

ALEXANDRE HENRIQUE ALVES RODRIGUES

**ADAPTAÇÃO DE UM ABRASÔMETRO TIPO RODA
DE BORRACHA PARA POSICIONAMENTO
HORIZONTAL DA AMOSTRA**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2017

ALEXANDRE HENRIQUE ALVES RODRIGUES

**ADAPTAÇÃO DE UM ABRASÔMETRO TIPO RODA DE BORRACHA
PARA POSICIONAMENTO HORIZONTAL DA AMOSTRA**

Projeto de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Uberlândia, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de
**BACHAREL em ENGENHARIA
MECÂNICA.**

Orientador: Prof. Dr. Washington Martins
da Silva Jr.

UBERLÂNDIA - MG

2017

ALEXANDRE HENRIQUE ALVES RODRIGUES

**ADAPTAÇÃO DE UM ABRASÔMETRO TIPO RODA DE BORRACHA
PARA POSICIONAMENTO HORIZONTAL DA AMOSTRA**

Projeto de conclusão de curso
_____ pelo Colegiado do Curso
de Graduação em Engenharia Mecânica
da Faculdade de Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Uberlândia.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Washington Martins da Silva Jr. – UFU – Orientador

Prof. Dr. Alberto Arnaldo Raslan - UFU

Prof. MSc. Vinícius Carvalho Teles – UFU

Uberlândia, 21 de dezembro de 2017.

À minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais, Marcos e Leidamar, pelo apoio incondicional. Palavras não bastam para demonstrar todo meu amor e gratidão a vocês, e assim, dedico-vos esse trabalho. À minha irmã Ana Alice, por toda confiança depositada em mim e por sempre me motivar a persistir nesta caminhada. À minha esposa, amiga e companheira Alícia, pelo apoio, carinho e paciência, e por me presentear com o melhor dos presentes, que é meu filho Bernardo. Aos meus avós, os quais tenho sorte de tê-los todos presentes durante toda minha caminhada, para vocês também o dedico.

Aos amigos e companheiros de faculdade e da vida, aos quais vou me abster de nomeá-los, pois certamente esqueceria algum, o que não seria justo.

Ao professor, orientador e amigo Washington. A execução deste trabalho só se tornou possível devido ao apoio, dedicação, e comprometimento do senhor, que por inúmeras vezes se mostrou um grande amigo além de um excelente orientador.

Rodrigues, A. H. A. **Adaptação de um Abrasômetro Tipo Roda de Borracha para Posicionamento Horizontal da Amostra**. 2017. 44p. Projeto de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

Resumo

O presente trabalho visou à modernização do ensaio roda de borracha, sendo que tal aparato encontra-se presente no LTM para fins acadêmicos e de pesquisa em tribologia, especificamente na severidade do desgaste abrasivo. Tomou-se como motivação desse trabalho a alteração na forma de operação do ensaio, do posicionamento vertical para horizontal da amostra. Foram feitas mudanças estruturais no presente mecanismo de forma a acatar as ideias apresentadas em tal artigo, porém, sem fugir à norma ASTM G-65, a qual rege esse experimento. Além disso, um sistema de coleta de abrasivos foi projetado para que partículas usadas no processo pudessem ser analisadas quanto à severidade do ensaio no próprio abrasivo e, partículas não usadas, que antes eram descartadas, pudessem ser utilizadas em um novo experimento. Tanto o aparato antigo quanto o novo foram desenhados com suas devidas dimensões no software SolidWorks, obtendo-se assim máximo detalhamento do projeto. Por fim, é possível constatar a viabilidade econômica do novo ensaio, tanto em questões operacionais quanto de materiais gastos.

Palavras Chave: tribologia, roda de borracha, desgaste abrasivo, adaptação, experimento.

Rodrigues, A. H. A. **Adaptation of a Rubber Wheel Abrasion Tester for Horizontal Positioning of the Sample.** 2017. 44p. Graduation Project, Federal University of Uberlandia, Uberlandia, Brazil.

Abstract

The present work aimed at the modernization of the rubber wheel abrasion tester, being that this apparatus is present in the LTM for academic and researching purposes in tribology, specifically in the severity of the abrasive wear. The motivation of this work was the change in the way the test was operated, from the vertical to horizontal positioning of the sample. Structural changes have been made in the present mechanism in order to comply with the ideas presented in this paper, but without going beyond the standard ASTM G-65, which governs this experiment. In addition, an abrasive collection system was designed so that particles used in the process could be analyzed for the severity of the test on the abrasive itself, and unused particles that were previously discarded could be used in a new experiment. Both the old apparatus and the new one were designed with their proper dimensions in the SolidWorks software, thus obtaining maximum detail of the project. Finally, it is possible to verify the economic viability of the new test, both in operational matters and in material expenses.

Keywords: tribology, rubber wheel, abrasive wear, adaptation, experiment.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	5
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 FATORES QUE INFLUENCIAM NO DESGASTE DE ESTRUTURAS	8
2.2 SISTEMAS TRIBOLÓGICOS	8
2.3 PROCESSOS DE DESGASTE	9
2.3.1 <i>Desgaste por adesão</i>	11
2.3.2 <i>Desgaste por fadiga superficial</i>	12
2.3.3 <i>Desgaste triboquímico</i>	14
2.3.4 <i>Desgaste abrasivo</i>	16
2.3.5 <i>Métodos de ensaio para desgaste abrasivo</i>	20
2.4 INFLUÊNCIA DA DUREZA DA BORRACHA NO ENSAIO RODA DE BORRACHA	22
CAPÍTULO III - METODOLOGIA	24
3.1 ANÁLISE E DESENHO DO ABRASÔMETRO ATUAL	27
3.2 ELABORAÇÃO DE CROQUIS DO NOVO ABRASÔMETRO	28
3.3 DIMENSIONAMENTO DO BRAÇO DE ALAVANCA	29
3.4 PROJETO DOS DEMAIS COMPONENTES	29
CAPÍTULO IV – RESULTADO E DISCUSSÕES	30
4.1 DIMENSIONAMENTO DO BRAÇO DE ALAVANCA E DEMAIS COMPONENTES	30
4.1.1 <i>Braço de alavanca e mancais de rolamento</i>	32
4.1.2 <i>Cuba de ensaios</i>	33
4.1.3 <i>Válvula dosadora e calha de alimentação de abrasivo</i>	34
4.1.4 <i>Calha de captação de abrasivo</i>	36
4.1.5 <i>Outros componentes</i>	37
4.2 SISTEMA DE POLIMERIZAÇÃO DA BORRACHA DIRETAMENTE NA RODA	37
CAPÍTULO V – CONCLUSÕES	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
ANEXO I	43

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O desgaste inerente nos maquinários e seus componentes são a principal preocupação na indústria mecânica, sendo que o mesmo leva a falhas inesperadas e, assim, perda da produtividade do sistema como um todo.

O desgaste abrasivo figura como o maior responsável por falhas catastróficas e consequentes pausas no processo para manutenção, sendo que o mesmo é o mais intensificado devido ao movimento relativo entre partes móveis em contato, o que causa uma perda progressiva, caso não observado. Junto ao mesmo, outros mecanismos de desgaste são comumente analisados, como o desgaste erosivo, podendo ser por deslizamento ou fadiga.

O desgaste abrasivo causa cerca de 50% das falhas no maquinário como um todo. Um índice altíssimo, que torna importante e necessário o estudo de todo o fenômeno para que seja otimizado tanto o processo, quanto o projeto e especificação dos materiais e equipamentos envolvidos.

Tal estudo tem como âmbito principal o desenvolvimento de novos materiais e/ou revestimentos que possibilitem uma maior resistência ao desgaste nos materiais, para que a

necessidade de parada e troca de componentes não seja tão frequente, o que, economicamente falando, é mais lucrativo.

Ainda sobre economia no meio fabril, todos os gastos referentes ao desgaste dos equipamentos podem ser reduzidos com um projeto bem feito, levando em conta tanto a escolha do lugar onde o maquinário será alojado, até o processo de fabricação do mesmo, sem contar com a ambientação do meio, para que fatores externos não influenciem.

Em meio às diversas formas de análise e compreensão das causas e consequências do desgaste, destaca-se o abrasômetro roda de borracha, que pode ser descrito como um aparato onde uma amostra de determinado material é fixada e, então, sujeito à ação de um abrasivo na interface entre a mesma e a roda de borracha, que se encontra em rotação, e pressionados em ação de uma força conhecida.

O objetivo desse trabalho é o projeto de modificação do abrasômetro presente no Laboratório de Tribologia e Materiais - LTM da FEMEC-UFU, para que concilie os conceitos definidos pela norma ASTM G-65 e os propostos por Hutchings e Stevenson (HUTCHINGS e STEVENSON, 1996). Além disso, o projeto de um sistema de coleta dos abrasivos que atuam efetivamente no processo abrasivo permitindo, além da análise do desgaste da amostra, a análise da abrasividade da partícula utilizada. Espera-se que as mudanças propostas abram novos caminhos para estudos fundamentais sobre desgaste abrasivo, sendo uma poderosa ferramenta para ensaios tribológicos.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo dos fenômenos relacionados ao atrito, lubrificação e desgaste, além das aplicações em campo é feito pela tribologia, palavra derivada do grego “tribos”, que significa atritar, roçar. (ZUM GAHR, 1987).

Segundo Hutchings, 1992, os primeiros relatos de estudo da tribologia remonta do século XV, pela formulação das leis do atrito propostas por Leonardo da Vinci. Atualmente, o conceito de tribologia é definido como o campo da ciência que trata de atrito, desgaste e lubrificação de superfícies em movimento relativo.

Desgaste é dito como a perda continua e crescente de material de uma superfície de determinado corpo graças ao movimento relativo proveniente do contato com outro corpo, seja sólido, líquido ou gasoso. Ou seja, o desgaste é proveniente do atrito, o qual é a resistência ao movimento entre dois corpos, o qual aumenta com as interações dos sólidos e a real área de contato. Atrito e desgaste, portanto, são características dos sistemas de engenharia em questão, ou tribo-sistemas, e não dos materiais em si. (ZUM GAHR, 1987)

Como o desgaste é uma perda progressiva de material em volume, o mesmo raramente configura uma falha catastrófica, pois sua severidade pode ser observada no aumento da vibração e desalinhamento do sistema/componente. Porém, há casos de lascamentos ou até mesmo trincas que se propagam e geram fragmentos, os quais podem adentrar em meio a elementos e produzir um novo mecanismo de desgaste. Dessa forma, a

melhor maneira de diminuir os gastos provenientes do atrito e, conseqüentemente, do desgaste, é manter a manutenção do meio em dia, conservando os mecanismos lubrificados e limpos, assim como seus arredores.

2.1 Fatores que influenciam no desgaste de estruturas

As conseqüências do atrito e desgaste, segundo Zum Gahr (1987), são a vibração, o ruído, o aquecimento, a geração de fragmentos e conseqüente mudança geométrica, que levam à queda da eficiência do sistema e possível falha catastrófica. Dessa forma, o estudo de tais fatores é uma importante ferramenta para o combate e até prevenção de desgastes futuros.

Listam-se as principais variáveis referentes ao desgaste como sendo:

- Variáveis metalúrgicas: dureza, tenacidade, composição química e microestrutura;
- Variáveis de processo: materiais em contato, pressão, velocidade de

deslizamento, temperatura e topografia ou acabamento da superfície;

- Outros fatores: lubrificação, corrosão.

Para solucionar um determinado problema de desgaste é necessário conhecer o tribo-sistema ao qual ele está inserido, avaliando todos os fenômenos e esforços aplicados. A caracterização do tribo-sistema é de suma importância para determinar o mecanismo de desgaste envolvido.

2.2 Sistemas tribológicos

Um sistema tribológico é composto de quatro elementos principais: corpo, contra-corpo, elemento de interface e ambiente. A Figura 2.1 mostra uma forma simplificada do tribo-sistema, conforme norma DIN 50320 (ZUM GAHR, 1987).

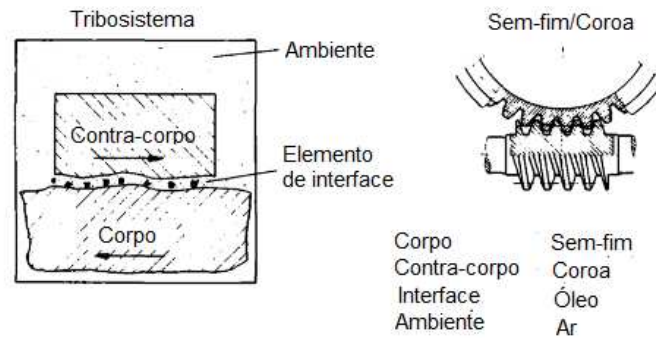


Figura 2.1 – Definição de sistema tribológico (ZUM GAHR, 1987)

A Figura 2.2 ilustra os diferentes tipos de movimento sobre o corpo sólido de um tribo-sistema, classificando-os como desgaste por deslizamento, rolamento, impacto, oscilação e desgaste erosivo, todos dependentes da cinemática do sistema. Além disso, os processos de desgaste podem ser lubrificados ou sem lubrificação. (ZUM GAHR, 1987)

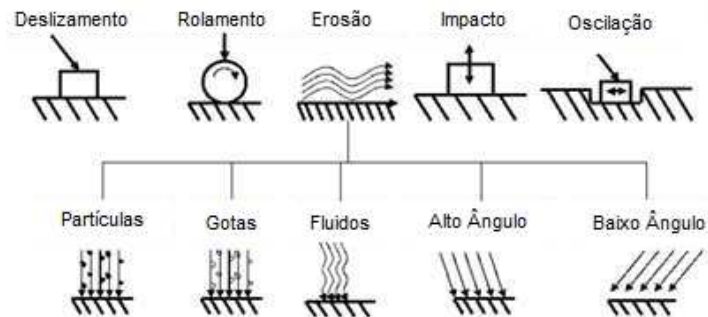


Figura 2.2 – Classificação dos processos de desgaste (ZUM GAHR, 1987)

2.3 Processos de desgaste

Zum Gahr (1987) ainda classifica os processos de desgaste em quatro grandes grupos, listados abaixo e mostrados na Figura 2.3:

- Desgaste adesivo: formação e quebra das ligações interfaciais adesivas;

- Desgaste abrasivo: remoção do material devido ranhura;
- Desgaste triboquímico: interação química entre os elementos que resulta em reação química;
- Fadiga de superfície: fadiga e formação de trincas devido a ciclos de tensões.

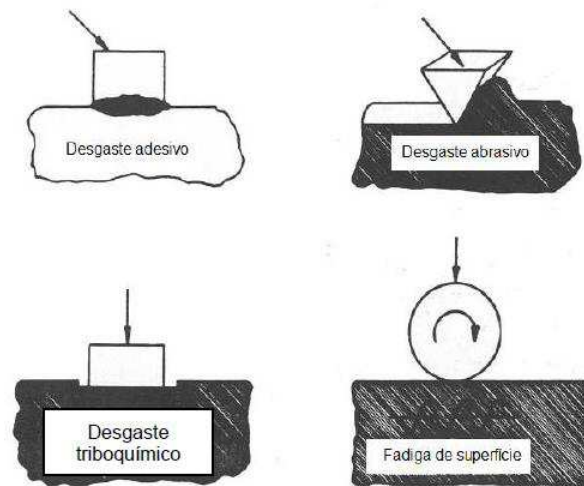


Figura 2.3 – Os quatros principais processos de desgaste (ZUM GAHR, 1987)

O comportamento ao desgaste dos materiais é definido quanto aos mecanismos atuantes de desgaste (abrasão, adesão, corrosão, fadiga), quanto ao tribo-sistema (corpo, contra-corpo, interface, ambiente), quanto aos processos tribológicos (rolamento, deslizamento, impacto, escolamento) e de acordo com os parâmetros de operação (carga, velocidade, temperatura, tempo).

Pode-se dizer que o desgaste pode ser caracterizado de forma contundente através dos mecanismos citados anteriormente. Porém, Rabinowicz (1995) e Zum Gahr (1987) propuseram que há, na verdade, quatro formas principais de desgaste, mostradas na Figura 2.3, além de processos subsequentes que frequentemente são classificados como formas de desgaste. Então, para avaliar o desgaste em um determinado corpo ou sistema, faz-se necessário conhecer todos os fenômenos envolvidos. Por vez, um determinado tipo de desgaste poderá levar a outro tipo de desgaste. Por exemplo, no desgaste por adesão, haverá partículas na interface entre os corpos e dependendo do movimento poderá causar desgaste abrasivo.

A seguir são descritos estes quatro modos de desgaste, em destaque para o desgaste abrasivo.

2.3.1 Desgaste por adesão

Microscopicamente não existe uma superfície de metal de deslizamento isenta de rugosidade. Mesmo que a topografia e a rugosidade da superfície sejam de ordem micrométrica, a presença de picos e vales é inevitável, como mostra a Figura 2.4.

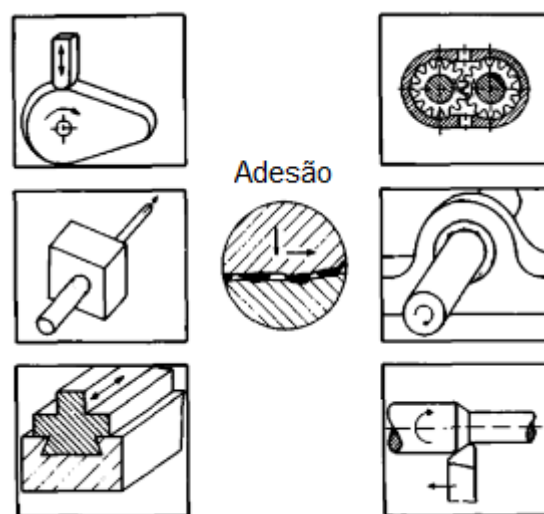


Figura 2.4 – Sistemas tribológicos sujeitos a adesão (ZUM GAHR, 1987)

De acordo com Zum Gahr (1987), o contato entre as asperidades microscópicas de duas peças em movimento relativo é realizado na área real de contato. Devido ao atrito no contato, elevadas temperaturas e pressões são formadas, podendo fundir uma superfície contra outra e dessa forma haverá uma solda pontual. Como o movimento relativo entre as superfícies deve continuar, tais soldas são cisalhadas, causando o desgaste nas superfícies.

Se a superfície áspera soldada e rompida causa a transferência de metal de uma superfície para outra, o desgaste resultante é chamado de estria ou risco de atrito (*scoring*). Se a aspereza do local soldado se tornar tão extensa que as superfícies já não deslizam uma sobre a outra, a falha resultante é chamada de emperramento (*seizure*). Já se o

processo de desgaste por adesão tornar-se severo, com transferência de grande volume de metal, o fenômeno é chamado raspagem (*galling*). (HUTCHINGS, 1992).

Para evitar a soldagem por adesão dos materiais é necessário um estudo quanto à compatibilidade de um material para com o outro. Metais quimicamente compatíveis tendem a formar ligações, sejam covalentes, as quais são mais fracas e de fácil separação, ou ligações iônicas, também chamadas de ligações metálicas, nas quais se tem uma junta forte e rígida, o que aumenta a severidade da adesão.

2.3.2 Desgaste por fadiga superficial

Pela definição de fadiga, Zum Gahr (1987) caracteriza o desgaste por fadiga superficial devido ao carregamento cíclico, como uma sequência de deformações plásticas e elásticas, seja por rolamento ou deslizamento e impacto de sólidos e líquidos sobre a superfície de determinado material, como visto na Figura 2.5. Tal carregamento forma trincas e posteriormente causa lascamento da superfície.

A formação e propagação de trincas provenientes de tensões de rolamentos causam os chamados *pits*, que é a formação de cavidades (*pitting*) devido ao lascamento (*spalling*) superficial do material e geração de partículas macroscópicas.

Pitting origina-se com trincas superficiais, sendo que cada *pit* tem relativamente uma pequena área superficial. *Spalling* origina-se com trincas sub-superficiais, e o *spall* são lascas finas de material de superfície. Este tipo de desgaste ocorre comumente em mancais de rolamento, dentes de engrenagens, cames e em partes de máquinas que envolvem superfícies em contato com rolamento.

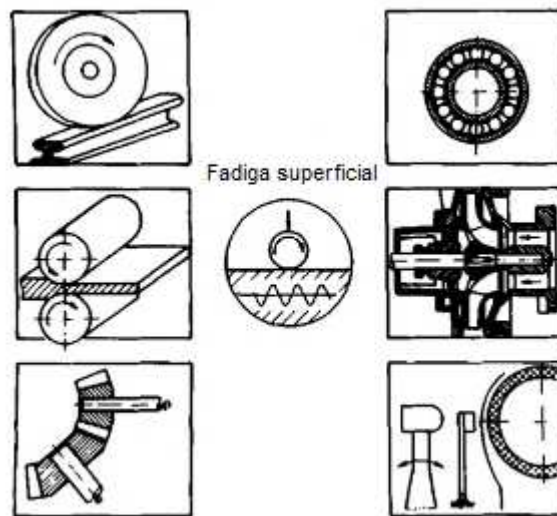


Figura 2.5 - Sistemas tribológicos sujeitos a fadiga superficial (ZUM GAHR, 1987)

Para reduzir os efeitos da fadiga superficial em uma superfície, uma solução é a redução do atrito pela lubrificação. Abaixo, são listadas as principais características do contato lubrificado entre superfícies:

- em uma superfície lubrificada, há a redução do atrito e, conseqüentemente, a redução da tensão cisalhante tangencial na superfície;
- a redução do atrito pela lubrificação faz com que se reduza o aquecimento entre as superfícies e, por consequência, as tensões térmicas;
- por fim, a presença de um filme lubrificante permite uma favorável distribuição da pressão em cima da área em contato.

Pode-se dizer que, o aumento da dureza superficial de um material reduz o desgaste superficial, obedecendo à lei de Archard, que também aponta um aumento da fragilidade do material. (HUTCHINGS, 1992)

A precisão na geometria da superfície e superfícies com baixa rugosidade são benéficas para a redução do desgaste. Entretanto, quando há uma superfície texturizada, seja sintetizada propositalmente ou não, verifica-se que há a redução na taxa de desgaste devido à formação de reservatórios de lubrificante.

2.3.3 Desgaste triboquímico

Nesse tipo de desgaste, a retirada de material ocorre devido à interação entre as superfícies em deslizamento e o ambiente à qual estão submetidas. Devido à afinidade química entre o meio e as partes envolvidas, a mesma gera um dano tribológico no material da peça. Além disso, a geração de calor existente na interface promove a oxidação das superfícies. Exemplos são mostrados na Figura 2.6.

O desgaste triboquímico é causado pelas ligações entre moléculas dos materiais das superfícies em estudo. Dependendo do material ou do ambiente ao qual o sistema triboquímico está inserido, haverá a facilitação para estas ligações. Zum Gahr (1987) explica que o ambiente corrosivo pode ser líquido ou gasoso, além de apresentar uma alta taxa de oxidação, o que favorece o início das ligações entre os materiais.

Tendo se iniciado essa reação, a mesma terá um fim e o filme lubrificante sairá da interface graças ao deslizamento das superfícies. Dessa forma, é propício o início de outro tipo de desgaste, como, por exemplo, o abrasivo, uma vez que o particulado gerado pela oxidação seja duro e com características abrasivas.

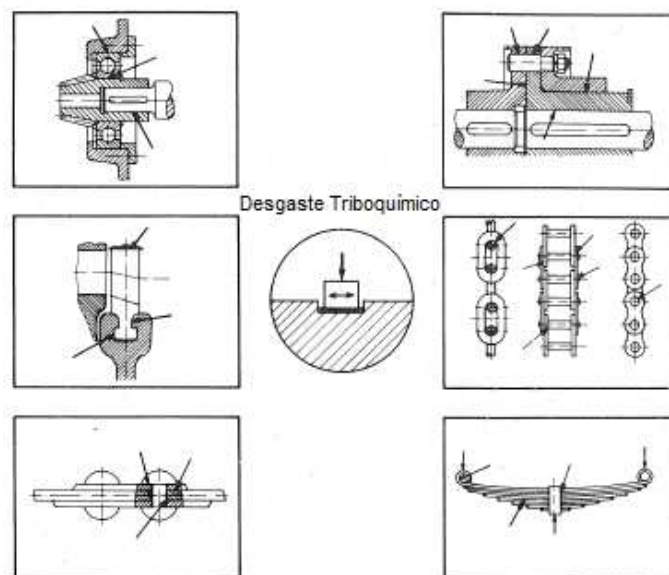


Figura 2.6 - Sistemas tribológicos sujeitos a desgaste triboquímico (ZUM GAHR, 1987)

A Figura 2.7 descreve a sequência de formação de camadas de óxidos no deslizamento a temperatura ambiente. Inicialmente, é estabelecida uma área real de contato

entre as superfícies que se conformam umas às outras. Nos pontos de contato são formados pequenos núcleos de óxidos devido à oxidação dos elementos metálicos existentes na liga. Nos pontos de suporte da carga se formam ilhas de óxidos ou placas devido ao elevado aquecimento, causado pelo atrito, Figura 2.7 (a). Estas ilhas ou placas crescem até atingir uma espessura crítica e, em seguida, se estendem sobre as áreas superficiais vizinhas Figura 2.7 (b) e Figura 2.7 (c). Estas camadas de óxidos se fragmentam, devido ao carregamento, quando atingem uma espessura crítica, que é dependente do tipo de óxido, entre outros fatores, que não mais suporta o carregamento. As placas mais elevadas são removidas expondo material abaixo, e outras placas são formadas nos novos pontos de suporte da carga, e assim áreas metálicas superficiais são novamente oxidadas quando entram em contato deslizante, Figura 2.7 (d) (ZUM GAHR, 1987).

O desgaste triboquímico é desejado em certos casos, como o que ocorre quando há desgaste por adesão, sendo que, adicionando um material reativo que provoque oxidação na interface, como fosfato, sulfetos e cloretos, os mesmos quebrarão as reações geradas entre os materiais e, pelo movimento relativo, esses materiais serão retirados do ambiente. Além disso, um filme lubrificante será criado para que evite a formação de novos pontos de adesão, diminuindo-se o atrito.

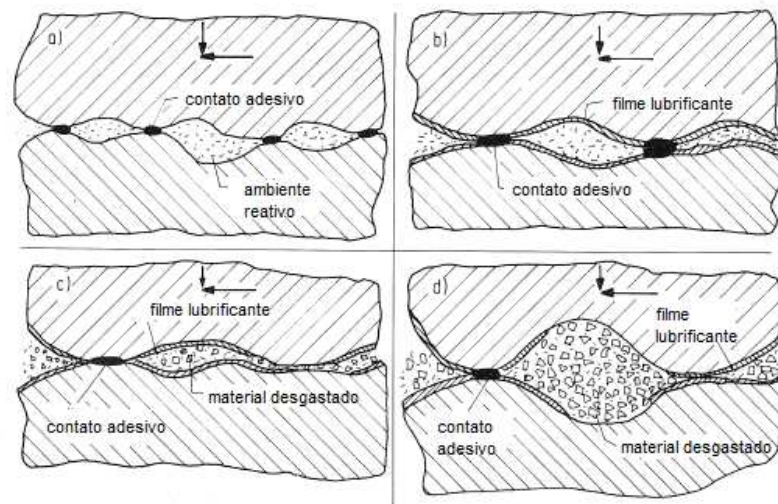


Figura 2.7 - Reação triboquímica: (a) formação de ilhas de óxidos, (b) e (c) crescimento das trilhas de óxidos e (d) destruição das placas de óxidos que suportam a carga e formação de outras novas. (ZUM GAHR, 1987)

2.3.4 Desgaste abrasivo

A Figura 2.8 ilustra os sistemas tribológicos sujeitos à ação do desgaste abrasivo, tendo como características a presença de protuberâncias, que significa grande rugosidade em uma das superfícies e/ou materiais soltos na interface. Segundo Hutchings, 1992, desgaste abrasivo é a perda de material causada pela presença de particulado duro na superfície de um dos materiais, em movimento relativo (abrasão dois corpos) ou de particulados duros livres na interface (abrasão três corpos), causando a perda de material na superfície menos dura. Além disso, pode haver o caso em que tais particulados estão indentados em uma das superfícies, o que também promove o desgaste abrasivo.

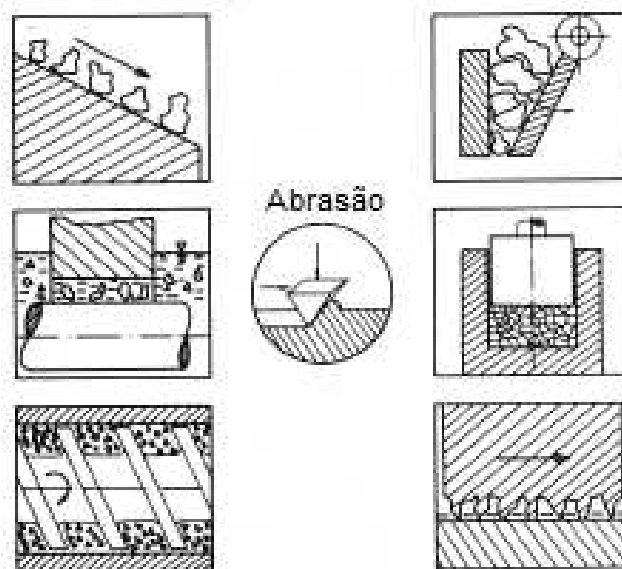


Figura 2.8 – Sistemas tribológicos sujeitos a desgaste abrasivo. (ZUM GAHR, 1987)

É sabido que o desgaste abrasivo a dois corpos é mais severo do que o desgaste a três corpos, sendo que, no segundo, predomina-se o rolamento do particulado livre, onde o mesmo passa 90% do tempo nesse movimento e apenas 10% deslizando, o que efetivamente causa o desgaste. Na figura abaixo (Figura 2.9), é possível observar o fenômeno.



Figura 2.9 – Desgaste abrasivo a dois e três corpos (ZUM GAHR, 1987)

O desgaste abrasivo é uma das formas mais severas de desgaste, provocando maior dano ou perda de material da superfície. Zum Gahr, 1998, ilustra em um de seus trabalhos (Figura 2.10) que a severidade do processo em comparação com o desgaste por deslizamento a seco através do coeficiente de desgaste, k , estimado segundo experiências práticas, pode ser substancialmente maior no desgaste abrasivo e/ou erosivo.

Modo de desgaste	Mecanismos de desgaste	Coef. de Desgaste $k = \frac{W_v \cdot H}{F_N \cdot s}$
		$10^{-7} \quad 10^{-6} \quad 10^{-5} \quad 10^{-4} \quad 10^{-3} \quad 10^{-2} \quad 10^{-1} \quad 10^0$
Deslizamento		Suave Severo
Abrasivo		3 corpos 2 corpos
Erosivo		

k : coeficiente de desgaste
 W_v : coeficiente adimensional do desgaste volumétrico
 H : dureza do material
 F_N : força normal
 s : distância de deslizamento

Figura 2.10 – Valores do coeficiente de desgaste (k) em função dos modos e mecanismos de desgaste (sem lubrificação). (ZUM GAHR, 1998)

No desgaste abrasivo, são envolvidos três mecanismos de ação da partícula abrasiva: o microcorte, a fadiga por microsulcamento e o microlascamento, no caso de a superfície sujeita ao desgaste ser frágil. Tais mecanismos são mostrados na Figura 2.11.

No microcorte, há formação de microcavacos decorrente da remoção de material na formação da ranhura, com pequena ou nenhuma deformação lateral de material. No microsulcamento, não ocorre remoção de material, apenas uma deformação plástica do material, sendo deformado e formando um sulco com consequente formação de acúmulos frontais e laterais do material movimentado. Neste caso não há perda de material, apenas um dano à superfície. Com a continuidade do deslizamento e a formação consecutiva de microsulcos, o material pode sofrer um processo de fadiga, formando trincas e, finalmente, a perda de material. O microlascamento ou trincamento é um mecanismo que só ocorre em materiais frágeis. Decorre na formação de grandes partículas de abrasão devido à formação e interação de fissuras, causadas pelas tensões impostas que superam as tensões críticas para a formação e propagação de trincas.

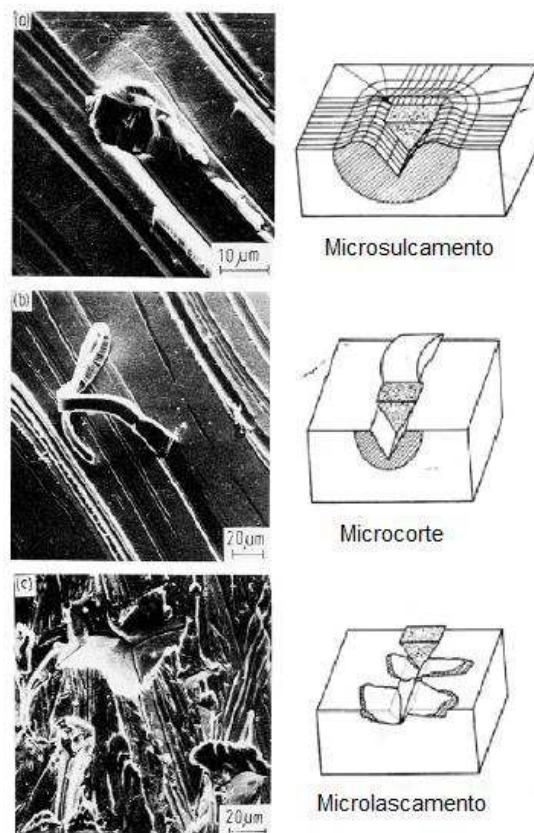


Figura 2.11 – Mecanismos de desgaste envolvidos no desgaste abrasivo. (ZUM GAHR, 1987)

Na prática, dificilmente ocorre situação onde haja um microcorte puro, ou seja, sem nenhuma deformação, ou um microsulcamento puro, onde ocorre somente deformação e nenhuma remoção de material. Na realidade, há um misto de microcorte e microsulcamento. Segundo Zum Gahr, 1987, a razão do volume de material removido como fragmentos de desgaste (microcavacos) pelo volume da ranhura pode ser descrito pelo fator f_{ab} , definido pela Equação 2.1:

$$f_{ab} = \frac{A_V - (A_1 + A_2)}{A_V} \quad (2.1)$$

Onde:

- f_{ab} é o fator de razão;
- A_V é a área da seção transversal da ranhura do desgaste;
- e $(A_1 + A_2)$ é a quantidade de material deformado para as laterais da ranhura por deformação plástica.

Este fator varia entre 0 (zero) e 1 (um), sendo que em um microsulcamento ideal o fator $f_{ab} = 0$ e num microcorte ideal, o fator $f_{ab} = 1$. A Figura 2.12 apresenta uma imagem de microscopia eletrônica de varredura de uma ranhura onde se observa que houve tanto remoção de material (microcorte), como deformação para as laterais (microsulcamento). Atualmente este fator pode ser mais facilmente determinado através de avaliação ótica ou mecânica da superfície, como por exemplo, a interferometria.

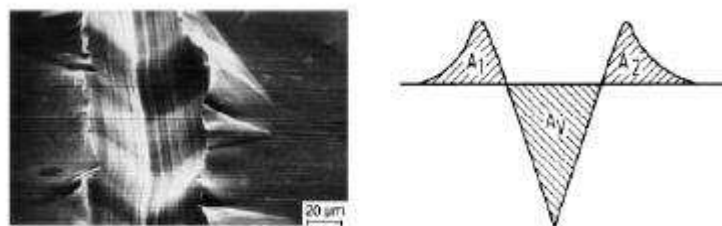


Figura 2.12 - Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura de uma ranhura em um aço austenítico e esquema da seção transversal de uma ranhura de desgaste. (ZUM GAHR, 1998)

Vários fatores podem influenciar nos micromecanismos de remoção de material durante o desgaste abrasivo, entre eles a dureza e tenacidade do material, a relação entre a dureza do abrasivo e do material, o tamanho do abrasivo, a força normal, a velocidade

relativa, entre outros. A Figura 2.13 apresenta os gráficos de tendências de perda de material (desgaste abrasivo), dependendo da dureza das partículas abrasivas e a dureza das superfícies submetidas ao desgaste.

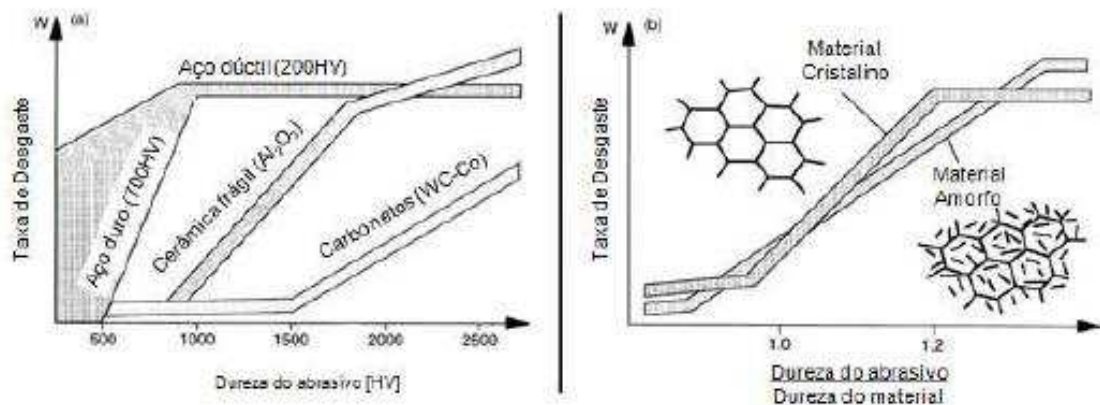


Figura 2.13 - Representação esquemática da perda de material por desgaste por partículas duras em função das propriedades do material e de parâmetros operacionais como (a) dureza da partícula abrasiva, (b) razão da dureza da partícula abrasiva e dureza do material de desgaste. (ZUN GAHR, 1998)

O desgaste pode aumentar até duas ordens de grandeza quando a dureza das partículas abrasivas é aumentada, Figura 2.13 (a). Esta variação de baixo para alto nível de desgaste depende da relação da dureza do abrasivo pela dureza do material. No caso de materiais monofásicos, a transição ocorre quando as durezas do abrasivo e do material são iguais (ZUM GAHR, 1998).

O desgaste abrasivo pode ser reduzido com a adição de particulados duros na matriz menos dura, que podem ser reforços ou outras fases, de modo a interromper os riscos (microcorte e microsulcamento), dependendo da distribuição e tamanho relativos dessas em relação ao abrasivo.

2.3.5 Métodos de ensaio para desgaste abrasivo

Os métodos de ensaio para desgaste abrasivo são chamados de testes tribológicos, os quais são realizados em tribômetros, sendo definido como um aparato de simulação de uma situação real de atrito/desgaste. Tais testes envolvem o estudo do atrito, desgaste e

lubrificação em um sistema aberto ou fechado, sendo que, os mais comuns estão representados na Figura 2.14. (ZUM GAHR, 1987)

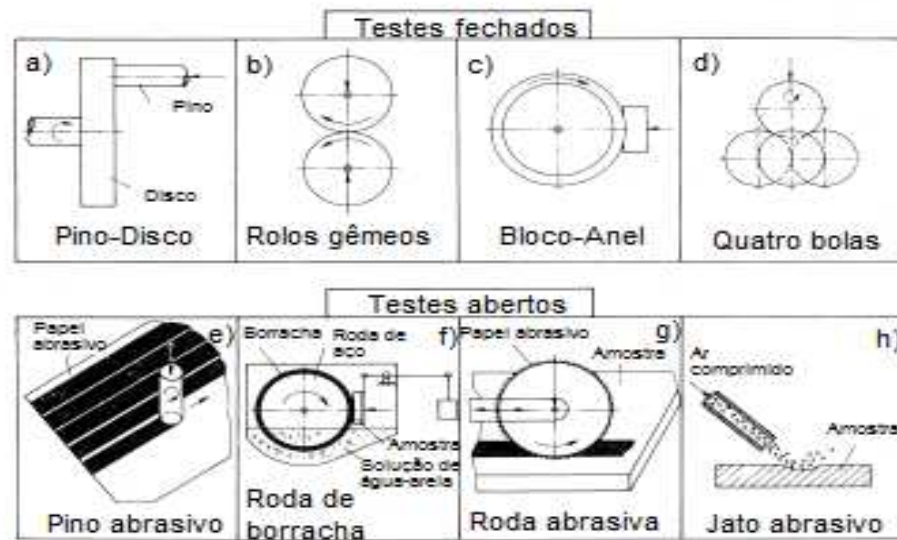


Figura 2.14 – Diferentes tipos de testes abrasivos

Podem-se destacar os testes abrasivos: pino sobre disco abrasivo (a); pino sobre tambor abrasivo (c); pino sobre placa abrasiva (e) e roda de borracha (f). Nos testes (a), (c) e (e) são mostradas variações de um método no qual um pino desliza contra uma superfície, plana ou não, na qual os abrasivos estão fixos. Neste caso, ocorre o desgaste abrasivo por deslizamento ou a dois corpos. Isto pode ser obtido através de uma lixa fixada sobre a superfície na qual o pino se movimenta. O tamanho do abrasivo pode ser facilmente alterado através da troca da lixa com granulometria diferente. Deve ser garantido que a superfície ensaiada do pino sempre deslize contra abrasivo 'novo', ou seja, o pino não deve deslizar duas vezes sobre o mesmo ponto.

Um dos testes mais comuns para ensaiar o desgaste abrasivo é mostrado na Figura 2.14 (f), porém, não necessariamente com a roda imersa em uma solução de água-areia, sendo esse uma variação do teste padrão. De acordo com a norma americana: *American Standards of Testing Materials, ASTM*, (ASTM G-65 – *Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*), a amostra ensaiada possui uma superfície plana, com a forma de uma placa ou um bloco que é pressionado com uma carga

constante contra a superfície de um disco recoberto de borracha, que ao girar desgasta a amostra, graças ao fluxo de abrasivo na interface.

Hutchings e Stevenson (STEVENSON, HUTCHINGS, 1996) propuseram uma variação em tal ensaio, onde a amostra é disposta num plano horizontal e a carga exerce uma força vertical aplicada diretamente sobre a amostra. A vantagem desta variação é a facilidade de fabricação e estabilidade da força aplicada à roda de borracha. Além disso, Hutchings utilizou outras durezas de borracha para avaliar o comportamento de outros polímeros no teste, o que será abordado no próximo tópico.

2.4 Influência da dureza da borracha no ensaio roda de borracha

Hutchings e Stevenson (STEVENSON, HUTCHINGS, 1996) realizaram em seu trabalho uma análise experimental sobre a influência da dureza da borracha no ensaio roda de borracha. Para isso, realizaram testes usando borrachas de poliuretano com faixas de dureza entre 46 e 84 IRHD, todas elas em atrito sobre amostras de aço 1020, para se ter uma mesma configuração de desgaste. Além disso, também foi ensaiada uma borracha de clorobutil, como é dito pela norma ASTM G-65.

Por esses ensaios, constatou-se que quanto maior a dureza da borracha, maior a taxa de desgaste, pois à medida que se aumenta a dureza, a taxa de material removido da mesma diminui e, conseqüentemente, desgasta mais a amostra. A taxa de desgaste foi evidenciada pelo aumento da curvatura da marca na amostra, uma vez que a superfície manteve-se igual antes e depois do ensaio em todas as borrachas. Por fim, a taxa de desgaste com a borracha de clorobutil (ASTM G-65) foi a maior deles, comparadas a todas as borrachas de poliuretano ensaiadas, mesmo que sua dureza encontra-se, aproximadamente, na média das de poliuretano. A rotação para todos os testes foram iguais, no valor aproximado de 500 rpm, validando-se assim o experimento.

O gráfico da Figura 2.15 abaixo nos mostra o resultado dos testes, plotando a dureza da borracha em função da taxa de desgaste.

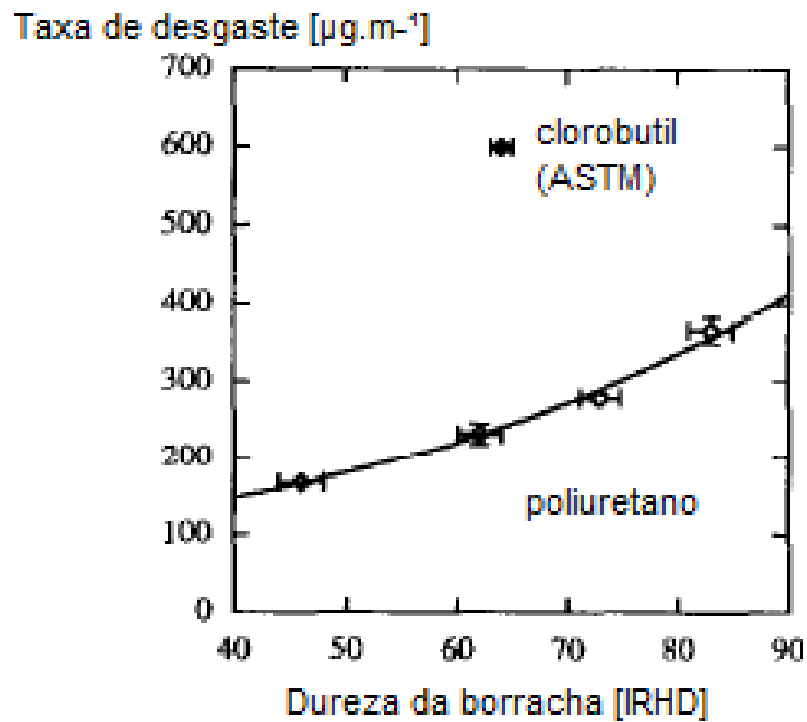


Figura 2.15 – O efeito da dureza da borracha na taxa de desgaste do aço 1020. O carregamento aplicado foi de 98,1 N, a velocidade de deslizamento de $0,6 \text{ m.s}^{-1}$ e a taxa de alimentação de abrasivo de $1,0 - 1,1 \text{ g.s}^{-1}$. O teste foi realizado num percurso de 359 m (500 revoluções da roda), aproximadamente. (STEVENSON, HUTCHINGS, 1996)

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

O projeto do novo abrasômetro roda de borracha partiu da ideia de modificação do aparato já existente no Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM-FEMEC/UFU). A configuração desse teste está descrita na norma ASTM G-65 (Figura 3.1). Nessa configuração, a amostra a ser ensaiada se encontra na posição vertical em contato com a roda de borracha e perpendicular ao braço de aplicação da força. A força normal é aplicada através de um peso morto que gera um momento que presciona o contato amostra-roda de borracha. De acordo com essa configuração, a força normal não varia durante o ensaio.

O fluxo de abrasivo é fornecido na interface amostra-roda de borracha pela ação da gravidade. Nesse caso, as partículas são conduzidas de um reservatório até a interface através de um tubo.

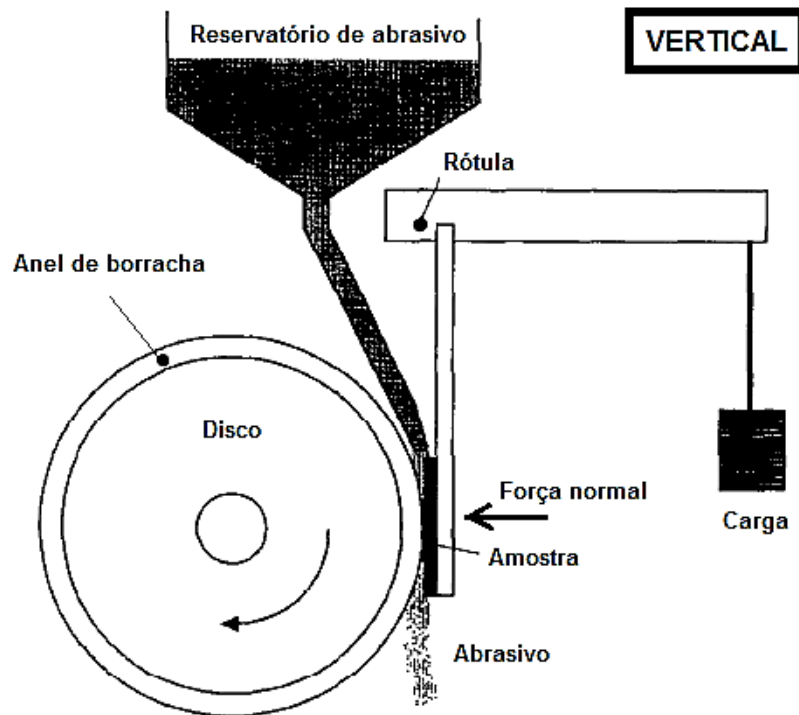


Figura 3.1 - Representação esquemática do equipamento roda de borracha/areia, com a amostra disposta na posição vertical, de acordo com a norma ASTM G-65.

O abrasômetro atualmente em operação no LTM encontra-se em divergência com a norma ASTM G-65, pois algumas dimensões importantes e especificações estão fora do indicado pela norma, tais como:

- Diâmetro e espessura da roda;
- Diâmetro, largura, espessura e material da borracha;
- Tipo de abrasivo.

Também foram identificados alguns problemas durante a execução dos ensaios, como se segue:

- Obstrução do tubo de alimentação do abrasivo, sendo que o bico dosador entope com frequência;
- Batimento da roda com a amostra, devido à falta de rigidez do aparato, que leva ao desbalanceamento do sistema durante o ensaio;

- Poluição do ambiente, uma vez que o abrasivo gera uma cortina de poeira ao ser usado e a região onde ocorre o ensaio é aberta em relação ao meio externo;

- Consumo excessivo de abrasivo, pois é sabido que cerca de 20%, apenas, do fluxo de abrasivo é usado efetivamente no ensaio, e todo o restante é descartado junto ao mesmo.

Dessa forma, o presente projeto foi proposto, visando solucionar os problemas acima listados através da adequação do tribômetro existente, e/ou possível construção de um novo mecanismo, seguindo às orientações da norma ASTM G-65. Outra configuração para o ensaio de desgaste abrasivo roda de borracha foi apresentada no trabalho de Stevenson & Hutchings, publicado em 1996, está mostrado na Figura 3.2. Nesse caso a amostra é posicionada horizontalmente permitindo a aplicação do carregamento na interface amostra-roda de borracha de acordo com uma força normal vertical gerada por peso morto.

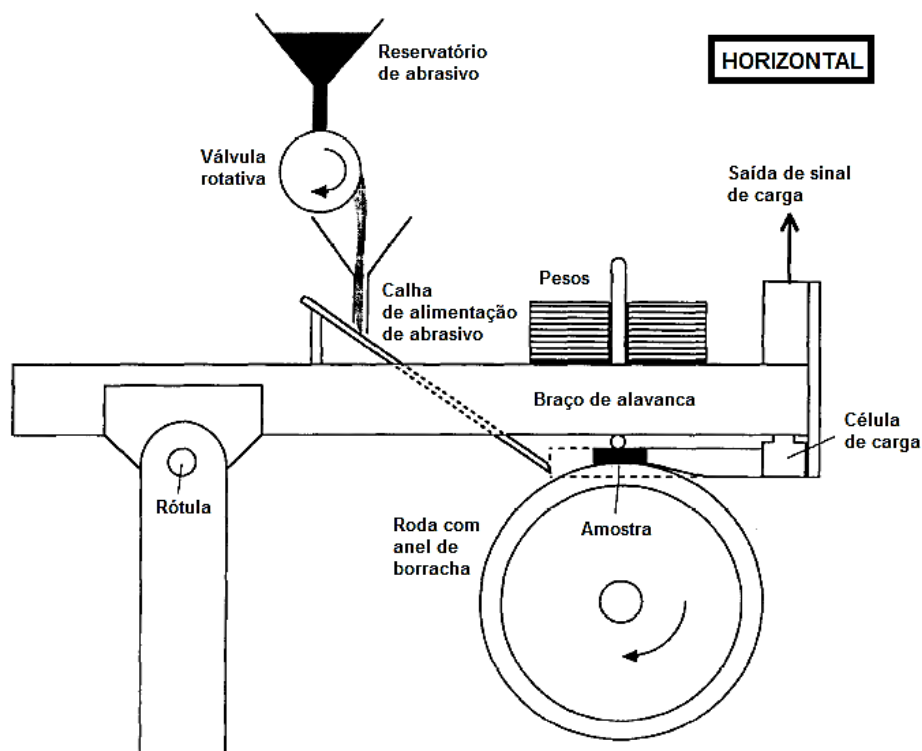


Figura 3.2 - Representação esquemática do equipamento roda de borracha/areia horizontal. (STEVENSON & HUTCHINGS, 1996)

A vantagem desta variação é a facilidade de fabricação e estabilidade da força aplicada à roda de borracha. Além disso, o uso da válvula dosadora em união com a calha de alimentação, substituindo o bico dosador e o tubo, é um dos pontos mais fortes dessa configuração pois o problema da obstrução de abrasivo é completamente resolvido.

3.1 Análise e desenho do abrasômetro atual

Nesta etapa foi realizado um estudo do abrasômetro atual existente no laboratório. Foram verificados os problemas, avaliou-se seu funcionamento e, então, mediram-se as dimensões do mesmo para que fosse feito seu desenho em CAD, para que uma comparação entre o projeto futuro e o aparato já existente pudesse ser efetuada.

Na Figura 3.4 podemos ver uma foto de como é o roda de borracha agora e na Figura 3.5 encontra-se seu desenho em CAD, nas dimensões coerentes.



Figura 3.4 – Foto do tribômetro roda de borracha atual. (PRÓPRIO AUTOR)



Figura 3.5 – Desenho em CAD do tribômetro roda de borracha atual. (PRÓPRIO AUTOR)

3.2 Elaboração de croquis do novo abrasômetro

Para que um desenho em CAD seja efetuado, é necessário antes um planejamento e um dimensionamento adequado do projeto. Na etapa de planejamento do referente trabalho, foram realizados croquis com base no que já se havia pronto, buscando uma adaptação do mesmo para se adequar ao projeto futuro. Porém, vários obstáculos foram encontrados, como por exemplo, a dimensão da cuba onde se é realizado o ensaio, o posicionamento do braço de alavanca e o espaço de bancada disponível para o aparato.

Assim, um novo projeto foi iniciado, tomando como base principal para o dimensionamento o braço de alavanca, sendo ele um dos fatores principais na mudança do mecanismo da forma vertical para a horizontal. A partir dessa análise, foram realizados croquis feitos à mão para ter-se uma noção das dimensões que cada componente do novo abrasômetro roda de borracha deve ter.

Como toda fase de planejamento, vários croquis foram feitos e descartados até que se chegou a um perfil aceitável. Depois disso, o dimensionamento real do aparato foi

realizado e, a partir dele, todo o restante do projeto fluiu intuitivamente, de acordo com a base teórica apresentada no capítulo anterior.

3.3 Dimensionamento do braço de alavanca

Para o braço de alavanca, foi escolhido um perfil quadrado de Metalon tipo caixão vazado, com seção de 40 x 40 mm e espessura 2,65 mm, disponível no mercado. Essa escolha foi feita dada a leveza e rigidez que essa configuração fornece. Já seu comprimento, foi definido iterativamente com base na norma ASTM G-65, a qual padroniza os ensaios do abrasômetro roda de borracha com um carregamento de 130N. Além disso, foi definido que a carga a gerar tal carregamento deveria estar em torno de 5 kgf, a fim de evitar o uso de grandes massas nos ensaios.

3.4 Projeto dos demais componentes

Como dito anteriormente, além da alteração estrutural do abrasômetro da forma como diz a norma ASTM G-65 (vertical), para como propõe Stevenson e Hutchings (horizontal), esse projeto visa solucionar problemas existentes no roda de borracha atual e obedecendo a norma ASTM G-65. Sucintamente, objetiva-se:

- Aumentar a rigidez e estabilidade no ensaio, de modo a eliminar batimentos que prejudicam o resultado;
- Eliminar a poluição do ambiente ocasionada pela poeira gerada durante o ensaio, graças ao fluxo de abrasivo;
- Evitar que haja obstrução no fluxo do abrasivo;
- Diminuir o consumo de abrasivo através do reaproveitamento do material que não foi usado efetivamente no ensaio.

Nesse trabalho, várias propostas para a solução dos problemas listados foram exaustivamente discutidas. Houve uma especial atenção para o custo do equipamento, que deve ser o menor possível.

CAPÍTULO IV

RESULTADO E DISCUSSÕES

O projeto e dimensionamento realizado nesse trabalho partem definição do comprimento do braço de alavanca e a massa que definirá a força normal aplicada sobre a amostra de 130N.

4.1 Dimensionamento do braço de alavanca e demais componentes

Para evitar o surgimento de uma componente de força adicional referente ao peso do próprio braço durante o carregamento, foi especificado que o contato entre a amostra e a roda de borracha deve ocorrer no centro de massa do braço. Assim, foram feitos cálculos iterativos, resultando em um comprimento ativo do braço em torno de 900 mm e a massa responsável pelo carregamento de aproximadamente 5 kg. O esquema mostrado na Figura 4.1 apresenta esse dimensionamento, o qual foi feito a partir das reações de apoio na rótula (ponto O).

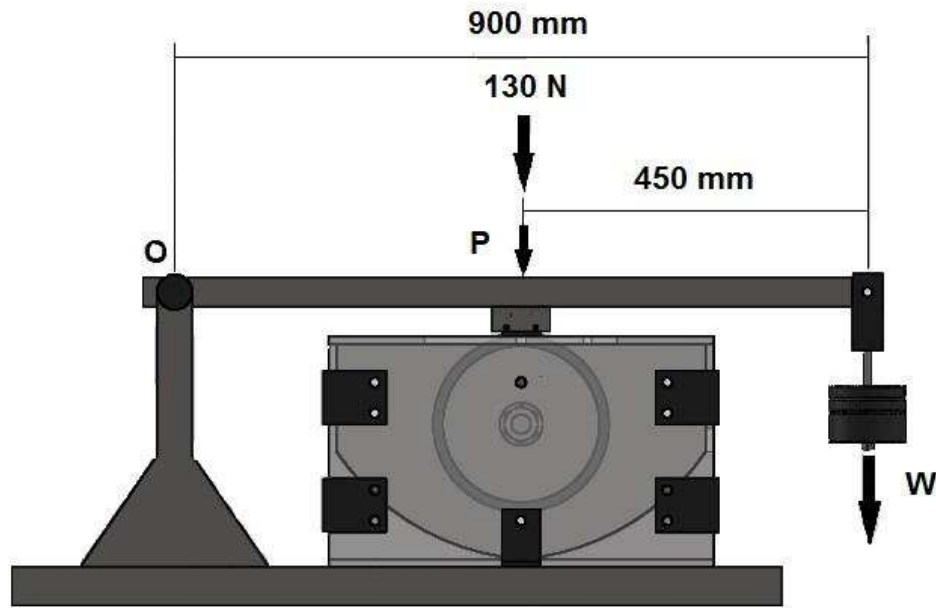


Figura 4.1 – Esquema de forças para o dimensionamento do braço de alavanca. (PRÓPRIO AUTOR)

Adotando-se o comprimento ativo do braço como 900 mm e posicionando o carregamento da amostra junto ao centro de massa da barra (P), podemos calcular o peso que deve ser aplicado na extremidade do braço (W) através das reações de apoio na rótula (ponto O), como mostra a Equação 4.1:

$$(W \times 900) + (P \times 450) = 130 \times 450 \quad (4.1)$$

Sendo que:

$$P = \rho_B \times V_B \times g \quad (4.2)$$

Onde:

- P é o peso da barra em Newtons [N];
- ρ_B é a massa específica do aço 1020 em quilogramas por metro cúbico [kg/m³];
- V_B é o volume da barra em metros cúbicos [m³];
- e g é a aceleração da gravidade em metros por segundo quadrado [m/s²], adotada aqui com 10 m/s².

Portanto, em (4.2):

$$P = 7900 \times [(0,9 \times 0,0381^2) - (0,9 \times 0,0318^2)] \times 10 \therefore P = 31,3[N]$$

Substituindo o valor de P em (4.1), temos:

$$(W \times 900) + (31,3 \times 450) = 130 \times 450 \therefore W = 49,35 [N] = 4,94 [kgf]$$

Dessa forma, a iteração se torna válida e a dimensão de 900 mm de comprimento ativo para o braço de alavanca é adotado, supondo uma massa de, aproximadamente, 5 kg, a qual gera, juntamente com o peso da própria barra, o carregamento total de 130 N sobre a interface amostra-roda de borracha. Para casos específicos de ensaios, pesos menores devem ser usados, usando com base a Equação 4.1 para serem estimados.

A partir do dimensionamento do braço de alavanca, o restante do equipamento foi então especificado, como, por exemplo, a rótula do braço, a cuba para o ensaio e a altura do reservatório de abrasivo.

4.1.1 Braço de alavanca e mancais de rolamento

O braço de alavanca foi dimensionado de modo que, a única massa a gerar um momento de força, seja a aplicada na extremidade oposta à articulação. Para isso, a área de contato amostra-roda de borracha foi posicionada junto ao centro de massa do próprio braço, o qual gera apenas uma força normal referente à sua massa, como visto na Figura 4.1. Além disso, a rótula do Ponto O é composta de mancais de rolamento, em ambos os lados, para garantir suavidade na articulação, mostrados pelas setas vermelhas na Figura 4.2.

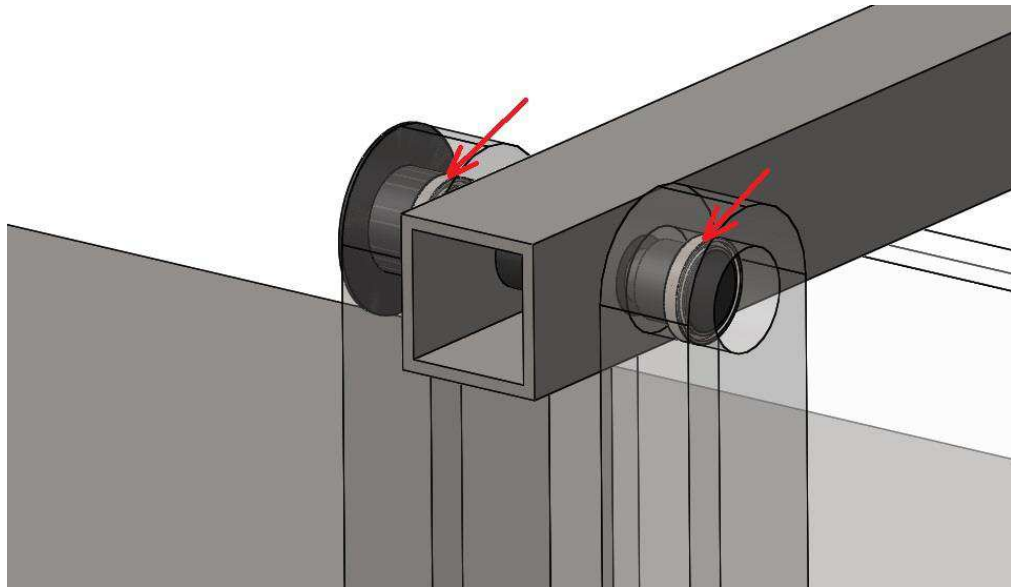


Figura 4.2 – Mancais de rolamento na rótula do braço de alavanca. (PRÓPRIO AUTOR)

Essa configuração garante a estabilidade do sistema, pois não haverá momentos adicionais referentes à estabilidade do ensaio. Contanto que não haja desbalanceamento no eixo de rotação da roda, tal mecanismo encontra-se rígido o suficiente e livre de batimentos e vibrações. Para garantir isso, o eixo é apoiado por um mancal de rolamentos duplo fixado na tampa traseira da cuba de ensaios.

4.1.2 Cubas de ensaios

Visando a criação de um ambiente, livre de influências externas ao ensaio e que também não afete o meio exterior com particulado, foi desenvolvida uma cuba de ensaios (Figura 4.3). Trata-se de uma caixa de acrílico, com exceção da tampa traseira na qual é fixado o mancal de rolamentos do eixo.

Dentro da cuba estão presentes a roda de borracha e a calha de captação de abrasivo usado, que será discutida no tópico 4.1.4. Por ser completamente fechada e estanque, esse projeto viabiliza a realização de ensaios submersos ou a secos. Além disso, o abrasivo que não passa pela interface poderá ser reaproveitado, pois esse cai no interior da cuba e escoar para um recipiente permitindo o reaproveitamento em um novo ensaio.

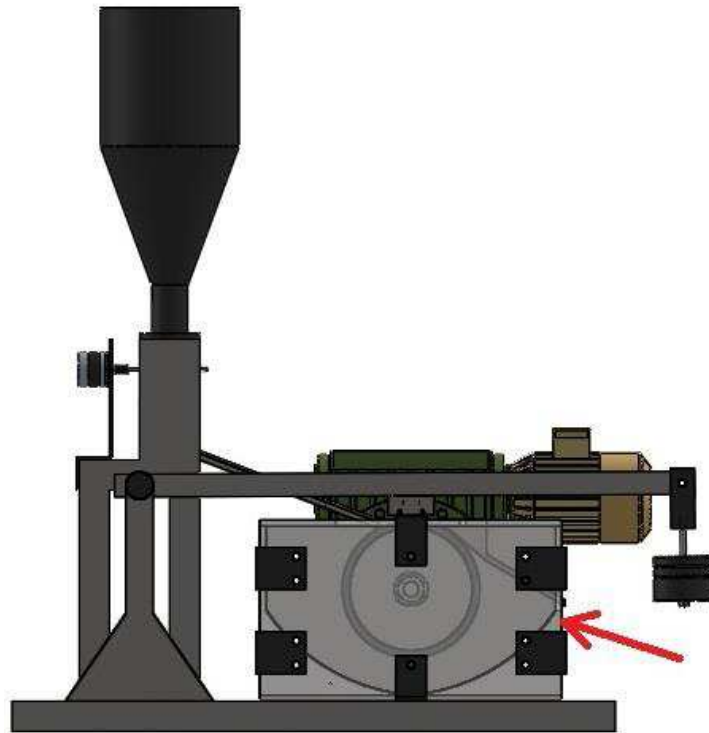


Figura 4.3 – Visão geral da cuba de ensaios montada no aparato. (PRÓPRIO AUTOR)

4.1.3 Válvula dosadora e calha de alimentação de abrasivo

Históricos de ensaios nos mostram que o bico dosador, proposto e padronizado pela norma ASTM G-65, em conjunto com o tubo que leva o abrasivo do reservatório ao bico, são suscetíveis à obstrução. Isso se dá ao fato de o rasgo de saída de abrasivo, o qual tem por finalidade controlar a vazão que entra na interface amostra-roda de borracha, não trabalha como deveria. Isso ocorre pois os particulados nem sempre são de mesma granulometria e o fluxo entre o reservatório e o bico é maior que na saída. Dessa forma, não só o bico, mas também o tubo entupam, e assim atrapalhando o andamento do ensaio. Stevenson e Hutchings (1996) propõem o uso de uma válvula dosadora (Figura 4.4) em conjunto com uma calha (Figura 4.5), a qual funciona apenas como uma rampa que direciona o abrasivo para a interface. A válvula tem por finalidade controlar a vazão de material, validando, assim, a padronização. Ou seja, as funções tanto do bico quanto do tubo foram devidamente supridas na substituição.

Essa estratégia de controle da vazão do abrasivo também resolve o problema da obstrução do tubo e bico dosador. A válvula dosadora é ligada a um servo motor de

regulagem eletrônica, permitindo o controle preciso do fluxo de partículas. Estas partículas caem por gravidade na calha de alimentação que direciona o material abrasivo para a interface do ensaio.

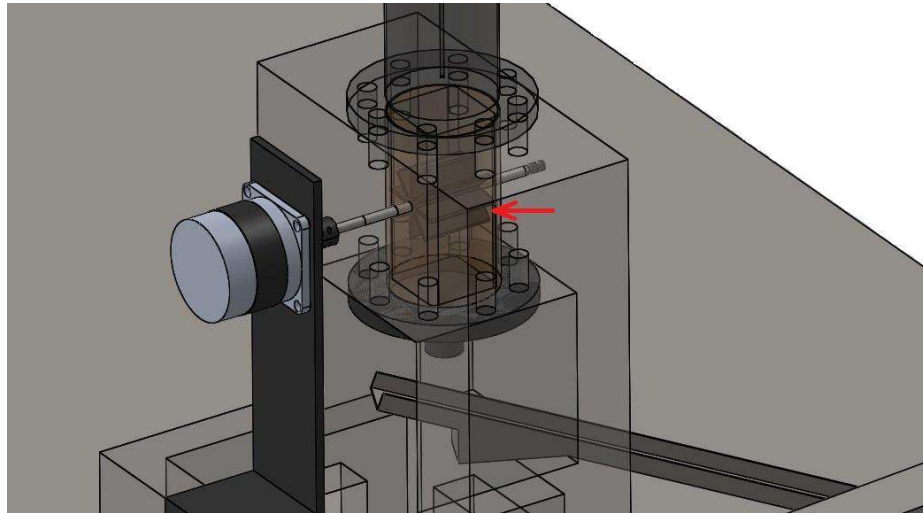


Figura 4.4 – Detalhe da válvula dosadora ligada ao servo-motor. (PRÓPRIO AUTOR)

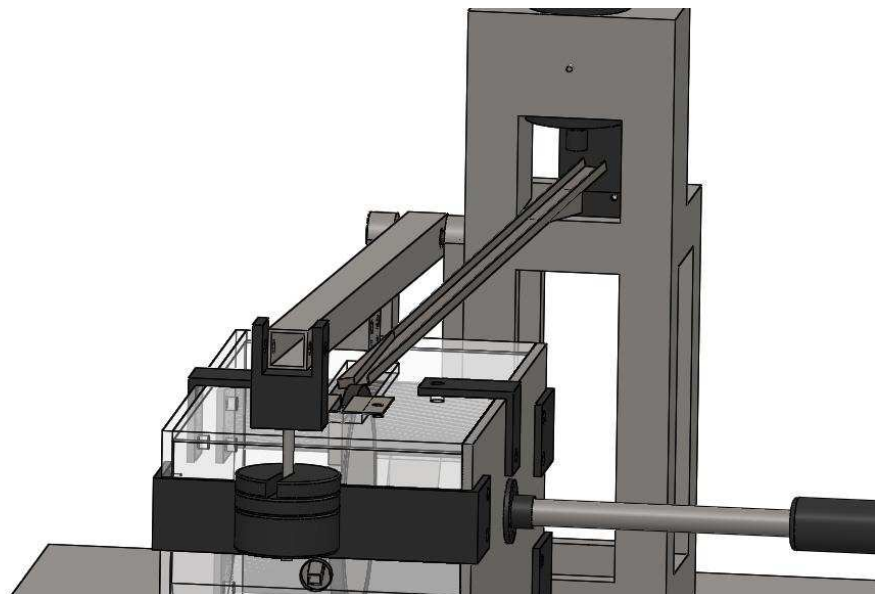


Figura 4.5 – Detalhe da calha de alimentação. (PRÓPRIO AUTOR)

4.1.4 Calha de captação de abrasivo

O presente projeto tem um apelo econômico forte, pois a configuração atual do teste roda de borracha leva a perda de abrasivo devido à falta de controle sobre as partículas que efetivamente passam pela interface. Nesse caso grande quantidade de abrasivo é desperdiçada, pois somente 20% do fluxo passam pela interface de desgaste, sendo imediatamente misturados ao restante do fluxo de abrasivo que não participa efetivamente do processo abrasivo. Nesse caso 80% do abrasivo são descartados indevidamente.

A calha de captação de abrasivo (Figura 4.6) foi projetada para ser colocada logo na saída do abrasivo da interface amostra-roda de borracha. Essa calha direciona o fluxo tangencial sobre a roda para um recipiente externo a cuba. Essa estratégia diminui significativamente o custo do ensaio.

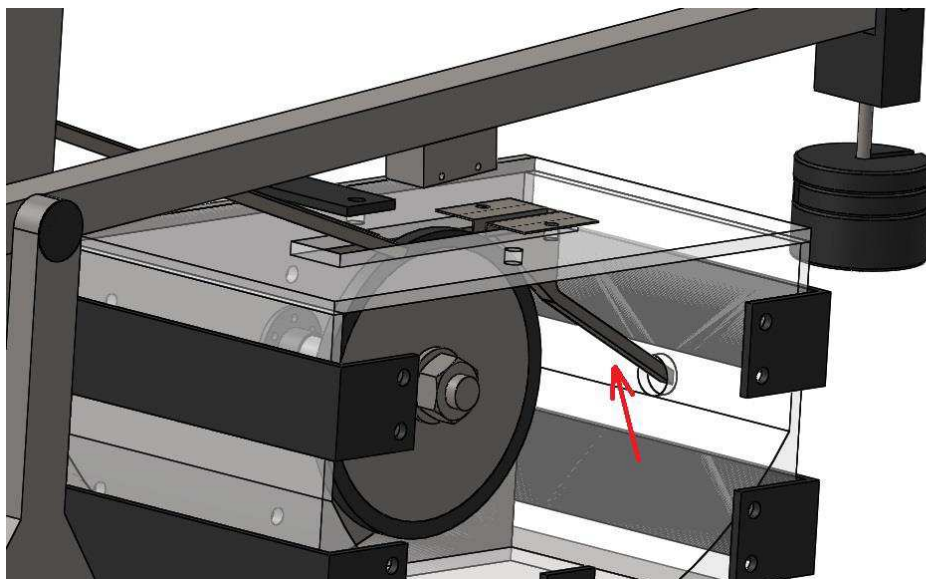


Figura 4.6 – Detalhe da calha de captação. (PRÓPRIO AUTOR)

Além disso, o uso da calha de captação de abrasivo oferece a oportunidade de se analisar a influência do desgaste sobre o próprio particulado, seja quanto sua fragmentação ou mudança de forma. Tal estudo é até então impossível, dado ao fato de que todo o abrasivo é misturado e descartado ao final do ensaio.

4.1.5 Outros componentes

Os demais componentes do aparato foram projetados para melhor a padronização estabelecida pela norma ASTM G-65.

Na Figura 4.7 abaixo, podemos ver o projeto completo.

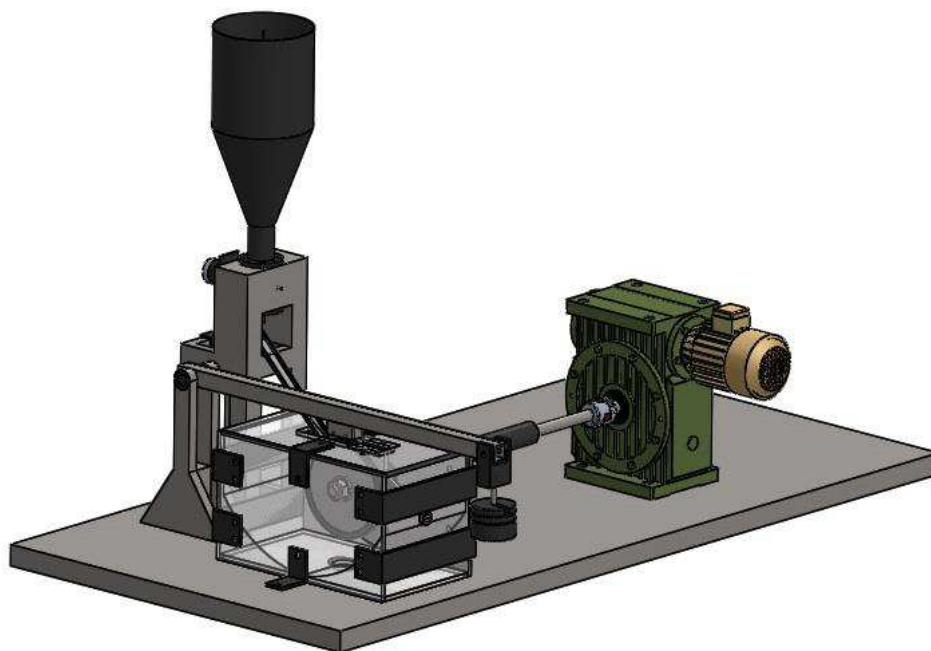


Figura 4.7 – Visão geral do desenho do projeto. (PRÓPRIO AUTOR)

O Anexo I apresenta todos os elementos da adaptação proposta na forma de desenho de fabricação.

4.2 Sistema de polimerização da borracha diretamente na roda

Uma questão importante abordada nesse projeto é que a norma ASTM G-65 estabelece a utilização de um tipo de borracha que não existe mais comercialmente, a borracha de clorobutil. Nesse caso é necessário definir uma nova borracha que apresente as mesmas características, como a dureza e resistência. Em termos de projeto, apresentam-

se duas possibilidades: especificar uma borracha que atenda a tais requisitos, ou sintetizar uma nova.

Normalmente a forma mais econômica de adquirir a borracha no mercado é na forma de lençol com a espessura do disco abrasivo. Esse lençol pode ser cortado em tiras de forma que cada tira possa ser colada no disco, sendo posteriormente usinada até o formato especificado na norma. Esse é o método normalmente utilizado em laboratório e o principal problema é a ocorrência de uma emenda que pode interferir no resultado do ensaio.

A segunda possibilidade foi descrita no artigo de Stevenson & Hutchings (1996) que propõe a polimerização da borracha diretamente na roda, de modo a obter uma borracha homogênea (sem emenda), bem aderida e rígida em relação à própria roda. Esse método permite a polimerização de diversos tipos de borracha. Nesse caso, o disco utilizado no ensaio seria parte do molde onde ocorre a polimerização, como apresentado na Figura 4.8. A borracha é introduzida no molde a 70°C e o espaço entre a roda e o molde possui as dimensões finais da borracha. Após essa etapa, a borracha é curada em um forno durante 8 horas a uma temperatura de 135°C, seguido de um resfriamento natural do molde até a temperatura ambiente. Feito isso, a roda é então removida usando-se furos roscados para parafusos no fundo do molde.

Foi projetado um molde, em que pode ser montada a roda, que possui as dimensões padronizadas pela norma ASTM G-65. A configuração desse molde está apresentada na Figura 4.8.

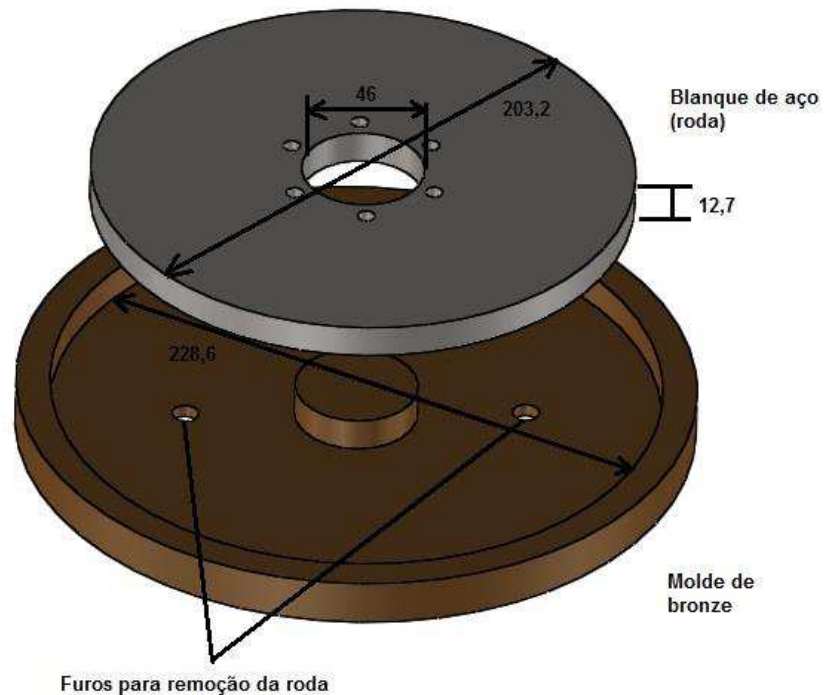


Figura 4.8 – Dimensões do molde de bronze usado para a polimerização da borracha diretamente na roda de aço prevista para o equipamento. (PRÓPRIO AUTOR)

Dentre as vantagens apresentadas pelo método de polimerização da borracha diretamente na roda, destacam-se:

- A ausência de emendas nas borrachas, o que aumenta sua rigidez;
- A homogeneidade da borracha, sendo que ela é inteiramente polimerizada na roda;
- A possibilidade de produzir e testar borrachas de diferentes composições e durezas;
- A diminuição de gastos com borrachas, sendo que não haveria mais desperdício de pedaços insuficientes.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Esse trabalho apresenta o projeto para o estudo da modernização do abrasômetro tipo roda de borracha do LTM-UFU. A configuração proposta apresenta vantagens interessantes para a execução dos ensaios, tais como:

1- A cuba projetada favorece um ensaio mais limpo que permite a observação e não prejudica o ambiente ao seu redor pois a cuba de ensaios é fechada em relação ao meio externo. Dessa forma, praticamente toda a cortina de poeira gerada pelo ensaio ficaria confinada no interior da cuba;

2- Diminuição de erros existentes na aplicação da força e desbalanceamento do eixo, levando a melhoria dos resultados obtidos. Isso graças à centralização do peso inerente do braço de alavanca na interface amostra-roda de borracha, como mostrado na Figura 4.1, e ao uso de mancais de rolamento na articulação do braço e no apoio do eixo de rotação com a cuba;

3- Menor gasto com abrasivo, pois a calha de captação de particulado usado vai nos oferecer uma grande economia, podendo-se reaproveitar o material que cai no fundo da cuba. Essa separação é extremamente benéfica para o ensaio, pois irá baratear o mesmo

com o reaproveitamento da maioria do abrasivo usado no ensaio precedente sem prejuízo científico nos resultados;

4- A possibilidade de se estudar o abrasivo usado, avaliando-se assim, não só a severidade do desgaste na amostra, como também a fragmentação ou mudança de forma das partículas que passaram pela interface. Esse ponto foi um dos maiores motivadores desse projeto, sendo que o conhecimento do desgaste no próprio particulado é até então escasso, dado a impossibilidade de separar a partícula usada da não usada na configuração atual do ensaio. O desenvolvimento da calha de captação soluciona esse obstáculo;

5- O uso da válvula rotativa dosadora e da calha de alimentação controlam tanto a vazão quanto o direcionamento do fluxo abrasivo. Na configuração atual, o uso do bico dosador funciona como um regulador de vazão que em conjunto com o tubo de alimentação direcionam o fluxo, conforme descrito na norma ASTM G-65. Assim, ao se usar o conjunto válvula dosadora-calha de alimentação, conseguimos um controle mais exato da vazão e a ausência do problema de bloqueio no fluxo.

A partir das observações listadas acima se conclui que a adaptação e modernização do abrasômetro tipo roda de borracha para a utilização de amostras na horizontal conforme projetado será de grande valia para o laboratório pois resolve problemas importantes que ocorrem nesse teste e permite novas análises que até então não são possíveis. Espere-se que essas melhorias se convertam em avanços nas pesquisas desenvolvidas no âmbito do LTM-FEMEC-UFU.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM G65-04, (Reapproved 2010), **Standard test method for measuring abrasion using the dry sand / rubber wheel apparatus**. Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA;

HUTCHINGS, I. M. e STEVENSON A. N. J. **Development of the dry sand/rubber wheel abrasion test**. Vol. 195, pp. 232-240, 1996;

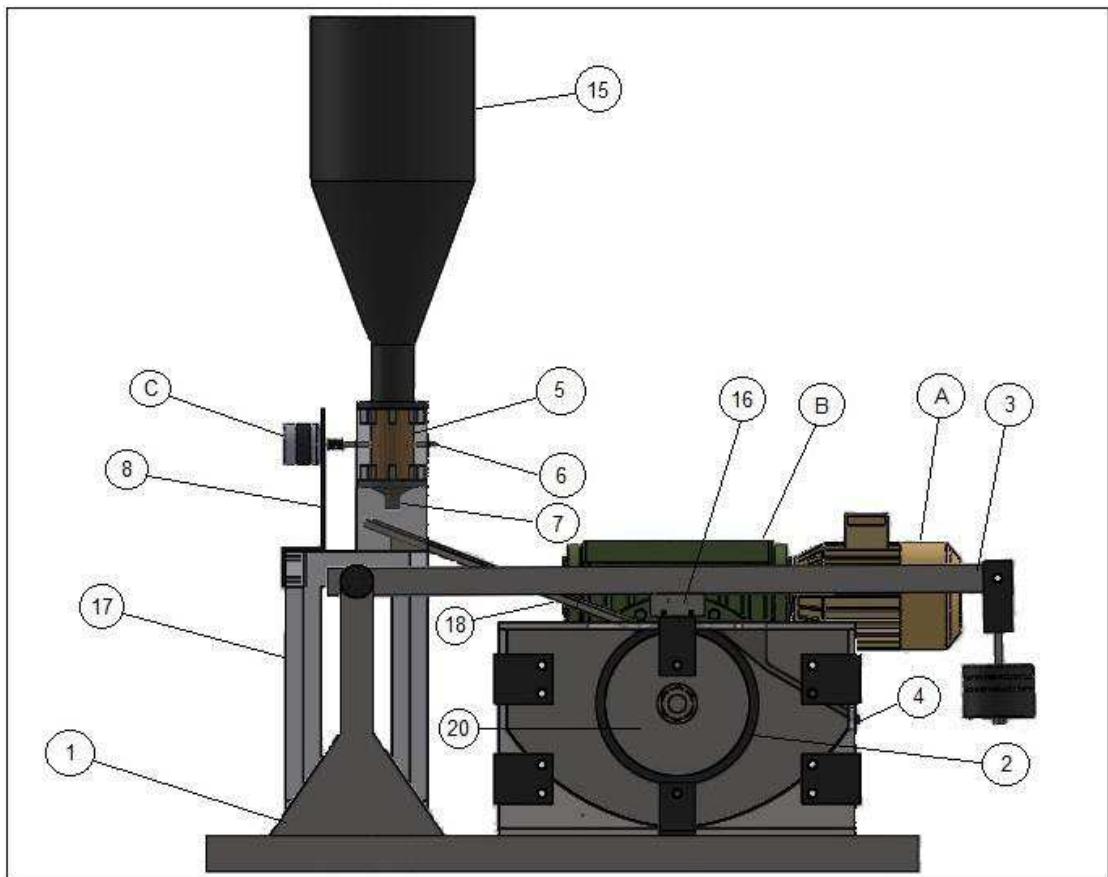
HUTCHINGS, I. M. Tribology: **Friction and Wear of Engineering Materials**. London, British Library, ISBN 0340 56184X, 1992;

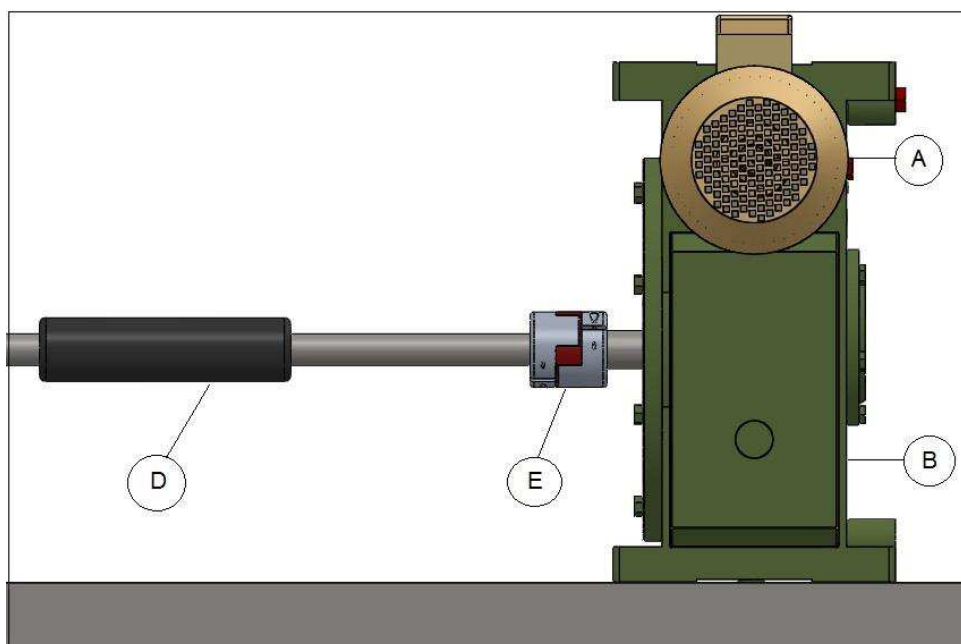
RABINOWICZ, E. et al. **Friction and wear of materials**. 2a.Ed. New York: John Wiley & Sons, 1995;

ZUM GAHR, K.H., **Microestructure and wear of materials**. Amsterdam: Elsevier, 1987;

ZUM GAHR, K. H., **Wear by hard harticles**, Tribology International Vol. 31, No. 10, pp. 587–596, 1998;

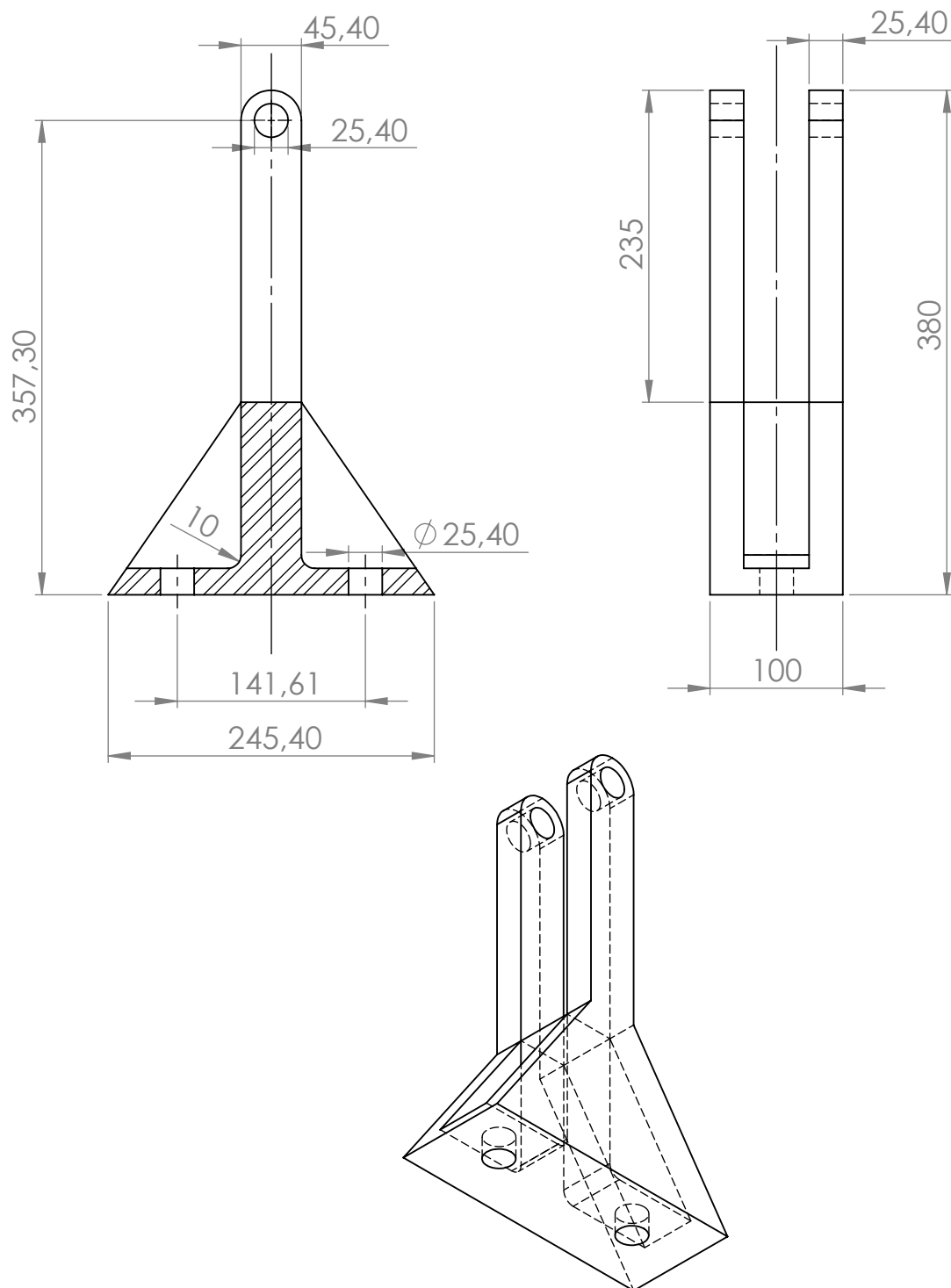
ANEXO I



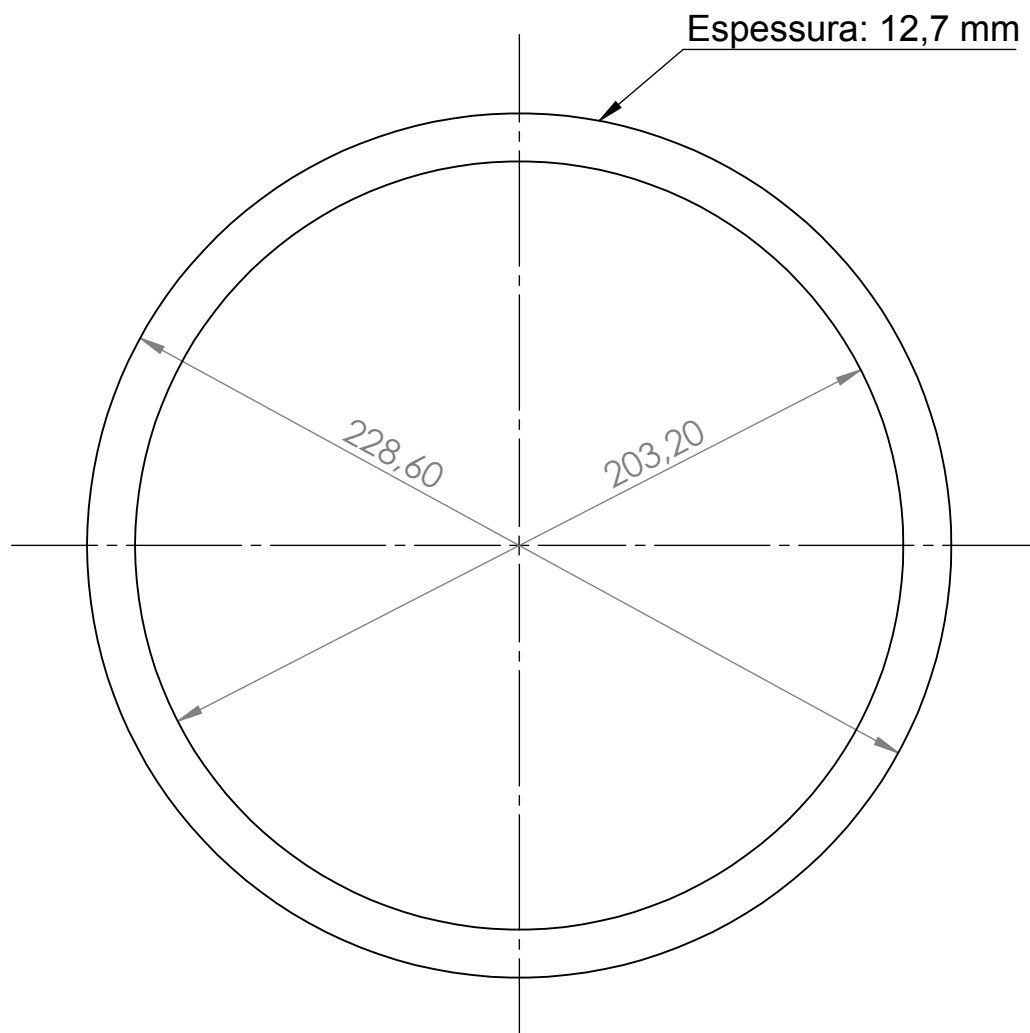


Nº	NOME	QNTD.	MATERIAL
1	Articulação do braço	1	Aço 1020
2	Borracha	1	Clorobutil/poliuretano
3	Braço de alavanca	1	Metalon
4	Calha de captação de abrasivo	1	Chapa de alumínio (1mm)
5	Camisa da válvula dosadora	1	Liga de bronze
6	Eixo da válvula dosadora	1	Aço 1020
7	Afunilador	1	FoFo cinza
8	Engate do servomotor	1	Aço 1020
9	Tampa frontal (cuba)	1	Acrílico
10	Tampa inferior (cuba)	1	Acrílico
11	Tampa lateral direita (cuba)	1	Acrílico
12	Tampa lateral esquerda (cuba)	1	Acrílico
13	Tampa superior (cuba)	1	Acrílico
14	Tampa traseira (cuba)	1	Aço 1020
15	Reservatório de abrasivo	1	Chapa de aço (2mm)
16	Porta-amostra	1	Aço 1020
17	Suporte do reservatório de abrasivo	1	Aço 1020
18	Calha de alimentação de abrasivo	1	Chapa de alumínio (1mm)
19	Válvula rotativa dosadora	1	Liga de aço endurecido
20	Roda	1	Aço 1020
A	Motor Elétrico	1	-
B	Redutor	1	-
C	Servomotor	1	-
D	Torquímetro	1	-
E	Acoplamento flexível	1	-

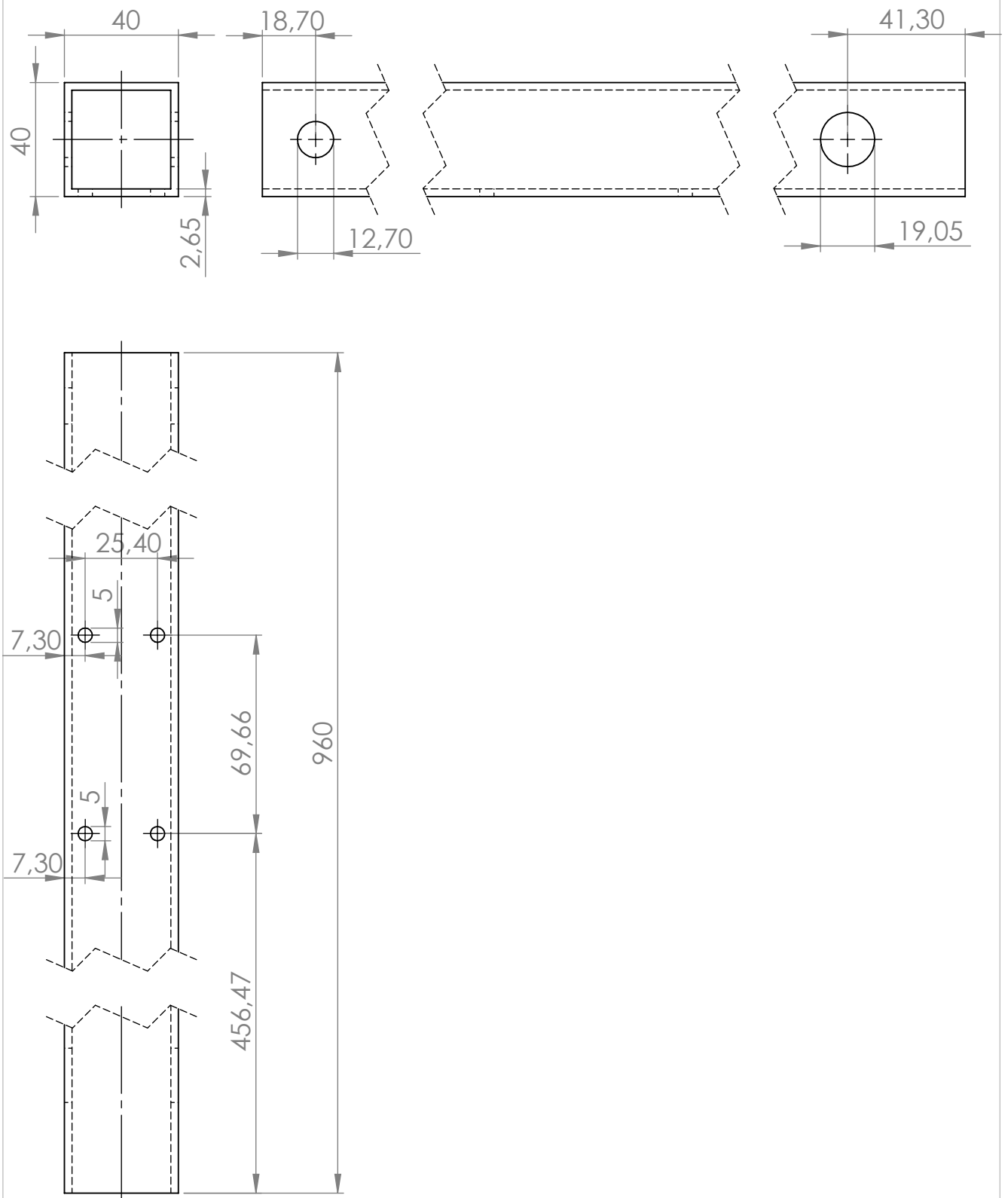
A seguir, encontra-se os desenhos em 2D dos componentes acima, com exceções de A, B, C, D e E.



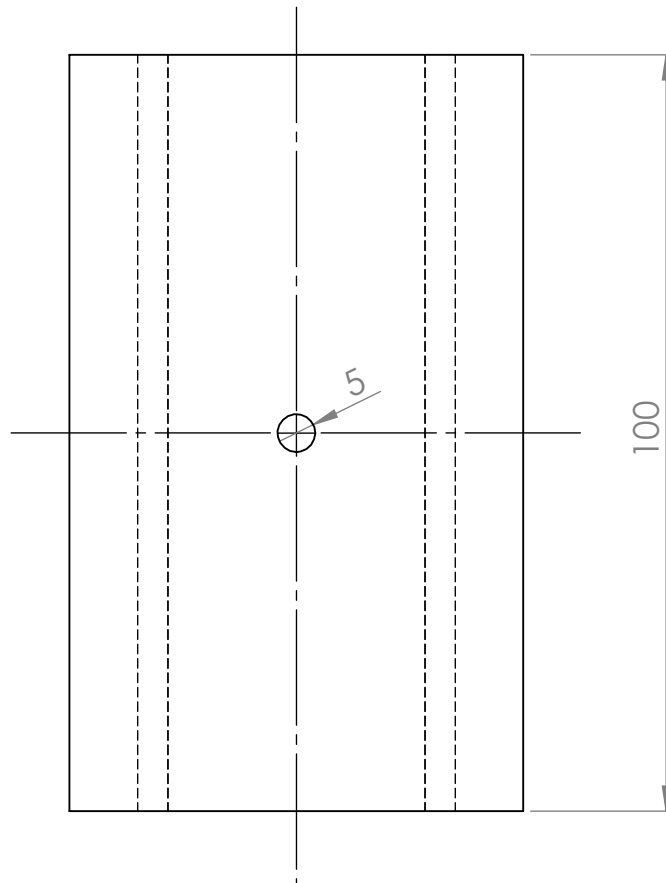
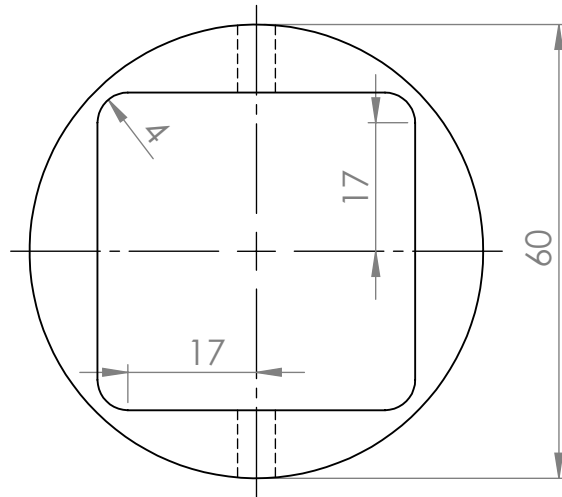
PROJETO Nº.: 1	NOME: Articulação do braço	QUANT.: 1
UFU	NOME: Alexandre Henrique Alves Rodrigues	Nº.: 11111EMC041
ESCALA: 1:5	TÍTULO: Projeto Roda de Borracha (TCC)	DATA:
MATERIAL: Aço 1020		DES. Nº.: 01/20



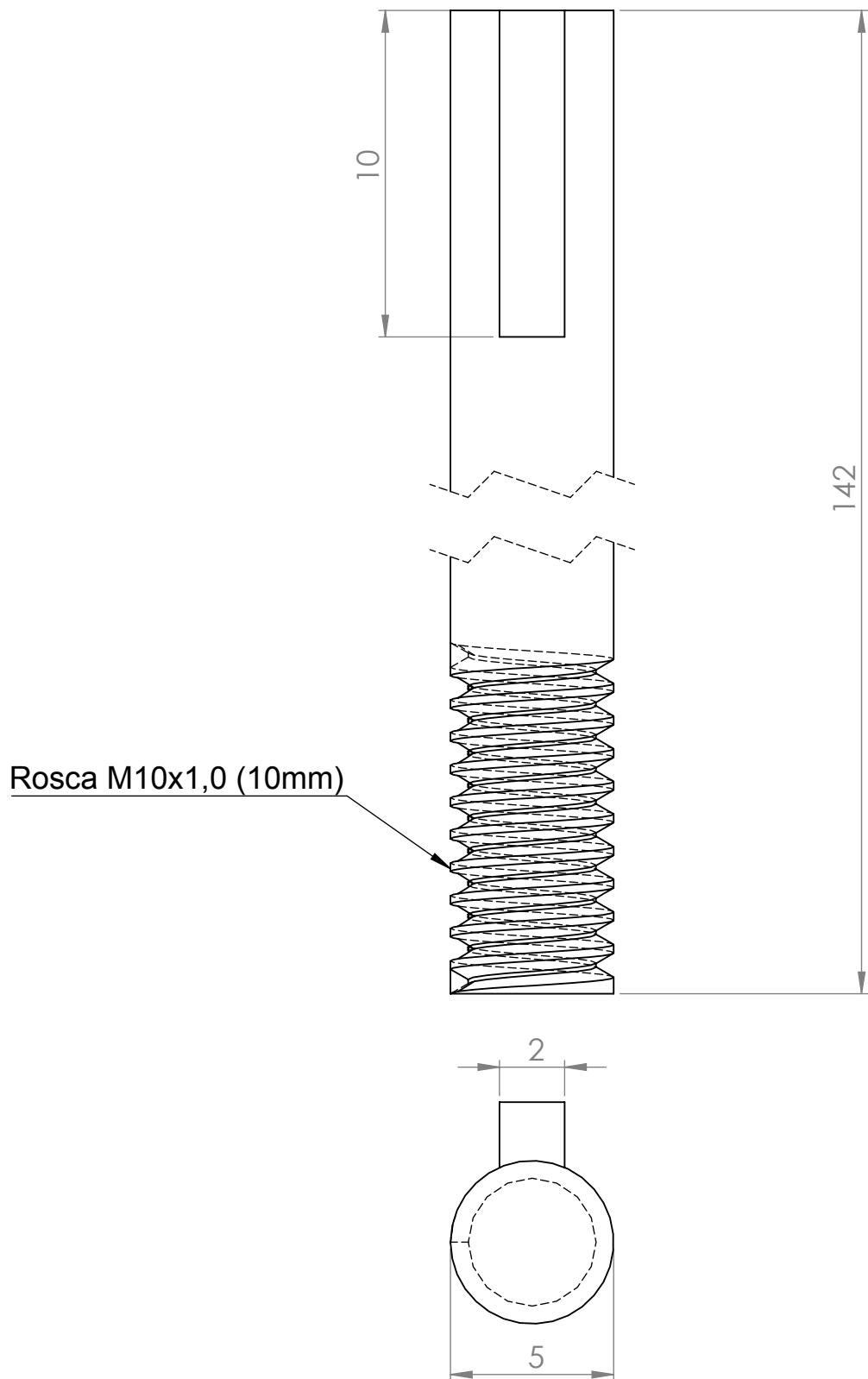
PROJETO Nº.: 1	NOME: Borracha	QUANT.: 1
UFU	NOME: Alexandre Henrique Alves Rodrigues	Nº.: 11111EMC041
ESCALA: 1:2	TÍTULO: Projeto Roda de Borracha (TCC)	DATA:
MATERIAL: Clorobutil		DES. Nº.: 02/20



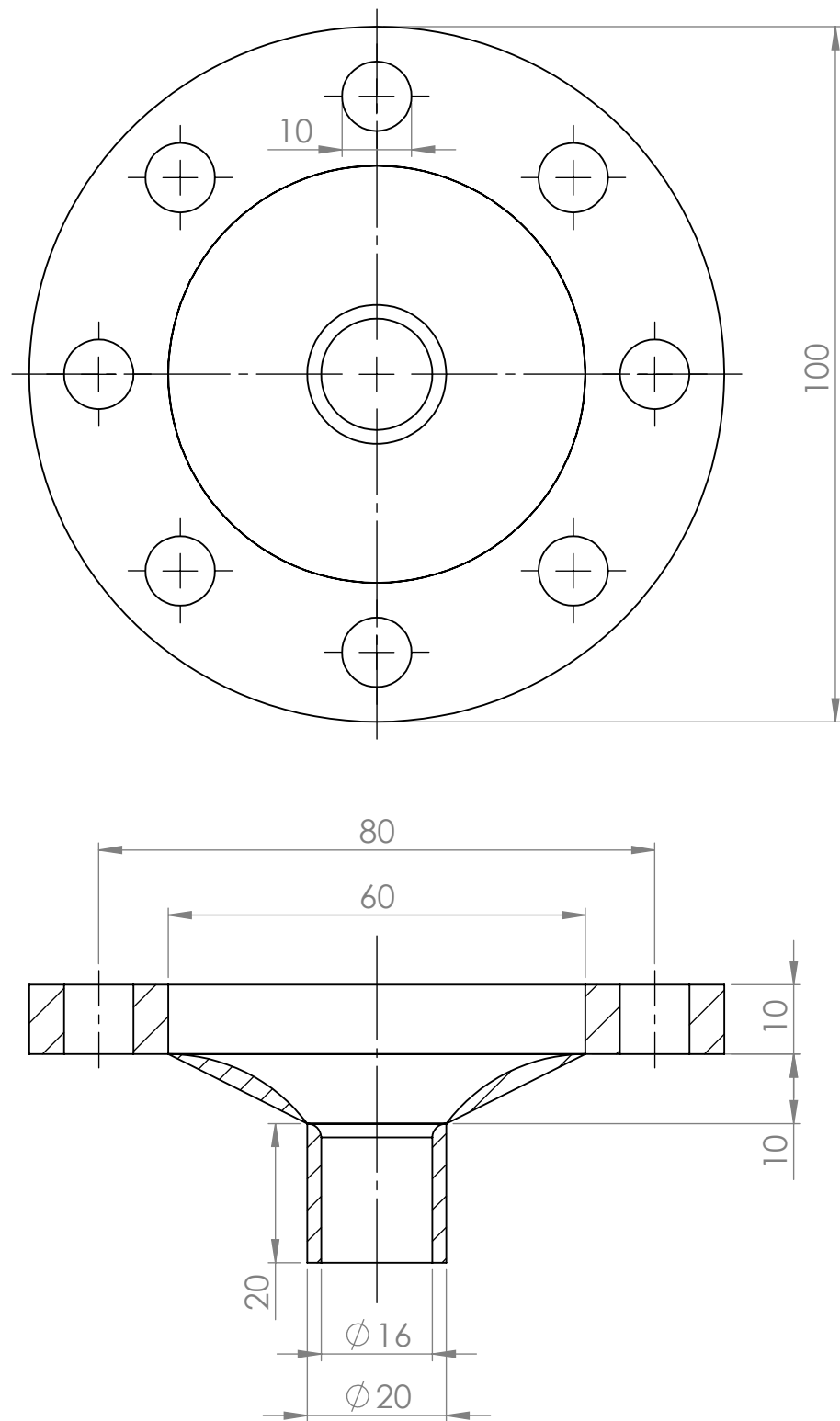
PROJETO Nº.: 1	NOME: Braço de alavanca	QUANT.: 1
UFU	NOME: Alexandre Henrique Alves Rodrigues	Nº.: 11111EMC041
ESCALA: 1:2	TÍTULO: Projeto Roda de Borracha (TCC)	DATA:
MATERIAL: Metalon		DES. Nº.: 03/20



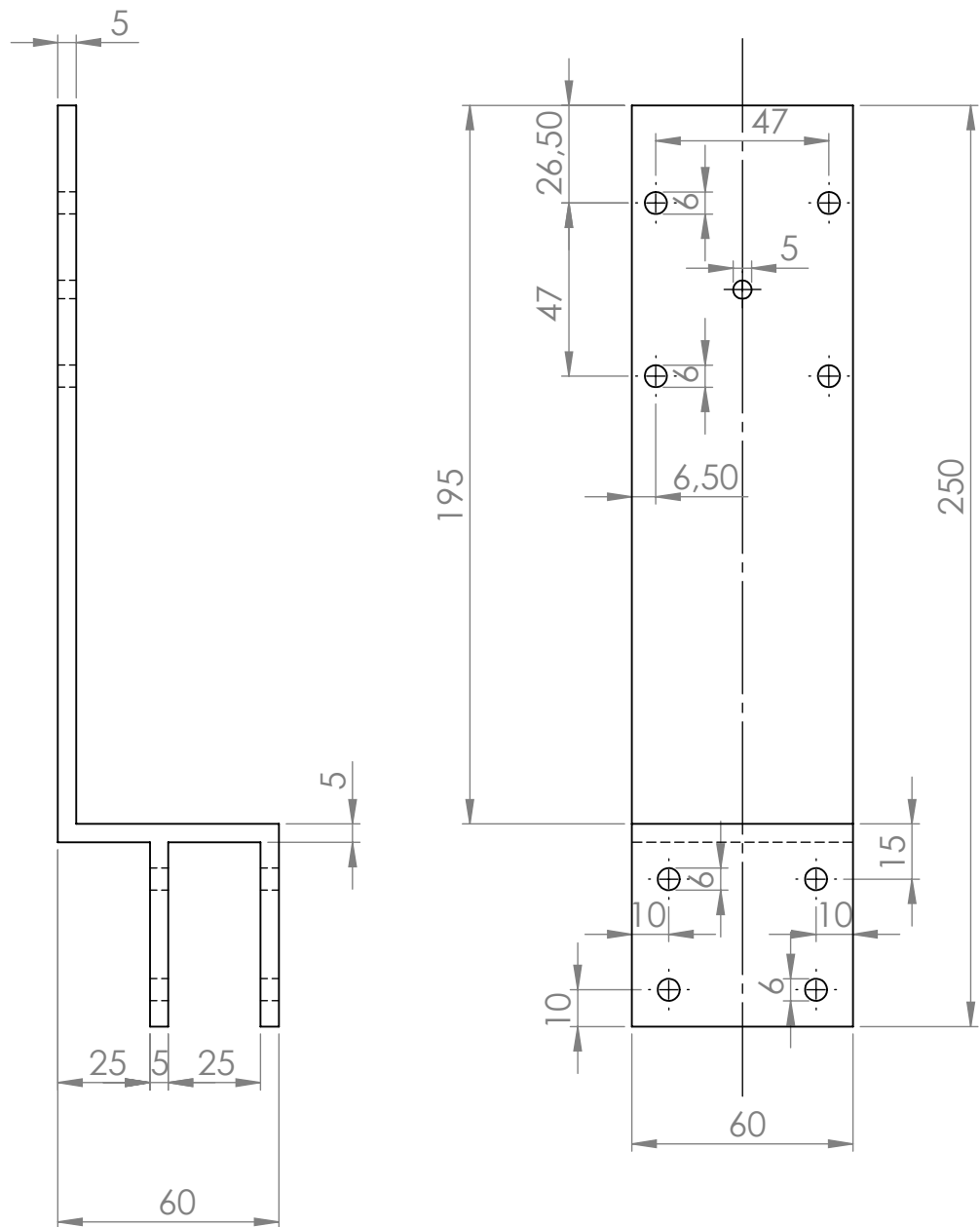
PROJETO Nº.: 1	NOME: Camisa da válvula dosadora	QUANT.: 1
UFU	NOME: Alexandre Henrique Alves Rodrigues	Nº.: 11111EMC041
ESCALA: 1:1	TÍTULO: Projeto Roda de Borracha (TCC)	DATA:
MATERIAL: Bronze		DES. Nº.: 05/20



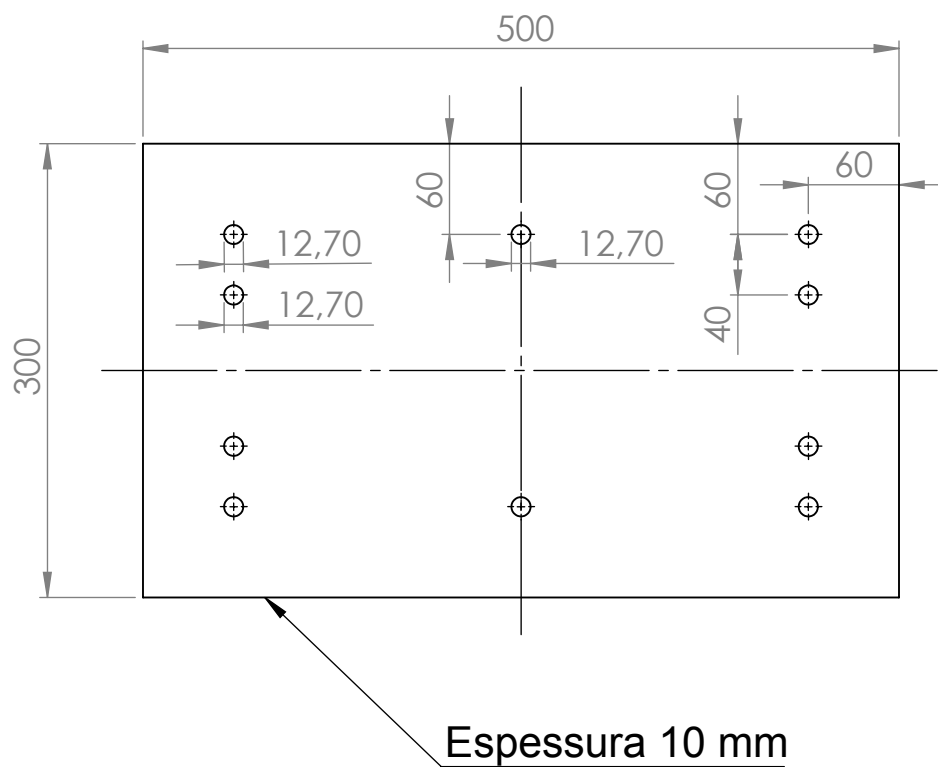
PROJETO Nº.: 1	NOME: Eixo da válvula dosadora	QUANT.: 1
UFU	NOME: Alexandre Henrique Alves Rodrigues	Nº.: 11111EMC041
ESCALA: 5:1	TÍTULO: Projeto Roda de Borracha (TCC)	DATA:
MATERIAL: Aço 1020		DES. Nº.: 06/20



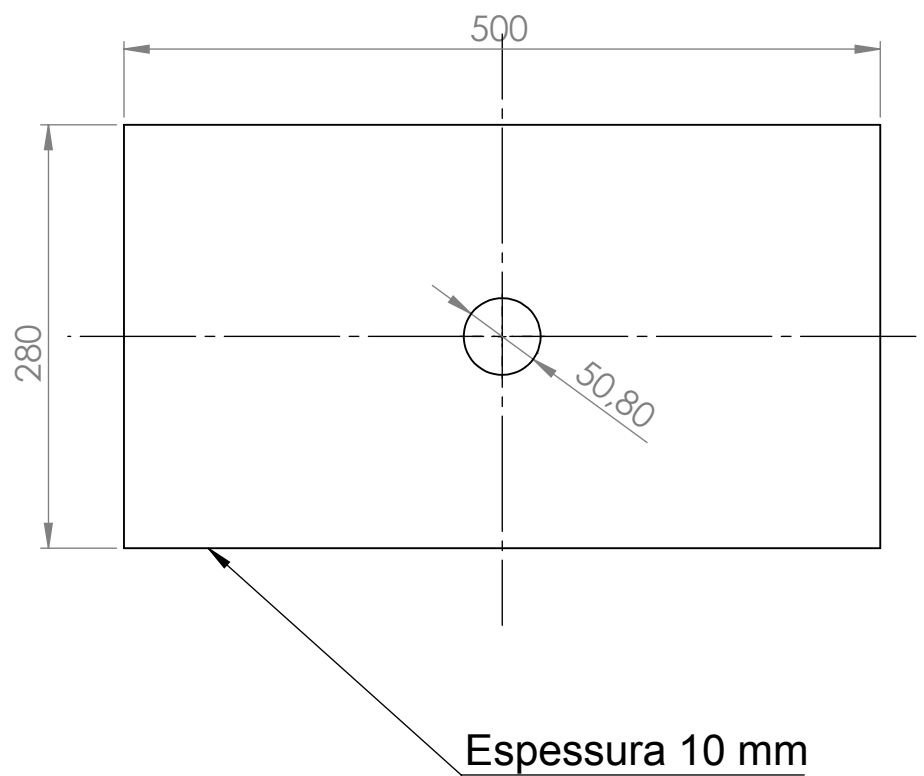
PROJETO Nº.: 1	NOME: Afunilador	QUANT.: 1
UFU	NOME: Alexandre Henrique Alves Rodrigues	Nº.: 11111EMC041
ESCALA: 1:1	TÍTULO: Projeto Roda de Borracha (TCC)	DATA:
MATERIAL: FoFo		DES. Nº.: 07/20



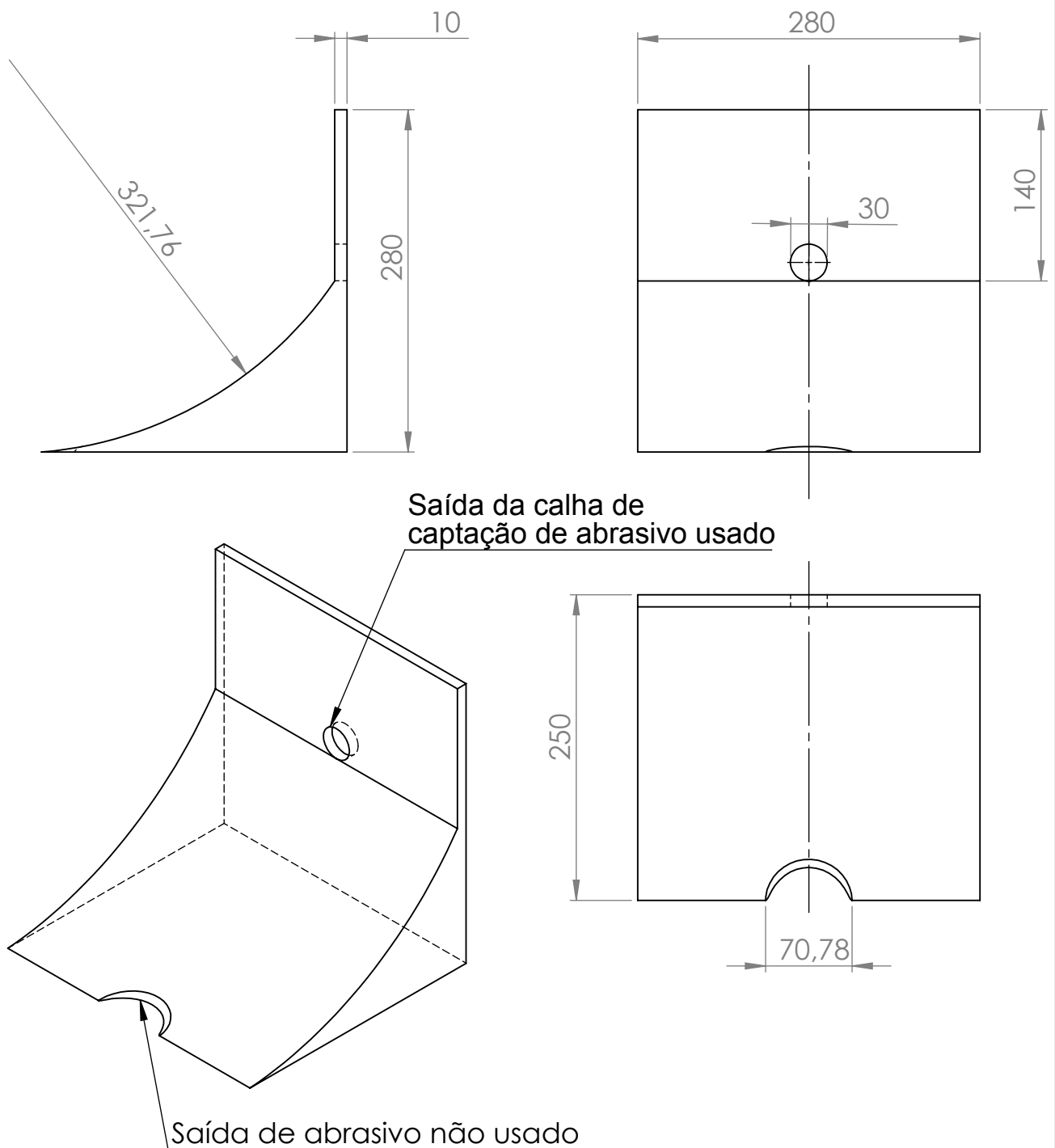
PROJETO Nº.: 1	NOME: Engate do servomotor	QUANT.: 1
UFU	NOME: Alexandre Henrique Alves Rodrigues	Nº.: 11111EMC041
ESCALA: 1:2	TÍTULO: Projeto Roda de Borracha (TCC)	DATA:
MATERIAL: Aço 1020		DES. Nº.: 08/20



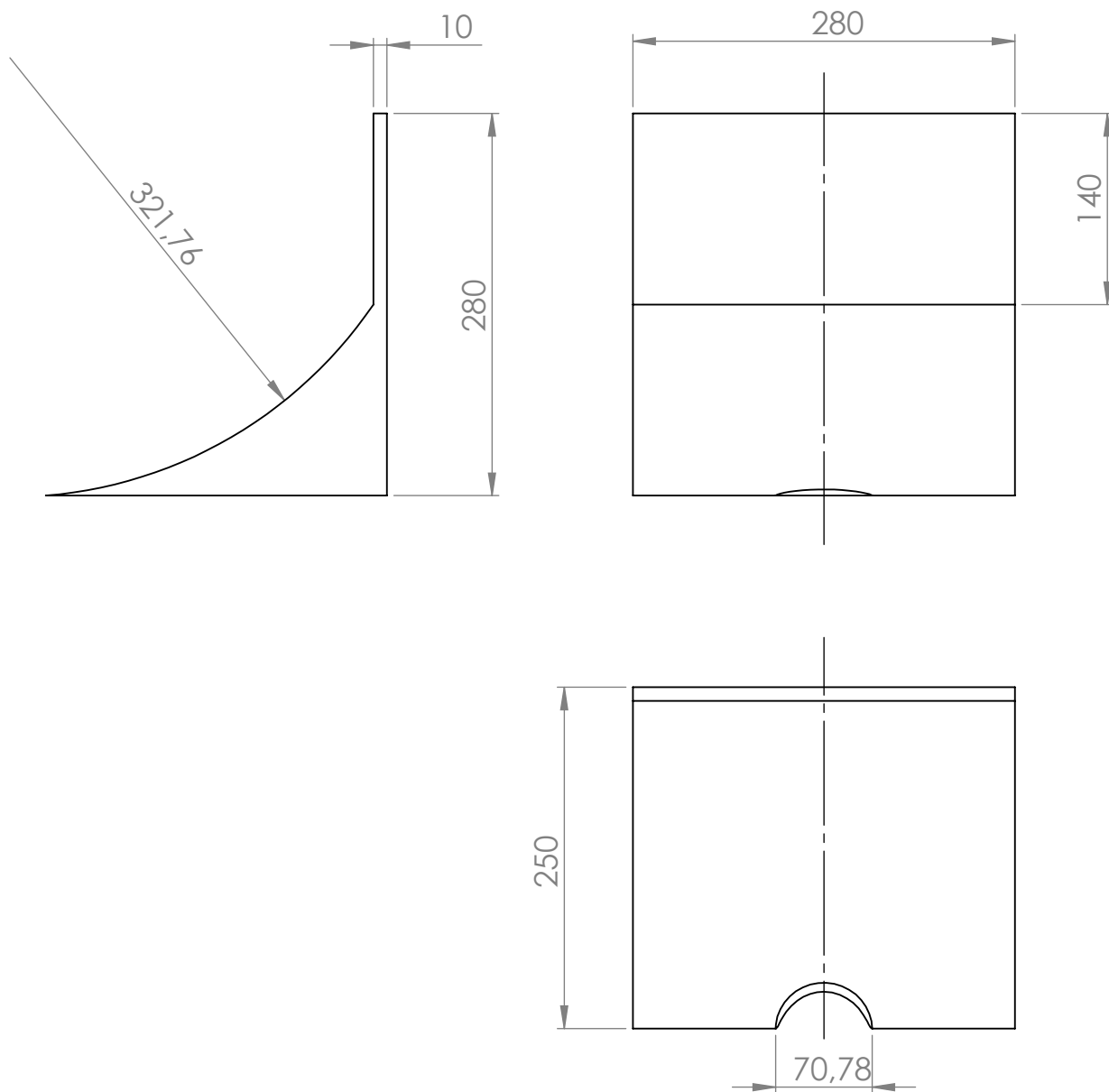
PROJETO Nº.: 1	NOME: Tampa frontal	QUANT.: 1
UFU	NOME: Alexandre Henrique Alves Rodrigues	Nº.: 11111EMC041
ESCALA: 1:5	TÍTULO: Projeto Roda de Borracha (TCC)	DATA:
MATERIAL: Acrílico		DES. Nº.: 09/20



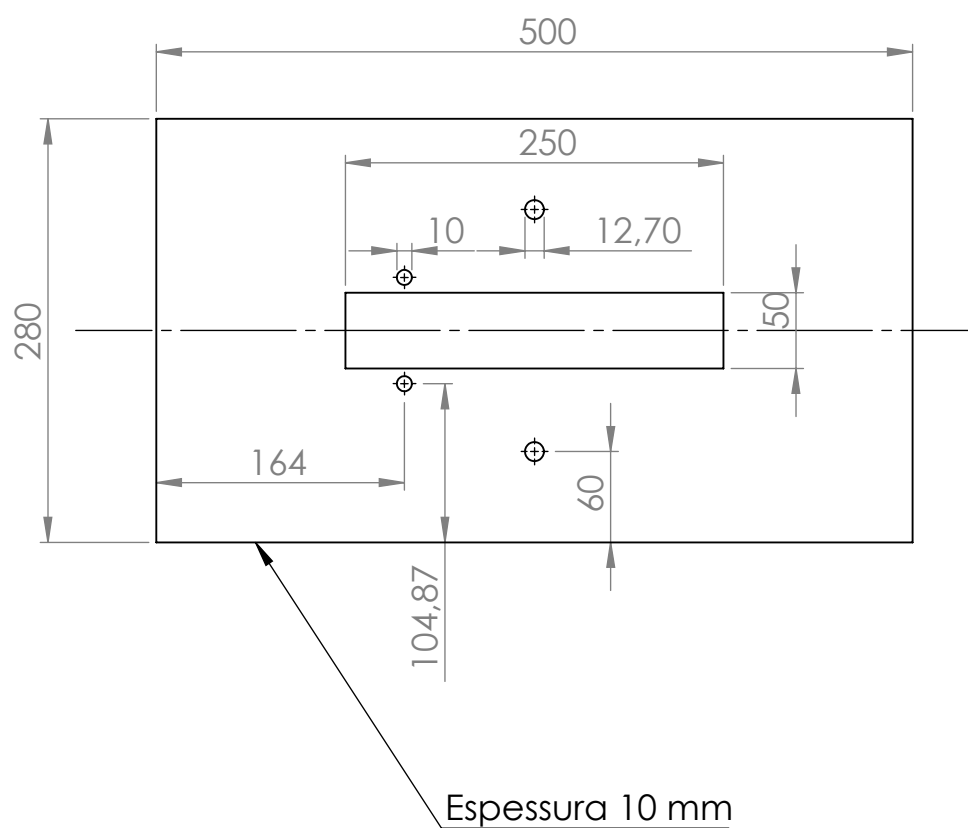
PROJETO Nº.: 1	NOME: Tampa inferior	QUANT.: 1
UFU	NOME: Alexandre Henrique Alves Rodrigues	Nº.: 11111EMC041
ESCALA: 1:5	TÍTULO: Projeto Roda de Borracha (TCC)	DATA:
MATERIAL: Acrílico		DES. Nº.: 10/20



PROJETO Nº.: 1	NOME: Tampa lateral direita	QUANT.: 1
UFU	NOME: Alexandre Henrique Alves Rodrigues	Nº.: 11111EMC041
ESCALA: 1:5	TÍTULO: Projeto Roda de Borracha (TCC)	DATA:
MATERIAL: Acrílico		DES. Nº.: 11/20



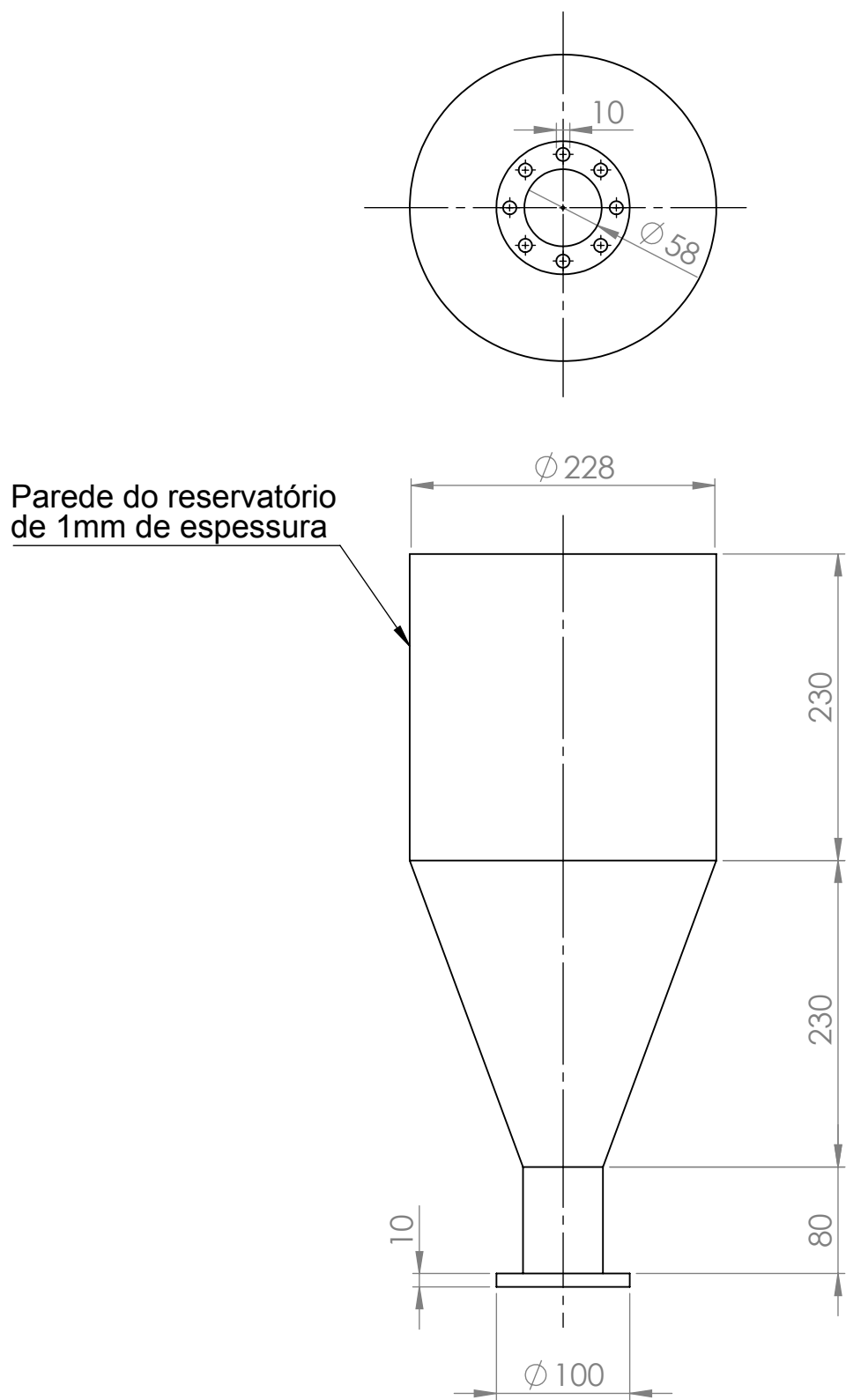
PROJETO Nº.: 1	NOME: Tampa lateral esquerda	QUANT.: 1
UFU	NOME: Alexandre Henrique Alves Rodrigues	Nº.: 11111EMC041
ESCALA: 1:5	TÍTULO: Projeto Roda de Borracha (TCC)	DATA:
MATERIAL: Acrílico		DES. Nº.: 12/20



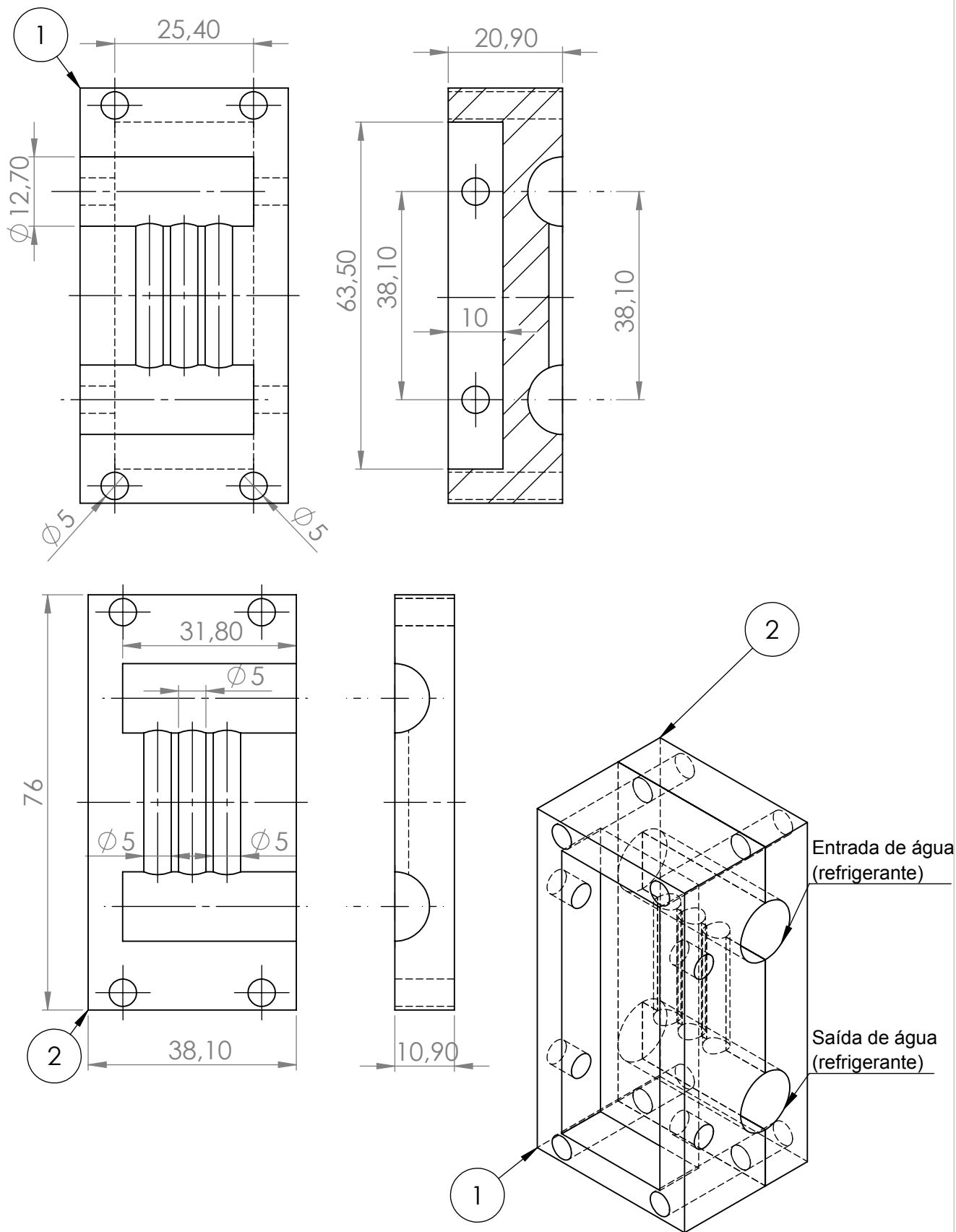
PROJETO Nº.: 1	NOME: Tampa superior	QUANT.: 1
UFU	NOME: Alexandre Henrique Alves Rodrigues	Nº.: 11111EMC041
ESCALA: 1:5	TÍTULO: Projeto Roda de Borracha (TCC)	DATA:
MATERIAL: Acrílico		DES. Nº.: 13/20



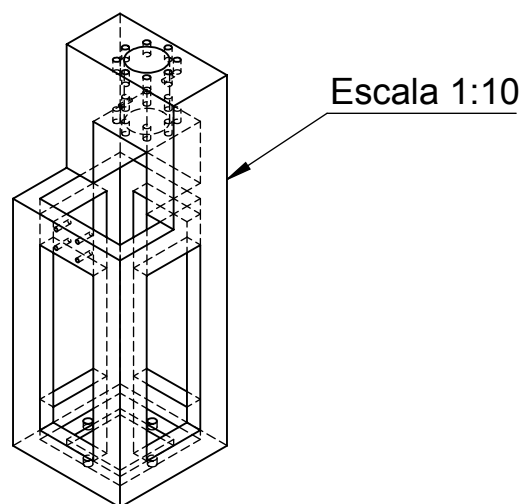
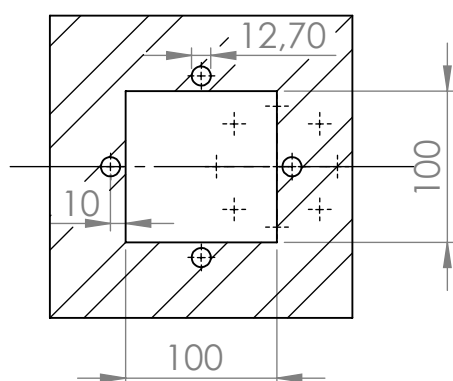
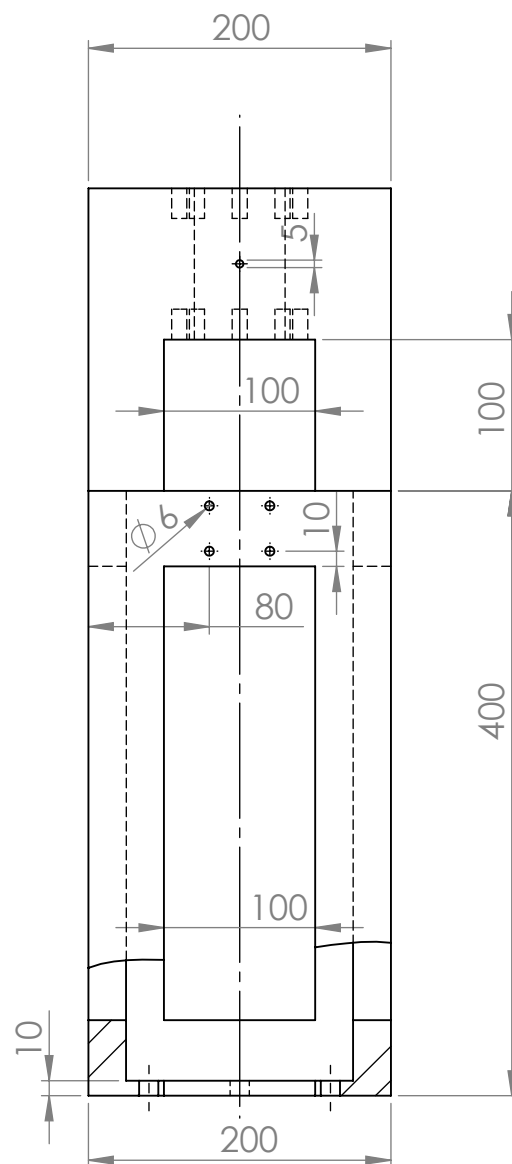
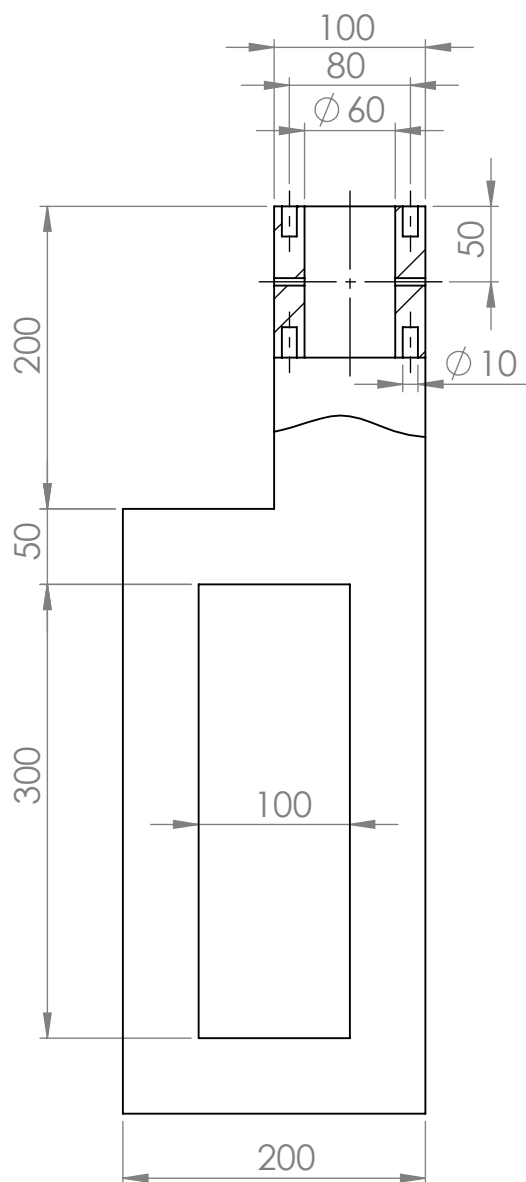
PROJETO Nº.: 1	NOME: Tampa traseira	QUANT.: 1
UFU	NOME: Alexandre Henrique Alves Rodrigues	Nº.: 11111EMC041
ESCALA: 1:5	TÍTULO: Projeto Roda de Borracha (TCC)	DATA:
MATERIAL: Aço 1020		DES. Nº.: 14/20



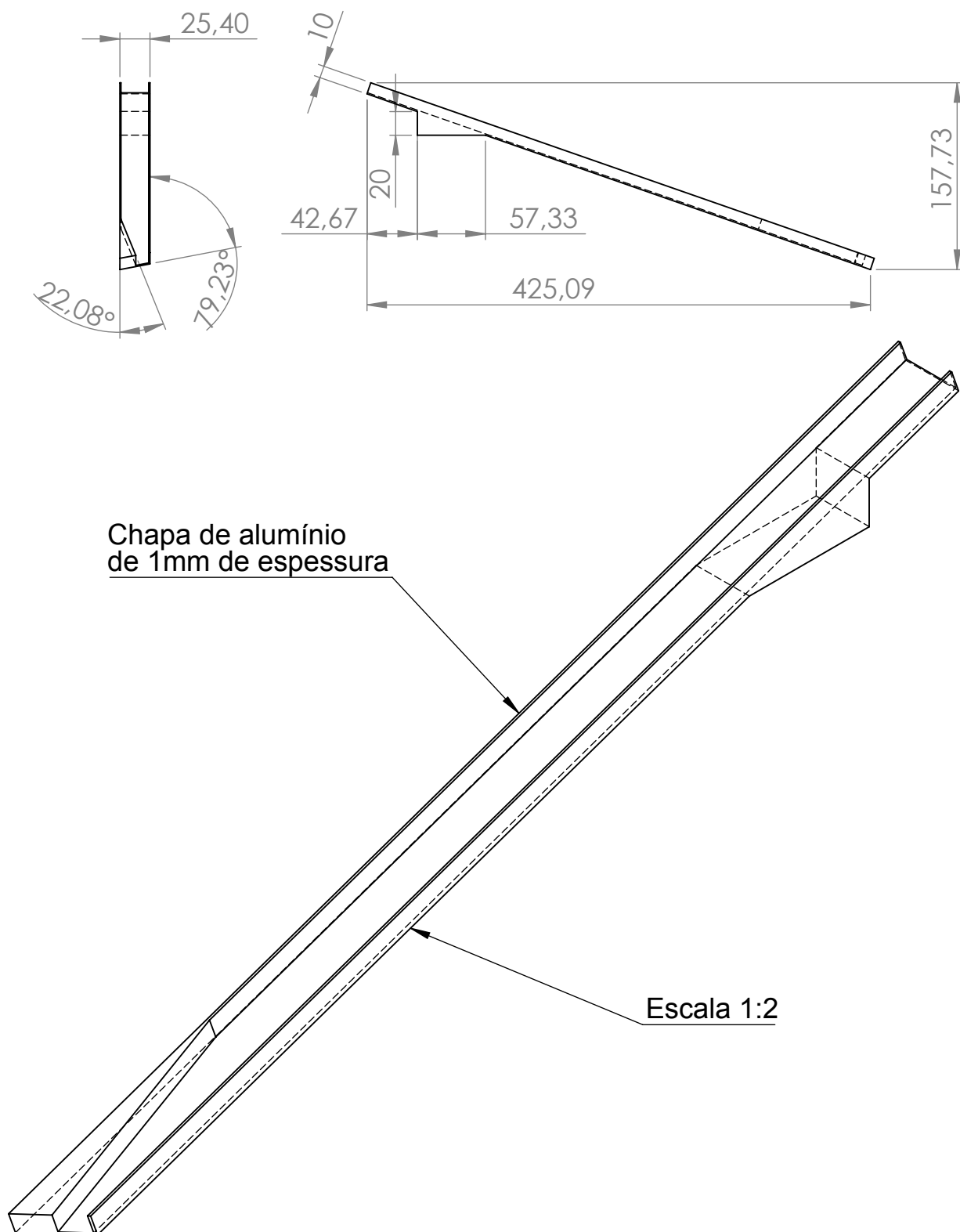
PROJETO Nº.: 1	NOME: Reservatório de abrasivo	QUANT.: 1
UFU	NOME: Alexandre Henrique Alves Rodrigues	Nº.: 11111EMC041
ESCALA: 1:5	TÍTULO: Projeto Roda de Borracha (TCC)	DATA:
MATERIAL: Aço (chapa)		DES. Nº.: 15/20



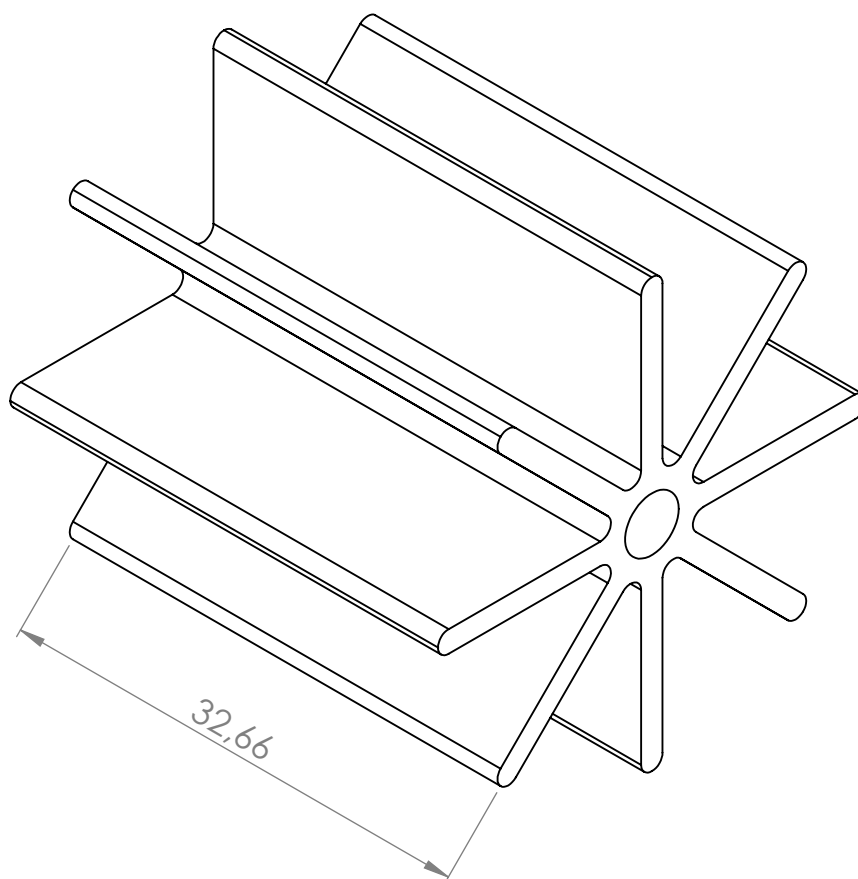
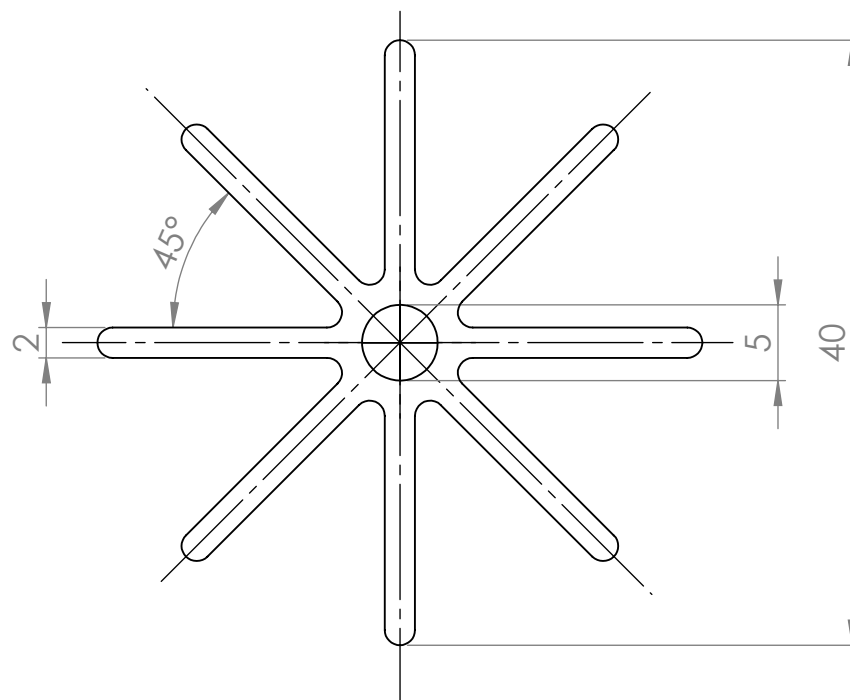
PROJETO Nº.: 1	NOME: Porta-amostra	QUANT.: 1
UFU	NOME: Alexandre Henrique Alves Rodrigues	Nº.: 11111EMC041
ESCALA: 1:1	TÍTULO: Projeto Roda de Borracha (TCC)	DATA:
MATERIAL: Aço 1020		DES. Nº.: 16/20



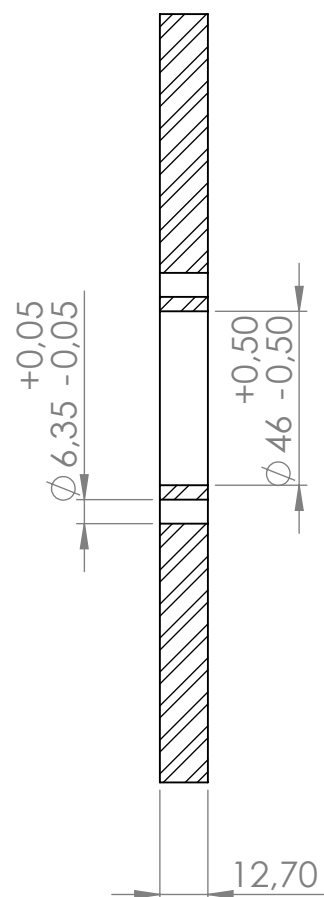
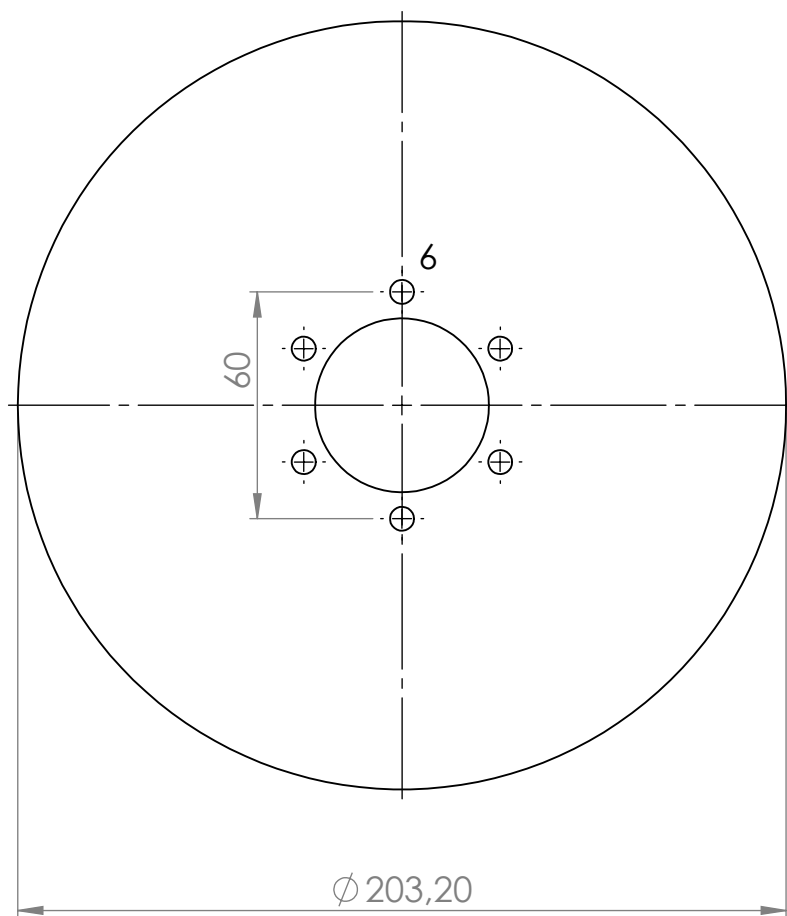
PROJETO Nº.: 1	NOME: Suporte do reservatório	QUANT.: 1
UFU	NOME: Alexandre Henrique Alves Rodrigues	Nº.: 11111EMC041
ESCALA: 1:5	TÍTULO: Projeto Roda de Borracha (TCC)	DATA:
MATERIAL: Aço 1020		DES. Nº.: 17/20



PROJETO Nº.: 1	NOME: Calha de alimentação de abrasivo	QUANT.: 1
UFU	NOME: Alexandre Henrique Alves Rodrigues	Nº.: 11111EMC041
ESCALA: 1:5	TÍTULO: Projeto Roda de Borracha (TCC)	DATA:
MATERIAL: Alumínio		DES. Nº.: 18/20



PROJETO Nº.: 1	NOME: Válvula rotativa dosadora	QUANT.: 1
UFU	NOME: Alexandre Henrique Alves Rodrigues	Nº.: 11111EMC041
ESCALA: 2:1	TÍTULO: Projeto Roda de Borracha (TCC)	DATA:
MATERIAL: Aço 1020		DES. Nº.: 19/20



PROJETO Nº.: 1	NOME: Roda em aço 1020 (normalizada)	QUANT.: 1
UFU	NOME: Alexandre Henrique Alves Rodrigues	Nº.: 11111EMC041
ESCALA: 1:2	TÍTULO: Projeto Roda de Borracha (TCC)	DATA:
MATERIAL: Aço 1020		DES. Nº.: 20/20