138/2021-07

SEI nº 0260159

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: (31)3559-1533 - www.ufop.br

Essa conquista é dedicada primeiramente a Deus e aos meus pais, Edna e Eliseu, pela força e o apoio incondicional para realizar meus sonhos.

AGRADECIMENTO

Ao meus pais, Edna e Eliseu, meus maiores incentivadores e minha força diária.

As minhas irmãs e meu cunhado por sempre demonstrarem orgulho.

Ao meu orientador e querido professor Vinicius, pelo estímulo e pela oportunidade de receber a sua orientação esplêndida neste trabalho.

Ao meu coorientador Jimmy Penagos, por acreditar sempre na minha capacidade de aprender e ser extremamente aberto com minhas dúvidas para meu crescimento acadêmico, desde a iniciação científica, até na concepção desta monografia. E ao Philip Pritzelwitz por me ensinar e aconselhar com sua experiência de vida nos projetos de máquinas.

Aos professores do curso de engenharia mecânica por suas importantes contribuições para o aprimoramento da minha formação e do meu profissionalismo como Engenheira Mecânica.

Em especial, para o professor Paulo Henrique Vieira Magalhães por sempre me oferecer oportunidades enriquecedoras.

A vida dividida em Ouro Preto na AVC com minhas queridas amigas: Bárbara, Dayane, Luana, Talita e Renata.

Em especial, a minha querida amiga Bárbara Barbosa, pelas motivações diárias e por me reiterar diversas vezes o orgulho que sentia do meu caminho traçado.

E com amor e carinho, as minhas amigas Dayane e Renata por me ajudarem desde o início e serem as melhores e maiores companheiras que alguém poderia ter nessa jornada longa e enriquecedora.

“Não basta ensinar ao homem uma especialidade, porque se tornará assim uma máquina utilizável e não uma especialidade. É necessário que adquira um sentimento, um senso prático daquilo que vale a pena ser empreendido, daquilo que é belo, do que é moralmente correto. Deve aprender a compreender as motivações dos homens, suas quimeras e suas angústias para determinar com exatidão seu lugar a seus próximos e à comunidade.”

Albert Einstein

RESUMO

A indústria de mineração é uma das mais importantes no Brasil. Os equipamentos estão sujeitos a diferentes formas de contato com o minério o que leva a diferentes formas de desgaste. Os chutes de transferência estão expostos ao desgaste abrasivo e por impacto ao mesmo tempo e essa combinação de mecanismos de desgaste não é facilmente reproduzido em laboratório. Normalmente, emprega-se o ensaio Roda de Borracha para avaliar materiais para placas de chutes de transferência, porém o Roda de Borracha não permite reproduzir os mecanismos de desgaste encontrado em campo, o que compromete o emprego dos resultados na indústria. O objetivo deste trabalho é projetar e construir um equipamento de abrasão por impacto, visando praticidade na realização dos ensaios e segurança e conforto dos usuários. O projeto foi desenvolvido baseado nos trabalhos de Ratia e co-autores. O equipamento consiste, basicamente, de um tambor e um rotor que giram no mesmo sentido de forma concêntrica. O rotor permite a inserção de três amostras igualmente espaçadas e no tambor é possível colocar partículas abrasivas com diferentes granulometrias. O sistema de transmissão, construído de forma independente, permite rotacionar o rotor e tambor com diferentes velocidades. Todos os componentes foram dimensionados empregando as boas práticas de projeto de máquinas, visando suportar todos os esforços e melhor eficiência do equipamento. O projeto também seguiu as recomendações da NR12, assim, uma carenagem, feita em acrílico, impede o usuário de acessar as partes móveis, mas permite a visualização do ensaio. Por fim, foi realizado um ensaio teste empregando os seguintes parâmetros: amostra aço SAE 1020; 700 g de brita; rotação do rotor 700 rpm; e rotação do tambor 30 rpm. Durante os ensaios experimentais, o equipamento construído funcionou corretamente e apresentou boa reprodutibilidade dos resultados.

Palavras-chave: Desgaste Abrasão – Impacto, Projetos de Máquinas, Ensaio laboratorial.

ABSTRACT

The mining industry is one of the most important in Brazil. Equipment is subject to different forms of contact with the ore which leads to different forms of wear. Transfer chutes are exposed to abrasive and impact wear at the same time, and this combination of wear mechanisms is not easily reproduced in the laboratory. Usually, the Rubber Wheel test is used to evaluate materials for transfer chute plates, but the Rubber Wheel does not allow reproducing the wear mechanisms found in the field, which compromises the use of results in the industry. The objective of this work is to design and build an impact abrasion equipment, aiming at practicality in carrying out the tests and safety and comfort for users. The project was developed based on the work of Ratia and co-authors. The equipment basically consists of a drum and a rotor that rotate in the same direction concentrically. The rotor allows the insertion of three samples equally spaced and in the drum, it is possible to place abrasive particles with different granulometries. The transmission system, built independently, allows the rotor and drum to be rotated at different speeds. All components were dimensioned using good machine design practices, aiming to support all efforts and better equipment efficiency. The project also followed the recommendations of NR12, thus, a fairing, made of acrylic, prevents the user from accessing the moving parts, but allows the test to be viewed. Finally, a rehearsal test was performed using the following parameters: SAE 1020 steel sample; 700 g of gravel; rotor rotation 700 rpm; and drum rotation 30 rpm. During the experimental tests, the equipment built worked correctly and presented good reproducibility of results.

Key-words: Abrasion – Impact Wear, Machines Projects, Laboratory Tests.

LISTA DE SIMBOLOS

DSRW	Dry-sand, rubber-wheel (Ensaio de Roda de Borracha à Seco)
CV	Coeficiente de variação
W	Taxa de desgaste
A	Área de desgaste (m ²)
t	Tempo de ensaio (s)
Δm	Perda de massa (kg)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxo do processo de beneficiamento de Minério.	5
Figura 2 - Fluxo de minério em chutes de transferências que interligam correias em níveis diferentes	6
Figura 3 - Tipos de mecanismos de desgaste.	8
Figura 4 - Sistemas Tribológicos em Abrasão.....	9
Figura 5 - Abrasão a dois corpos e a três corpos.	10
Figura 6 - Desgaste abrasivo em função da razão de durezas do material e do abrasivo.....	11
Figura 7 - Micromecanismos de desgastes na Abrasão.	12
Figura 8 - Representação esquemática do equipamento DSRW	13
Figura 9 - Variação do desgaste por unidade de distância de deslizamento em função da força normal.....	16
Figura 10 - Volume perdido de material após variação da distância de deslizamento.....	16
Figura 11 - Representação esquemática do equipamento de teste Rotor e Tambor.	17
Figura 12 - Desenho esquemático do conjunto tambor e rotor do dispositivo.	18
Figura 13 - a) Amostra disposta com ângulo de 60°; b) Amostra disposta com ângulo de 90°.	19
Figura 14 - Análise do volume perdido na variação do material em ensaio.....	20
Figura 15 - Fluxograma geral da monografia.....	22
Figura 16 - Fluxograma detalhado da etapa 1 da metodologia.....	23
Figura 17 - Etapa final de análise de resultados.	24
Figura 18 - Desenho 3D do equipamento projetado e fabricado.	28
Figura 19 - Mesa de apoio dos componentes do Tribômetro.	29
Figura 20 - Tabela com especificações dos motores comercializados pela WEG.....	30
Figura 21 - Tabela com especificações dos motoredutores comercializados pela Nord.	31
Figura 22 – Corte A-A do conjunto de transmissão do equipamento.....	32
Figura 23 - Eixo externo (2) do sistema de transmissão do Tambor.	33

Figura 24 - Eixo interno (1) do sistema de transmissão do Rotor.	33
Figura 25 - Medidas da chaveta do Eixo 1.	34
Figura 26 - Medidas da chaveta do Eixo 2.	34
Figura 27 - Dimensões das polias e perfil da correia.	35
Figura 28 - Especificação das polias e correias.	36
Figura 29 - Desenho 3D do conjunto polia e correia.	36
Figura 30 - Geometria do Tambor.	37
Figura 31 - a) Caldeiraria do Tambor; b) Desenho em corte: peças 1, 2, 3, 4 e 5 foram fabricadas separadas e soldadas entre si.	38
Figura 32 - a) Tambor com tampa bipartida e móvel; b) Tambor com tampa em acrílico inteiriça e fixa.	38
Figura 33 - Rotor para posicionamento das amostras; a) amostras dispostas a 90°; b) amostras dispostas a 60°; c) amostras dispostas a 30°.	39
Figura 34 - Equipamento fabricado e montado no laboratório do ITV.	40
Figura 35 - Amostras dispostas no Rotor após o ensaio.	41
Figura 36 - Amostras desgastadas após ensaio.	42
Figura 37 - Gráfico de perda de massa acumulada durante o tempo de ensaio.	43
Figura 38 - Mudança de geometria das bordas das amostras.	44
Figura 39 - Amostra com porta amostra para proteger as bordas.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condições padrão para teste de desgaste DSRW	14
Tabela 2 - Variáveis de ensaio definidas.	24
Tabela 3 - Variáveis e indicadores da pesquisa	26
Tabela 4 - Perda de massa média e coeficiente de variações dos dados obtidos.....	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	2
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Geral	3
1.3.2	Específicos.....	3
1.4	Estrutura do Trabalho	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Processo produtivo da Mineração.....	5
2.2	Mecanismos de desgaste.....	6
2.2.1	Desgaste Abrasivo	8
2.2.2	Micromecanismos de desgaste em Abrasão	11
2.3	Tribômetro Roda de Borracha	13
2.3.1	Ensaio	14
2.3.2	Parâmetros de Ensaio.....	15
2.4	Tribômetro de Abrasão e Impacto	17
2.4.1	Ensaio	18
3	METODOLOGIA.....	21
3.1	Tipo de Pesquisa.....	21
3.2	Materiais e Métodos	22
3.2.1	Ensaio de Abrasão e Impacto	24
3.3	Variáveis e Indicadores	26
3.4	Instrumentos de coleta de dados	26
3.5	Tabulação de dados	26
3.6	Considerações finais do capítulo	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
4.1	Sistema Estrutural.....	29
4.2	Motorização	30
4.3	Sistema de transmissão	31
4.4	Dimensionamento dos Elementos de Máquinas.....	32
4.4.1	Eixos	33
4.4.2	Chavetas	34

	viii
4.4.3 Polias e Correias	35
4.4.4 Tambor	37
4.4.5 Rotor	38
4.5 Segurança em equipamentos	39
4.6 Ensaios Preliminares de Abrasão e Impacto.....	40
4.6.1 Desgaste das Amostras	41
4.6.2 Perda de Massa acumulada.....	42
4.6.3 Influência Direta da Borda na Perda de Massa.....	44
5 CONCLUSÃO.....	46
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	47
ANEXO A.....	49

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Segundo Jost (1990, p. 1) “Tribologia é definida como a ciência e tecnologia da interação entre as superfícies em movimento relativo e assuntos e práticas associados”. E estuda os fenômenos relacionados ao atrito, lubrificação e desgaste.

Um componente pode chegar ao seu fim de vida devido deformação plástica, formação e propagação de trincas, corrosão e o desgaste. Ao compreender como o desgaste atua, pode-se otimizar a escolha dos materiais e minimizar os custos de manutenção na indústria em geral (GAHR, Z., 1987). Na indústria, o desgaste dos materiais é um fator que causa inúmeros problemas para o sistema produtivo, desde o deterioramento da resistência mecânica até a mudança de dimensões dos componentes mecânicos (RATIA; MIETTUNEN; KUOKKALA, 2013). Diversos equipamentos na indústria de extração e manuseio de minérios, como os chutes de transferência, estão sujeitos ao desgaste por abrasão e por impacto de partículas de minério (RATIA *et al.*, 2016).

Os chutes de transferências são equipamentos, dentro da indústria mineradora, responsáveis por transferir o minério de um transportador de correia para outro. Estes equipamentos são revestidos com placas de materiais de elevada dureza e resistência ao desgaste para diminuir o desgaste das superfícies do maquinário ou seus componentes. Durante seu uso as placas chutes estão sujeitas ao desgaste de impacto e abrasão (MESQUITA, 2017).

O desgaste abrasivo pode ser definido como o desgaste que ocorre entre superfícies móveis devido à penetração de partículas duras presentes na interface ou de protuberâncias duras presentes na superfície do contra corpo (GAHR, Z., 1987). Para o desgaste erosivo por deformação plástica ou desgaste por impacto, considera-se que a partícula não deforma, ou seja, o desgaste é proveniente apenas da deformação que ocorre na superfície do material onde o abrasivo aplica uma força como uma indentação (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Em laboratório pode-se estudar o desgaste abrasivo de duas formas: a abordagem global, que utiliza técnicas abrasométricas, e a abordagem local, que emprega técnicas esclerométricas (SILVA, W. M. DA, 2008). Os abrasômetros reproduzem, em determinadas condições, o mecanismo de desgaste encontrado da análise de campo. Nesses equipamentos ocorre à atuação de diversas partículas abrasivas simultaneamente. Já as técnicas esclerométricas utilizam um penetrador instrumentado de geometria definida que interage com

a superfície deformando-a. As forças geradas nessa interação são bem conhecidas e o mecanismo de remoção de matéria bem definido (SILVA, W. M. DA, 2008).

Neste projeto foi desenvolvido um abrasômetro baseado na metodologia abrasão-impacto apresentada nos trabalhos Ratia (2015) e Wilson & Hawk (1999). O equipamento consiste, basicamente, de um rotor e um tambor que giram em torno de seu eixo na mesma direção. Os corpos de prova são fixados no rotor enquanto os abrasivos ficam livres dentro do tambor. A velocidade relativa do tambor e do rotor é diferente, o que possibilita o movimento dos abrasivos que colidem contra as amostras causando o desgaste. O projeto contemplou um inversor de frequência para alcançar maior controle da velocidade de cada eixo e diferentes porta amostras que permitem posicionar os corpos de prova com diferentes ângulos em relação ao tambor (RATIA *et al.*, 2016; WILSON; HAWK, 1999).

Realizar ensaios de desgaste nos materiais é de extrema importância para classificá-los com base na resistência ao desgaste, na dureza superficial, no encruamento após o trabalho e definir a aplicação para cada material. Uma maneira de caracterizar tais materiais é a realização de ensaios controlados de desgaste que simulem o mecanismo de desgaste encontrado em campo. O ensaio de abrasão-impacto agrega valor pois permite a junção de dois fenômenos de desgaste o que possibilita estudar o desgaste presente em diversos equipamentos industriais. Nesse quesito, o presente trabalho apresenta a seguinte pergunta:

Como ensaiar materiais para placas de chutes de transferências após a fabricação da máquina de ensaios de Abrasão e Impacto?

1.2 Justificativa

O desgaste é um fator que influencia nos custos de produção e principalmente na manutenção dos equipamentos, pois causam danos e ocasionam a substituição prematura de peças (RATIA; MIETTUNEN; KUOKKALA, 2013). Na indústria mineradora é muito comum os componentes estarem expostos ao desgaste abrasivo severo. Um dos equipamentos submetidos ao desgaste são os chutes de transferência, pois o fluxo de minério entra em contato direto com as placas que os revestem e em cada região do chute pode-se perceber diferentes mecanismos de desgaste e intensidade. Em algumas zonas ocorrem, simultaneamente, desgaste abrasivo, neste caso a velocidade da partícula é baixa, e por impacto, quando a partícula abrasiva apresenta velocidade e inércia capazes de deformar o material.

Portanto, analisar o comportamento de materiais submetidos ao desgaste por abrasão e impacto em um ambiente controlado capacita a classificação das placas em relação a taxa de desgaste para um minério específico. Assim, permite fazer escolhas mais assertivas quanto ao material/fornecedor a ser adotado reduzindo custos de manutenção e parada do equipamento. Porém, para obter tal eficácia é necessário definir os parâmetros de testes que replicam o que ocorre em campo nos chutes de transferências.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Projetar e testar um equipamento de abrasão por impacto, com a finalidade de avaliar e classificar materiais para placas de chutes de transferência em relação a sua resistência a abrasão e propor parâmetros que influenciam nos mecanismos de desgaste e taxa de desgaste dos materiais.

1.3.2 Específicos

- i. Revisar a bibliografia de Tribologia acerca dos assuntos que serão abordados;
- ii. Projetar a máquina de desgaste por abrasão e impacto (Tribômetro de Tambor) para o laboratório do Instituto Tecnológico Vale;
- iii. Testar o equipamento desenvolvido;
- iv. Avaliar a perda de massa de material padrão para classificar a efetividade da máquina.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho se divide nos seguintes tópicos: Introdução, Revisão Bibliográfica, Metodologia, Resultados e Discussões e, finalmente, Conclusão. Além das referências bibliográficas e o anexo.

No próximo capítulo será feito uma revisão bibliográfica do estado da arte que envolve o trabalho em questão. Será abordado o projeto da máquina de desgaste, os principais

parâmetros do ensaio, desgaste abrasivo, desgaste por impacto, mecanismos de desgaste, materiais utilizados em placas de chutes.

A apresentação dos materiais utilizados e o procedimento experimental estarão dispostos no capítulo 3, metodologia do ensaio de desgaste nos tribômetros tipo.

Nos resultados serão analisados os seguintes tópicos:

1. Os componentes desenvolvidos pelo projeto da máquina;
2. Ensaio preliminar com as variáveis do ensaio, como rotação, tipo e tamanho de abrasivo, tempo de ensaio e material de teste;
3. A perda de massa e a influência do desgaste a borda da amostra nesse tipo de ensaio;

E por fim, segue-se as principais conclusões do trabalho que validam o equipamento e os dados que foram obtidos, além de possíveis melhorias do projeto e dos ensaios.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processo produtivo da Mineração

Na exploração e beneficiamento do minério, o fenômeno de desgaste é um fator que está presente no processo de mineração, onde superfícies internas que possuem contato direto com o minério apresentam diferentes tipos de desgaste devido o atrito mecânico com as partes de equipamentos (SILVA, J. R., 2016). Na Figura 1 é apresentado um processo esquemático do fluxo de processos para beneficiamento do minério (VALE, 2021).

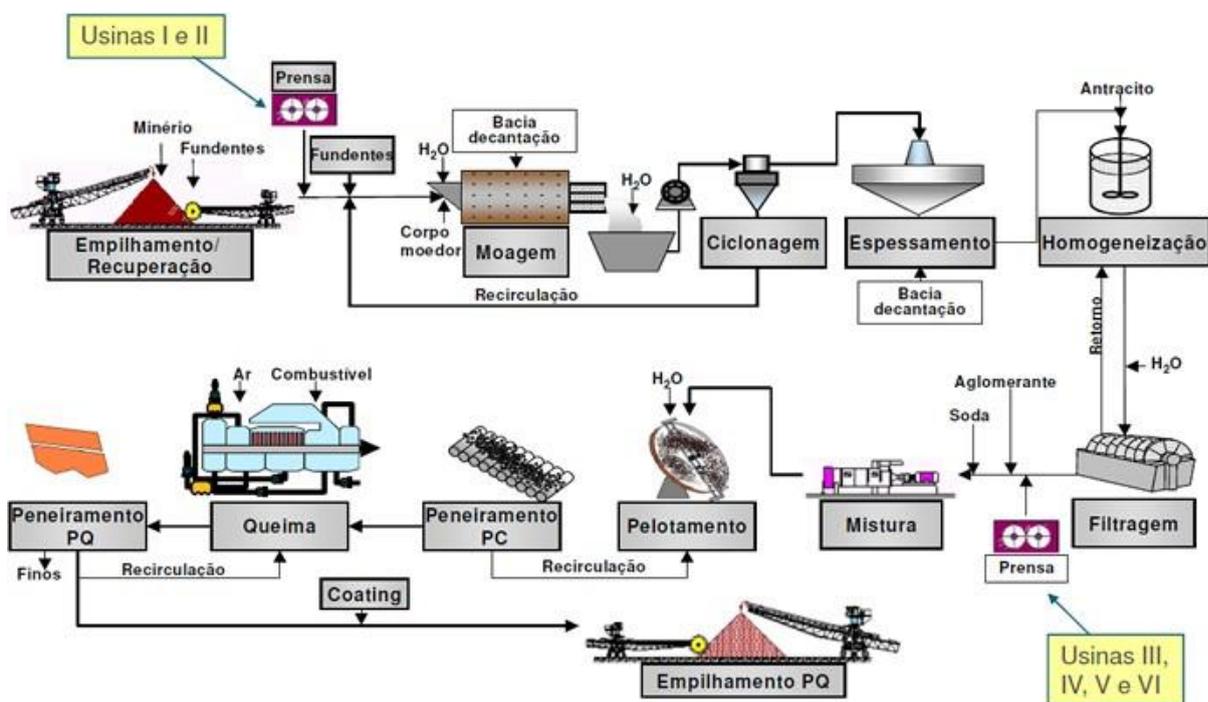


Figura 1 – Fluxo do processo de beneficiamento de Minério.

Fonte: Site da Mineradora Vale, 2021.

Observa-se na Figura 1 que o minério passa por diversos equipamento até chegar no empilhamento do minério processado. A movimentação e transporte desse minério é feito por correia e chutes de transferência. O deslocamento do minério pelo processo é feito por correias transportadoras e quando há correias dispostas em diferentes níveis, os chutes de transferência funcionam como direcionamento do fluxo de minério, como demonstrado na Figura 2 (SILVA, J. R., 2016).

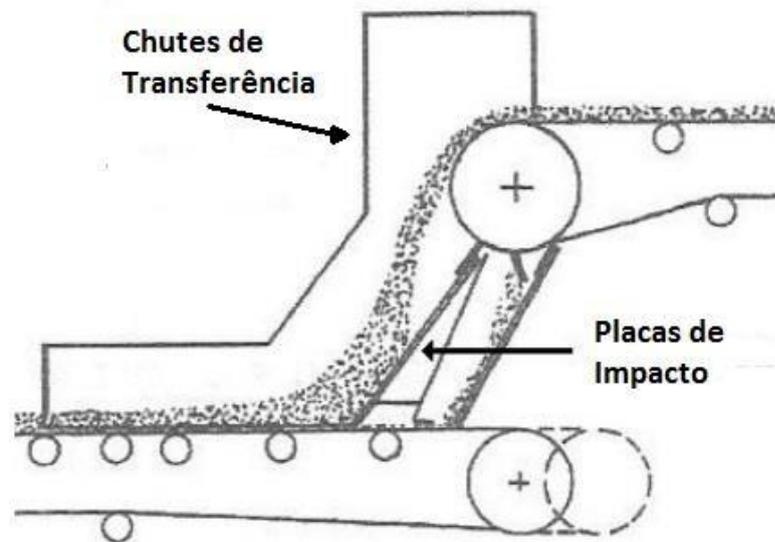


Figura 2 - Fluxo de minério em chutes de transferências que interligam correias em níveis diferentes

Fonte: Mesquita, 2017.

Na região interna dos chutes são colocadas placas de materiais resistentes ao desgaste de maneira a revestir o equipamento para que não ocorra o desgaste prematuro. A geometria dos chutes é projetada para que, durante a passagem de minério, a velocidade da partícula seja reduzida garantindo que ao atingir a correia transportadora receptora o impacto seja baixo e não haja desalinhamento ou danos estruturais mais severos (SILVA, J. R., 2016). Além do direcionamento do fluxo de minério, outra função dos chutes é de impedir que o material seja lançado para fora das correias e causando prejuízos devido à perda de matéria prima.

Pode-se perceber que as placas de chutes sofrem simultaneamente dois tipos de desgaste: o impacto, devido queda livre do minério, e a abrasão, devido ao escorregamento do minério sobre o revestimento dos chutes. Conseguir representar tais fenômenos em laboratórios demandam equipamentos dinâmicos que causem impacto e abrasão em materiais de placas.

2.2 Mecanismos de desgaste

Zum Gahr (1987) apresenta uma definição para desgaste proveniente da norma DIN 50320: “O desgaste é a perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido devido a ação mecânica, contato e movimento relativo contra outro corpo sólido, líquido ou gás”. O dano causado a superfície pode ser descritos como riscos ou sulcos e até mesmo o arrancamento de material, dependendo da gravidade do desgaste (EYRE, 1978).

Czichos (1978) explica que na engenharia mecânica, o movimento relativo entre os corpos que causam o desgaste dos componentes se dividem em quatro tipos:

- i. Deslizamento;
- ii. Rotação;
- iii. Impacto;
- iv. Oscilação.

E com base nisso, é possível observar que na interface de desgaste podemos ter diferentes tipos de mecanismos de desgaste agindo durante o movimento relativo entre as superfícies, classificados em (GAHR, Z., 1987):

- i. Adesão: formação e quebra de ligações adesivas interfaciais.
- ii. Abrasão: remoção de material devido à arranhões.
- iii. Fadiga da superfície: fadiga e formação de fissuras na superfície devido ao ciclo de estresse tribológico.
- iv. Reação triboquímica: formação de reação química como resultado das interações químicas entre os elementos do tribossistema iniciado pela ação tribológica.

Na Figura 3 são exemplificados os tipos de mecanismos de desgaste (DIN 50320).

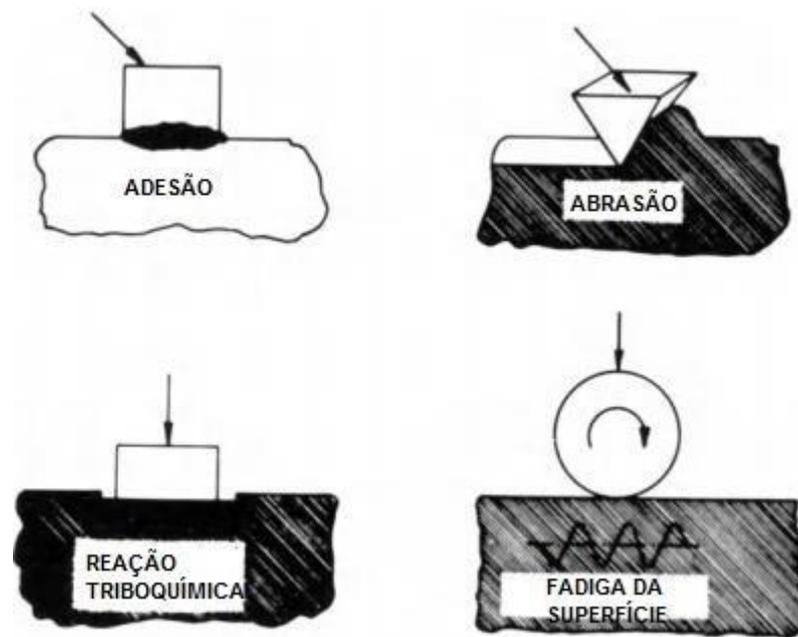


Figura 3 - Tipos de mecanismos de desgaste.

Fonte: DIN 50320.

Os mecanismos de desgastes são diferentes em diferentes tribosistemas, devido a variedade dos parâmetros que podem ocorrer. Um fator preponderante no tipo de desgaste são as propriedades dos materiais que são influenciados por aspectos como composição química dos grãos, estrutura cristalina, tamanho e orientação dos grãos (CZICHOS, 1978).

Gahr (1987) explica que a prevalência de um tipo de mecanismos de desgaste sobre outro é função do tipo de contato, elástico ou plástico, a área de contato e as propriedades do material, seja o corpo sólido ou o contra corpo.

2.2.1 Desgaste Abrasivo

O desgaste abrasivo é desenvolvido através da presença de partículas duras presentes no tribosistema entre os corpos que estão em movimento relativo, no qual as partículas podem ser proveniente de processos de produção, como sílica, alumina, dentre outros, ou fragmentos de material durante o trabalho que funcionam como a partícula dura (GAHR, K. H. Z., 1998).

Os fatores que influenciam diretamente no mecanismo de abrasão são: a carga que age sobre os corpos, a concentração de partículas no fluido abrasivo, a severidade de contato entre o corpo, a temperatura, a umidade, as propriedades como dureza, tamanho e forma da partícula abrasiva e propriedades do material como dureza e microestrutura. Ou seja, são fatores relacionados ao sistema tribológico em que estão inseridos a partícula e o material (GAHR, Z., 1987).

A Figura 4 representa alguns tipos de sistemas tribológicos no qual pode haver a presença do desgaste abrasivo.

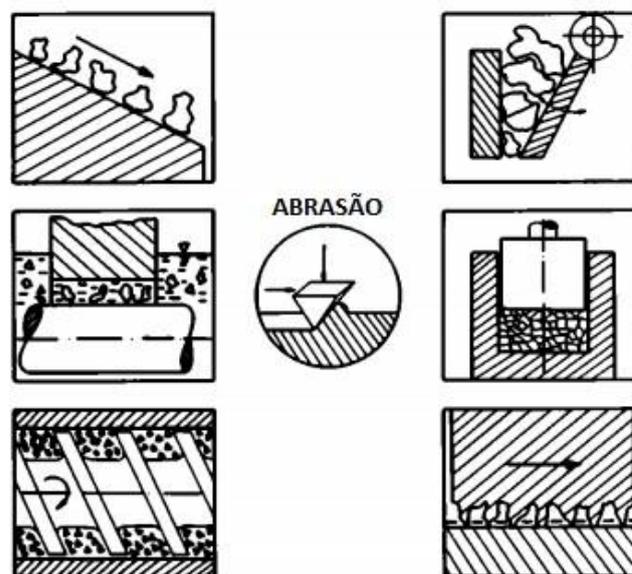


Figura 4 - Sistemas Tribológicos em Abrasão.

Fonte: Gahr, 1998.

Williams e Hyncica (1992) desenvolveram um modelo para o desgaste abrasivo em contatos lubrificados no qual relaciona a taxa de desgaste do material com o movimento da partícula na interface de desgaste e, assim, foi visto. Percebeu-se que há uma relação entre o movimento da partícula e a taxa de desgaste do material. Desse modo, o mecanismo de remoção de matéria foi definido com base no movimento da partícula durante o contato do corpo, contra corpo e o abrasivo. Entretanto, fatores como tamanho e forma da partícula e a distância entre as superfícies influenciam diretamente no mecanismo de desgaste (SILVA, W. M. DA, 2008).

O desgaste abrasivo é, historicamente, classificado em abrasão a dois corpos e abrasão a três corpos (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). O primeiro caso, abrasão a dois corpos, ocorre quando na superfície do contra corpo é áspera ou possui partículas abrasivas fixas a ela e essa superfície deslizada sobre a superfície do corpo causando riscos e sulcos (Figura 5 a). No caso

do desgaste abrasivo a três corpos, o abrasivo está livre ou solto, assim, quando as superfícies se movem, essas partículas podem rolar causando microindentações ou engastar em uma das duas superfícies formando riscos e sulcos (Figura 5 b). Normalmente, observa-se em laboratório, que o desgaste abrasivo a dois corpos causa uma maior perda de massa comparado ao desgaste abrasivo a três corpos (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Uma das explicações é que a partícula ao rolar entre as duas superfícies perde energia que seria empregada para remover matéria.

Na Figura 5 são demonstrados os dois tipos de abrasão, a dois corpos e a três corpos.

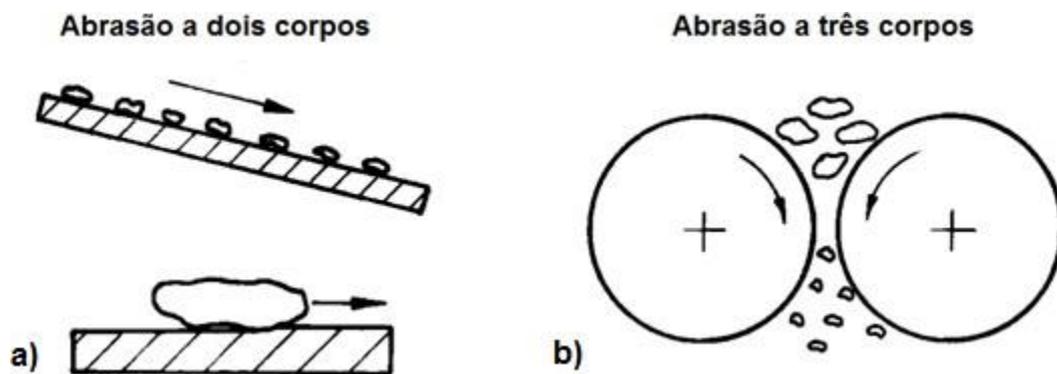


Figura 5 - Abrasão a dois corpos e a três corpos.

Fonte: Adaptado de Czichos, 1978.

Gahr (1987) apresenta o conceito de severidade em abrasão, Figura 6. Que é a relação entre a taxa de desgaste em função da razão entre a dureza do abrasivo e do material. Na Figura 6 podemos perceber o comportamento para materiais homogêneos e materiais heterogêneos.

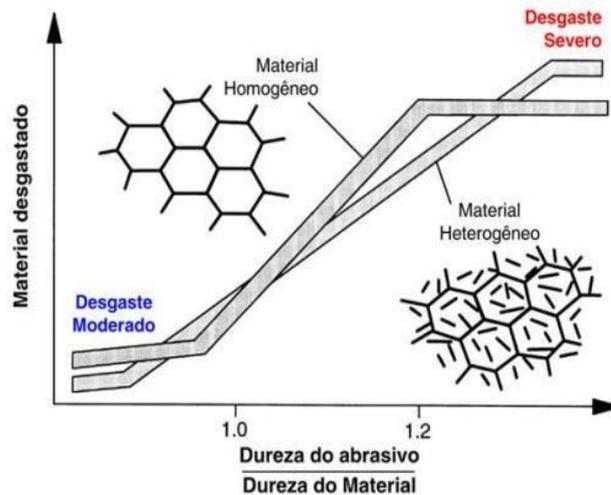


Figura 6 - Desgaste abrasivo em função da razão de durezas do material e do abrasivo.

Fonte: Adaptado de Gahr (1998).

Os materiais homogêneos apresentam uma severidade menor quando a razão entre a dureza do abrasivo e do material são similares ou menor que a unidade. Para esses materiais a severidade será alta quando a dureza dos abrasivos for pelo menos 1,2 vezes maior que a da superfície (GAHR, Z., 1987; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Os materiais heterogêneos, que possuem uma matriz mole e uma segunda fase dura, o desgaste abrasivo será suave enquanto a dureza do abrasivo for menor que a dureza da segunda fase (GAHR, Z., 1987). Classifica-se então como abrasão suave aquela que a relação entre a dureza da partícula abrasiva e superfície desgastada é menor ou igual a 1, e abrasão severa como sendo aquela a dureza da partícula excede a dureza do matéria desgastado (GAHR, Z., 1987).

2.2.2 Micromecanismos de desgaste em Abrasão

Existem diversos micromecanismos de desgaste em abrasão e estes definem o processo de interação entre a asperidades ou partículas abrasivas com a superfície, são alguns deles: microcorte, microsulcamento, microtrinca, como apresentados na Figura 7(GAHR, Z., 1987).

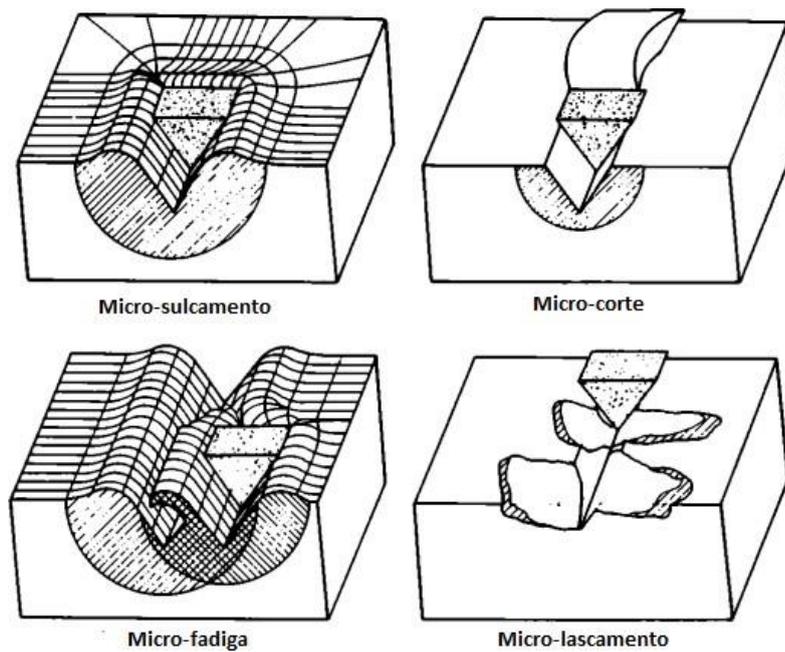


Figura 7 - Micromecanismos de desgastes na Abrasão.

Fonte: Gahr, 1987.

Gahr (1997) classifica quatro tipos de micromecanismos de desgaste na abrasão:

- **Microsulcamento:** ocorre a deformação plástica do material, mas sem haver perda de material, gerando apenas um acúmulo de material nas laterais devido ao deslocamento do material deformado;
- **Microcorte:** ocorre a remoção do material sem a deformação plástica, resultando em um risco na superfície. Neste caso ocorre a formação de microcavacos, no qual o volume de material perdido da superfície é igual ao volume de risco produzido;
- **Microlascamento:** ocorre quando há uma tensão concentrada aplicada pela partícula abrasiva sobre a superfície maior que a tensão crítica, assim, ocorre a formação e propagação de trinca no material. Este mecanismo é restrito aos materiais com características frágeis;
- **Micro-fadiga:** este micromecanismo é resultante de sucessivos eventos de microsulcamento ou microindentações, que esgotam plasticamente a superfície do material e levam a perda de massa.

2.3 Tribômetro Roda de Borracha

O teste de roda de borracha é um ensaio de baixa tensão típico para coletar dados do desgaste abrasivo de três corpos, além de ser uma maneira fácil e de menor custo para obter informações de taxa de desgaste e mecanismos de desgaste, além de possibilitar a caracterização de materiais (HAWK, 1999). Por ser um ensaio fácil de ser realizado, rápido e normatizado (ASTM G65, 2017), faz dele um dos ensaios mais empregados na indústria de forma geral. Mas esse experimento é limitado quanto ao mecanismo de desgaste capaz de simular, pois não consegue reproduzir os danos causados pelo impacto das partículas abrasivas.

O princípio de funcionamento da roda de borracha consiste em introduzir um abrasivo, de tamanho e composição definidos, entre a roda com revestimento de borracha e a amostra do material analisado. A amostra é pressionada contra a roda através de um peso morto com valor pré-estabelecido, enquanto o fluxo de abrasivo controlado é arrastado pelo borracha e desliza sobre a superfície da amostr. Um desenho esquemático do equipamento roda de borracha é demonstrado na Figura 8.

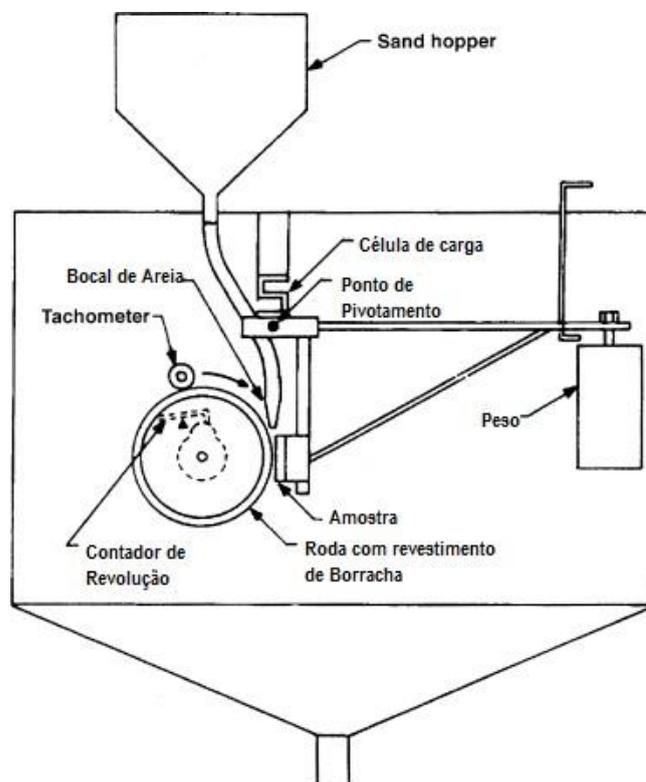


Figura 8 - Representação esquemática do equipamento DSRW.

Fonte: Hawk, 1999.

2.3.1 Ensaio

A finalidade do ensaio de Roda de Borracha é determinar a resistência dos materiais metálicos mediante à abrasão por riscamento. Permite produzir dados que classificarão os materiais com base na sua resistência à abrasão em condições específicas (ASTM G65, 2017).

A norma divide o teste em procedimentos, A até D, que variam para atender uma grande gama de materiais, durezas e, até mesmo, geometria da amostra. Esses procedimentos são discutidos, de forma breve, a seguir:

- A: Teste para classificar materiais metálicos devido o volume perdido. Usado na classificação de materiais de média ou extrema resistência à abrasão;
- B: Teste para materiais de alta resistência ao desgaste abrasivo e classificação de materiais média e baixa resistência à abrasão. Também poderá ser utilizado em casos que no procedimento A o valor de volume perdido excedeu 100 mm³;
- C– A: Com poucas variações do procedimento A, este é usado para materiais com revestimentos finos;
- D: Utilizado para classificação de materiais com baixa resistência ao desgaste abrasivo e materiais específicos ou materiais que apresentaram no procedimento A taxas de volume perdido muito próximos;
- E – A: Utilizado para classificar materiais de média ou baixa resistência ao desgaste.

Para cada procedimento haverá condições padrões para realizar o teste, como exemplificado na Tabela 1, estes parâmetros pode ser a carga aplicada e a distância deslizada.

Tabela 1 - Condições padrão para teste de desgaste DSRW.

Procedimentos	Força sobre a amostra (N)	Revoluções da Roda	Abrasão Linear (m)
A	130	6000	4309
B	130	2000	1436
C	130	100	71.8
D	45	6000	4309
E	130	1000	718

Fonte: Adaptado da norma ASTM G65.

2.3.2 Parâmetros de Ensaio

Os parâmetros de ensaios são provenientes da norma ASTM G65 (Standart Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus).

- i. Os dados são reportados em volume perdido de material (mm^3);
- ii. O tempo de procedimento varia para cada procedimento;
 - a. Os procedimentos A e D devem ser feitos por 30 minutos, o procedimento B por 10 minutos, 5 minutos para o procedimento E e 30 segundos para o procedimento C;
- iii. Amostras devem ter as dimensões 25 x 76 x 3,2-12,7 mm.

A rotação da roda deve ser de $(200 \pm 10) \text{ rev}/\text{min}$, e o diâmetro da roda com a borracha deve ser de 228,6 mm.

O abrasivo é estabelecido como quartzo ou areia AFC 50/70, com um escoamento entre 300 a 400 g/min. O bocal de saída da areia deve ser projetado de maneira a não obstruir e reduzir o fluxo de abrasivo durante o teste.

Variando os parâmetros haverá mudanças que acarretarão em diferentes taxas de desgaste do material e até mesmo mecanismos de desgaste. Uma variação que pode ser feita é o aumento da força normal, que conseqüentemente aumenta-se o contato de área que pode gerar um desgaste mais severo no material (HAWK, 1999). Ou seja, a força normal incrementa o volume de material perdido no teste, como pode-se visualizar na Figura 9.

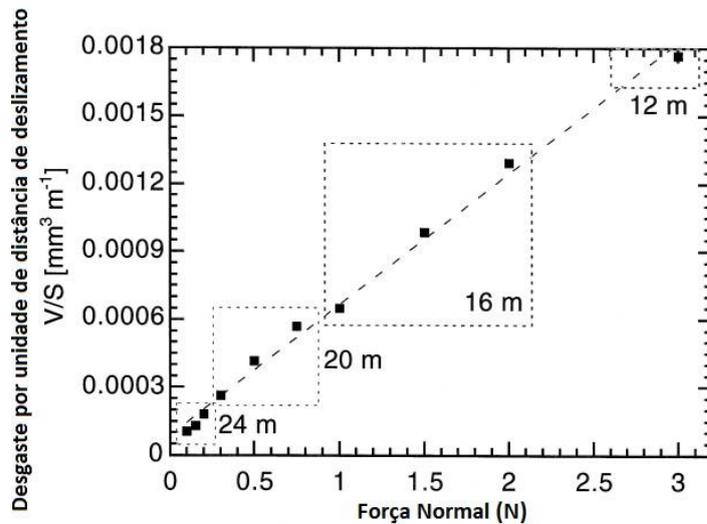


Figura 9 - Variação do desgaste por unidade de distância de deslizamento em função da força normal.

Fonte: Adaptado de Trezona, 1999.

Com o aumento da força normal aplicada sobre a amostra, pode-se observar uma maior taxa de desgaste por distância de deslizamento.

Outro fator que pode variar é a distância de deslizamento sobre a amostra, que também influencia diretamente no aumento do volume perdido, como demonstrado na Figura 10.

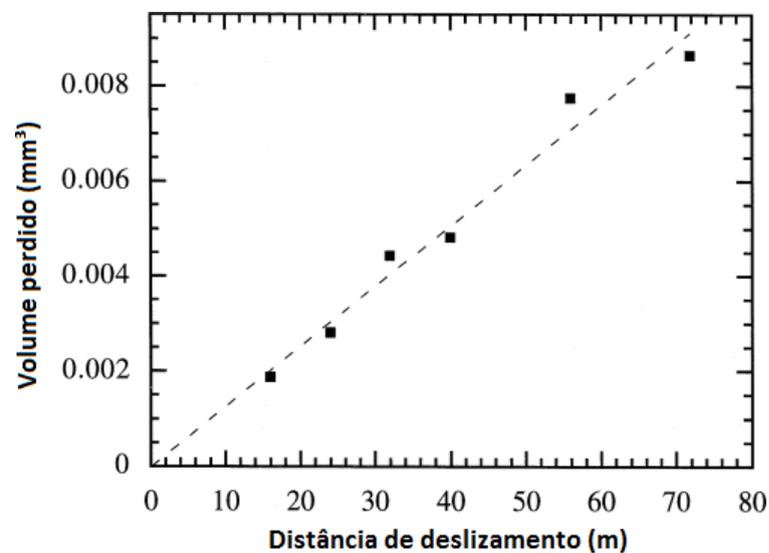


Figura 10 - Volume perdido de material após variação da distância de deslizamento.

Fonte: Adaptado de Trezona, 1999.

Ao alterar esses parâmetros pode-se alterar o mecanismo de desgaste e com isso aproximar os resultados encontrados em laboratório com os vistos em campo.

2.4 Tribômetro de Abrasão e Impacto

O equipamento Roda de Borracha é um teste que visa a análise do desgaste abrasivo, entretanto não simula outros mecanismos de desgastes que ocorre em placas de chutes, como o impacto entre o abrasivo e as placas de transferência de minério (RATIA, 2015; RATIA *et al.*, 2016; WILSON; HAWK, 1999).

Com base nisso, o Tribômetro de Abrasão e Impacto é um equipamento de teste que simula através de um rotor as condições de desgaste em situações que ocorrem a junção de dois tipos de mecanismo de desgaste, abrasivo e impacto. Consiste em um rotor onde estão dispostos três amostras e um tambor que são distribuídos o abrasivo, e ambos movimentam na mesma direção, entretanto, com velocidades diferentes (HAWK, 1999; WILSON; HAWK, 1999).

A Figura 11 demonstra o desenho esquemático de um equipamento do tipo rotor e tambor para simulação de desgaste abrasivo e por impacto.

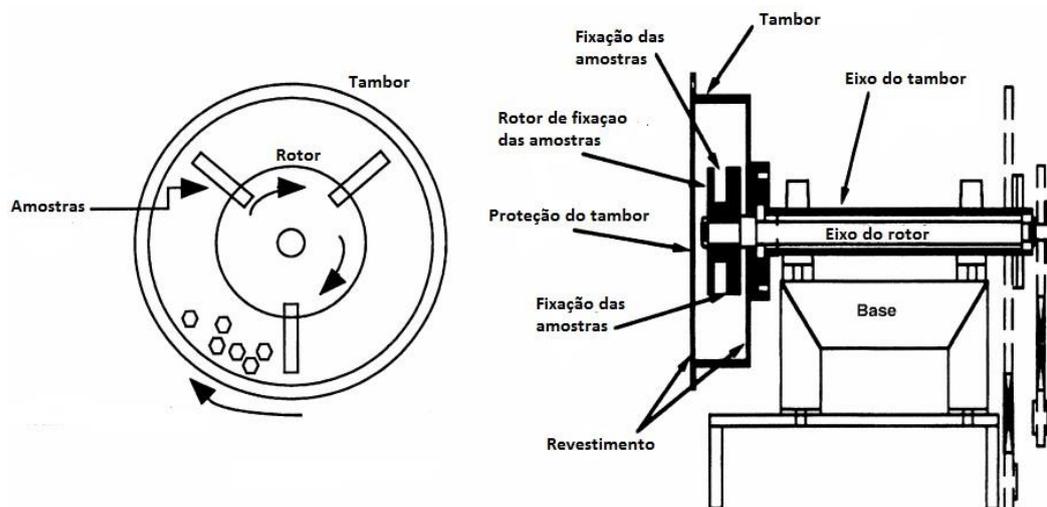


Figura 11 - Representação esquemática do equipamento de teste Rotor e Tambor.

Fonte: Adaptado de Hawk, 1999.

Esse equipamento foi desenvolvido buscando simular variáveis de desgaste que ocorrem devido ao impacto do abrasivo antes de iniciar o deslizamento sobre a superfície dos materiais, determinando a resistência dos materiais em condições controladas de impacto e abrasão em aços ou ligas, no qual pode-se variar o abrasivo com base na indústria estudada (RATIA; MIETTUNEN; KUOKKALA, 2013; WILSON; HAWK, 1999). O tempo de teste tem

influência direta no quão real será o ensaio, no qual Hawk e Wilson (1999) concluíram que 5h de teste favoreceram para resultados de taxa de desgastes mais realísticos.

2.4.1 Ensaio

O teste é conduzido utilizando o tribômetro de Abrasão e Impacto, no qual o abrasivo será disposto no interior do tambor, e as amostras fixadas no rotor. As velocidades de rotação são diferentes, o rotor possui uma velocidade dentro de 30 a 45 rpm, enquanto que o tambor apresenta uma velocidade maior próxima de 700 rpm (HAWK, 1999). O abrasivo não possui uma quantidade definida em norma e após um tempo de ensaio se fragmenta, por isso Hawk (1999) utilizou 600 gramas em seu estudo com troca de abrasivo de 15 em 15 minutos, e seguinte, Ratia (2015) utilizou 900 gramas com uma troca de 15 em 15 minutos para analisar o desgaste nas bordas.

Na Figura 12 são demonstrados um desenho esquemático do conjunto tambor e rotor, para disposição das amostras e do abrasivo de teste.

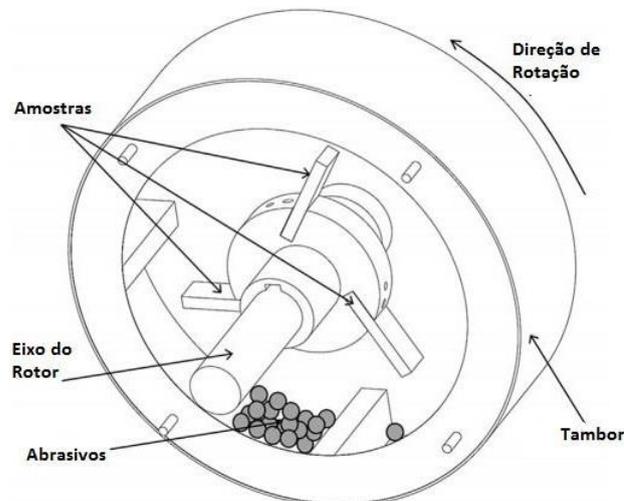


Figura 12 - Desenho esquemático do conjunto tambor e rotor do dispositivo.

Fonte: Adaptado de Ratia, 2013.

Neste ensaio, pode-se variar diversos fatores, como os ângulos de posição das amostras em relação ao rotor, pois influencia diretamente no ângulo de incidência que o abrasivo atingirá as amostras, quantidade e tipo de abrasivo, material de análise, velocidades de rotação para o tambor e o rotor, substituição do abrasivo e o tempo de ensaio realizado (RATIA *et al.*, 2016; RATIA; MIETTUNEN; KUOKKALA, 2013; WILSON; HAWK, 1999).

Na Figura 13, Ratia (2013) demonstrou a variação do ângulo de posição da amostra durante os ensaios, que influenciam diretamente na taxa de desgaste, principalmente nas bordas do material.

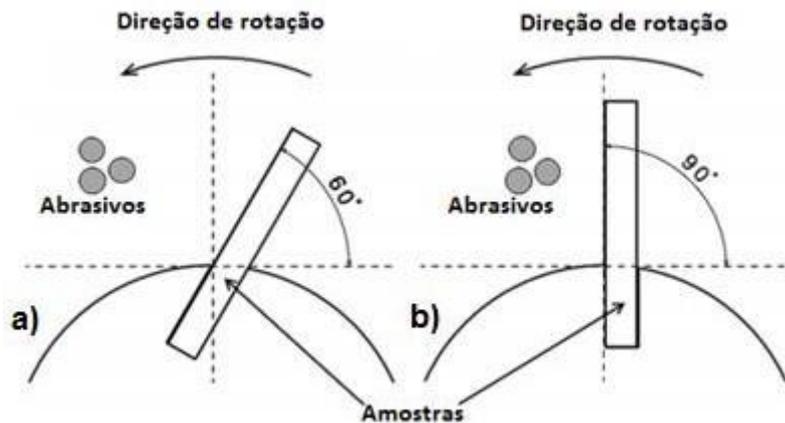


Figura 13 - a) Amostra disposta com ângulo de 60°; b) Amostra disposta com ângulo de 90°.

Fonte: Adaptado de Ratia, 2013.

Hawk e Wilson (1999) afirmaram que o tempo de ensaio é um fator que influencia na taxa de desgaste, onde concluíram que na primeira hora de ensaio a taxa era elevada, mas se estabiliza no início do regime permanente no qual o desgaste apresenta um comportamento linear e não constata, e aumentando o tempo de ensaio é perceptível uma taxa mais constante.

Além da possibilidade de variar o material testado utilizando um abrasivo em comum, pode-se variar o abrasivo em teste. Wilson e Hawk (1999) analisaram o uso de quartzito de sílica para quatro materiais: aço inoxidável (AISI 304SS), aço de baixa liga (REM500), aço manganês (Mn Steel) e Ferro Fundido Branco de Alto Cromo (High-Cr WCI).

Na Figura 14 foram apresentados o volume perdido para cada material com base no tempo de ensaio com Quartzito de Alta Sílica.

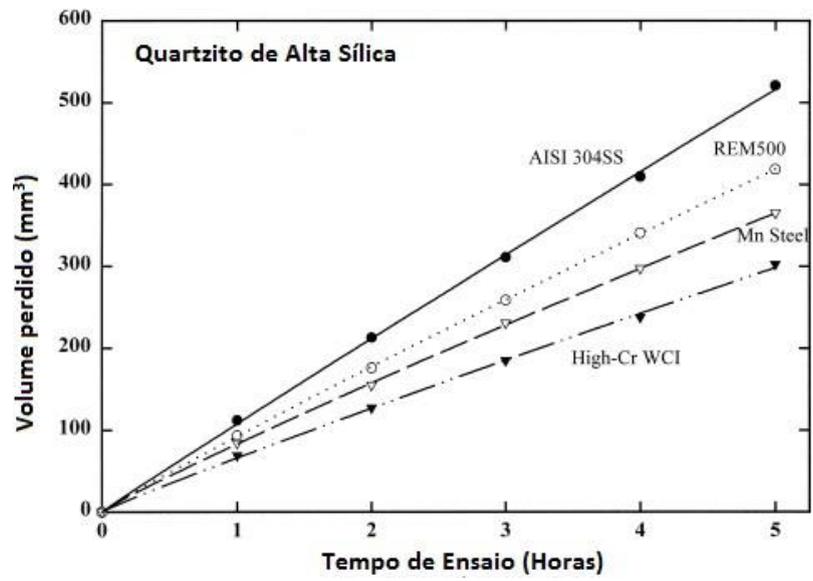


Figura 14 - Análise do volume perdido na variação do material em ensaio.

Fonte: Adaptado de Wilson e Hawk, 1999.

3 METODOLOGIA

3.1 Tipo de Pesquisa

A pesquisa é um estudo que disserta sobre um tema específico ou particular, com suficiente valor representativo e que obedece a rigorosa metodologia, investigando o assunto em todos os âmbitos e aspectos, dependendo dos fins que se destina (MARCONI; LAKATOS, 2003).

A pesquisa só é iniciada com base em uma dúvida ou pergunta que deseja responder, seja por razões intelectuais ou razões práticas (GERHARDT; SILVEIRA, 2009).

Com base nisso obtém-se os objetivos da pesquisa que determina a sua classificação. Dessa forma, a presente pesquisa se enquadra nos seguintes estudos: quantitativa, qualitativa, bibliográfica e experimental.

A pesquisa quantitativa é um enfoque de pesquisa que mede fenômenos, testa hipóteses e realiza análise de causa-efeito, através de um processo sequencial, dedutivo, comprobatório e objetivo. Com isso, é possível generalizar os resultados através do controle, da precisão, da réplica e da previsão (SAMPIERI; CALLADO; LUCIO, 2013).

Para a pesquisa qualitativa ocorre a exploração dos fenômenos com uma profundidade de significados, conduzindo em ambientes naturais, sem se fundamentar em estatística e sim em dados extraídos, de maneira indutiva e recorrente. Neste caso, ocorre uma riqueza interpretativa que envolve a pesquisa, com uma contextualização extensa (SAMPIERI; CALLADO; LUCIO, 2013). A preocupação dos resultados não é pela representatividade numérica, e sim pra compreensão aprofundada (GERHARDT; SILVEIRA, 2009).

Sampieri *et al* (2013) ainda classifica a pesquisa mista com qualitativa e quantitativa, no qual há a combinação dos dois enfoques. O estudo possui caráter misto, devido medir fenômenos e testar, mas também apresentar dados reais de uma análise múltipla da realidade.

Quando a pesquisa é com base no levantamento e análise de teoria acerca do assunto percorrido, utilizando meios escritos e eletrônicos, como livros, artigos científicos, página da web site, permitindo que o pesquisador conheça o que já foi estudado (GERHARDT; SILVEIRA, 2009).

A pesquisa experimental segue uma delimitação de variáveis de um objeto de estudo que influenciam o estudo, garantindo a forma de controle e de observação de tais efeitos produzidos, com apresentação de manipulação, controle e distribuição aleatória (GIL, 2002).

E por fim, o estudo de campo é determinado pela pesquisa junto com o fenômeno real, ou seja, a coleta de dados e investigação do aprofundamento das questões propostas de certa população de estudo. A interação entre os componentes da população são observados, com maior profundidade e com levantamento dos resultados caracterizados como base o objetivo da pesquisa (GERHARDT; SILVEIRA, 2009; GIL, 2002).

3.2 Materiais e Métodos

A metodologia geral desse trabalho é apresentada na Figura 15.



Figura 15 - Fluxograma geral da monografia.

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

As amostras testadas são materiais comerciais padrão para validar os equipamentos laboratoriais. Foi empregado uma amostra de Aço SAE 1020 devido ao excelente custo-benefício que esse material possui. O aço 1020 possui um teor médio de carbono de 0,20% e é comumente empregados em equipamentos mecânicos. Vale ressaltar que esse material não é comumente empregado como material resistente ao desgaste.

A Figura 16 apresenta o fluxograma de atividades simplificado que foram realizados neste trabalho.

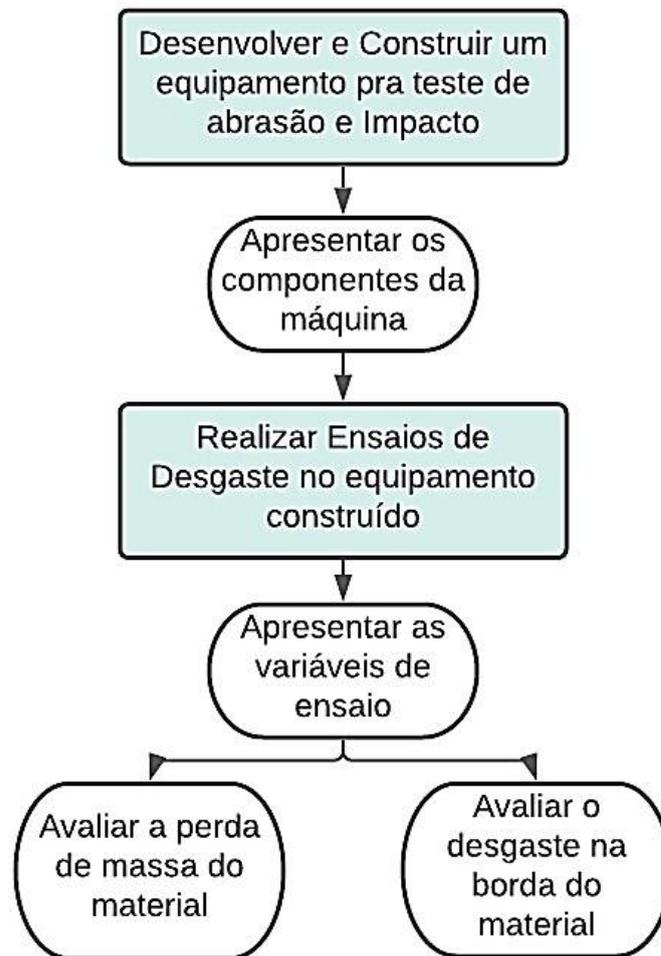


Figura 16 - Fluxograma detalhado da etapa 1 da metodologia.

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

Após a coleta de dados, foram computados os dados e elaborados gráficos de perda de massa pelo tempo de ensaio e estabelecido, com ferramentas estatísticas, a dispersão entre os dados através de um coeficiente de variação, como demonstrado na Figura 17.

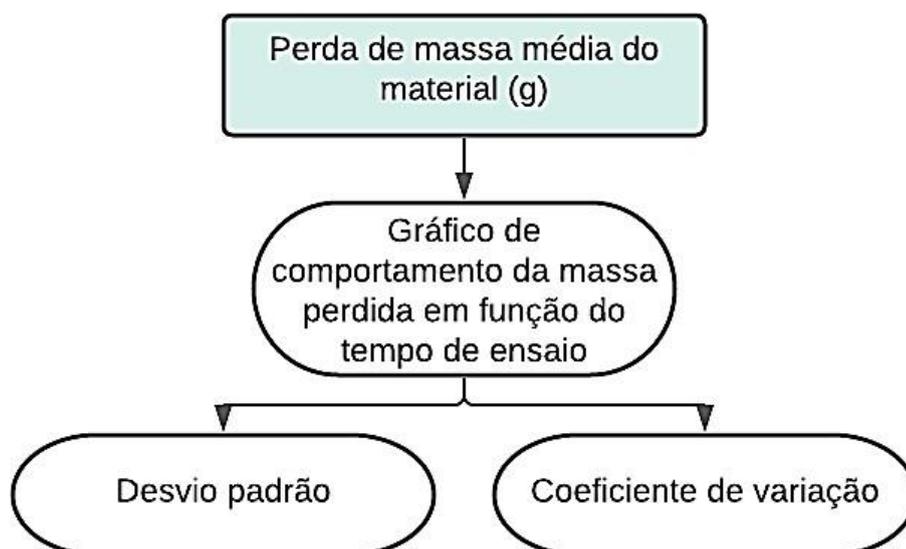


Figura 17 - Etapa final de análise de resultados.

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

A etapa laboratorial foi realizada no equipamento do Instituto Tecnológico Vale (ITV), local onde o tribômetro projetado está instalado.

3.2.1 Ensaio de Abrasão e Impacto

Os corpos de prova para o ensaio Abrasão por impacto foram fabricados em aço carbono ABNT 1020 nas dimensões 75 x 12 x 5 mm.

Todas as amostras passaram pelo mesmo processo de preparação superficial; foram lixadas com lixas de granulometria 320#, 400# e 600#.

Os parâmetros de ensaio foram baseados nos trabalhos realizados por Ratia (2013) e Ratia (2015) e são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Variáveis de ensaio definidas.

Amostra:	Material padrão do equipamento (Aço SAE 1020)
-----------------	---

Abrasivo:	Brita
Massa do Abrasivo:	700g
Tempo de Ensaio:	60 min
Rotação Rotor:	700 rpm
Rotação Tambor:	30 rpm
Troca de Abrasivo:	15 em 15 minutos

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

A perda de massa dos corpos de prova foi mensurada a cada 15 minutos de teste até completar 60 minutos. As amostras foram limpas, por 10 minutos, em equipamento minisom submersas em álcool. Em seguida, foram secas com ar comprimido. A perda de massa foi medida em uma balança com 4 casas de precisão e foram feitas três medidas em cada seção.

A taxa de desgaste, W , foi calculada pela Eq. (2),

$$W = \frac{\Delta m}{A \cdot t} \quad (2)$$

sendo Δm a perda de massa [kg]; A é a área de desgaste [m²]; t o tempo de ensaio realizados [s]. Para o este trabalho, definiu-se na Tabela 2 os seguintes dados de ensaios.

Devido a intensa fragmentação dos abrasivos durante o ensaio eles também foram removidos e substituídos a cada 15 minutos de ensaio. Não foi realizada uma análise de granulometria para saber se o tempo de remoção do abrasivo estava influenciando na perda de massa do material, determinando apenas com base na bibliografia.

3.3 Variáveis e Indicadores

As variáveis são definidas devido a quantidade de valores diferentes que pode assumir, seja na pesquisa qualitativa ou quantitativa, e para isso necessita de indicadores que são baseados para medir tais variáveis (FRANCISCO, 2007).

Para a realização da pesquisa, alguns fatores possuem grande influência nos pontos a serem pesquisados e analisados. Com base nisso, na Tabela 3 são apresentadas as variáveis que envolvem o problema e seus indicadores.

Tabela 3 - Variáveis e indicadores da pesquisa.

Variáveis	Indicadores
<ul style="list-style-type: none"> • Tribômetro de Abrasão e Impacto; • Variáveis do ensaio; 	<ul style="list-style-type: none"> • Componentes definidos; • Perda de massa; • Mecanismos de desgaste • Influência da borda na geometria final;

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

3.4 Instrumentos de coleta de dados

A coleta de dados foi feita através de ensaios de abrasão e impacto, em equipamentos presentes no laboratório do Instituto Tecnológico Vale, no qual possui automação para aquisição dos dados de ensaio.

3.5 Tabulação de dados

A tabulação dos dados foi feita no Excel, onde os valores são copilados e organizados. Todos os dados são provenientes de equipamentos e testes são direcionados para planilhas organizadas com base nas amostras e no teste realizado.

Para a realização da pesquisa e coleta de dados, foram utilizados o Word para armazenamento de informações para o relatório.

No projeto do tribômetro foram utilizados o SolidWorks, o Autocad e o MitCalc atrelado ao Excel para os cálculos estruturais e mecânicos.

3.6 Considerações finais do capítulo

Nesta seção da pesquisa foi apresentado as ferramentas e métodos utilizados para atingir os objetivos definidos inicialmente, para que a pesquisa seja desenvolvida e estudada com base nos dados obtidos pelos métodos apresentados.

No próximo capítulo, os dados adquiridos neste capítulo são tratados e analisados para serem apresentados e discutidos de maneira clara e eficiente para responder à questão e os objetivos propostos pela pesquisa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para realização dos testes de abrasão por impacto foi necessário o desenvolvimento de um aparato com uma dinâmica similar ao realizado pela Ratia *et al.* (2016). O tribômetro contempla uma estrutura para suportar os componentes do sistema de transmissão do rotor e do tambor, no rotor é montado amostras e as partículas abrasivas ficam soltas no tambor.

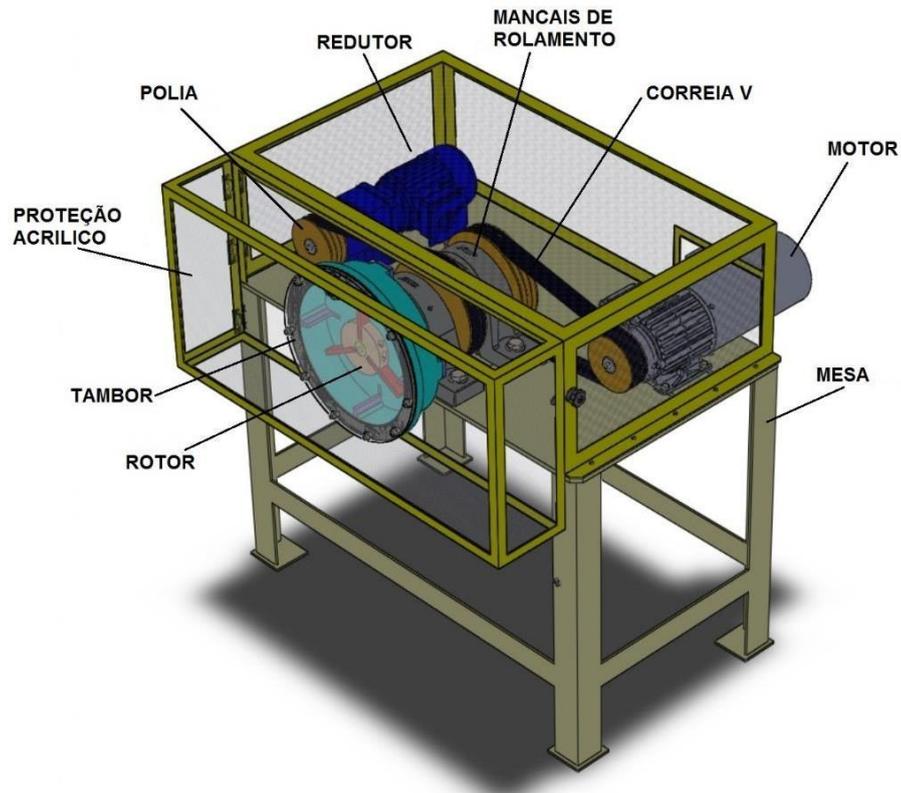


Figura 18 - Desenho 3D do equipamento projetado e fabricado.

Fonte: Pesquisa Direta, 2019.

O equipamento, apresentando na Figura 18, é composto pelos seguintes sistemas funcionais:

- 1) Sistema de alimentação: motor elétrico e motoredutor atrelados a um inversor de frequência que possibilita o controle da velocidade;
- 2) Sistema Estrutural: consiste na bancada de chapa de aço no qual os outros componentes são fixados;
- 3) Sistema de transmissão do Rotor: consiste em um motor acoplado a transmissão por polias e correias em V no qual movimenta o rotor onde estão dispostas as amostras em 90°.

- 4) Sistema de transmissão do Tambor: consiste em um redutor acoplado a transmissão por polias e correias em V no qual movimentam o tambor onde estarão dispostos os abrasivos.

Nos próximos tópicos serão explicados como foram definidos e fabricados cada componente do sistema.

4.1 Sistema Estrutural

A estrutura de apoio do sistema do tribômetro foi definida utilizando chapas com medidas comerciais, visando a melhor estabilidade estática da estrutura e a facilidade de obtenção.

As chapas utilizadas foram de 12 mm de espessura para a região plana de fixação dos componentes e os pés da mesa juntamente com os calços de 6 mm de espessura. A junção das partes foi realizada através de solda.

Na Figura 19 temos a mesa projetada em 3D para fabricação, utilizando o software SolidWorks para concepção do projeto.

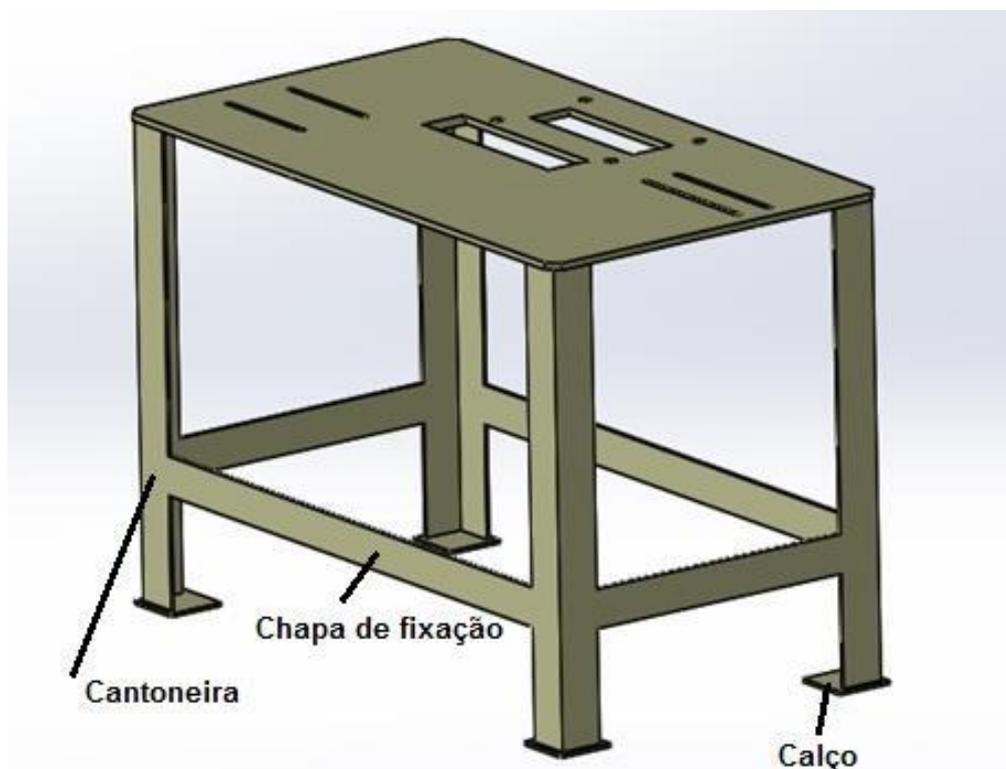


Figura 19 - Mesa de apoio dos componentes do Tribômetro.

Fonte: Pesquisa Direta, 2019.

Na região central da mesa foram feitos rasgos retangulares para as polias do sistema, que não se encontravam na mesma altura que os outros componentes, Figura 19. Desta forma, não foi necessário construir uma base para o motor, motoredutor e dos mancais de rolamentos.

Os mancais são fixados com parafusos sextados M20 x 50 mm (DIN 24017), enquanto no redutor e no motoredutor utilizou-se parafusos sextavados M8 x 40 mm com rasgos de fixação oblongo para garantir o ajuste na montagem dos componentes.

A mesa possui medida de comprimento, largura e altura de 1152,3 x 658,3 x 832 mm respectivamente e nos apoios foram utilizadas cantoneiras de 75 x 75 x 6 mm soldados com chapa de 6 mm entre eles.

4.2 Motorização

O Tambor e o Rotor apresentam diferentes velocidades de rotação, sendo necessário para cada sistema uma motorização diferente. A tensão de alimentação foi de 220 V, com frequência de 60 Hz e de 3 fases.

Para o Rotor foi definido um motor, pois é o sistema que apresentará maior velocidade de funcionamento. O motor utilizado foi da WEG, modelo 90L com rotação máxima de 1750 rpm. Figura 21, apresenta o catálogo dos motores elétricos da WEG. O motor selecionado está em destaque.

Potência kW HP		Carcaça	Conjugado Nominal (kgfm)	Corrente com Rotor Bloqueado Ip/In	Conjugado de Partida Cp/Cn	Conjugado Máximo Cmáx/Cn	Momento de Inércia J (kgm²)	Tempo máximo com rotor bloqueado (s)		Massa (kg)	Nível médio de pressão sonora dB(A)	Fator de Serviço	220 V							
								Quente	Frio				RPM	% de Carga			Fator de Potência			Corrente Nominal In (A) (2)
														50	75	100	50	75	100	
IV polos																				
0,12	0,16	63	0,068	4,5	2,0	2,3	0,0005	28	62	8,3	48	1,25	1710	58,0	64,0	66,0	0,46	0,59	0,68	0,702
0,18	0,25	63	0,103	5,0	2,5	3	0,0006	39	86	8,5	48	1,25	1710	62,0	67,0	70,0	0,49	0,61	0,70	0,964
0,25	0,33	63	0,142	5,5	2,9	3,2	0,0007	30	66	8,8	48	1,25	1710	66,0	71,0	73,4	0,46	0,59	0,69	1,30
0,37	0,5	71	0,213	5,1	2,8	2,9	0,0007	52	114	11,2	47	1,25	1690	75,0	77,5	78,2	0,49	0,62	0,70	1,77
0,55	0,75	71	0,317	5,3	2,5	2,7	0,0008	14	31	12,4	47	1,25	1690	73,0	78,0	79,0	0,44	0,56	0,66	2,77
0,75	1	80	0,423	7,3	3	3,2	0,0029	16	35	15,5	48	1,25	1725	82,3	83,0	83,0	0,63	0,74	0,82	2,89
1,1	1,5	L80	0,621	7,4	3,4	3,4	0,0037	11	24	19,0	48	1,25	1725	79,5	82,5	83,0 ³	0,58	0,71	0,80	4,35
1,5	2	L90S	0,832	7,7	2,8	3,3	0,0066	14	31	23,1	51	1,25	1755	84,0	86,0	86,5	0,59	0,72	0,80	5,68
2,2	3	L90L	1,22	7,4	2,8	3,1	0,0077	11	24	26,7	51	1,25	1750	86,0	86,5	87,5	0,61	0,74	0,81	8,14
3	4	L100L	1,67	8,5	4	4	0,0096	15	33	33,6	54	1,25	1745	87,4	88,5	89,5	0,61	0,70	0,78	11,3
3,7	5	L100L	2,07	8,2	4	4,2	0,0119	14	31	39,7	54	1,25	1740	87,5	88,5	89,5	0,56	0,70	0,78	13,9

Figura 20 - Tabela com especificações dos motores comercializados pela WEG.

Fonte: Catálogo WEG, 2019.

O redutor definido para este projeto foi da fabricante NORD, modelo de carcaça SK12 80HL, conforme retirado do catálogo Nord especificado na Figura 21.

Model Type	Gear Ratio i_{tot}	Output Speed n_2 1750 rpm [rpm]	Output Torque* T_{2max} [lb-in]	Maximum input power* Solid input shafts type "W"				NEMA C-Face* Available Combinations									
				Input Speed				56C	140TC	180TC	210TC	250TC	280TC	320TC	360TC		
				1750 rpm [hp]	1150 rpm [hp]	875 rpm [hp]	580 rpm [hp]										
SK 11E	1.35	1296	443	5.00	3.30	2.50	1.65	X	X	X							
	1.54	1136	443	5.00	3.30	2.50	1.65	X	X	X							
	1.81	967	487	5.00	3.30	2.50	1.65	X	X	X							
	2.04	858	513	5.00	3.30	2.50	1.65	X	X	X							
	2.32	754	425	5.00	3.30	2.50	1.65	X	X	X							
	2.83	618	478	4.69	3.09	2.34	1.55	X	X	X*							
	3.18	550	354	3.09	2.04	1.54	1.02	X	X								
	3.60	486	372	2.87	1.89	1.43	0.95	X	X								
	8.10	216	266	0.91	0.60	0.45	0.30	X*	X*								
9.11	192	204	0.62	0.41	0.31	0.20	X*										
SK 12	2.96	591	929	5.00	3.30	2.50	1.65	X	X	X							
	3.39	516	965	5.00	3.30	2.50	1.65	X	X	X							
	3.98	440	1009	5.00	3.30	2.50	1.65	X	X	X							
	4.32	405	991	5.00	3.30	2.50	1.65	X	X	X							
	4.49	390	1044	5.00	3.30	2.50	1.65	X	X	X							
	4.93	355	1027	5.00	3.30	2.50	1.65	X	X	X							
	5.79	302	1080	5.00	3.30	2.50	1.65	X	X	X							
	6.53	268	1115	4.74	3.13	2.37	1.56	X	X	X*							
	7.28	240	1097	4.18	2.76	2.09	1.38	X	X	X*							
	7.85	223	1159	4.10	2.71	2.05	1.35	X	X	X*							
	8.56	204	1151	3.72	2.46	1.86	1.23	X	X	X*							
	9.65	181	1195	3.43	2.26	1.72	1.13	X	X	X*							
	10.70	164	1186	3.09	2.04	1.54	1.02	X	X	X*							
	13.39	131	1319	2.74	1.81	1.37	0.90	X	X	X*							
	16.73	105	1363	2.27	1.50	1.14	0.75	X	X	X*							
	18.79	93	1425	2.10	1.39	1.05	0.69	X	X								
	21.28	82	1478	1.92	1.27	0.96	0.63	X	X*								
25.92	68	1212	1.31	0.86	0.65	0.43	X	X*									
29.15	60	1097	1.04	0.69	0.52	0.34	X										

Figura 21 - Tabela com especificações dos motoredutores comercializados pela Nord.

Fonte: Catálogo NORD, 2019.

A redução total do motoredutor é de 29,15, gerando uma velocidade de saída de 60 rpm no redutor. Com o sistema de transmissão por polias, temos um fator de transmissão de 1,87, o que gera uma velocidade no rotor de 32 rpm. Entretanto, foi acrescentado um inversor de frequência que favorece a variação dessa velocidade para diversos ensaios.

4.3 Sistema de transmissão

O sistema de transmissão foi definido com polias e correias em V, onde os cálculos de dimensionamento foram feitos através de planilhas no suplemento do Excel, MITCalc. Na Figura 22 é demonstrado o sistema de transmissão contendo o motor, motoredutor, polias e correias, mancais de rolamento, tambor e rotor.

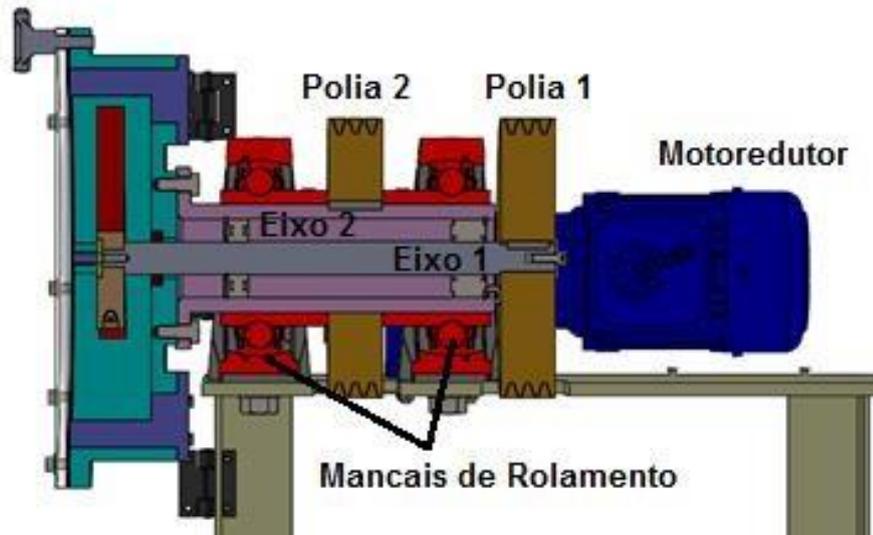


Figura 22 – Corte A-A do conjunto de transmissão do equipamento

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

Na perspectiva em corte do projeto, podemos perceber que o sistema 1, polia 1 e eixo 1, é responsável por conectar o motorreductor ao Rotor. Enquanto o sistema 2, polia 2 e eixo vazado 2, é ligado no motorreductor e responsável por movimentar o tambor. O eixo 2 externo é vazado e fixado no Tambor através de um flange com parafusos e o eixo 1 interno é montado no espaço vazado do eixo 2, pensado especificamente para projetar uma máquina mais compacta possível.

Os mancais de rolamentos foram especificados através dos catálogos da SKF, sendo rolamento de esferas. Os rolamentos internos também foram de esferas, visando suportar as cargas radiais e leves cargas axiais.

Todos os cálculos de dimensionamento de eixos, chavetas e tolerâncias foram realizados na interface do MITCalc.

4.4 Dimensionamento dos Elementos de Máquinas

O MITCalc é um suplemento do Excel que contempla todas as informações e equações de cálculos técnicos na área de mecânica e industrial. Esta ferramenta permite agilizar o processo de cálculos de engenharia para projeto de componentes de máquinas, tais como engrenagens, correias, polias, vigas, molas, eixos, chavetas, parafusos e de arruelas. Além das dimensões de projeto fornecida, a planilha estabelece faixas de tolerâncias e para as extensões pagas, o desenho pronto em 3D do componente.

4.4.1 Eixos

O MITCal oferece os resultados (*Output*) de diâmetro mínimo para determinados dados de entrada (*Input*) de rotação máxima pré-determinados pelo projetista. É necessário estabelecer uma potência nominal máxima, definida como 3,5 kW, e a rotação máxima do sistema, de 700 rpm, que através disso podemos calcular o torque. Com o torque de 47,75 Nm, obtemos para o eixo 2 um diâmetro mínimo de 98 mm e o eixo 1 de 25 mm. A Figura 23 e Figura 24 demonstram o desenho 3D final de cada eixo.

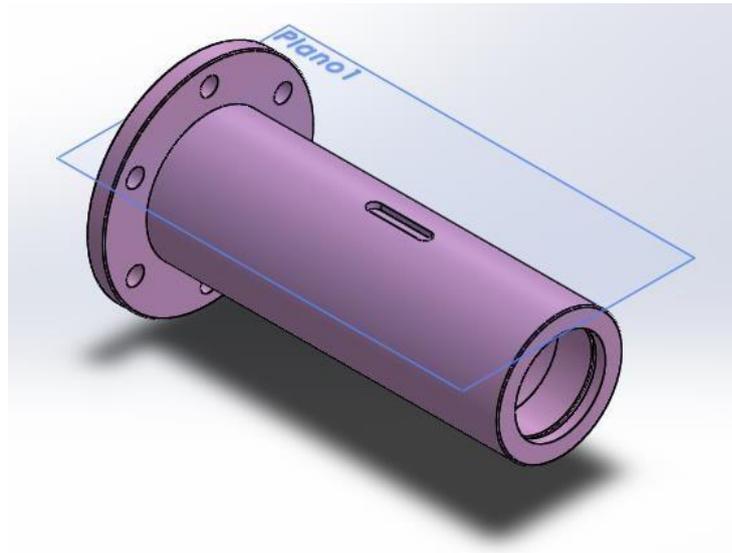


Figura 23 - Eixo externo (2) do sistema de transmissão do Tambor.

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

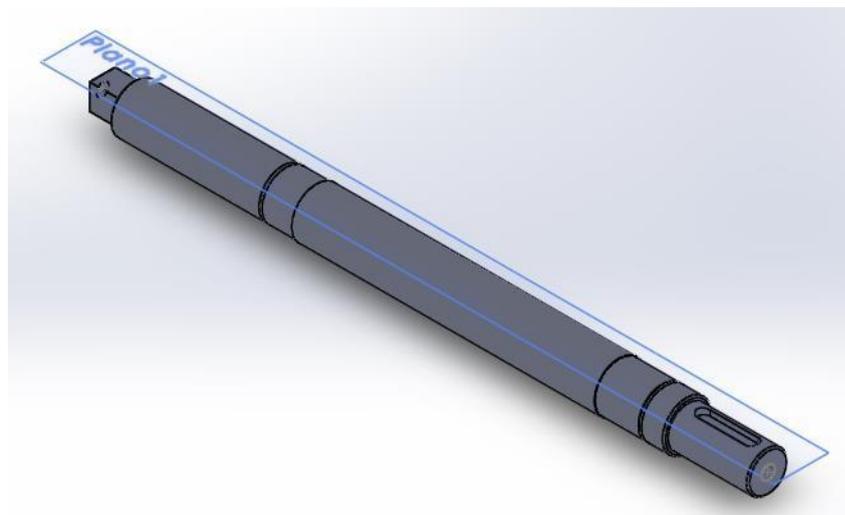


Figura 24 - Eixo interno (1) do sistema de transmissão do Rotor.

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

Em posse dos diâmetros mínimos definiu-se a geometria dos eixos com todos os componentes: chaveta, anel elástico de trava ou roscas para parafuso.

4.4.2 Chavetas

Para cada eixo, foi necessário definir uma chaveta com base nas condições de trabalho individuais, considerando as rotações diferentes e, conseqüentemente, diferentes torques de trabalho dos eixos devido as diferentes rotações e potências nominais. Nas Figura 25 e Figura 26 temos as medidas em mm de cada chaveta com base nos dados de saída que o MITCalc apresentou após os dados de entrada de projeto.

2.11 Design of coupling dimensions

2.12 Keys for diameters		6 ~ 500	[mm]
2.13 Min. shaft diameter	d_{1min}	10,9	[mm]
2.14 Shaft diameter	d	25,000	[mm]
2.15 Key		8 x 7	<input type="checkbox"/>
2.16 Key width / height	b / h	8 7	[mm]
2.17 Key radius / chamfer	R / s	4 0,4	[mm]
2.18 Parameters of the key groove	t / d_1	4 21	[mm]
2.19 Min. functional key length	L_{fmin}	16,3	[mm]
2.20 Minimum key length	L_{min}	24,3	[mm]
2.21 Permitted range of key lengths		18 ~ 90	[mm]
2.22 Chosen key length	L	40,000	[mm] <input type="checkbox"/>

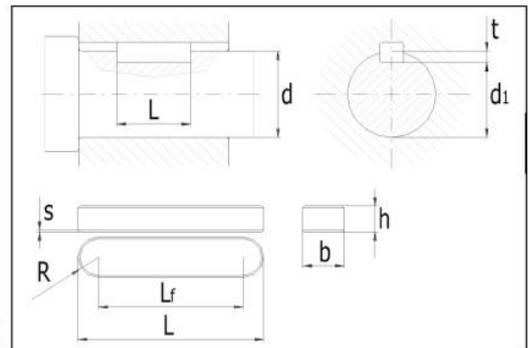


Figura 25 - Medidas da chaveta do Eixo 1.

Fonte: Pesquisa Direta, 2019.

2.11 Design of coupling dimensions

2.12 Keys for diameters		6 ~ 500	[mm]
2.13 Min. shaft diameter	d_{1min}	14,9	[mm]
2.14 Shaft diameter	d	100,000	[mm]
2.15 Key		10 x 8	<input type="checkbox"/>
2.16 Key width / height	b / h	10 8	[mm]
2.17 Key radius / chamfer	R / s	5 0,6	[mm]
2.18 Parameters of the key groove	t / d_1	5 95	[mm]
2.19 Min. functional key length	L_{fmin}	7,3	[mm]
2.20 Minimum key length	L_{min}	17,3	[mm]
2.21 Permitted range of key lengths		22 ~ 110	[mm]
2.22 Chosen key length	L	50,000	[mm] <input type="checkbox"/>

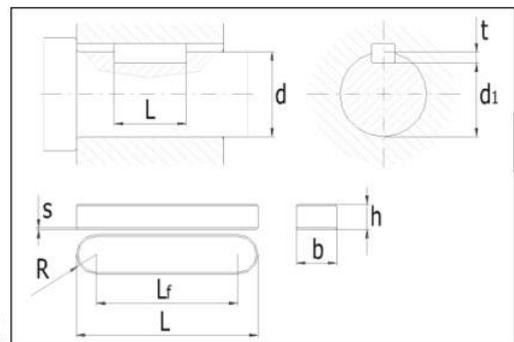


Figura 26 - Medidas da chaveta do Eixo 2.

Fonte: Pesquisa Direta, 2019.

As figuras 26 e 27 informam os dados de saída do software que apresentou todas as dimensões necessárias para a fabricação das chavetas, definindo as tolerâncias como H7 e f7.

- Chaveta C1: 8x7x30 mm;
- Chaveta C2: 10x8x40 mm.

Tais dados são obtidos devido o torque que os sistemas produzem, e então as chavetas são dimensionadas pelos métodos de esmagamento e cisalhamento. O software utiliza os dados de entrada de diâmetro do eixo, torque máximo e as informações do material que será fabricado.

4.4.3 Polias e Correias

A planilha do MITCalc estabeleceu a polia motora com $\varnothing 137,6$ mm e a polia movida com $\varnothing 257,9$ mm, definida com a norma ISO 4184 e DIN 2215. A interface de resultados é apresentada na Figura 27.

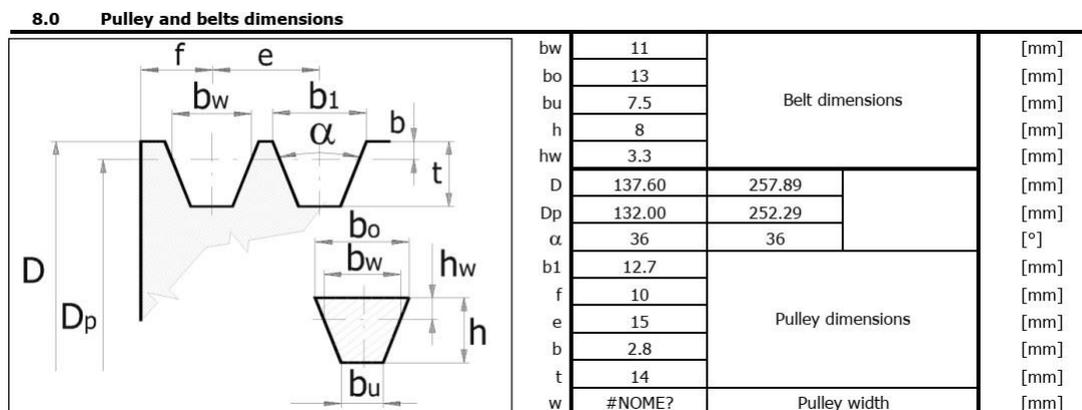


Figura 27 - Dimensões das polias e perfil da correia.

Fonte: Pesquisa Direta, 2019.

A figura 28 é o resultado final do perfil da correia e da polia que melhores se adequam ao projeto. Além do perfil da correia e da polia, o resultado permite saber o diâmetro correto para cada polia, as motoras acopladas ao motor e ao motoredutor, e as movidas acopladas aos dois eixos.

A correia é do tipo A trapezoidal com norma ISO 4184 e DIN 2215, no qual seu comprimento total é de 1429,98 mm, como visto na Figura 28.

9.5 Text description (Information for BOM)	
Row 1 (BOM attribute 1)	Pulley 1
Row 2 (BOM attribute 2)	Pulley A (13) <input checked="" type="checkbox"/>
Row 3 (BOM attribute 3)	Dp=132; k=3 ISO 4184 (DIN 2215)
Row 1 (BOM attribute 1)	Pulley 2
Row 2 (BOM attribute 2)	Pulley A (13) <input checked="" type="checkbox"/>
Row 3 (BOM attribute 3)	Dp=252,29; k=3 ISO 4184 (DIN 2215)
Row 1 (BOM attribute 1)	Pulley 3
Row 2 (BOM attribute 2)	Pulley SPB <input checked="" type="checkbox"/>
Row 3 (BOM attribute 3)	Dp=277,64; k=3 ISO 4184 (DIN 7753)
Row 1 (BOM attribute 1)	Belt
Row 2 (BOM attribute 2)	Belt A (13) <input checked="" type="checkbox"/>
Row 3 (BOM attribute 3)	Lw=1429,98; k=3 ISO 4184 (DIN 2215)

Figura 28 - Especificação das polias e correias.

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

Após exibir os dados de dimensões, o software especifica a classe dos componentes, polia e correia, contemplando a especificação de cada um.

O conjunto final de ambos os sistemas de polia e correia é apresentado na Figura 29.

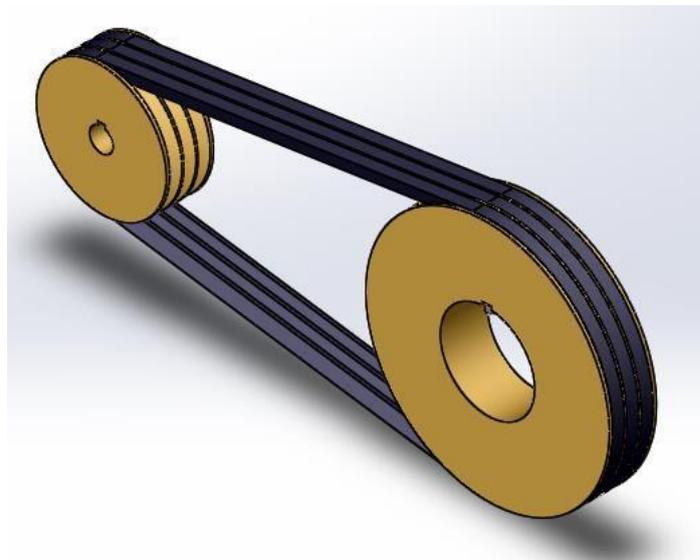


Figura 29 - Desenho 3D do conjunto polia e correia.

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

4.4.4 Tambor

O tambor é um componente projetado para ser fabricado por caldeiraria, devido à complexidade do desenho. O espaço onde se dispõem os abrasivos possui calços responsáveis por elevar as partículas durante o ensaio. Na Figura 30 podemos observar a geometria final do tambor.

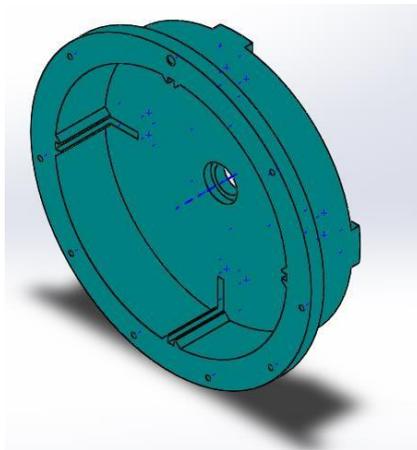


Figura 30 - Geometria do Tambor.

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

Considerando a complexidade da geometria, foi estabelecido a forma de fabricar a peça, demonstrando na Figura 31 através das variações de cores. Cada cor representa uma chapa dobrada que será soldada formando a peça final.

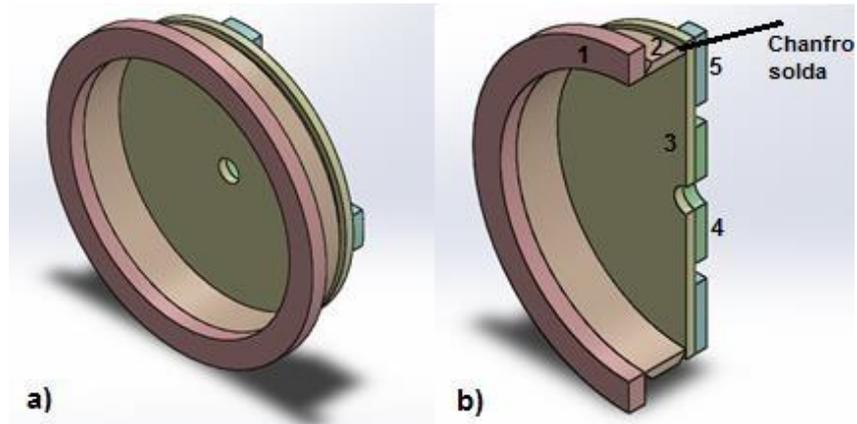


Figura 31 - a) Caldeiraria do Tambor; b) Desenho em corte: peças 1, 2, 3, 4 e 5 foram fabricadas separadas e soldadas entre si.

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

A superfície interna do tambor foi revestida com manta de borracha Neoprene, garantindo boa resistência ao desgaste e proteção das partes internas do tambor durante os ensaios. O tambor também contempla duas opções de tampa, uma projetada em aço e com abertura móvel bipartida e outra em acrílico com abertura fixa, conforme Figura 32 abaixo.

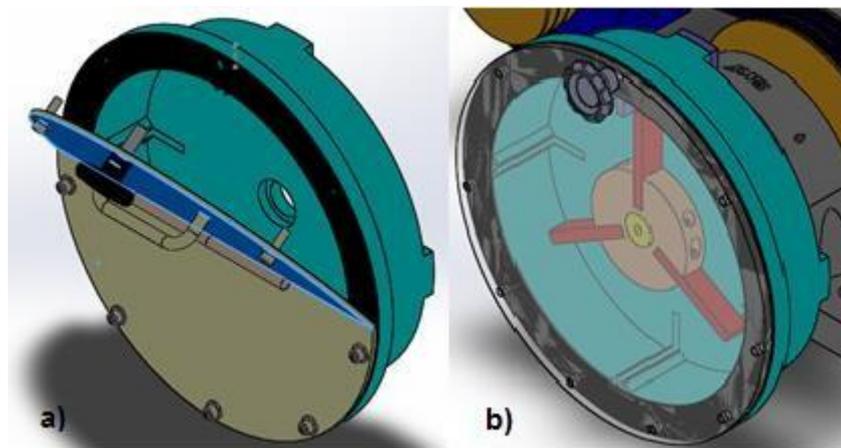


Figura 32 - a) Tambor com tampa bipartida e móvel; b) Tambor com tampa em acrílico inteiriça e fixa.

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

4.4.5 Rotor

O rotor fabricado por Usinagem, através de um torno para a geometria circular e centro de usinagem para os rasgos e furações. O posicionamento das amostras defasadas em 120° , definidos com base na bibliografia acerca do tema no qual o ângulo de impacto vai influenciar

nos dados de perda de massa do material, foram feitos para variar os parâmetros de ensaio. O desenho 3D do componente, apresentando na Figura 33 podemos ver 6 parafusos cabeça Allen M8x35 mm, no qual fazem a fixação da amostra no rotor.

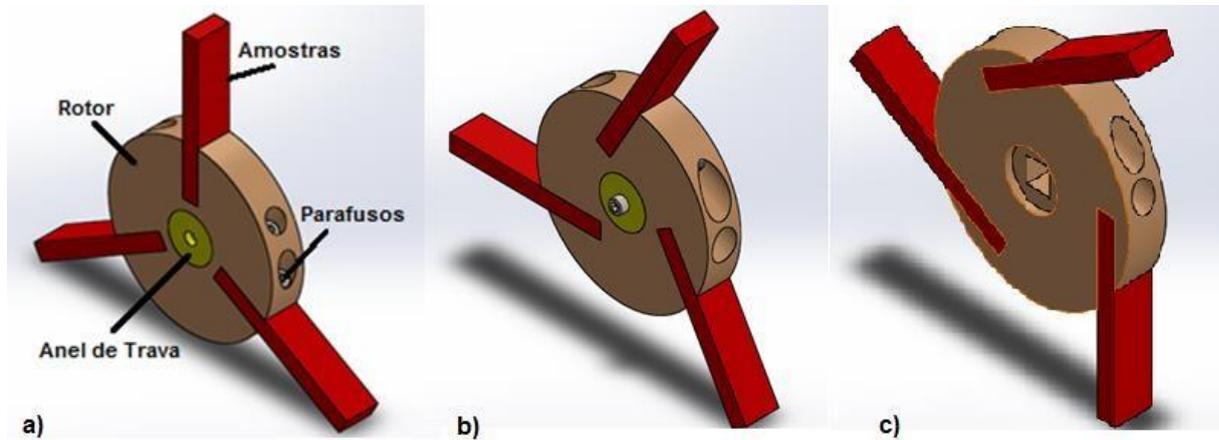


Figura 33 - Rotor para posicionamento das amostras; a) amostras dispostas a 90°; b) amostras dispostas a 60°; c) amostras dispostas a 30°.

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

A variação da posição das amostras em relação ao plano radial e horizontal do rotor possibilita maior variedade de ensaios analisando diferentes posições, com isso é possível avaliar a influência da incidência do abrasivo com base nos ângulos das amostras.

4.5 Segurança em equipamentos

O equipamento projetado possui partes rotativas que ficarão em constante movimento durante o funcionamento, sendo necessário o projeto de uma cobertura, denominada no projeto como carenagem. A função dela é proteger os operadores das partes rotativas e possibilitar a visualização dos componentes durante o funcionamento. O acrílico foi o material escolhido, tanto para a carenagem como para o tambor, no qual também era possível visualizar a dinâmica do movimento relativo entre o abrasivo e as amostras no rotor.

Visando seguir a norma NBR 12 sobre máquinas e equipamentos, toda a extensão do equipamento foi protegida com uma tampa. Na Figura 34 é possível observar o aparato já fabricado, montado e estabelecido no laboratório do ITV.

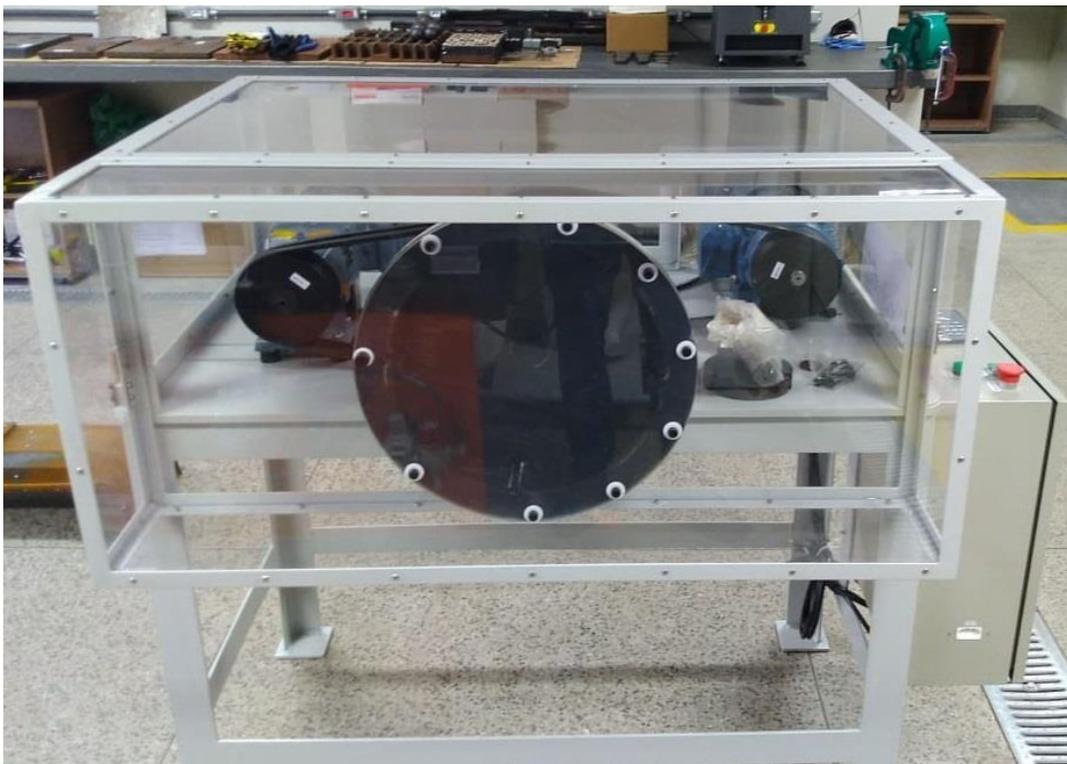


Figura 34 - Equipamento fabricado e montado no laboratório do ITV.

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

4.6 Ensaios Preliminares de Abrasão e Impacto

Os ensaios preliminares visavam a análise da dinâmica dos componentes durante a execução dos testes e o funcionamento da máquina. Com isso, definiu-se os dados laboratoriais com base nos trabalhos já realizados e revisados nessa monografia.

Os valores utilizados baseados nos trabalhos apresentados na revisão bibliográfica, foram definidos utilizando o critério de que o tribômetro é um equipamento que não possui normas relacionadas, o que garante um vasto valor de variáveis de ensaios.

Devido a fragmentação do abrasivo causado pelo impacto deles nas amostras durante o tempo de ensaio, trocou-se, em períodos de 15 minutos, o abrasivo fragmentado por um novo.

A velocidade do rotor e do tambor são diferentes o que possibilitou o impacto direto do abrasivo na amostra. Através de um inversor de frequência, determinou-se as velocidades de cada componente, assim como o tempo de duração do ensaio no painel elétrico da máquina. Durante os ensaios foi feito o uso de tacômetro para validar a velocidade real dos sistemas, que não são apresentados nesse trabalho.

Com base nos dados apresentados, posicionou-se três amostras de aço 1020 na porta amostra fabricado no laboratório do ITV. A Figura 35 apresenta as três amostras posicionadas no Rotor e os abrasivos fragmentados após decorridos 15 minutos de teste.



Figura 35 - Amostras dispostas no Rotor após o ensaio.

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

Com o ensaio de 15 minutos (quando se dava a troca de abrasivo), a brita utilizada foi totalmente pulverizada, demonstrando a importância em substituir os abrasivos em períodos predeterminados.

4.6.1 Desgaste das Amostras

O desgaste ocorrido na superfície, Figura 36, causado pelo movimento relativo e colisão entre as partículas e os corpos de prova, de análise é nítido e visível a olho nu.

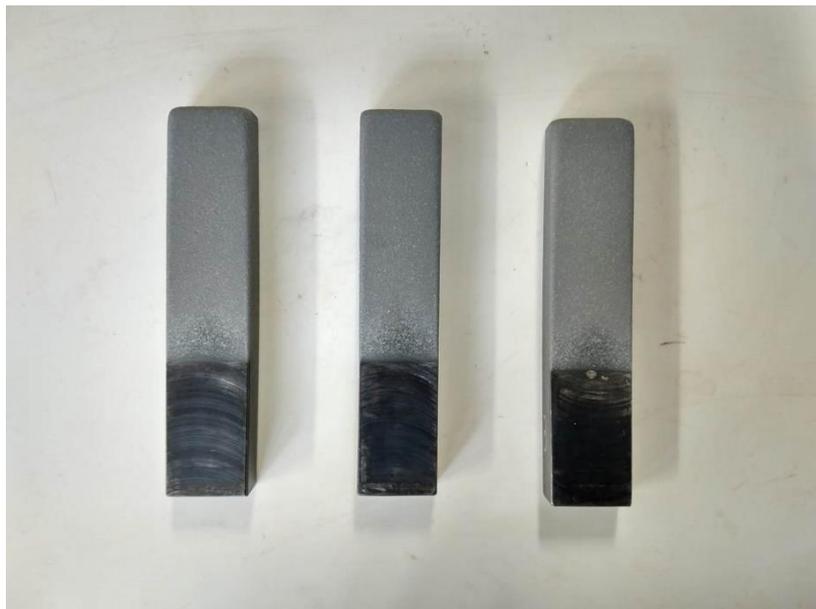


Figura 36 - Amostras desgastadas após ensaio.

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

O mecanismo de desgaste é diferente no centro da área desgastada da amostra em relação a borda, devido a diferença de velocidade em cada região. Os eventos são maiores na extremidade da amostra.

4.6.2 Perda de Massa acumulada

Quando retiradas do equipamento, as amostras são limpas e pesadas para avaliar média de perda de massa acumulada, permitindo assim construir o gráfico da perda de massa em função do tempo de teste.

Na Tabela 4 a seguir, foram tabelados os valores de perda de massa média e calculou-se o desvio padrão com o coeficiente de variação, de forma a quantificar o quanto os valores obtidos se aproximam da média calculada.

Tabela 4 - Perda de massa média e coeficiente de variações dos dados obtidos.

Tempo	0	15	30	45	60
Perda de massa Média (g)	0	0,162	0,330	0,506	0,673
Desvio padrão	0	0,0143	0,0090	0,0075	0,0038
CV	0	8,83 %	2,73 %	1,48 %	0,57 %

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

O coeficiente de variação mostra que a dispersão do ensaio diminuiu com o aumento do tempo de ensaio, ou seja, quanto maior o tempo de ensaio mais homogeneidade entre os valores de perda de massa são percebidos. Com os dados amostrais medidos, criou-se um gráfico de comportamento de desgaste em função do tempo, como observado na Figura 37.

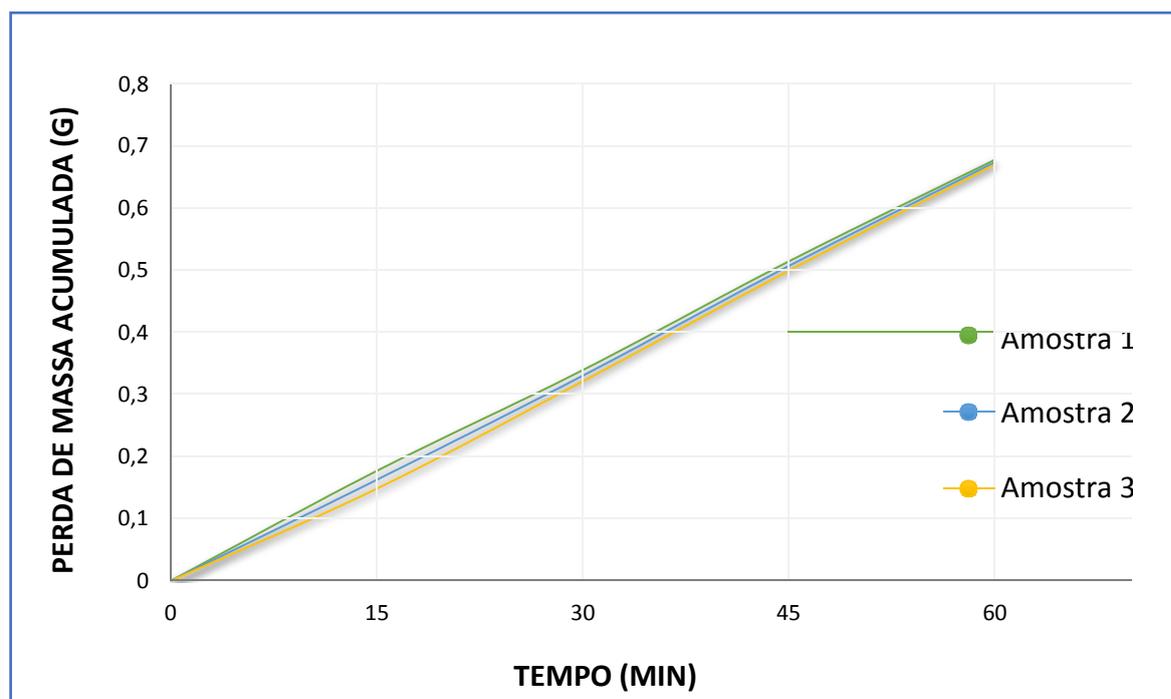


Figura 37 - Gráfico de perda de massa acumulada durante o tempo de ensaio.

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

Analisando a curva de perda de massa x tempo de ensaio podemos dizer que o ensaio gerou resultados promissores, visto que o aparato construído entregou um ensaio com valor de coeficiente de variação pequenos, e a curva gerada obedeceu ao comportamento linear como esperado pela da perda de massa, Eq (2).

4.6.3 Influência Direta da Borda na Perda de Massa

Após o ensaio, um dos problemas mencionadas na revisão bibliográfica pela Ratia (2015) em sua pesquisa foi visualizado nesse ensaio. O constante impacto com a borda da amostra causa uma perda de massa maior nas laterais, ou seja, a concentração de desgaste ocorrerá nas bordas das amostras.

Com o desgaste das bordas, a geometria mudará devido o escoamento fácil do abrasivo sobre a superfície, pois depois do impacto sucessivo entre os corpos, o abrasivo começa a retirar material da lateral da amostra. Na Figura 38 podemos perceber a mudança de geometria da amostra tornando suas bordas arredondadas.

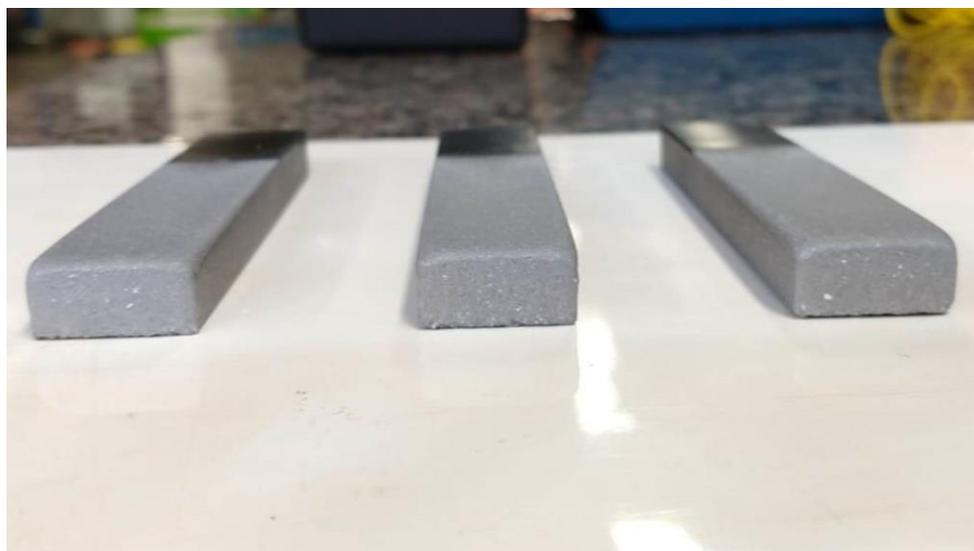


Figura 38 - Mudança de geometria das bordas das amostras.

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

Para solucionar esse problema foi projetado uma porta amostra, demonstrado na Figura 39. para incluir nos próximos ensaios que serão realizados. O intuito é garantir que os dados de perda de massa e os mecanismos de desgastes ocorrido sejam reproduzidos o mais próximo possível do que acontecem nas placas de chutes.

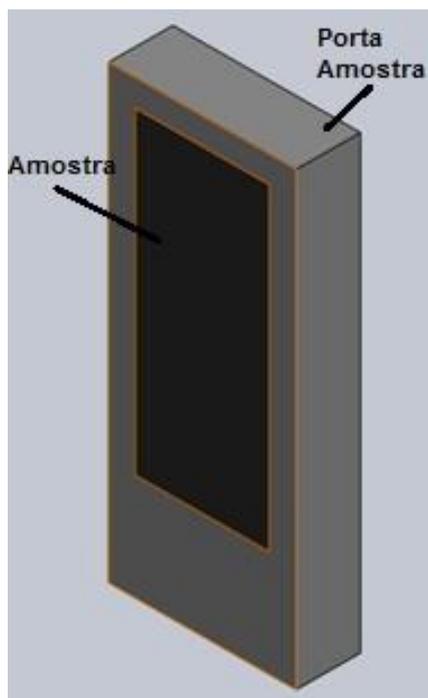


Figura 39 - Amostra com porta amostra para proteger as bordas.

Fonte: Pesquisa Direta, 2021.

A amostra deve encaixar na porta amostra através de tolerância, e ambos estarão fixos pela pressão que os dois parafusos do Rotor, sem necessidade de fazer roscas na amostra ou na proteção. Com isso, podemos solucionar a perda de massa concentrada nas bordas e gerar resultados melhores com o uso do Tribômetro de Abrasão e Impacto.

5 CONCLUSÃO

Um dos ensaios mais realizados para validar placas de chutes de transferências é o Roda de Borracha, no qual já possui norma de ensaios que padronizam o ensaio, entretanto, é um ensaio limitado quanto a reprodução dos mecanismos de desgaste. Em algumas regiões dos chutes são observadas um misto de mecanismo de desgaste abrasivo e por impacto. Este fenômeno não é possível de ser reproduzido no equipamento Roda de Borracha.

Os resultados mostraram que o equipamento está operacional conforme projetado e observado na literatura. Além disso, os dados de perda de massa das amostras de aço carbono foram mensuradas e apresentaram reprodutibilidade.

O equipamento desenvolvido se mostrou prático de ser operado: fácil acesso e substituição dos corpos de prova e fácil de inserir ou remover os abrasivos do tambor.

O sistema conseguiu isolar o pó gerado de forma eficaz, o que manteve o ambiente limpo e aumentou o bem-estar e segurança do usuário.

A carenagem construída em acrílico impede o acesso as partes rotativas do equipamento, porém, permite observar o comportamento de todos os componentes inclusive a movimentação dos abrasivos no tambor.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CZICHOS, H. *Tribology a systems approach to the science and technology of friction, lubrication and wear*. [S.l: s.n.], 1978.

EYRE, T. S. The mechanisms of wear. *Tribology International*, v. 11, n. 2, p. 91–96, 1978.

FRANCISCO, Alberto de. **Metodologia de Pesquisa**. 2007. Disponível em: <http://metodologiadespesquisa2.blogspot.com/2007/08/variaveis-e-indicadores.html>. Acesso em: 08 out. 2021.

GAHR, K. H. Z. Wear by hard particles. *Tribology International*, v. 31, n. 10, p. 587–596, 1998.

GAHR, Z. *Microstructure and wear of materials*. [S.l.]: Elsevier, 1987.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. *Métodos de Pesquisa*. Porto Alegre: [s.n.], 2009.

GIL, A. C. *Como Elaborar Projetos de Pesquisa*. [S.l: s.n.], 2002. v. 38.

HAWK, J. A. Laboratory abrasive wear tests: Investigation of test methods and alloy correlation. *Wear*, v. 225–229, n. PART II, p. 1031–1042, 1999.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. *Tribology - Friction and Wear of Engineering Materials*. 2° ed. [S.l.]: Matthew Deans, 2017.

MARCONI, M.; LAKATOS, E. *Fundamentos de metodologia científica*. [S.l: s.n.], 2003.

MESQUITA, Amarante. Metodologia para dimensionamento de chute de caixa de pedra - Resultados preliminares. *XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa*, 2017. , p. 1–8.

RATIA, V. *Behavior of martensitic wear resistant steels in abrasion and impact wear testing conditions*. 2015. 171 f. 2015.

RATIA, V. *et al.* The role of edge-concentrated wear in impact-abrasion testing. *Tribology Online*, v. 11, n. 2, p. 410–416, 2016.

RATIA, V.; MIETTUNEN, I.; KUOKKALA, V. T. Surface deformation of steels in impact-abrasion: The effect of sample angle and test duration. *Wear*, v. 301, n. 1–2, p. 94–101, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.006>>.

SAMPIERI, R. H.; CALLADO, C. F.; LUCIO, M. DEL P. B. *Metodologia De Pesquisa*. [S.l: s.n.], 2013

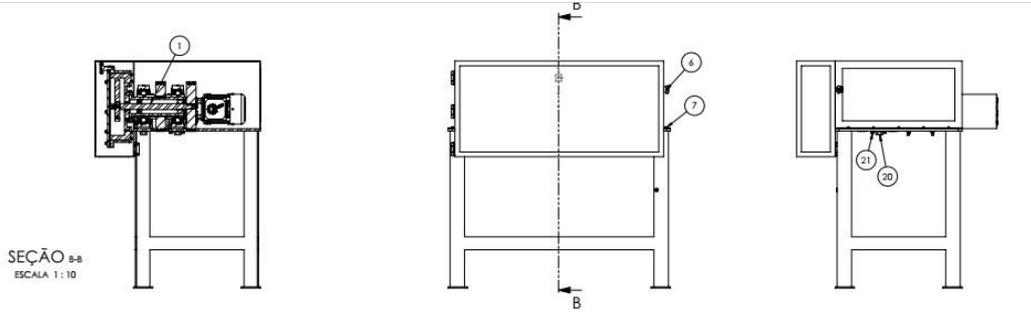
SILVA, W. M. DA. *Simulação do desgaste abrasivo via interações múltiplas*. 2008. 198 f. Universidade Federal de Uberlândia, 2008.

SILVA, J. R. *Caracterização De Sistema Tribológico E Seleção De Ligas Para Revestimento De Chutes De Transferência De Minério*. 2016. 93 f. 2016.

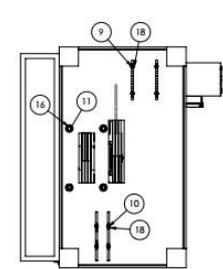
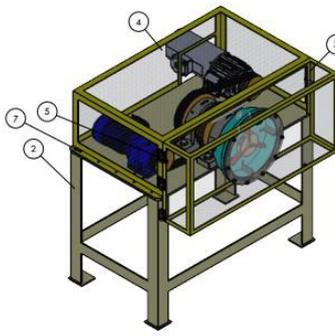
WILSON, R. D.; HAWK, J. A. Impeller wear impact-abrasive wear test. *Wear*, v. 225–229, n. PART II, p. 1248–1257, 1999.

ANEXO A

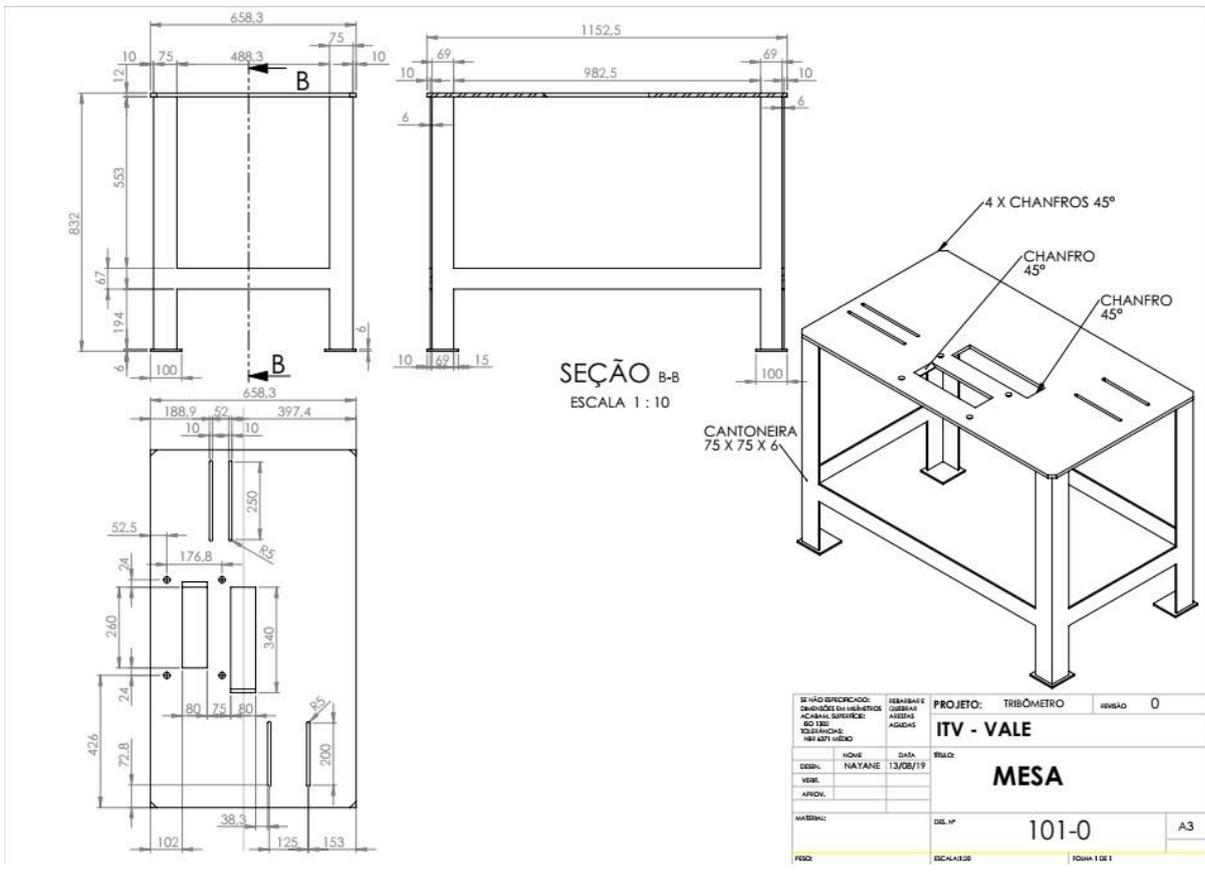
Desenhos Técnicos do Tribômetro



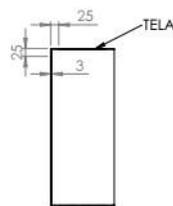
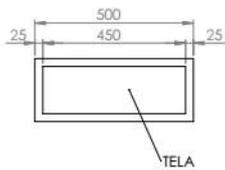
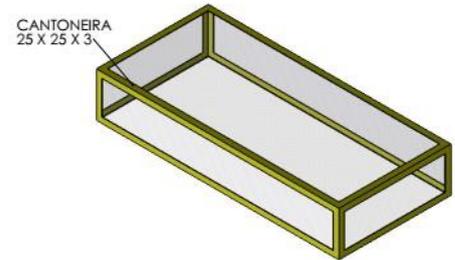
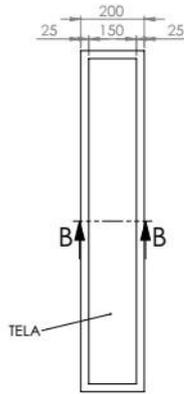
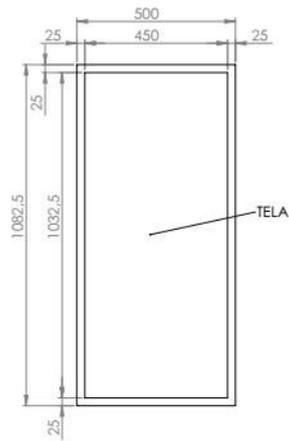
Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	DESCRIÇÃO	QTD.
1	CONJUNTO TAMBOR	110-0	1
2	MESA	101-0	1
3	JANELA	102-0	1
4	CARREGAÇÃO	103-0	1
5	DOBRAÇADA	TÍPICA	3
6	MANÍPULO DE APERTO	TÍPICO	1
7	DIN EN 24017 - M5 x 10-N	PARAF. SEXT. 8.8	10
8	DIN EN 24017 - M6 x 12-N	PARAF. SEXT. 8.8	4
9	B18.3.5M - Hex bolt M8 x 1.25 x 45 - 12-N	PARAFUSO SEXTAVADO 10.9	4
10	DIN EN 24014 - M8 x 40 x 22-N	PARAFUSO SEXTAVADO 10.9	4
11	DIN EN 24017 - M20 x 30-N	PARAFUSO SEXTAVADO 10.9	4
12	DIN 912 M8 x 30 - 30N	PARAF. ALLEN 12.9	8
13	B18.3.1M - 8 x 1.25 x 30 Hex SHCS - 12-NHX	PARAF. SEXT. 8.8	1
14	B18.3.1M - 8 x 1.25 x 12 Hex SHCS - 12-NHX	PARAF. SEXT. 8.8	1
15	B18.3.1M - 6 x 1.0 x 10 Hex SHCS - 10-NHX	PARAF. SEXT. 8.8	1
16	B18.22M - Plain washer, 20 mm, narrow	ARRUELA DE PRESSÃO	5
17	B18.22M - Plain washer, 24 mm, narrow	ARRUELA DE PRESSÃO	3
18	B18.22M - Plain washer, 8 mm, narrow	ARRUELA DE PRESSÃO	22
19	B18.22M - Plain washer, 10 mm, narrow	ARRUELA DE PRESSÃO	4
20	Hexagon Nut ISO 4034 - M20 - N	PORCA SEXTAVADO GR8	4
21	B18.2.4.1M - Hex nut, Style 1, M8 x 1.25 - DN	PORCA SEXTAVADO GR8	8



SE VÃO DIFERENCIADO: IDENTIFICAR O DIFERENCIAL	REBARBAR E CORTAR	PROJETO: TRIBÔMETRO	REVISÃO: 0
ACABAR SUPERFÍCIE: R0.130	ASISTAS	ITV - VALE	
EQUILIBRANÇAS: NENHUMA	ASISTAS	CONJUNTO GERAL	
DESPL.:	NOME: NATYANE	DATA: 13/08/19	
VERB.:			
APROV.:			
MATERIAL:	DEL. Nº	100-0	A2
POSO:	ESCALA: 1:10		

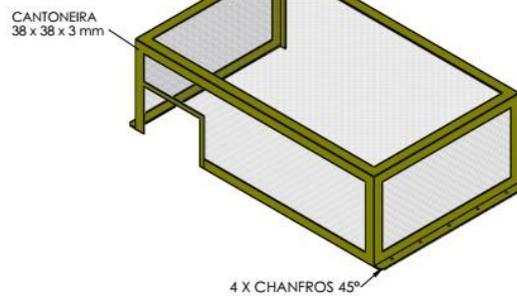
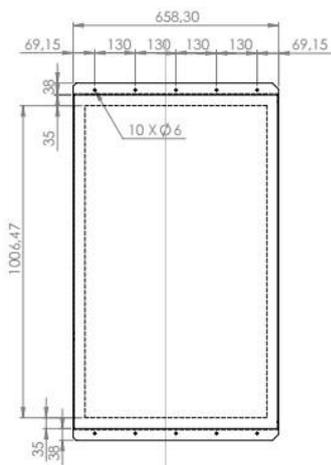
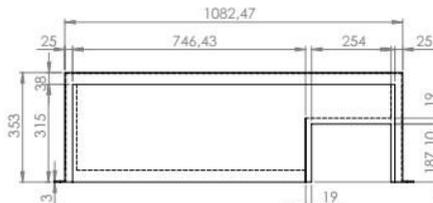
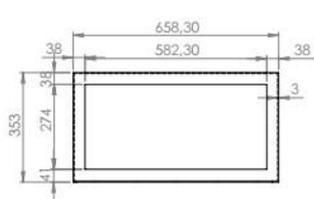


SE VÃO DIFERENCIADO: IDENTIFICAR O DIFERENCIAL	REBARBAR E CORTAR	PROJETO: TRIBÔMETRO	REVISÃO: 0
ACABAR SUPERFÍCIE: R0.130	ASISTAS	ITV - VALE	
EQUILIBRANÇAS: NENHUMA	ASISTAS	MESA	
DESPL.:	NOME: NATYANE	DATA: 13/08/19	
VERB.:			
APROV.:			
MATERIAL:	DEL. Nº	101-0	A3
POSO:	ESCALA: 1:10		

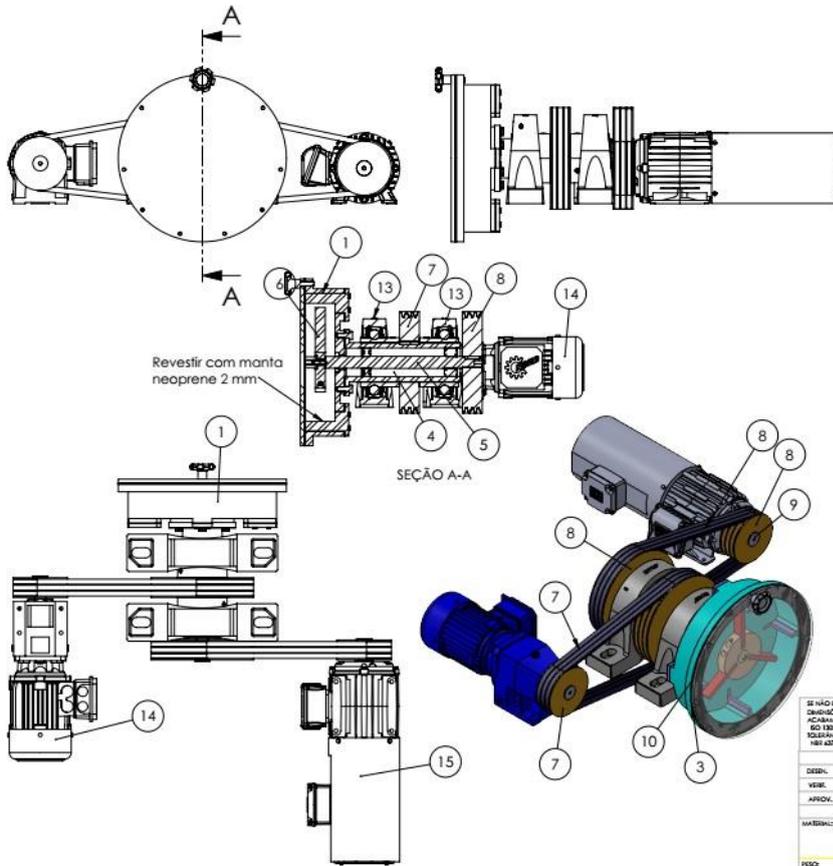


SEÇÃO B-B

SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS		REBARBAR E CANTONAS AGUDAS	PROJETO: TRIBÔMETRO	REVISO 0
ACABAMENTO: RASADO		AGUDAS	ITV - VALE	
DESIGN.	NOME	DATA	TÍTULO:	
VERB.	NATANE	13/10/19	JANELA	
APROV.			DEL. Nº	
MATERIAL:			102-0	A3
A-36				
FECH.	ESCALA: 1:50	FOLHA 1 DE 1		

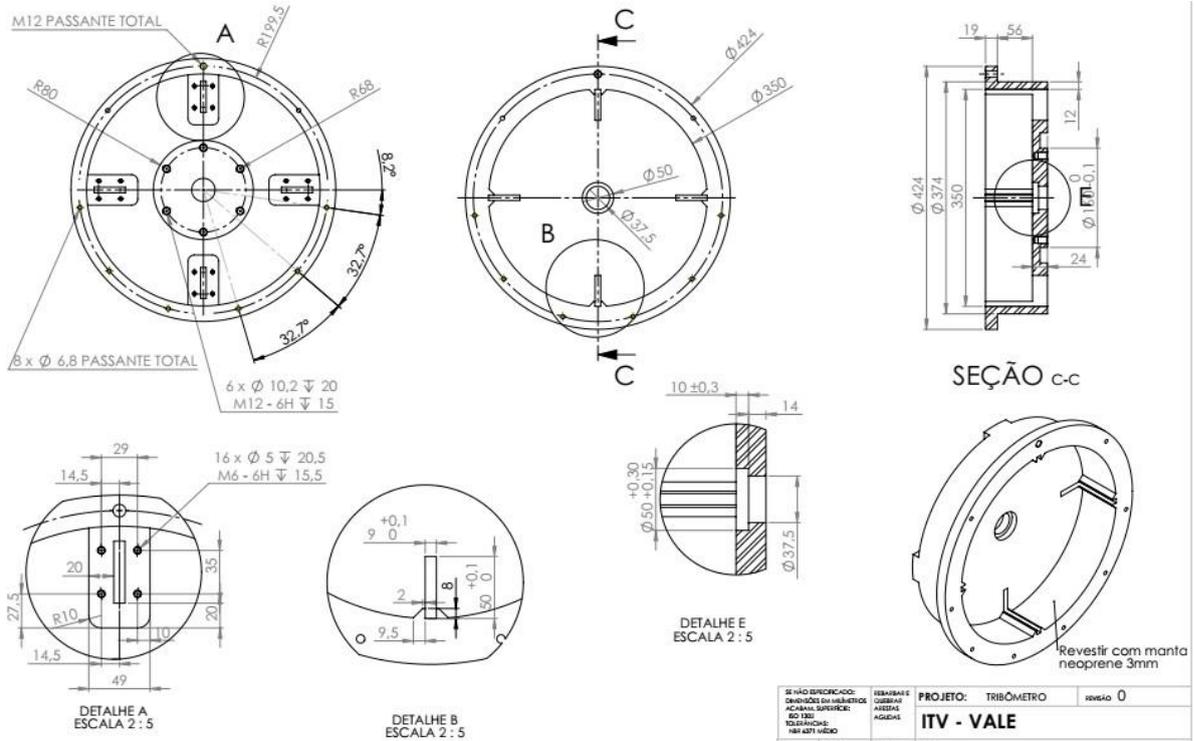


SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS		REBARBAR E CANTONAS AGUDAS	PROJETO: TRIBÔMETRO	REVISO 0
ACABAMENTO: RASADO		AGUDAS	ITV - VALE	
DESIGN.	NOME	DATA	TÍTULO:	
VERB.	NATANE	13/08/19	CARENAGEM	
APROV.			DEL. Nº	
MATERIAL:			103-0	A3
FECH.	ESCALA: 1:50	FOLHA 1 DE 1		

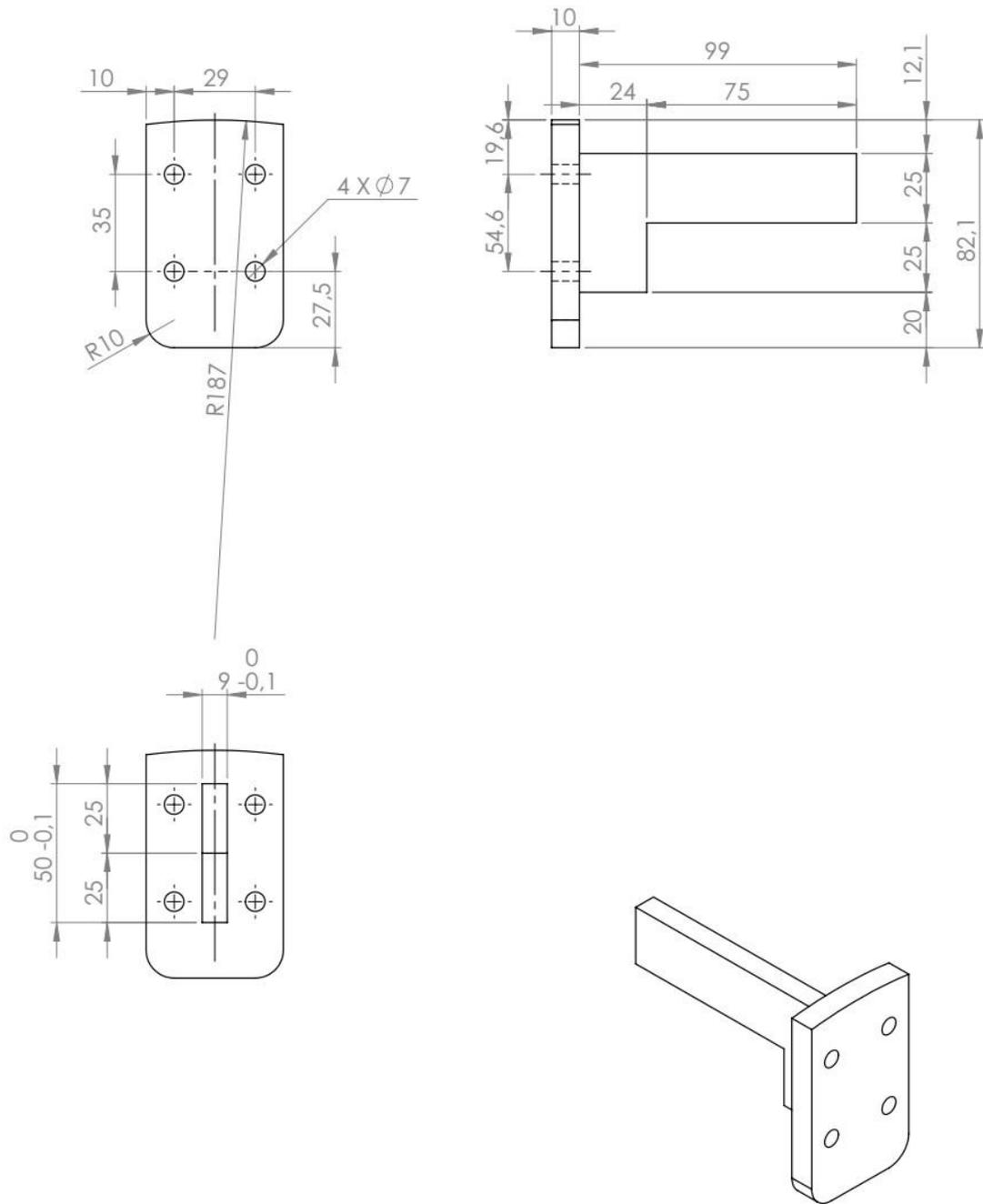


Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	DESCRIÇÃO	QTD.
1	TAMBOR	111-0	1
2	NERVURA 25	112-0	4
3	TAMPA ACRÍLICO	113-0	1
4	EIXO EXTERNO	114-0	1
5	EIXO INTERNO	115-0	1
6	CONJ PORTA AMOSTRA 90	120-0	1
7	v_belt2p_ass_mm_4STJ9	130-0	1
8	v_belt2p_nova	140-0	1
9	TRAVA POLIA	131-0	6
10	JUNTA NEOPRENE	3mm	1
11	SKF - NU 2306 EC - 10.SI.NC.10	ROLAMENTO DE ESFERAS ZZ	1
12	SKF - 6306 - 10.SI.NC.10_68	ROLAMENTO DE ESFERAS ZZ	1
13	SYJ_100_TF	MANCAL	2
14	SK12-80LH - NORD	REDUTOR NORD	1
15	90L_LEFT	MOTOR WEG	1
16	vedabras 0731740	RETENTOR R2	1
17	MANIPULO DE APERTO M12X25	TÍPICO	1
18	DIN EN 24017 - M12 x 30-N	PARAF. SEXT 8.8	6
19	DIN EN 24017 - M6 x 25-N	PARAF. SEXT 8.8	12
20	ovit_vsu_1_116rbzjz5qf9dx 84zowh3z	PARAF. SEXT 8.8	4
21	Circclip DIN 471 - 30 x 1.5	ANEL ELAST.	2
22	Circclip DIN 472 - 72 x 2.5	ANEL ELAST.	2

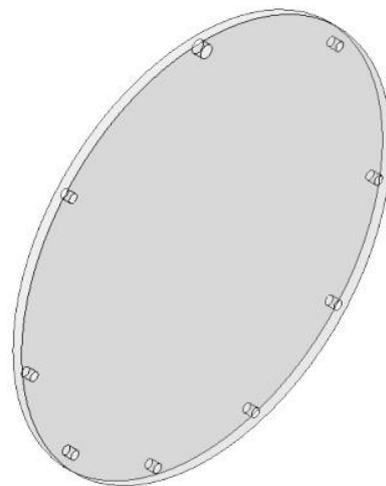
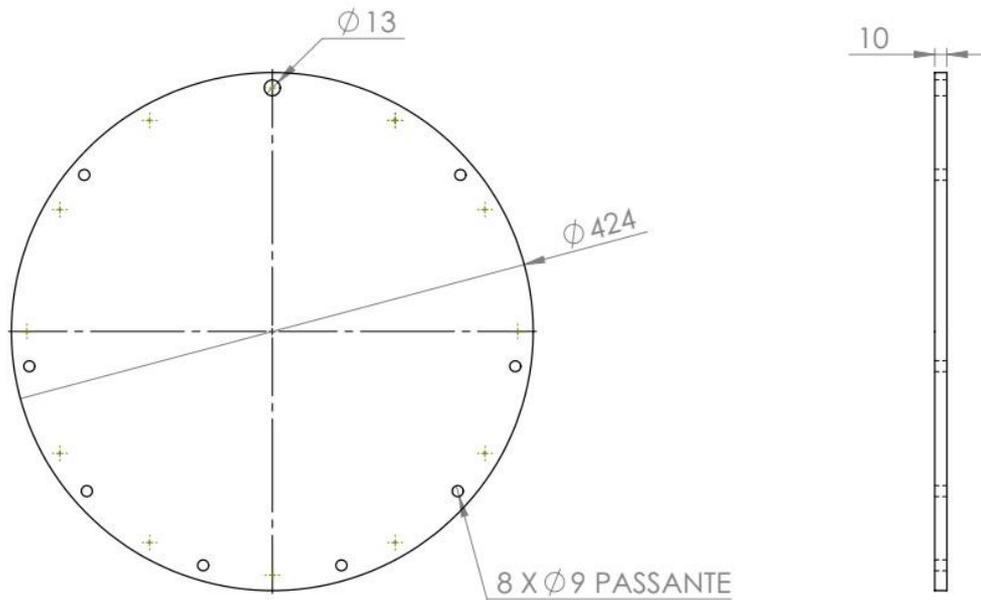
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAR SUPERFÍCIE: R0.130 TOLERÂNCIAS: NBR 4071 MÉDIO	ESBARRAR E CERRAR AS ABRAS AGUARDAS	PROJETO: TRIBÔMETRO	REVISÃO: 0
DESENH.: PHILIP	DATA: 09/08/19	CONJ. TAMBOR	
VEIC.: APROV.:			
MATERIAL:	DEL. Nº: 110-0	A3	
FEIC:	ESCALAS:	FOLHA 1 DE 1	



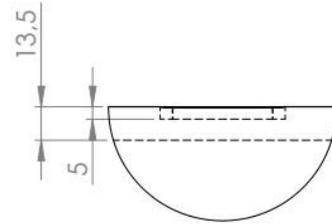
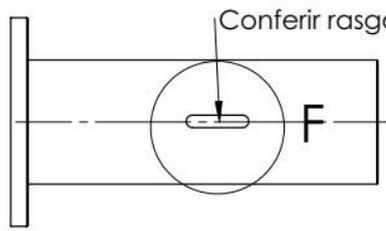
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAR SUPERFÍCIE: R0.130 TOLERÂNCIAS: NBR 4071 MÉDIO	ESBARRAR E CERRAR AS ABRAS AGUARDAS	PROJETO: TRIBÔMETRO	REVISÃO: 0
DESENH.: NATANE	DATA: 11/08/19	TAMBOR	
VEIC.: APROV.:			
MATERIAL: A-36	DEL. Nº: 111-0	A3	
FEIC:	ESCALAS:	FOLHA 1 DE 1	



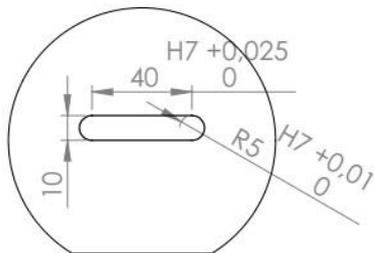
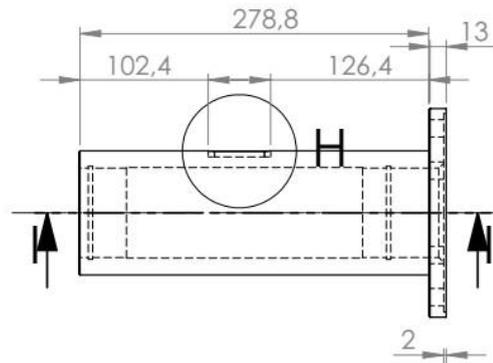
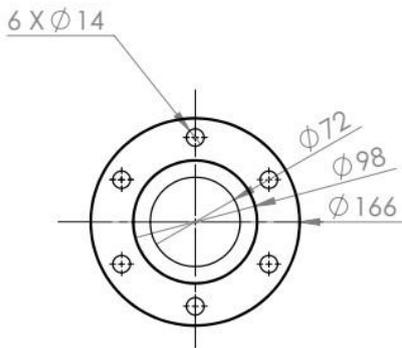
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: ISO 1302 TOLERÂNCIAS: NBR-6371 MÉDIO		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	PROJETO: TRIBÔMETRO	REVISÃO 0
		ITV - VALE		
		NERVURA		
MATERIAL:		DES. Nº 112-0		A4
PESO:		ESCALA:1:2		FOLHA 1 DE 1



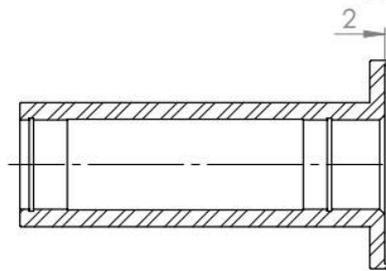
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: ISO 1302 TOLERÂNCIAS: NBR-6371 MÉDIO		REBARBAR E QUEBRAR: ARESTAS AGUDAS	PROJETO: TRIBÔMETRO	REVISÃO 0	
			TÍTULO: TAMPA		
DES.	NAYANE	DATA			18/08/19
VERIF.					
APROV.					
MATERIAL: ACRÍLICO		DES. Nº 113-0		A4	
PESO:		ESCALA:1:10		FOLHA 1 DE 1	



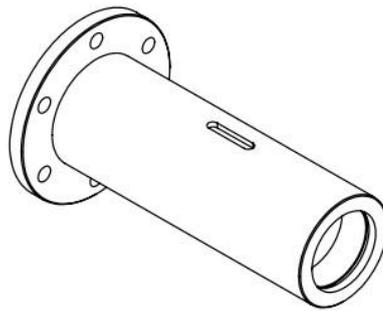
DETALHE H
ESCALA 2 : 5



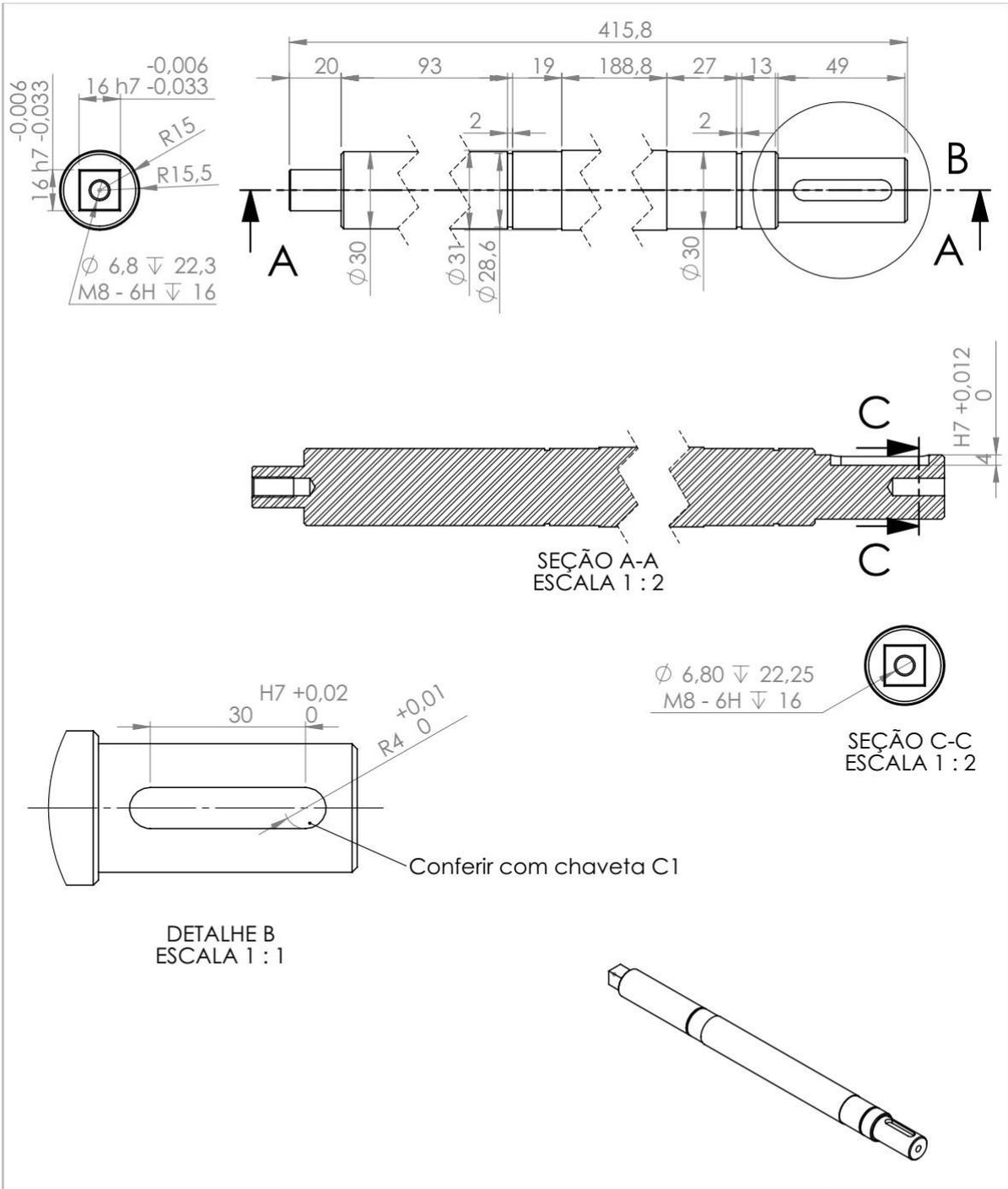
DETALHE F
ESCALA 2 : 5



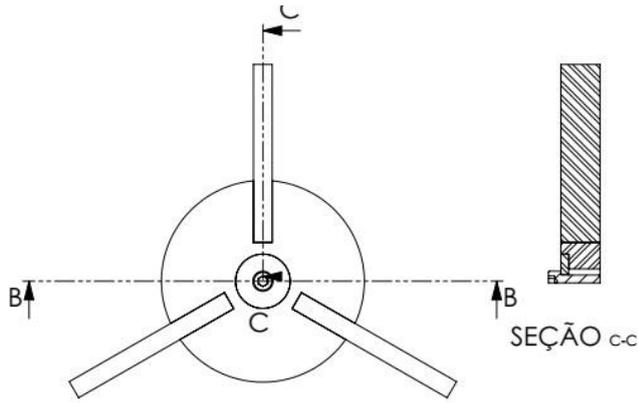
SEÇÃO H



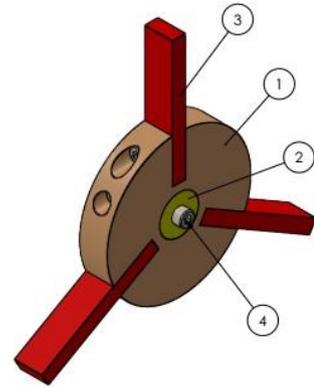
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: ISO 1302 TOLERÂNCIAS: H7 NBR-6371 MÉDIO		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	PROJETO: TRIBÔMETRO	REVISÃO 0
NOME		DATA	TÍTULO:	
DES. NAYANE		11/08/19	EIXO EXTERNO	
VERIF.				
APROV.				
MATERIAL:		DES. Nº	A4	
		114-0		
PESO:		ESCALA: 1:5	FOLHA 1 DE 1	



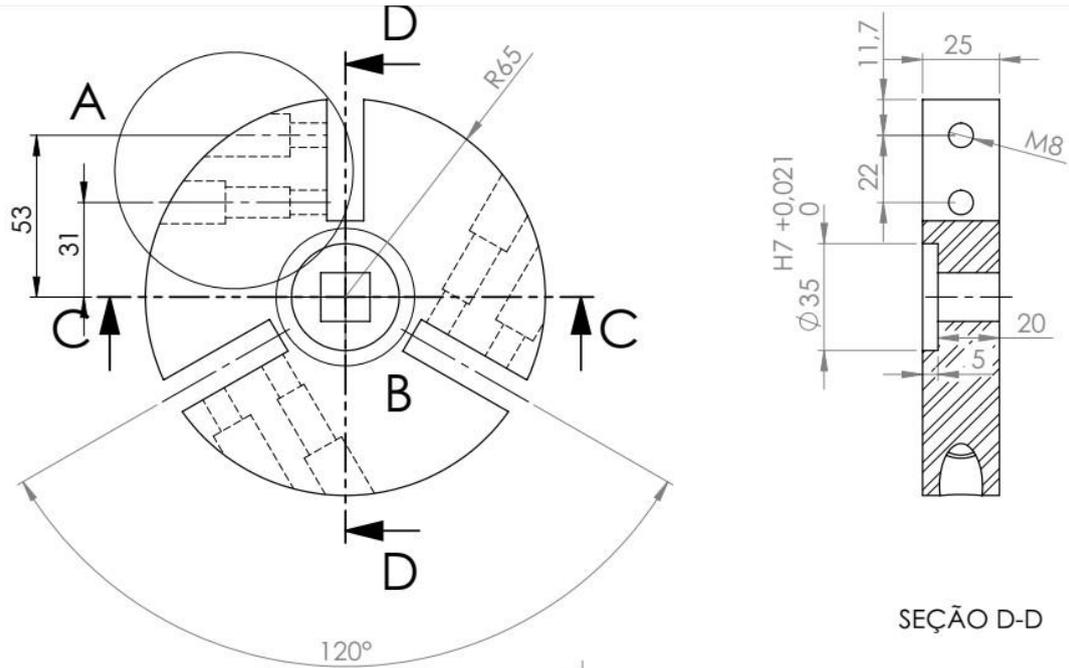
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: ISO 1302 TOLERÂNCIAS: NBR-6371 MÉDIO		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	PROJETO: TRIBÔMETRO	REVISÃO 0
			ITV - VALE	
			TÍTULO: EIXO INTERNO	
MATERIAL:			DES. Nº 115-0	A4
PESO:			ESCALA:1:5	FOLHA 1 DE 1



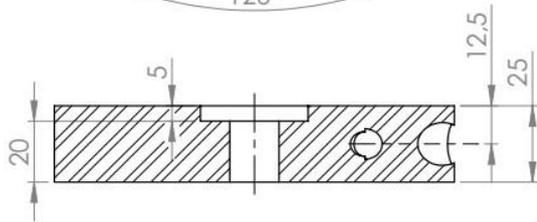
Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	DESCRIÇÃO	QTD.
1	PORTA AMOSTRA 90	121-0	1
2	TRAVA	122-0	1
3	CP12	123-0	3
4	DIN 912 M8 x 25 --- 25N	PARAF. ALLEN 12.9	1
5	DIN 912 M8 x 12 --- 12N	PARAF. ALLEN 12.9	3
6	DIN 912 M8 x 35 --- 35N	PARAF. ALLEN 12.9	3



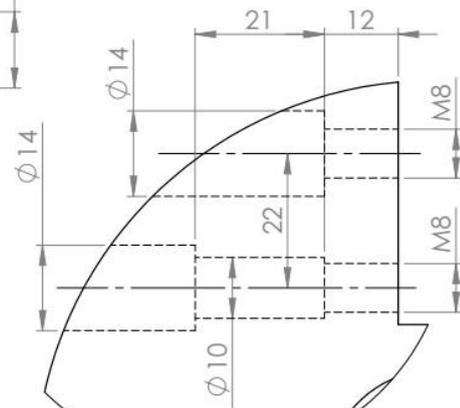
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS		ESCALAS E COTAS: ARREDEAR	PROJETO: TRIBÔMETRO	REVISÃO: 0
ACABAR SUPERFÍCIE: R0,130		REVISÃO: 0	ITV - VALE	
DESENHADO: NAYANE	DATA: 13/08/19	TÍTULO: CONJ PORTA AMOSTRA 90		
VERIFICADO:		MATERIAL: 120-0		
APROVADO:		DIM. Nº: 120-0		A3
PESQ:		ESCALAS: 1 DE 1		



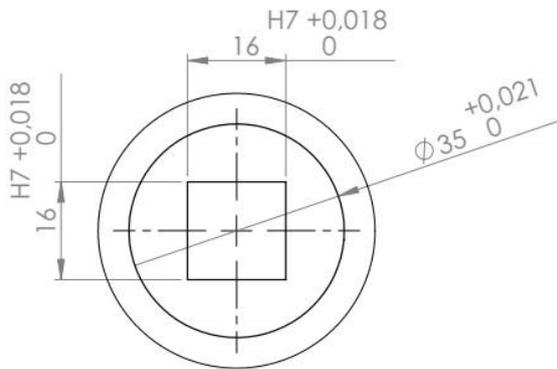
SEÇÃO D-D



SEÇÃO C-C

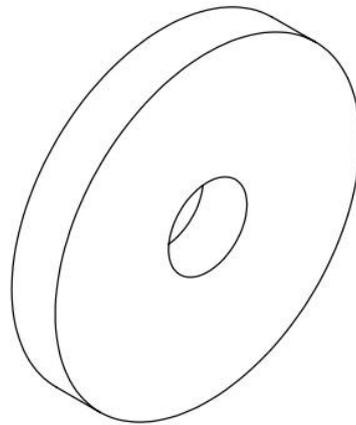
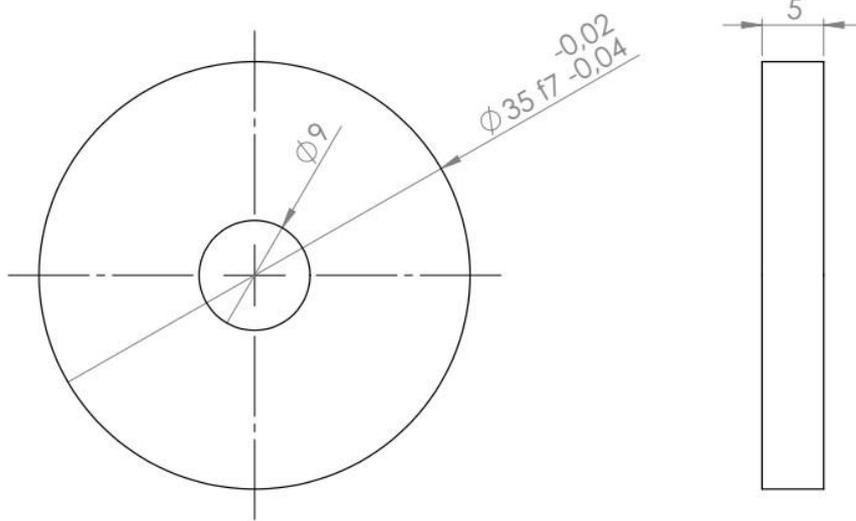


DETALHE A
ESCALA 1 : 1

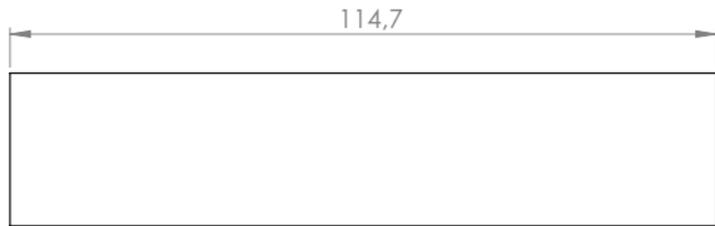
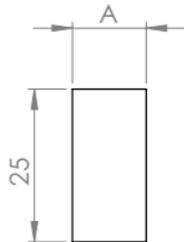


DETALHE B
ESCALA 1 : 1

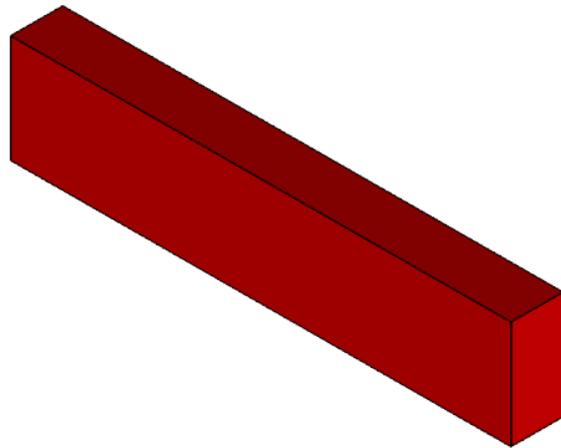
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: ISO 1302 TOLERÂNCIAS: NBR-6371 MÉDIO		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	PROJETO: TRIBÔMETRO	REVISÃO 0
			ITV - VALE	
			PORTA AMOSTRA 90	
NOME	DATA	TÍTULO:		
DES. NAYANE	13/08/19			
VERIF.				
APROV.				
MATERIAL: AÇO 1045		DES. Nº 121-0	A4	
PESO:		ESCALA:1:2	FOLHA 1 DE 1	



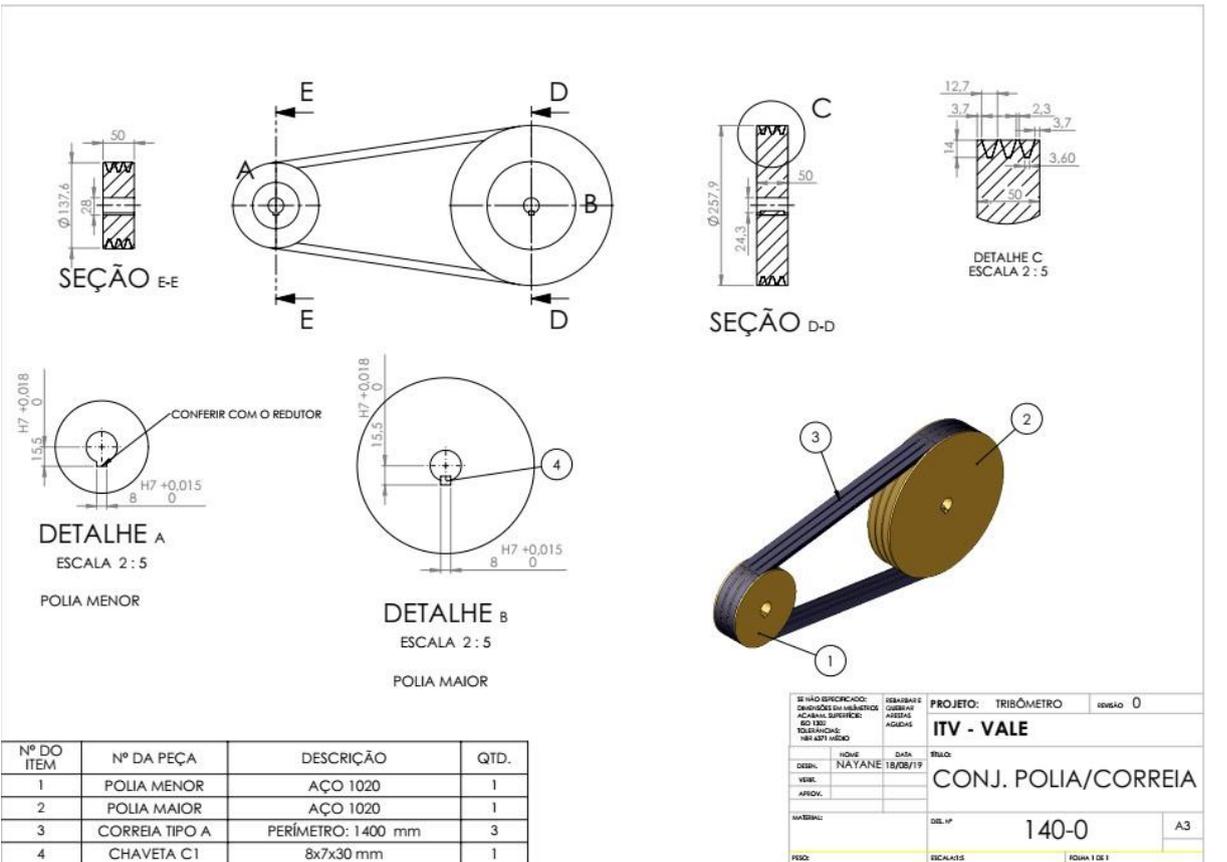
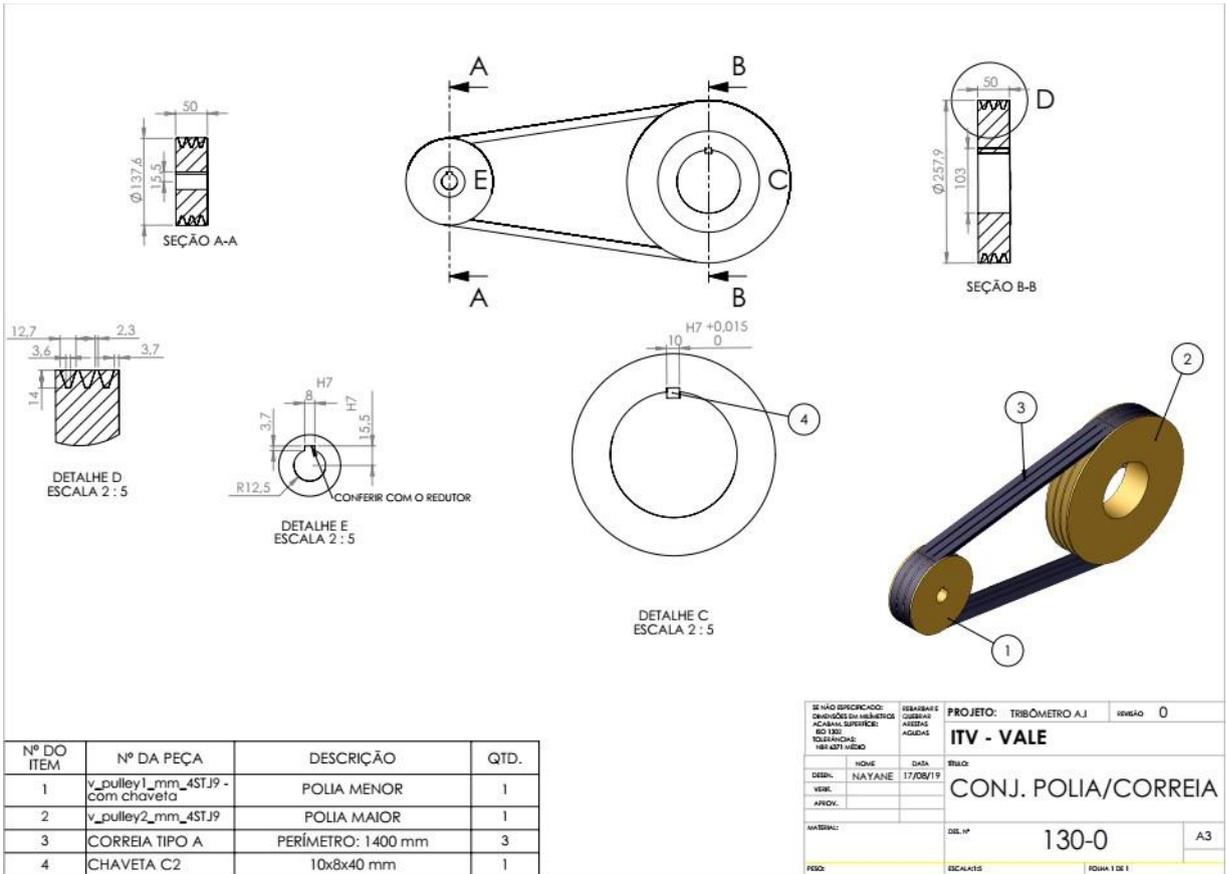
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: ISO 1302 TOLERÂNCIAS: NBR-6371 MÉDIO		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	PROJETO: TRIBÔMETRO	REVISÃO 0
			ITV - VALE	
	NOME	DATA	TÍTULO:	
DES.	NAYANE	16/08/19	TRAVA PORTA AMOSTRA	
VERIF.				
APROV.				
MATERIAL:		DES. Nº	A4	
AÇO 1020		122-0		
PESO:		ESCALA:2:1	FOLHA 1 DE 1	



VALOR DE A
12 mm +0/-0,1



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: ISO 1302 TOLERÂNCIAS: NBR-6371 MÉDIO		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	PROJETO: TRIBÔMETRO	REVISÃO 0
TÍTULO: AMOSTRA				
DES.	NOME	DATA		
	123-0	13/08/19		
VERIF.				
APROV.				
MATERIAL:			DES. Nº 123-0	A4
PESO:			ESCALA:1:1	FOLHA 1 DE 1

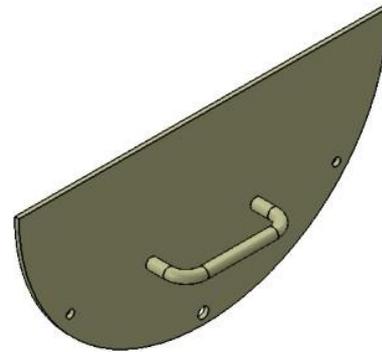
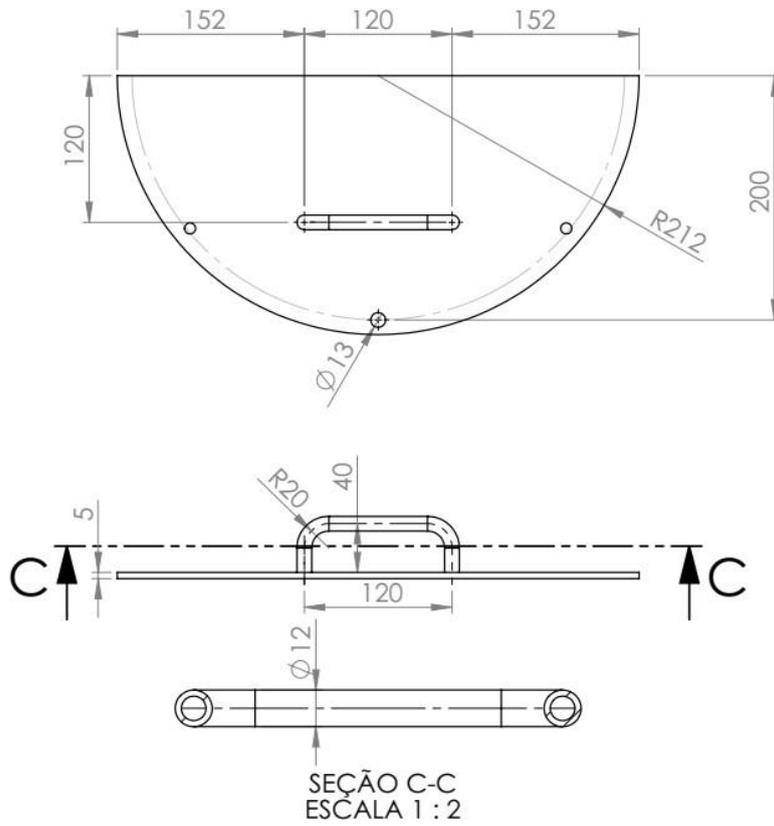


AJUSTAR E SOLDAR DOBRADIÇA NA MONTAGEM

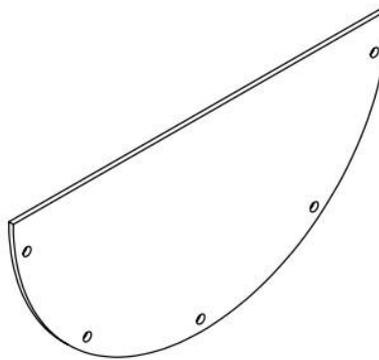
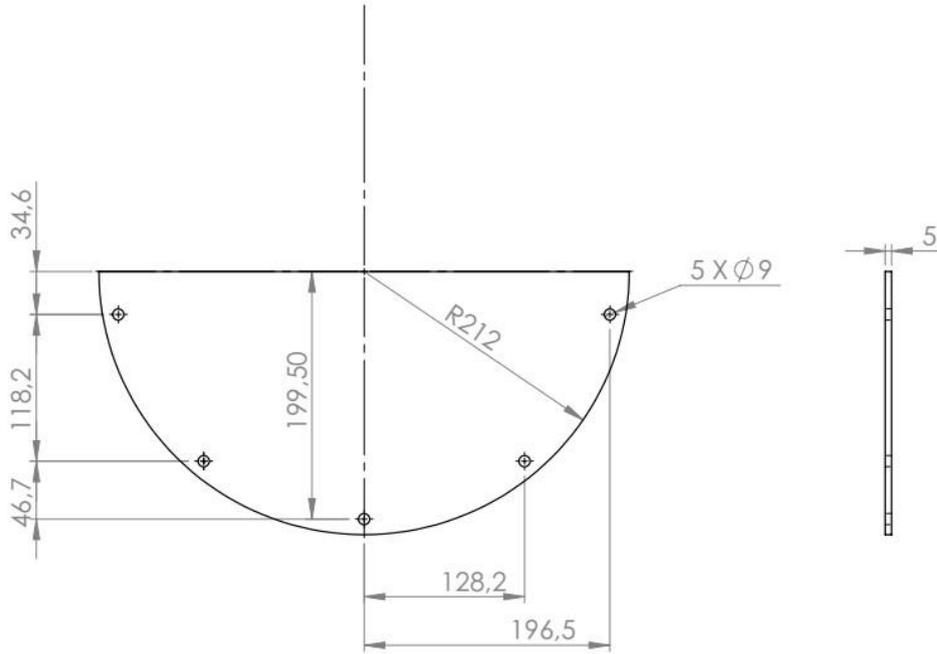
PROTEGER COM MANTA NEOPRENE 3 mm

Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	DESCRIÇÃO	QTD.
1	TAMBOR	150-0	1
2	Tampa Superior	151-0	1
3	Tampa Inferior	152-0	1
4	DOBRADIÇA PM	153-0	1
5	MANIPULO PM M12X25	TÍPICO PARA APERTO	1
6	JUNTA DE VEDAÇÃO	MANTA NEOPRENE 3mm	1
8	DIN 912 M8 x 30 --- 30N	PARAF. ALLEN 12.9	6
9	B18.22M - Plain washer, 8 mm, narrow	ARRUELA DE PRESSÃO	7

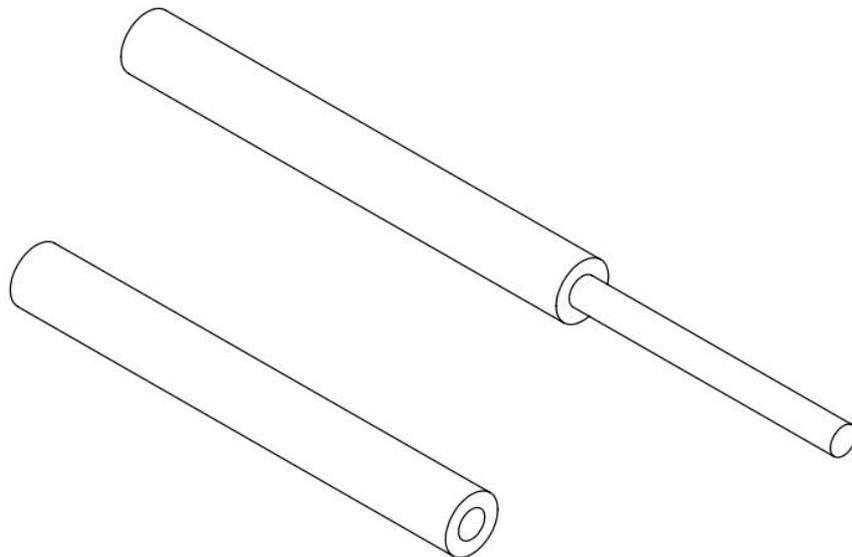
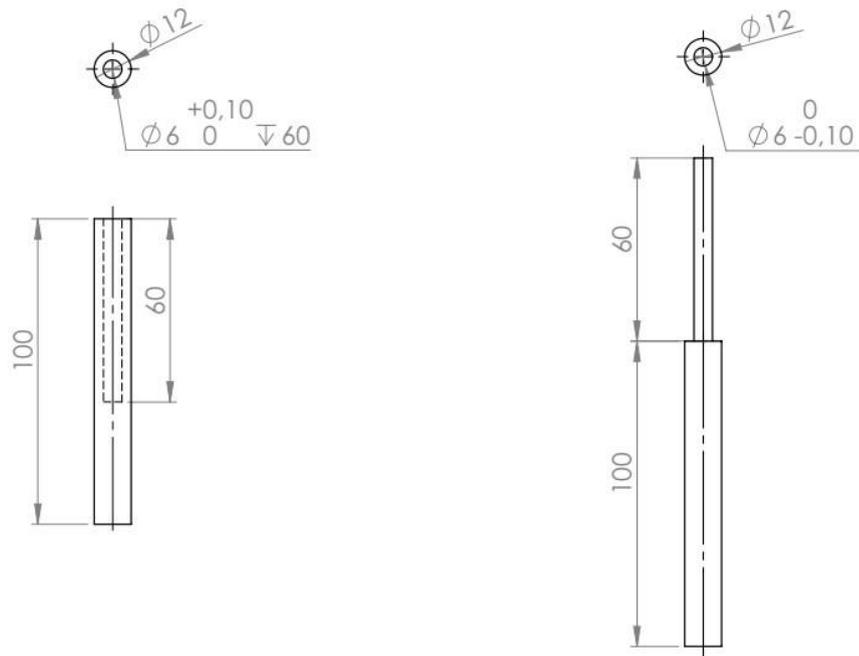
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES OU MATERIAIS ACABAR SUPERFÍCIE: EQ. TÊX. EQUILIBRADO: NÃO ESTÁ NÍDRO	REBARBAR E CORRETA ASISTAS AGUAS	PROJETO: TRIBOMETRO	SERVAO 0
DESL. NAYANE	DATA 20/08/19	ITV - VALE	
VERE.		TAMBOR COM TAMPA MÓVEL	
APROV.			
MATERIAL:	DEL. Nº	150-0	A3
REDO:	ESCALA: 1:1	FOLHA 1 DE 1	



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: ISO 1302 TOLERÂNCIAS: NBR-6371 MÉDIO		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	PROJETO: TRIBÔMETRO	REVISÃO 0
			ITV - VALE	
			TÍTULO: TAMPA MÓVEL SUPERIOR	
MATERIAL: AÇO 1020			DES. Nº 151-0	A4
PESO:			ESCALA:1:5	FOLHA 1 DE 1



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: ISO 1302 TOLERÂNCIAS: NBR-6371 MÉDIO		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	PROJETO: TRIBÔMETRO	REVISÃO 0
NOME		DATA	TÍTULO:	
DES.	NAYANE	20/08/19	TAMPA MÓVEL INFERIOR	
VERIF.				
APROV.				
MATERIAL:		DES. Nº	A4	
AÇO 1020		152-0		
PESO:		ESCALA: 1:5	FOLHA 1 DE 1	



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: ISO 1302 TOLERÂNCIAS: NBR-6371 MÉDIO		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	PROJETO: TRIBÔMETRO	REVISÃO 0
			ITV - VALE	
			TÍTULO: DOBRADIÇA	
MATERIAL: AÇO 1020			DES. Nº 153-0	A4
PESO: Cemento para fins de instrução			ESCALA:1:1	FOLHA 1 DE 1