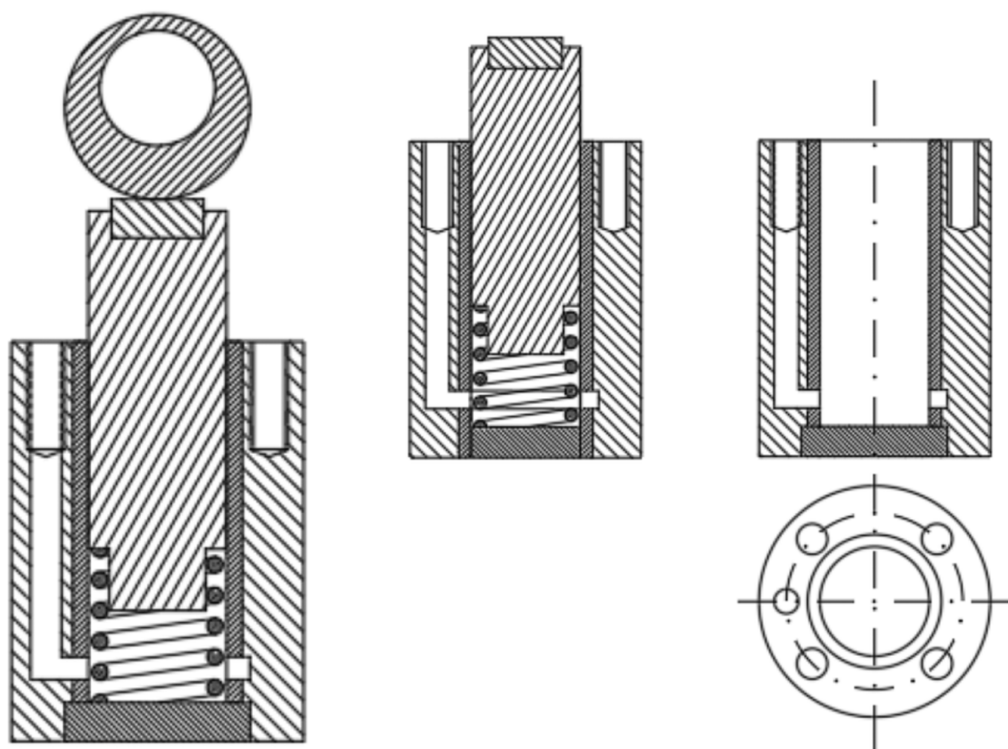


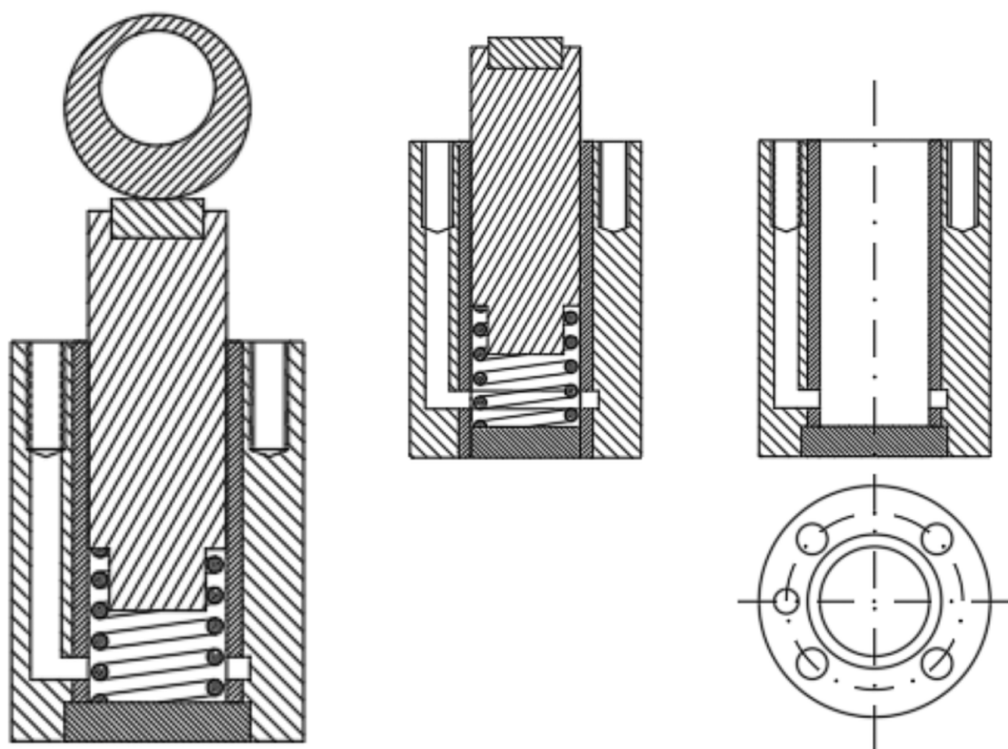
Leonardo Chagas da Silva  
Manoel Fernandes de Oliveira Filho

# PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM TRIBÔMETRO: T R I B O C A M E



Leonardo Chagas da Silva  
Manoel Fernandes de Oliveira Filho

# PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM TRIBÔMETRO: TRIBOCAME



**Editora chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Editora executiva**

Natalia Oliveira

**Assistente editorial**

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto gráfico**

Camila Alves de Cremo

Ellen Andressa Kubisty

Luiza Alves Batista

Nataly Evilin Gayde

Thamires Camili Gayde

**Imagens da capa**

iStock

**Edição de arte**

Luiza Alves Batista

2024 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2024 Os autores

Copyright da edição © 2024 Atena

Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo do texto e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

**Conselho Editorial**

**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará

Prof. Dr. Fabrício Moraes de Almeida – Universidade Federal de Rondônia

Profª Drª Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá

Profª Drª Iara Margolis Ribeiro – Universidade Federal de Pernambuco

Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense

Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande

Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora

Profª Drª Maria José de Holanda Leite – Universidade Federal de Alagoas

Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Prof. Dr. Milson dos Santos Barbosa – Universidade Tiradentes

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Nilzo Ivo Ladwig – Universidade do Extremo Sul Catarinense

Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas

Profª Dr Ramiro Picoli Nippes – Universidade Estadual de Maringá

Profª Drª Regina Célia da Silva Barros Allil – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí

Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

## Projeto e construção de um tribômetro: Tribocame

**Diagramação:** Ellen Andressa Kubisty  
**Correção:** Yaiddy Paola Martinez  
**Indexação:** Amanda Kelly da Costa Veiga  
**Revisão:** Os autores  
**Autores:** Leonardo Chagas da Silva  
 Manoel Fernandes de Oliveira Filho

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)	
S586	<p>Silva, Leonardo Chagas da          Projeto e construção de um tribômetro: Tribocame /          Leonardo Chagas da Silva, Manoel Fernandes de          Oliveira Filho. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2024.</p> <p>Formato: PDF          Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader          Modo de acesso: World Wide Web          Inclui bibliografia          ISBN 978-65-258-2340-9          DOI: <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.409240603">https://doi.org/10.22533/at.ed.409240603</a></p> <p>1. Métodos de projetos - Engenharia mecânica. 2.          Manutenção e reparo de máquinas. 3. Engenharia          tribológica. I. Silva, Leonardo Chagas da. II. Filho, Manoel          Fernandes de Oliveira. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDD 621.8</p>
Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166	

**Atena Editora**  
 Ponta Grossa – Paraná – Brasil  
 Telefone: +55 (42) 3323-5493  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)

## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao conteúdo publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que o texto publicado está completamente isento de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

## DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

Na maioria das máquinas e equipamentos mecânicos ocorre movimento relativo entre os seus componentes, e, conseqüentemente o resultado desse deslizamento, provoca uma deformação plástica podendo ocorrer ou não a perda de material, isto em conseqüência das forças de atrito geradas durante o funcionamento do equipamento. Este trabalho é direcionado ao desenvolvimento de um tribômetro cilindro sobre disco cujo objetivo é desenvolver desgaste abrasivos sobre superfícies de amostras, onde seja possível simular situações reais, em que haja avaliação de resistência ao desgaste e a capacidade da película de filme, assim como, revestimentos de filmes finos inseridos nas superfícies das amostras. A sequência de execução do processo de construção, iniciou-se na necessidade de desenvolver um tribômetro desse perfil, em seguida o projeto foi desenhado e simulado as condições em CAD, deduzindo as melhores formas de execução e montagem dos componentes. Para avaliação da eficiência desse dispositivo, foi realizado um ensaio de desgaste, abordado de forma evolutiva, sobre corpos de prova de aço SAE 1045, imersos em um lubrificante líquido, sob intervalos de tempo pré-determinados. Também foi desenvolvido um procedimento de calibração e manutenção do equipamento, indicando o passo a passo da montagem e da calibração para os ensaios. Também é disponibilizado o esboço dimensionado de elementos que são substituídos perante ao uso do equipamento.

**PALAVRAS-CHAVE:** Projetos mecânicos. Tribologia. Tribômetros. Manutenção.



<b>1. REFERENCIAL TÉCNICO .....</b>	<b>1</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES TRIBOLÓGICAS.....	1
1.2 TRIBÔMETROS .....	9
1.3 SISTEMA CAME SEGUIDOR.....	12
1.3.1 Dinâmica de funcionamento.....	12
1.3.2 Mecanismos de contato e tipos de falha na geometria came-seguidor.....	14
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>18</b>
2.1 ENSAIOS TRIBOLÓGICOS .....	18
2.1.1 Projeto e Construção .....	18
2.1.2 Designação do dispositivo.....	23
2.1.3 Calibração e Manutenção do dispositivo.....	24
2.1.4 Caracterização do mecanismo came-seguidor.....	29
2.1.5 Caracterização do par tribológico .....	30
2.1.6 Definição do lubrificante .....	32
2.2 CORPOS DE PROVA .....	33
2.2.1 Confeção e caracterização dos corpos de prova.....	33
2.3 ENSAIO TRIBOLÓGICO .....	34
<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>37</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>38</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>41</b>
<b>SOBRE OS AUTORES .....</b>	<b>58</b>

# REFERENCIAL TÉCNICO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES TRIBOLÓGICAS

Por reunir aspectos das ciências física, química, materiais e mecânica, a tribologia pode ser considerada como um dos ramos mais complexos do âmbito da engenharia mecânica. Grandes nomes da tribologia como Zum Gahr (1987), Hutchings (1992) e Dowson (1998), Jost, (1966), Bhushan, (2001), a definem, resumidamente, como a ciência que observa a interação entre superfícies em movimento relativo, relacionando-a aos estudos inerentes de atrito, lubrificação e desgaste.

A ideia de se estudar tribologia é entender e procurar soluções para sanar situações problemas, ocorridas diariamente no universo da mecânica, trazendo como resultados a eficiência dos organismos, aumento da vida útil, juntamente com a redução de custos com interrupções dos sistemas mecânicos (BHUSHAN, 2005).

O atrito e o desgaste não são propriedades intrínsecas dos materiais, no entanto, os fenômenos tribológicos são sistêmicos. Os mesmos possuem características que dependem dos mecanismos do tribossistema que está atuando. O surgimento desses fenômenos está ligado às propriedades dos elementos, como à geometria do contato, tipo do movimento, pressão de contato, velocidade, temperatura, condições do ambiente além das propriedades mecânicas dos materiais (VIEIRA, 2017).

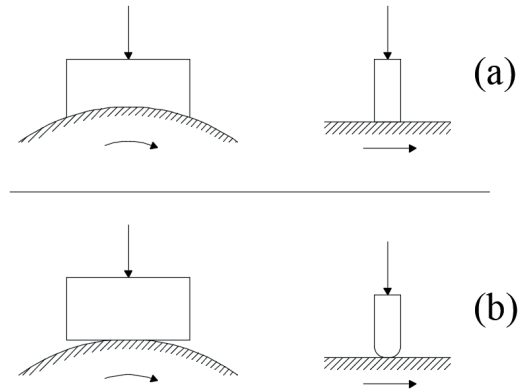
A classificação simplificada do tipo de contato entre dois corpos foi estabelecida por Hertz em 1882, sendo ela dividida em contato conforme e não-conforme, podendo ainda considerar o limiar entre eles.

É classificado como contato conforme aquele entre duas superfícies, que mesmo por ausência de uma força externa, ocorre-se em uma área diferente de zero, ajustando-se perfeitamente em termos macroscópicos, sendo facilmente observado e bem caracterizado em situações de contato entre superfícies de perfis semelhantes, como paralelas e planas (JOHNSON, 1987).

Por outro lado, quando duas superfícies se tocam em uma linha ou um ponto, ocorre o contato não-conforme. Nessa interação, a área de contato possui dimensões muito menores que as dimensões dos corpos em contato. Esta forma pode ser encontrada em situações em que pelo menos uma superfície possua uma curvatura, como no caso entre esferas (JOHNSON, 1987).

Na figura 1 é possível encontrar as duas situações definidas por Johnson, sob a visão de (HUTCHINGS, I M, 1992).

Figura 1 – Exemplos de contato (a) conforme e (b) não-conformes



Fonte: Adaptado de HUTCHINGS (1992)

O estudo sobre contato existente entre as superfícies do objeto de estudo desse livro (cilindro-disco), foi desenvolvido por Hertz, baseando-se na deformação elástica das superfícies e na formação de uma área de contato com forma aproximadas de um retângulo. O equacionamento proposto por ele para esse tipo de contato, permite estimar a largura da área, chamada de “2a” e a distribuição da pressão no contato (BUDYNAS e KEITH NISBETT, 2011).

Metade da largura da região de contato, representado por  $a$  é obtida pela equação 1:

$$a = \sqrt{\frac{2 m_1 + m_2 F}{\pi B L}} \quad (1)$$

Onde,

$m_1$  e  $m_2$  – constantes de materiais;

$F$  é – força de contato;

$B$  – constante geométrica do contato;

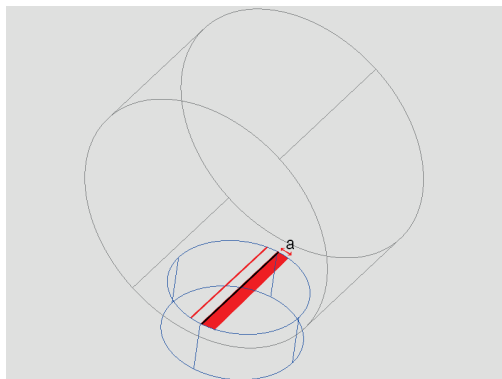
$L$  – comprimento do contato ao longo do eixo.

Área de contato equação 2:

$$\text{área} = 2aL \quad (2)$$

A figura 2 ilustra o contato simplificado entre as superfícies de um sistema came-seguidor, utilizado na elaboração deste livro.

Figura 2 – Região de contato entre superfícies de um sistema came seguidor



Fonte: Elaborada pelo autor

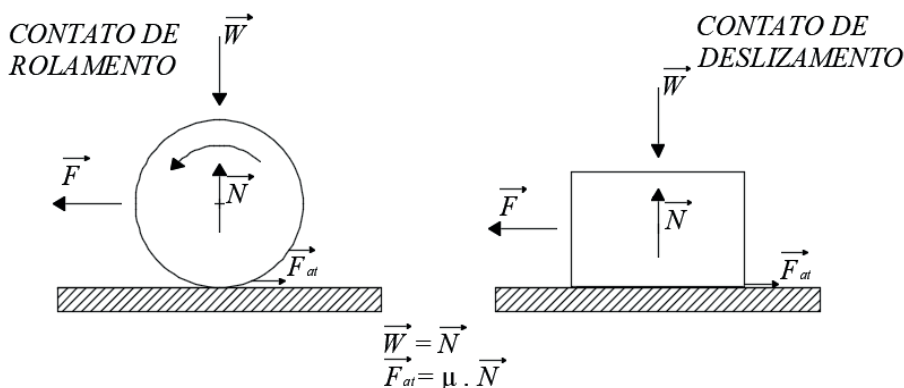
Para este ensaio, a equação utilizada para a pressão de contato máxima ( $P_{máx}$ ) é exibida na equação 3:

$$P_{máx} = \frac{2F}{\pi aL} \quad (3)$$

Não sendo considerado como propriedade intrínseca do material (VIEIRA, 2017), o atrito está atrelado a fatores físicos, químicos e mecânicos entre a interação microscópica das superfícies dos materiais e, é definido como a “resistência encontrada por um corpo em movimento sobre outro” (HUTCHINGS, I M, 1992). Além disso, o atrito como consequência do contato é provedor do desgaste e dissipação de energia, sendo também considerado como a principal fonte de desperdício de materiais e perdas de desempenho mecânico dos sistemas.

Devido a esses fatores das superfícies desses materiais, quando postos em contato relativo, é gerada uma força que atua na mesma direção e em sentido contrário ao movimento relativo, sendo possível classifica-lo em atrito estático/deslizamento ou de rolamento. É possível ver na figura 3 um esquema resumido do diagrama de força sobre um pequeno sistema (BHUSHAN, 2001).

Figura 3 – Diagrama de forças em corpos com tipos de contato de rolamento e deslizamento



Fonte: Adaptado de Hutchings (1992)

O coeficiente de atrito está relacionado com as condições de ensaio envolvidas. Fatores como rugosidade das superfícies, lubrificação, temperatura, umidade, presença de ar, etc., torna o coeficiente um parâmetro de natureza mais relativa que absoluta.

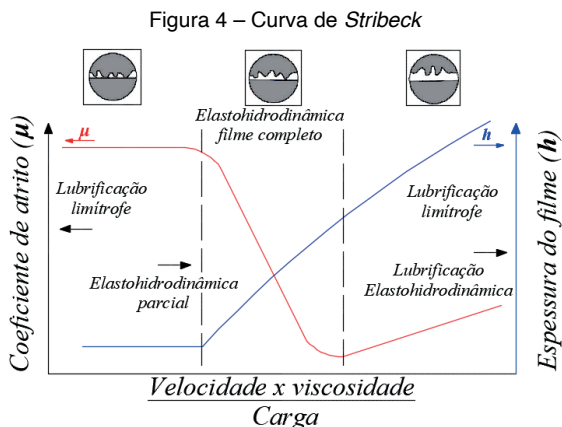
Segundo (HUTCHINGS, I M, 1992), a intensidade da força de atrito é estabelecida pelo valor do coeficiente de atrito, o qual pode variar entre 0,001, em mancais de rolamento levemente carregados, a 10, para deslizamento puro entre metais deslizando contra eles mesmos no vácuo. E  $\mu$  entre 0,1 a 1 para materiais comuns deslizando no ar. No deslizamento não lubrificado, o coeficiente de atrito dos materiais em contato estão entre 0,5 a 1,5.

Em muitos sistemas mecânicos são aplicados lubrificantes como redutores de força de atrito entre superfícies, conseguindo com isso reduzir a taxa de desgaste por deslizamento. O princípio básico de funcionamento de um lubrificante é estar presente entre as superfícies que estão em deslizamento, ofertando uma resistência ao cisalhamento abaixo do valor das superfícies. A intensidade do desgaste e do atrito em um par tribológico está ligado ao regime de lubrificação atuante, pois os mecanismos de interação das superfícies se alteram com os fenômenos do contato e com os regimes de lubrificação.

Uma divisão elaborada por Hutchings (1992), subdivide o regime de lubrificação em função da espessura da camada de filme contido entre os componentes móveis. É possível que em alguns sistemas lubrificados, o lubrificante separe completamente ambas as superfícies e não haja nenhuma forma de contato entre elas. Em determinadas aplicações, o lubrificante pode não atuar completamente na prevenção do contato entre as partes de maior aspereza, no entanto, é possível que ainda reduza a resistência da formação de junções.

A Curva de Stribeck, mostrada na figura 4, foi inicialmente definida para estudos de mancais, mas é possível aplica-la a todos os tipos de contato entre superfícies (WOYDT e

WÄSCHE, 2010). O diagrama expõe a relação entre a espessura do filme e a rugosidade aritmética média ( $R_a$ ) (conhecido como parâmetro  $\lambda$  ou número de Gumbel) de uma superfície e se correlaciona com as respostas do coeficiente de atrito. É possível estabelecer sobre o gráfico, algumas regiões em que ocorre diferentes regimes de lubrificação nos sistemas mecânicos (WEN e HUANG, 2012).



Fonte: Adaptado de Hutchings (1992)

A curva de *Stribeck* atribui à ordenada o valor do coeficiente de atrito entre o par tribológico e a abscissa equivale ao valor do parâmetro de mancal, uma constante adimensional definida em função da velocidade angular ( $\omega$ ), viscosidade cinemática do fluido ( $\eta$ ) e da carga aplicada ( $p_m$ ) gerada pela pressão de contato da montagem.

Uma das muitas nomenclaturas estabelecidas por tal relação denominada de *Número de Hershey* (HERSEY, 1928), definida pelas equações 4 e 5.

$$H = \frac{\eta \omega}{P_m} \quad (4)$$

$$P_m = \frac{F_n}{2rl} \quad (5)$$

Onde, " $F_n$ " é definido pelo valor normal da força aplicada sobre o par, " $r$ " é a medida do raio interno do mancal (came) e " $l$ " é a largura do mancal.

A teoria de Hertz afirma que quando uma esfera, assim como um cilindro, é pressionada sobre uma superfície plana, sendo ambos rígidos, a região de contato inicial ocorre em um ponto, ou uma linha, no caso do cilindro. Pelo incremento da carga normal entre eles, a linha de contato expande-se formando uma região de contato e, o filme lubrificante previsto por esta teoria tem um perfil com espessura mínima ( $h_{\min}$ ) (HUTCHINGS, I M, 1992).

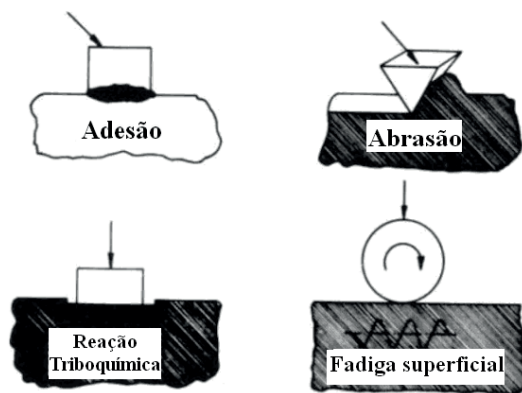
Hutchings (1992) apud Farias et al. (2015) some dynamic characteristics present significant changes as the vibration signal patterns. The acquisition and characterization of these signals, by the use of Fourier Transform (FT) ressalta sobre a importância das investigações/estudos de desgastes em laboratórios, a fim de entender criticamente os principais mecanismos pelos quais ocorre desgaste ou para simular situações práticas objetivando extrair resultados para projetos relativos às taxas de desgaste e coeficiente de atrito.

De acordo com Norton (2013) é possível, atribuir três formas segundo as quais uma peça ou sistema pode “falhar”, sendo elas a obsolescência, quebra ou desgaste acentuado. Dentre estas, a mais comum estudada no campo tribológico está o desgaste, considerado uma falha lenta e gradual, às vezes nem perceptível. O autor ainda afirma que o desgaste é o único modo de falha ao qual nada escapa.

O desgaste pode ser classificado de várias formas, segundo (Bhushan, 2013) é possível avaliar a intensidade em severo ou moderado, onde há liberação de *debris* por parte de uma superfície macia em contato mais macia em relação a outra, sendo avaliado a dimensão e geometria desses *debris* em função dos mecanismos de desgaste.

Ainda como formas de classificação, é cabível pelo tipo de movimentação do par tribológico, como deslizamento, rolamento ou ambos combinados. Os mecanismos de desgaste também fazem parte da classificação, onde as principais e mais estudadas formas são listadas por Zum Gahr (1987), compondo a lista os mecanismos de adesão, abrasão, corrosão, erosão e fadiga de superfície (figura 5).

Figura 5 – Representação dos principais mecanismos de desgaste



Fonte: Adaptado de Zum Gahr (1987)

Maru (2003), apud Beasley e Ting (1974) afirma que a espessura mínima de filme lubrificante é da ordem de  $1\ \mu\text{m}$  para início da ocorrência de contato metal-metal, logo, ocorrendo o desgaste, no caso específico do par came seguidor. A medida que essa espessura diminui, diferentes mecanismos de desgaste são potencialmente introduzidos.

A ação entre as superfícies em contato do esse par came seguidor é complexa e envolve muitas variáveis na relação. Entre os parâmetros que devem ser observados estão a rugosidade da superfície, ondulação e tensões; histórico prévio de usinagem; módulos de elasticidade; atrito (rolamento e deslizante); materiais; lubrificação; corrosão; e cargas (ROTHBART, 2004).

Basicamente, os quatro tipos de desgaste envolvidos no mecanismo came seguidor são: desgaste adesivo, desgaste abrasivo, desgaste corrosivo e desgaste por fadiga da superfície. Além disso, há outros tipos de falhas de superfícies menos significativas, como desgaste erosivo, desgaste por cavitação e *fretting*.

Segundo Norton (2013) o desgaste adesivo, geralmente chamado *galling*, *scuffing*, ou *scoring*, ocorre entre duas superfícies sólidas deslizantes. Dá-se pela interação entre os átomos da superfície dos materiais em contato, ocorrendo a transferência de material de uma superfície para a outra e, eventualmente, pela formação de fragmentos soltos.

A alta pressão local combinada com o movimento de deslizamento relativo ao longo dos planos cristalográficos, causa o desgaste na interface de contato. Quando um par de pontos altos (picos) são forçados contra si, tendendo-os a se separarem, ocorre normalmente a ruptura onde a seção for mais fraca. Nesse caso, se no processo de separação a difusão for rápida o suficiente, ocasionará a soldagem/transferência de material do pico despreendido de um elemento no elemento oposto, caso contrário, a partícula deixará as superfícies e passará a ser tratada como partícula livre, podendo, então, causar riscos e cavar sulcos em ambas as peças, tal dano é denominado *scuffing*, ou *scoring* (NEALE, (1995); ROTHBART, (2004)).

O desgaste abrasivo ocorre quando duas superfícies estão em contato e uma é consideravelmente mais dura do que a outra. É caracterizado principalmente pela remoção de material entre as superfícies afetadas, ocorrendo a perda mássica. Esse mecanismo é comumente encontrado em componentes do sistema came seguidor.

De acordo com Hutchings e Shipway, (2017) o processo pode ser observado de duas formas: entre dois corpos ou três corpos. A abrasão entre dois corpos se refere a um material duro e rugoso deslizando sobre um material mole, ocorrendo a introdução da superfície mais dura na superfície mais mole, consequentemente a remoção de material. No outro caso, em abrasão por três corpos, partículas livres e duras se introduzem entre as superfícies deslizantes, provocando a remoção de material de das superfícies mais macias ou em ambas.

O processo de corrosão ocorre sob condições normais em praticamente todos os materiais, sendo a oxidação forma mais comum encontrada. Na grande maioria, os metais reagem com o oxigênio na atmosfera do ar e da água, formando os óxidos. A ação da oxidação sobre as superfícies do came seguidor, ocorre devido ao contato deslizante ou rolante dos dois corpos (ROTHBART, 2004).



A formação dos óxidos possui características de baixa adesão à superfície, tornando-os facilmente removíveis pelo contato deslizante ou por rolamento entre dois corpos. Assim, por meio desse contato, essas partículas duras e frágeis se desprendem e ficam livres, contribuindo para a ação do desgaste abrasivo entre três corpos. A utilização de lubrificante pode ser utilizada para minimizar o processo de desgaste, assim como, como redutor do processo corrosivo, reagindo de forma favorável às superfícies (NORTON, 2013).

O mecanismo de falha por fadiga superficial é proveniente de corpos rolantes em contato por rolamento puro ou principalmente quando rolam em combinação com uma pequena porção de deslizamento. A ocorrência da fadiga possui variáveis, como velocidade, carga, material, temperatura, geometria das superfícies, lubrificante e quantidade de deslizamento, podendo ocorrer de forma superficial ou subsuperficial (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017).

Os cames, rolamentos e engrenagens são elementos de máquinas com dinâmicas de componentes semelhantes e, é considerável o número de falhas devido à fadiga da superfície. No entanto, a grande maioria dos dados estatísticos de desgaste foram desenvolvidos para rolamentos e engrenagens, mas não para sistemas seguidores de came (ROTHBART, 2004).

Durante a ação do rolamento, o acúmulo de deslocamentos após um elevado número de ciclos atuará como um gerador de estresse, concentrando-se em uma pequena área de contato local. Esse estresse resultante nas superfícies desses elementos, são denominadas tensões de Hertz ou tensões de contato (NORTON, 2013).

O resultado do acúmulo dessas tensões é o início de uma trinca, que logo tornar-se-á em uma falha por crateração (*pitting* - arrancamento de pequenos pedaços do material da superfície). Ao continuar o movimento, logo culminará numa rede de rachaduras, evoluindo posteriormente em uma falha por lascamento (*spalling* - perda de pedaços maiores da superfície), culminando na falha do componente por fadiga superficial (NEALE, (1995); HUTCHINGS e SHIPWAY, (2017)).

A fadiga de contato superficial de elementos rolantes pode ser iniciada por inclusões duras no material; corrosão; elevadores de tensão de superfície, como amassados, imperfeições de retificação ou concentrações de tensão geométrica; micro lascamentos; e interações superficiais dependentes da rugosidade e espessura do filme de lubrificação (ROTHBART, 2004).

Rothbart, (2004) acrescenta sobre a possibilidade de camadas finas endurecidas, indentações de medições de dureza de superfície de tratamentos térmico, altas velocidades de deslizamento, temperatura excessiva, tipo de lubrificante ou contaminação podem acelerar a ação da fadiga.

Dessa forma, o estudo dos mecanismos de desgaste em uma máquina específica, possibilita o entendimento e o aprimoramento de projetos que o mesmo venha a desenvolver. Os principais métodos de quantificar desgaste adotados pela literatura são por meio da

perda mássica, análises de partículas ou evolução da rugosidade durante o processo e, ainda, por análises microscópicas da topografia da superfície dos elementos.

A perda mássica de um sistema lubrificado é normalmente avaliada pelo modelo de desgaste de Archard, onde o desgaste volumétrico é proporcional à carga, com um fator de correção e, à dureza do material (equação 6) (RABINOWICZ, 1984).

$$Q = \frac{KW}{H} \quad (6)$$

Na equação 4, o  $Q$  ( $\text{mm}^3/\text{m}$ ) representa o volume de material desgastado por unidade de distância;  $W$  representa a carga normal aplicada entre os pares (N);  $H$  é o valor dureza superficial do material menos duro (Mpa); o fator  $k$  consiste no valor do coeficiente de desgaste, estabelecendo a igualdade dessa relação, dado em  $\text{mm}^3/(\text{N.m})$ .

Outra forma de obter valores referentes ao volume de material desgastado é expressando o valor de  $K/H$  por  $k$  pela carga e distância percorrida, aplicando na equação 7:

$$Q = k.W.\delta s \quad (7)$$

Onde  $\delta s$  é a distância percorrida em metros (MARU, 2003).

Como dito anteriormente, o desgaste e o atrito são diretamente dependentes dos regimes de lubrificação, devido aos fenômenos envolvidos na região de interface do tribopar.

Com isso, conclui-se que a principal forma de obter desgaste é por meio de tribômetros.

## 1.2 TRIBÔMETROS

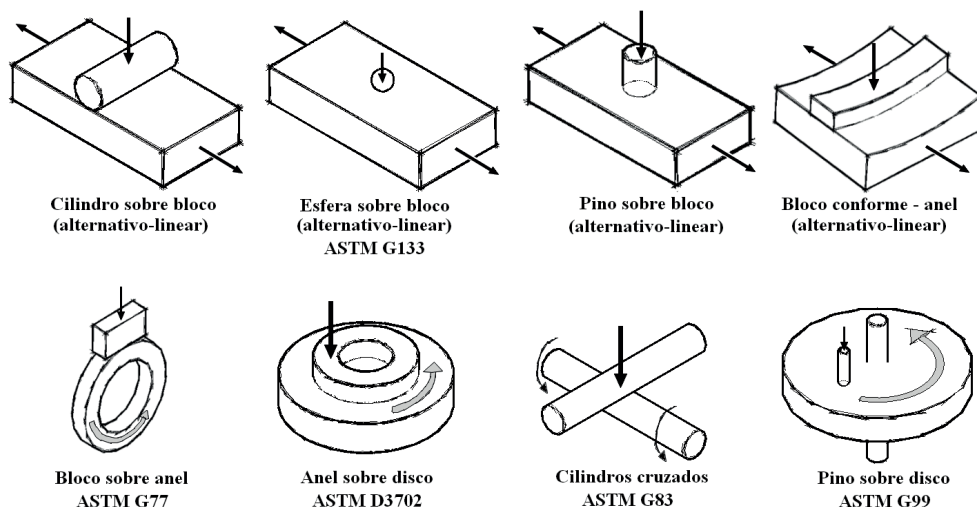
Para se ter o entendimento e o domínio da ciência que estuda os fenômenos da interação entre superfícies em movimentos relativos, em fricção, em desgaste e em lubrificação, constitui-se necessário o uso de equipamento que possibilitem a produção, visualização e medição direta ou indireta desses parâmetros.

É por intermédio desses equipamentos denominados de tribômetros, que se torna possível fomentar tais fenômenos, realizando simulações de situações de determinado interesse, especificidade, tipo de movimento relativo, onde duas partes estão em contato, obtendo valores de coeficiente de atrito e desgastes entre superfícies (FERREIRA, 2010).

Comercialmente, estão disponíveis tribômetros que são classificados conforme seu tipo de movimento, velocidade, modo de contato, material aplicado, faixa de temperatura, índice de umidade, forma de lubrificação, etc.

A figura 6 apresenta uma ideia aproximada das diversas formas de como pode ocorrer os contatos, os movimentos e as geometrias dos pares tribológicos aplicados em tribômetro regidos por Normas da ASTM.

Figura 6 – Disposição geométrica e de forma de tribômetros



Fonte: Adaptado de ASTM

Com a utilização dessas máquinas é possível inferir sobre diversas propriedades e características que pode haver em um par tribológico, estando entre as mais importantes o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste, onde, a partir delas pode-se prever resultados quanto a redução de desgaste, o tempo de vida, a economia de energia, produção ou redução de calor, entre outros (HOLMBERG e ERDEMIR, 2017).

Diante da vasta disponibilidade de formas, os ensaios nos tribômetros são orientados por normas que especificam os parâmetros de funcionamento de acordo com os itens da classificação citados anteriormente, obedecendo como característica principal o tipo de contato, movimento e o material a ser avaliado.

As normas de padronização que mais abrange a aplicação em ensaios tribológicos em tribômetros comerciais são regidas pela ASTM, indo ao encontro à necessidade de pesquisadores e indústria, possibilitando a reprodução de resultados plausíveis e reproduzíveis nos mais diversos laboratórios, em busca sempre das propriedades de atrito. Dentre elas, as mais aplicadas são ASTM G99, ASTM G133, ASTM G83, ASTM G77 e ASTM D3702 (FERREIRA, 2010).

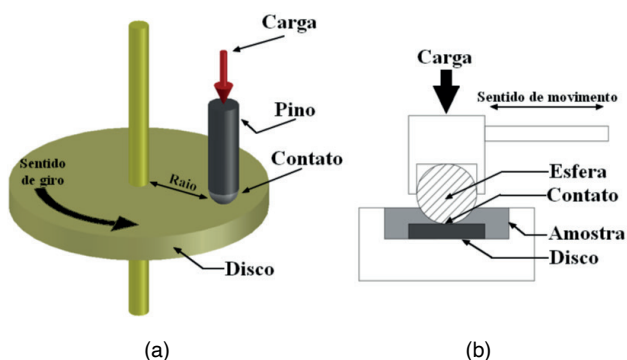
Em uma busca realizada em alguns fabricantes, observou-se que para ensaios em combustíveis e óleos lubrificantes, há uma certa predominância de equipamentos tribológicos voltados para os ensaios pino sobre disco e HFRR. Paralelamente à indústria,

estudos acadêmicos relacionados a essa área, primam por tribômetros com esses princípios.

Esses ensaios configuram-se comumente no qual uma esfera dura desliza contra um plano macio, sendo o ensaio HFRR com movimentos alternativos em ciclos de breve intervalo de tempo a uma baixa carga, porém alta pressão de contato. O método pino-disco difere que uma esfera dura, sob ação de uma carga, percorre uma trilha contínua sobre a superfície de um disco plano em movimento circular (KNOTHE, 2008 LACEY e SHAVER, 1999).

As representações esquemáticas desse contato podem ser visualizadas na figura 7.

Figura 7 – Representação esquemática do dispositivo (a) Pino-Disco e (b) HFRR



Fonte: adaptado de ASTM G99, (2004), ASTM D6079, (2018)

Uma outra técnica que avalia o comportamento do desgaste por deslizamento de materiais, em diferentes condições simuladas é o ensaio *Block-on-Ring*, regido pela ASTM G77, que visa principalmente em permitir uma classificação confiável de pares de materiais para aplicações tribológicas específicas e abrange procedimentos de laboratório para determinar a resistência dos materiais ao desgaste por deslizamento.

O ensaio *Block-on-Ring* utiliza uma máquina de teste de desgaste por atrito, onde um bloco com dimensões definidas, confeccionado em qualquer material, entra em contato com um anel que rotacional. O bloco está sob um carregamento, além de que o teste pode ser executado com vários lubrificantes, líquidos ou atmosferas gasosas, conforme desejado, para simular as condições de serviço (ASTM G77-17, 2017).

Um atributo importante deste teste é que ele é muito flexível. Qualquer material que possa ser fabricado ou aplicado em blocos e anéis pode ser testado, assim, as combinações de materiais em potencial são infinitas.

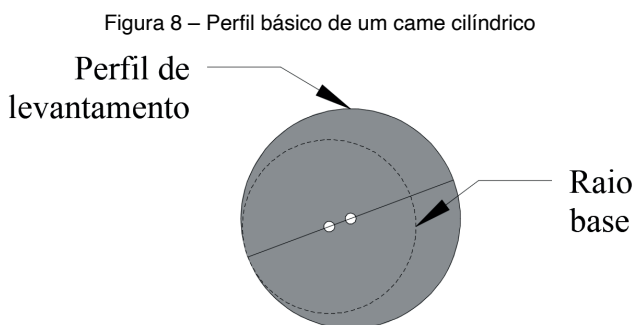
A importância da avaliação do desgaste por deslizamento do bloco sobre o anel deve-se aos complexos mecanismos de desgaste que ocorrem na superfície de contato, como desgaste por adesão, abrasão de dois corpos, abrasão de três corpos e desgaste por

fadiga. O comportamento do desgaste dos materiais é significativamente influenciado pelo ambiente de trabalho, como carga normal, velocidade, corrosão e lubrificação (LI, Duanjie e LEROUX, 2016).

### 1.3 SISTEMA CAME SEGUIDOR

Na engenharia mecânica, o mecanismo came seguidor está presente em diversas máquinas e equipamentos, sendo frequentemente utilizado em motores de combustão interna – no processo de acionamento do comando de válvulas, em componentes de unidade injetoras e em algumas bombas de alta pressão do sistema de injeção *Common Rail*. Este importante sistema tem a função de transformar a o movimento de rotação do came em algum outro movimento através do elemento chamado seguidor (SIQUEIRA et al., 2018).

O seguidor é a parte do elo que mantém o contato direto com o came e, geralmente, é acompanhada de uma mola com a finalidade de propiciar o contato entre as duas peças – came e seguidor. A forma do came determina o como será acionamento e por quanto tempo o seguidor estará acionado, tendo como parâmetros para isso, o raio de base (que determina a posição de repouso do seguidor) e o perfil de levantamento (que dita o momento de abertura e fechamento da válvula), como mostra a figura 8 (TURKISH, 1946).



Fonte: Elaborada pelo autor

Os arranjos mais comuns são: face plana, face esférica e rolete; e o menos comum aresta de faca. Os seguidores de face plana possuem volumes menores comparados aos de roletes, e por esta razão costumam ser mais baratos.

#### 1.3.1 Dinâmica de funcionamento

De acordo com Norton (2013), os mecanismos came seguidor são classificados de diversas maneiras: pelo tipo de movimentação, pelo tipo do came, pelo tipo da junta, pelo tipo do seguidor, pelo tipo de movimento crítico, pelo tipo de programa de movimentação. Por meio de uma análise cinemática é possível estudar isoladamente o movimento do came onde deslocamento, a velocidade, a aceleração e o tempo se relacionam.

O perfil do came e sua dinâmica de funcionamento pode ser obtido estabelecendo-se uma curva cicloidal a qual permita que, com o movimento de rotação do came, sejam atendidas as condições necessárias de utilização. Cada etapa do deslocamento do sistema ocorre em um intervalo de tempo  $t_n$ , com intervalo angular  $\beta_n$ , correspondente à  $n$ -ésima fase de rotação do came. As etapas do movimento do came, ao realizar uma volta completa, com velocidade angular  $w$ , obedeceram a ordem do movimento em 3 etapas (BUDYNAS e KEITH NISBETT, 2011), sendo elas:

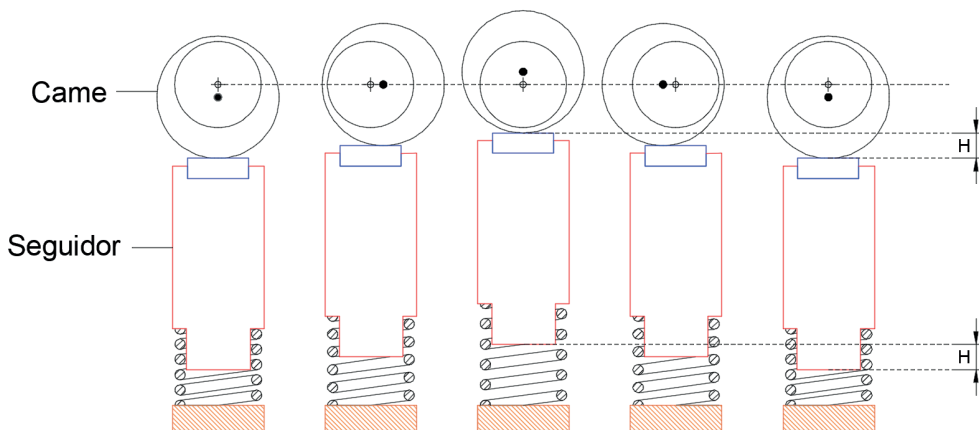
I - Repouso na altura mínima ( $h_0$ ), intervalo angular  $\beta_1$ , tempo  $t_1$ ;

II- Subida, intervalo angular  $\beta_2$ , tempo  $t_2$ ;

III - Descida, intervalo angular  $\beta_3$ , tempo  $t_3$ .

É possível entender melhor o funcionamento do mecanismo came seguidor do tipo cicloidal observando a figura 9.

Figura 9 – Sequência dinâmica do mecanismo came seguidor



Fonte: Elaborada pelo autor

Onde:

$H \rightarrow$  Curso máximo do seguidor;

$\omega \rightarrow$  Velocidade angular do came;

$r \rightarrow$  Raio de base do came;

$\beta_1 = \beta_2 \rightarrow$  Fase angular da etapa subida/descida.

Considerando-se que a aceleração ( $A(\theta)$ ) do seguidor pode ser descrita por uma curva senoidal, em seu movimento de subida ou descida, tem-se na equação 8:

$$A(\theta) = C \sin\left(2\pi \frac{\theta}{\beta}\right) \quad (8)$$

Para obter a velocidade ( $V(\theta)$ ) e posição ( $S(\theta)$ ), deve-se integrar a equação 9:

$$V(\theta) = -C \frac{\beta}{2\pi} \cos\left(2\pi \frac{\theta}{\beta}\right) + k_1 \quad (9)$$

Onde  $k_1$  é a primeira constante de integração (equação 10). Seu valor pode ser obtido substituindo-se a condição de contorno  $v = 0$  em  $\theta = 0$  (equação 11). Portanto:

$$k_1 = C \frac{\beta}{2\pi} \quad (10)$$

$$V(\theta) = C \frac{\beta}{2\pi} \left[1 - \cos\left(2\pi \frac{\theta}{\beta}\right)\right] \quad (11)$$

Integrando-se novamente, obtém-se a função para a posição ( $S(\theta)$ ) na equação 12:

$$S(\theta) = C \frac{\beta}{2\pi} \theta - C \frac{\beta^2}{4\pi^2} \sin\left(2\pi \frac{\theta}{\beta}\right) + k_2 \quad (12)$$

Novamente, para obter-se o valor da constante de integração  $k_2$ , aplicam-se as seguintes condições de contorno:  $S = 0$  em  $\theta = 0$ . E para o valor da constante  $C$ , referente à amplitude do movimento, tem-se que  $S = h$  em  $\theta = \frac{\beta}{2}$ . Assim é mostrada na equação 13:

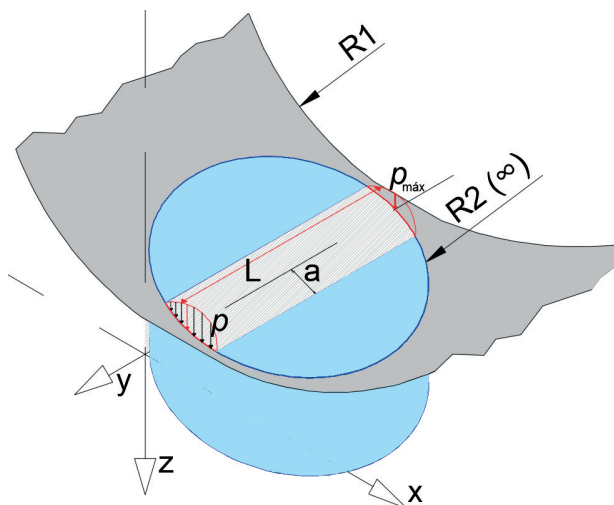
$$C = \frac{h}{\pi} \quad (13)$$

### 1.3.2 Mecanismos de contato e tipos de falha na geometria came-seguidor

As tensões introduzidas nos materiais em contato em uma situação de deslizamento são altamente dependentes da geometria das superfícies em contato, bem como do carregamento e das propriedades do material. A geometria do contato entre came e cilindro, baseia-se na forma original entre o contato cilindro e cilindro, em ambos os casos, os raios de curvaturas são parâmetros significativos para os cálculos (NORTON, 2013).

Como é de interesse prático, no caso do contato cilindro/plano (came-seguidor), o raio do segundo cilindro (que estamos considerando como seguidor) possui raio de valor infinito, levando-o ao infinito. Assim, quando um cilindro ou um rolo entra em contato com um plano, teoricamente, o contato possui características de uma reta sem espessura, como mostrado na figura 10, a seguir.

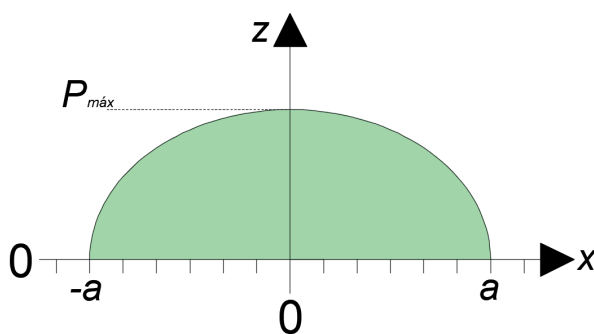
Figura 10 – Distribuição de pressão elipsoidal prismática no contato cilindro-plano



Fonte: Adaptada de Norton (2013)

De fato, isso não acontece e sabe-se que na região em que ocorre o contato acontece a deformação dos materiais sob uma determinada pressão de contato. Essa deformação, gera uma distribuição de pressão de forma elíptica, gerando assim, o que chamamos de tensão de contato ou tensões de Hertz, apresentado na figura 11, a seguir.

Figura 11 – Distribuição de pressão na região de contato



Fonte: Adaptada de Norton (2013)

Esse carregamento de tensões compressivas, acontece de forma repetitiva em todo esse pequeno volume, na frequência de rotação, que, com o tempo, levará a fadiga do contato. Associado a essas tensões, ocorrem tensões de cisalhamento, que respondem pela causa da ocorrência de trincas após “n” ciclos de tensão.



Após um elevado número de ciclos, o crescimento de dessas trincas levam podem resultar em falhas por *pitting* – arrancamento de pequenos pedaços do material da superfície. Por conseguinte, após o processo iniciado, rapidamente transforma-se em *spalling* – perda de pedaços maiores da superfície.

A determinação dos valores de pressão e tensão de contato referentes a essa geometria compreendem o universo das equações deduzidas por Hertz e estão entre os casos mais complexos da teoria da elasticidade. O conjunto de equações do contato entre cilindros (cilindro-cilindro e cilindro-plano), serão apresentadas seguindo as condições de contato para o presente estudo e aplicadas no capítulo dos resultados (BUDYNAS e KEITH NISBETT, 2011).

As equações seguem uma linha de resolução e para sequência do entendimento foram divididas em caráter geométrico/material, pressão e tensão de contato.

#### Equações de caráter geométrico:

$$\text{Constante dos materiais: } m_1 = \frac{1-\gamma_1^2}{E_1}, m_2 = \frac{1-\gamma_2^2}{E_2}; \quad (14)$$

onde  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$  = Coeficiente de Poisson

e  $E_1$  e  $E_2$  = Módulo de Elasticidade

$$\text{Constante geométrica do contato: } B = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right); \quad (15)$$

$R_1$  e  $R_2$  = Raios dos cilindros

$R_2 = 0$ ; para o segundo elemento como um disco

$$\text{Metade da largura da região de contato: } a = \sqrt{\frac{2 m_1 + m_2}{B} \frac{F}{L}}; \quad (1)$$

$$\text{Área de contato: } \text{área} = 2aL; \quad (2)$$

#### Equações de Pressão de Contato

$$\text{Força aplicada na região de contato: } F = \frac{1}{2} \pi a L P_{\text{máx}}; \quad (16)$$

$L$  = Comprimento do contato

$P_{\text{máx}}$  = Pressão máxima

$$\text{Pressão média de contato: } P_{\text{média}} = \frac{F}{\text{área}} \quad (17)$$

$$\text{Pressão máxima de contato: } P_{\text{máx}} = \frac{2F}{\pi a L} \quad (3)$$

### Equações de Tensão de Contato

Na superfície do seguidor, onde o  $z = 0$ , as tensões normais são dadas por:

$$\begin{aligned}\sigma_{z_{m\acute{a}x}} &= -p_{m\acute{a}x} \\ \sigma_{x_{m\acute{a}x}} = \sigma_{y_{m\acute{a}x}} &= -\frac{1+2\gamma}{2}p_{m\acute{a}x}\end{aligned}\quad (18)$$

E as tensões de cisalhamento podem ser obtidas por:

No plano  $yz$  – linha de centro:

$$\tau_{yz} = \frac{p_{m\acute{a}x}}{2} \left[ \frac{(1-2\gamma)}{2} + \frac{2}{9}(1+\gamma)\sqrt{2(1+\gamma)} \right] \quad (19)$$

Plano  $xy$  – Nas bordas da região de contato:

$$\tau_{xy} = \frac{(1-2\gamma)}{3}p_{m\acute{a}x} \quad (20)$$

Diante da fundamentação teórica apresentada, este livro visa dar uma contribuição ao estado atual, no que tange, o modo de analisar o par tribológico, uma vez que se gerou um dispositivo de ensaio tribológico deslizante, ora denominada *tribocame*.

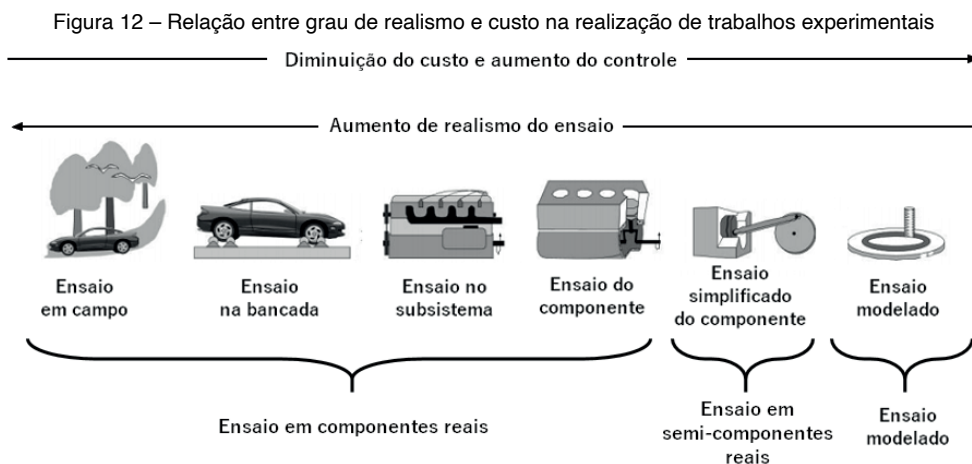
Cabe informar que para tal, para validar e fortalecer a criação do dispositivo explanada, utilizou-se um aço da série 1000 (SAE 1045) sem revestimento e o mesmo aço SAE 1045 com cobertura de  $\text{MoS}_2$  e TiN em multicamadas, a fim de estudar seus desempenhos mecânicos para eventuais aplicabilidade na indústria automotiva.

# MATERIAL E MÉTODOS

## 2.1 ENSAIOS TRIBOLÓGICOS

O esquema da figura 12, apresenta a relação entre grau de realismo e controle sobre os moldes de ensaios tribológicos. Para a realização do trabalho aqui desenvolvido, foi levado em consideração os custos e os meios para aquisição dos componentes, deste modo, foi projetado e confeccionado um tribômetro (classificado como um ensaio modelado) que possibilitasse o ensaio de cilindro sobre um bloco em forma de disco, para obtenção do desgaste, simulando/modelando situações reais, tendo como alvo a avaliação da capacidade de resistência da película de filme e principalmente dos revestimentos inseridos nas superfícies dos discos.

A figura 12 a representa a forma de realização do ensaio.



Fonte: Elaborada pelo autor

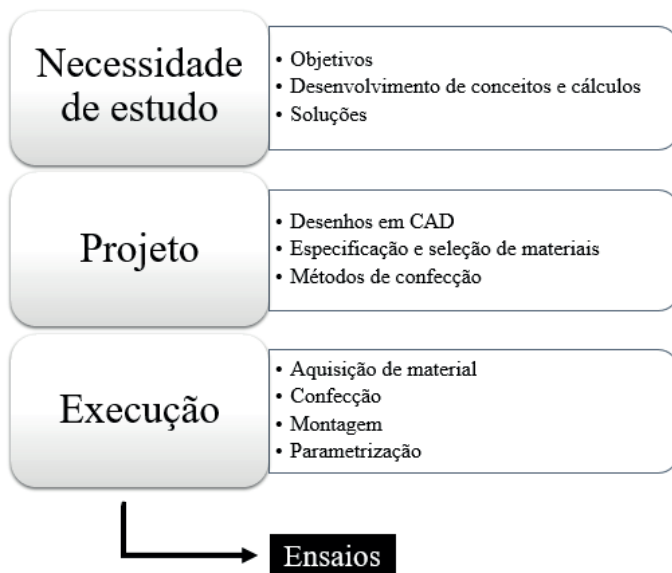
### 2.1.1 Projeto e Construção

Diante da necessidade e a não existência de um dispositivo que reproduzisse o par tribológico presente em componentes do sistema de injeção *Common Rail* e de um dispositivo que possuísse o mecanismo cilindro sobre disco em meio lubrificado, a ausência de um equipamento como esse ao alcance fez com que optasse pela construção de um tribômetro com essas características, que simulasse o par tribológico em questão a ser estudado.

Inicialmente a ideia para confecção do tribômetro girou em torno dos ensaios cilindro sobre disco e um possível cilindro-êmbolo. Ambas configurações são passíveis de serem encontradas em diversas aplicações em máquinas e, componentes mecânicos do sistema de injeção *Common Rail*. Assim a configuração cilindro sobre disco foi selecionada, no entanto, deixando para os ensaios de cilindro-êmbolo como sugestões para trabalhos futuros.

A sequência apresenta a seguir no fluxograma 1, indica as etapas que foram seguidas para confecção do dispositivo:

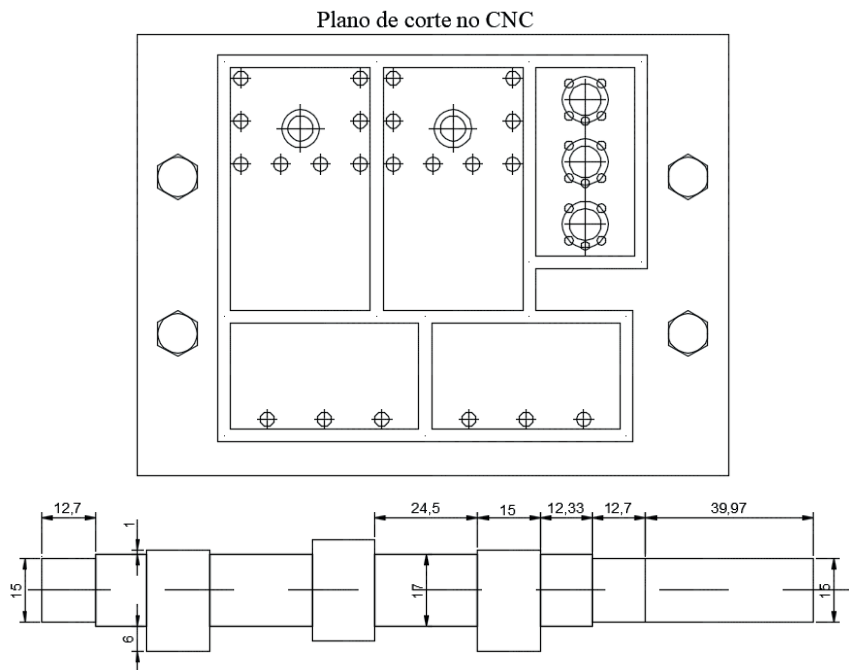
Fluxograma 1 – Sequência de etapas para realização da confecção e realização dos ensaios



Fonte: Elaborada pelo autor

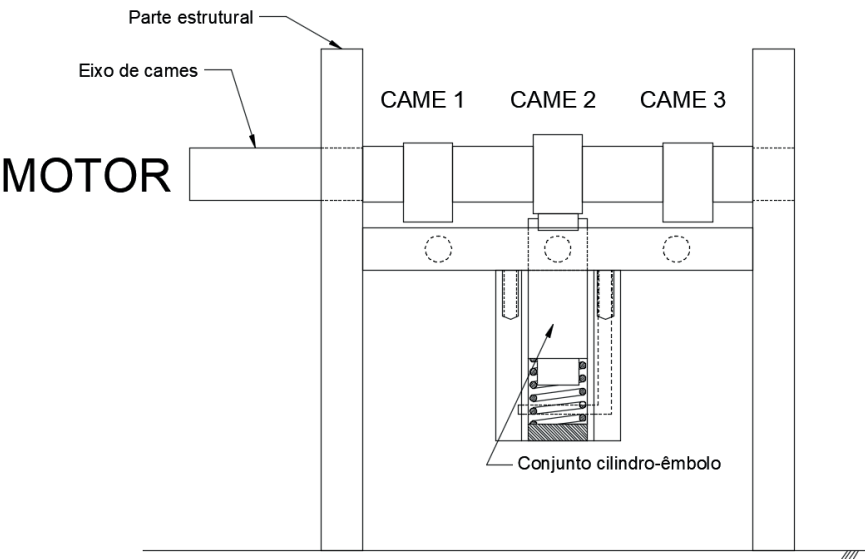
A figura 13 e figura 14 apresentam a primeira versão do esboço do projeto do dispositivo feito em CAD.

Figura 13 – Esboço dos componentes da versão inicial do projeto do tribômetro



Fonte: Elaborada pelo autor

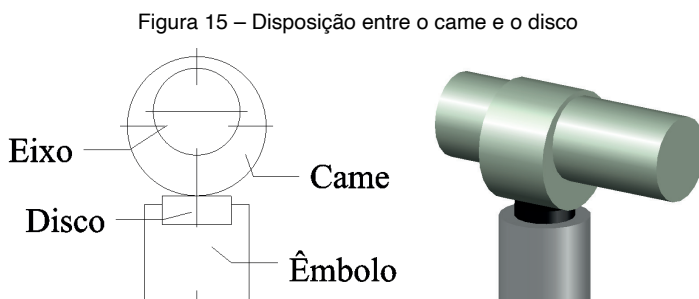
Figura 14 – Vista lateral do esboço da montagem dos componentes do projeto do tribômetro



Fonte: Elaborada pelo autor

Em seguida, realizou-se a especificação e seleção dos materiais da parte estrutural e dos componentes a serem ensaiados e, então, determinou-se as dimensões dos materiais escolhidos em função de valores dimensionais encontrados comercialmente, reduzindo o tempo de usinagem e custos.

O objetivo do ensaio no dispositivo é obter através de um par tribológico do tipo came-seguidor, onde o came (cilindro) mantivesse contato contínuo contra um disco metálico alojado em um êmbolo/pistão, sendo este, forçado contra o cilindro por força de uma mola. A figura 15 apresenta em vista lateral e a disposição dos componentes ensaiados em perspectiva.



Fonte: Elaborada pelo autor

A superfície retificada do par cilindro-disco após usinada obteve valores de  $R_a$  entre 0,2 e 0,25.

Para dar suporte aos êmbolos, foi necessário o uso de blocos cilíndricos, confeccionados em aço 1020 e, por haver movimento alternado entre os pares, optou-se pelo encamisamento dos blocos com uma camisa de bronze, com objetivo de reduzir o atrito nas as paredes e evitar que o bloco cilíndrico e o êmbolo se desgastem prematuramente. Abaixo, na figura 16 (a) está o bloco cilíndrico utilizado nos ensaios.

Os êmbolos confeccionados em aço SAE 1045, torneados e em seguida retificados para garantia de deslizamento sobre o bronze com o mínimo atrito (figura 16 (b)). Sua principal função é a de suporte dos discos (corpos de prova), funcionando alojado dentro do bloco cilíndrico realizando do movimento alternado de subida e descida (*reciprocating*), transferindo a força da mola para os discos.

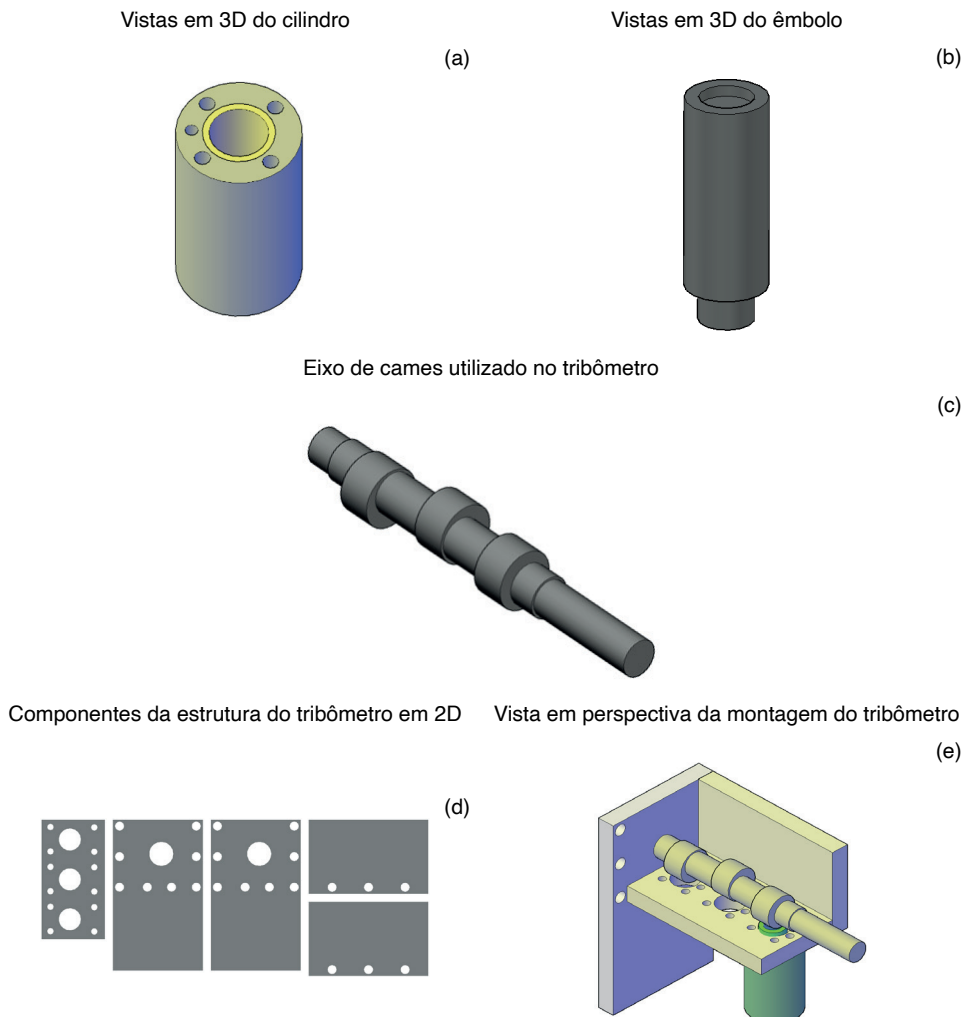
O eixo de cames cilíndricos foi confeccionado em aço SAE 1045, com a particularidade de ter sido usinado em duas partes. A primeira parte tratou de usinar primeiramente o eixo (sem os cames) nas medias nominais de projeto, respeitando as interferências do rolamento e, dos cames. Em seguida, do mesmo material do eixo foram usinados os cames em um torno mecânico com em uma placa de quatro castanhas. Por fim, os 3 cames foram posicionados no eixo defasados em  $120^\circ$  entre eles, respeitando as distancias nominais do projeto, para que assim pudessem ser soldados no eixo (figura 16 (c)).

O processo de soldagem foi realizado por meio de soldagem MIG, sendo feita a solda na zona lateral de maior área do came, configurando-se numa união de juntas em ângulo do tipo filete. O eixo foi submetido a ensaios de microdureza, constatando-se a não interferência do processo na microdureza da superfície do came, como também, nos ensaios.

A estrutura do tribômetro (figura 16 (d)) foi confeccionada em placas de aço SAE 1020 com espessura de 12,70 mm. Os componentes foram usinados em um centro de usinagem CNC, com o código fonte obtido por auxílio do *software Fusion 360®*.

Na figura 16 (e) é possível visualizar a vista em perspectiva em 3D parcialmente montada dos componentes do tribômetros

Figura 16 – Vistas dos componentes do dispositivo



Fonte: Elaborada pelo autor

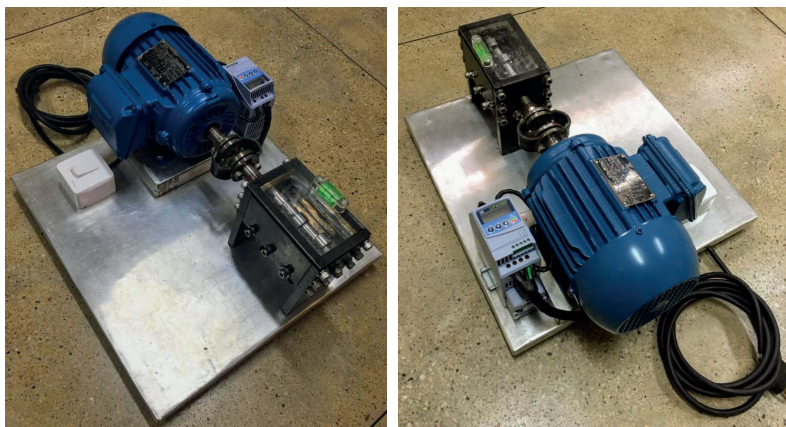
Os desenhos individuais de cada componente do tribômetro pode ser visualizado no Apêndice A deste livro.

### 2.1.2 Designação do dispositivo

O modelo experimental utiliza o princípio de um came cilíndrico girando contra um disco de teste utilizando uma máquina denominada *tribômetro cilindro sobre disco* ou *Tribocame*, acoplado a um motor elétrico DC WEG de 1 de cv para rotacionar o eixo que contém os cames a uma rotação de 480 rpm, a velocidade tangencial equivalente a  $60,31e-2$  metros por segundo, que por sua vez, estão em contato constante com os discos (corpos de prova). Os pares tribológicos permanecem imersos em um volume de 35 ml de lubrificante, sob a força de expansão da mola que possui um  $k = 100,3$  N/m. Convencionou-se que o came 1 é o mais próximo ao motor, seguido pelo came 2 ao meio e o came 3 sendo o mais distante do motor.

Por meio de programação de um inversor de frequência WEG, foi possível registrar a quantidade de horas ensaiadas com o motor em funcionamento, além de estabelecer o controle de rotação e incrementar o tipo de partida e desligamento de forma suave (tipo rampa) do motor, reduzindo assim impactos e trancos nesses dois momentos. Uma visão em perspectiva do dispositivo é mostrada na figura 17:

Figura 17 – Tribômetro cilindro sobre disco



Fonte: Elaborada pelo autor

O objetivo do dispositivo é produzir desgaste por atrito deslizante sobre amostras em forma de discos, sob várias configurações. Um dos pontos positivos atribuídos a esta máquina é a flexibilidade na escolha da amostra e do tipo de lubrificante a ser utilizado, além da possibilidade de alteração da velocidade e da carga, de acordo com as necessidades de cada trabalho desenvolvido.



O desenvolvimento do dispositivo em questão, elaborado para este livro possibilitou a criação de uma Patente de Invenção (PI), sob depósito no INPI, via UFRN em parceria com o IFRN e o GET. O modelo discricionário completo dessa patente encontra-se no Apêndice B deste livro.

### 2.1.3 Calibração e Manutenção do dispositivo

O nível de complexidade de funcionamento e as possibilidades de alterações nos parâmetros definidos para o dispositivo, requerem que haja um procedimento para calibração e manutenção básica para obtenção de repetitibilidade e confiabilidade dos ensaios.

Os principais parâmetros a serem observados para calibração antes e durante o curso dos ensaios são: o valor da carga das molas, a rotação do eixo, a adição do lubrificante, o nivelamento da base do dispositivo e a manutenção do nível de lubrificante dentro da cuba.

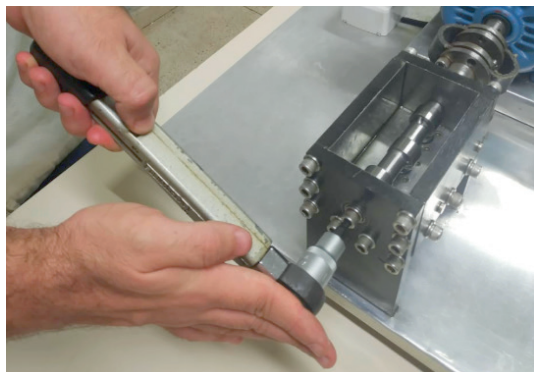
#### a) Molas

A medição da carga das molas é feita de forma indireta, por intermédio de um torquímetro com faixa entre 0,1 – 1 kgf/m. Inicialmente o eixo deve ser posicionado quando o came 1 estiver voltado para cima. O torquímetro é então acoplado ao parafuso Allen de sextavado interno, do fim do eixo (figura 18). Deve-se então tentar girar o eixo no sentido horário, observando os valores registrados no torquímetro, a cada 120° completados, seguindo a defasagem do posicionamento dos comes no eixo.

Para as molas padrão de  $k = 100,3 \text{ N/m}$ , os valores lidos no torquímetro deve estar na faixa entre 0,5 – 0,6 N/m.

O procedimento deve ser repetido 3 vezes para medição de 3 leituras por cada came.

Figura 18 – Procedimento para verificação da calibração das molas



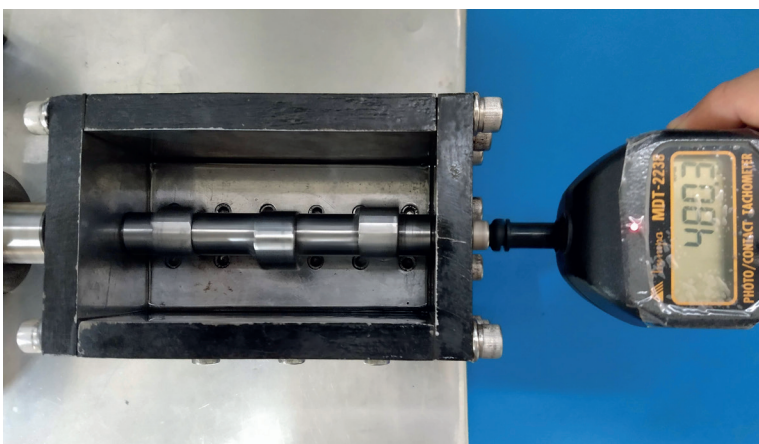
Fonte: Elaborada pelo autor

### **b) Rotação do eixo**

A rotação do eixo deve ser aferida de forma direta por meio de um tacômetro de contato, utilizando a faixa rotação entre 100 ~ 999 rpm. Apesar do dispositivo possuir um inversor de frequência que seleciona e controla a rotação do motor a rotação deve ser lida diretamente no eixo.

Com o dispositivo tribológico desligado, posicione o tacômetro de contato no parafuso Allen de sextavado interno, do fim do eixo (figura 19). Deve-se colocar o dispositivo em funcionamento e efetuar a leitura durante 30 segundo. A faixa de rotação para o uso à 480 rpm pode oscilar em  $\pm 0,25\%$  durante esse período. Para rotações maiores, a variação deve estar no máximo entre  $\pm 0,25\% - \pm 0,75\%$ . Recomenda-se uma rotação máxima de 800 rpm, para um funcionamento equilibrado do dispositivo.

Figura 19 – Procedimento para verificação da rotação do eixo do dispositivo



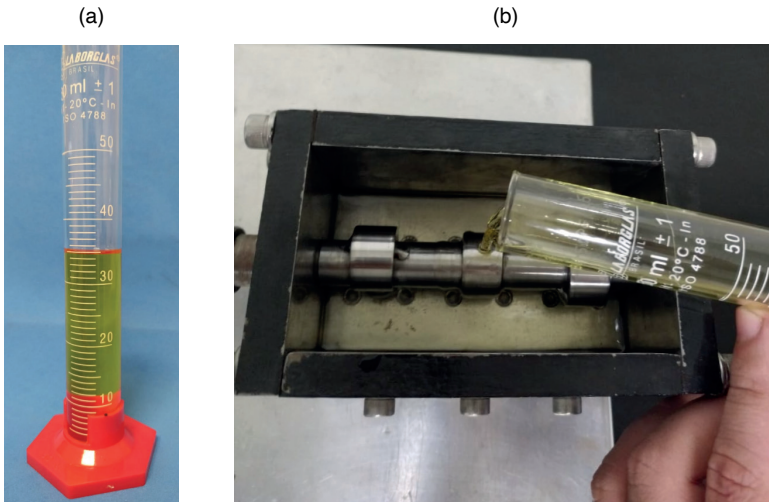
Fonte: Elaborada pelo autor

### **c) Adição do lubrificante**

Para o uso do dispositivo com lubrificante líquido, recomenda-se o volume mínimo de 35 ml para a operação, sendo permitido o volume máximo de até 40 ml para o bom funcionamento. Pode-se utilizar uma pipeta graduada (50 ml), juntamente com uma pera de sucção ou um pipetador manual, ou uma proveta graduada (50 ml), para inserir o lubrificante na cuba do dispositivo (Figura 20 (a)).

A inserção do lubrificante deve ser feita com o dispositivo montado e desligado, recomendando-se a liberação do fluido sobre os cames (Figura 20 (b)). Ao fim do processo, o eixo de cames deve ser girado no sentido horário manualmente por 10 vezes, visando garantir a circulação do fluido nas câmaras dos blocos cilíndricos e a formação de uma película inicial nas superfícies de contato em baixa rotação.

Figura 20 – Procedimento para adição do lubrificante



Fonte: Elaborada pelo autor

O regime de lubrificação do sistema enquadra-se no perfil de lubrificação elastohidrodinâmica.

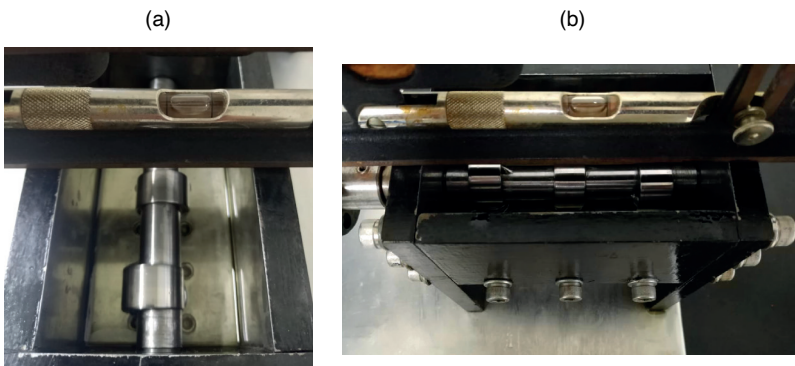
#### d) Nivelamento do dispositivo

A lubrificação homogênea entre os pares em contato, está condicionada à distribuição do lubrificante no fundo da cuba. Para isso, é necessário verificar o nivelamento da base do dispositivo.

Posicione-o em uma região plana e, com o auxílio de um nível de bolha verifique o nivelamento no sentido cima-baixo (figura 21 (a)) e no sentido direita-esquerda (figura 21 (b)).

Para uma possível compensação de desnivelamento, deve-se utilizar calços de calibre de lâmina abaixo dos coxins de apoio, até a correção do posicionamento do nível.

Figura 21 – Procedimento para verificação do nivelamento do dispositivo



Fonte: Elaborada pelo autor

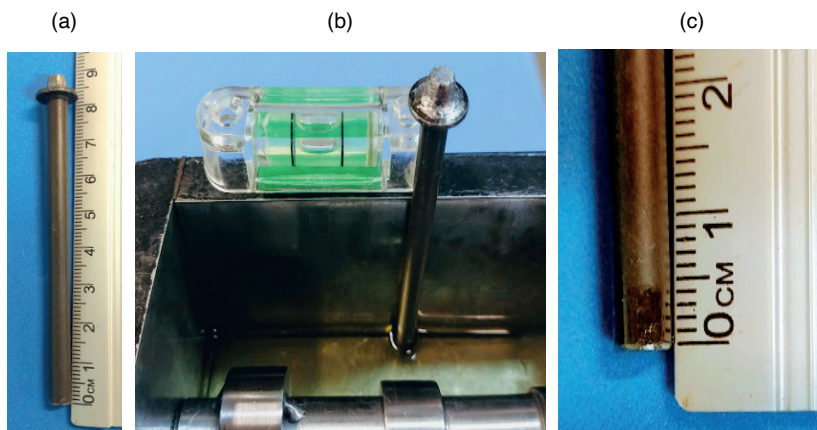
### e) Nível do lubrificante

Após a operação realizada nos itens 3.1.3 (c) e (d), recomenda-se após um período de 60 minutos, em função de possíveis perdas por evaporação, aspersão ou possível vazamento, deve-se observar o nível de lubrificante contido na cuba e o nivelamento da base do dispositivo.

Para isso, com o dispositivo desligado, aguarde 60 segundos para o retorno e estabilidade do lubrificante na parte inferior da cuba, em seguida, a tampa de acrílico deve ser removida do dispositivo.

Com o auxílio de um pequeno bastão fosco metálico limpo e seco (figura 22 (a)), insira-o na região central da cuba até que o mesmo toque o fundo, em seguida remova-o (figura 22 (b)). Com o auxílio de um paquímetro deve ser efetuada uma leitura da marca deixada pelo fluido no bastão (figura 22 (c)). Para garantir o funcionamento com 35 ml, a leitura deve registrar um valor entre 4mm, podendo considerar valores entre 3,5mm e 4,5 mm.

Figura 22 – Procedimento para verificação do nível dos lubrificantes



Fonte: Elaborada pelo autor

Assim como o plano de calibração e uso, o plano de manutenção estabelece procedimentos que devem ser adotados ao fim de cada ensaio e de cada ciclo ensaiado.

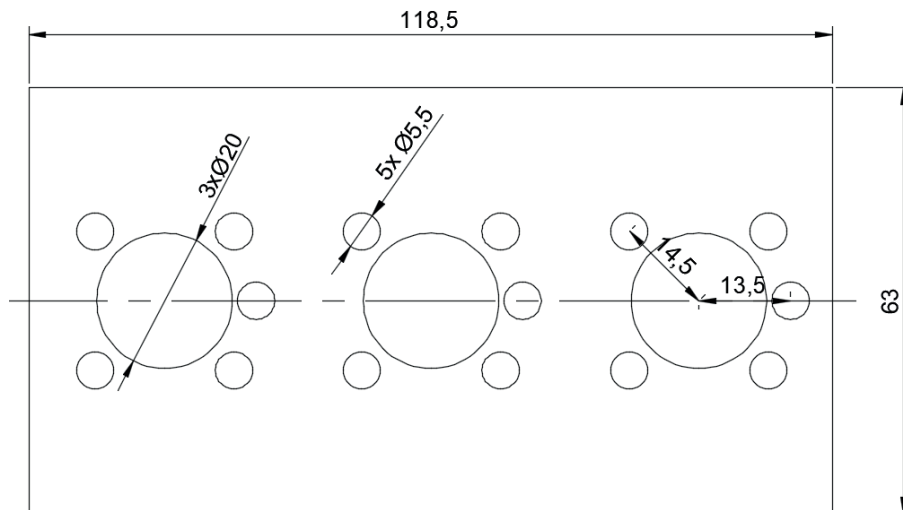
Para a continuidade dos ensaios sem interferência entre as pausas, deve-se observar a limpeza dos componentes e a reposição da junta de papel.

### f) Reposição da junta de papel

Para que não ocorra vazamento entre a base inferior da cuba e os blocos cilíndricos, recomenda-se que após a utilização da junta a mesma venha inspecionada e avaliada pela ocorrência de rasgo ou deformações. Em caso de uma possível reutilização, a junta deve apenas se secar com o auxílio de um soprador de térmico.

Em caso de a mesma não estar em condições de uma possível reutilização, deve ser confeccionada e substituída. A confecção deve ser feita em uma folha de junta de papel de 2 mm de espessura, contendo as dimensões estabelecidas na imagem da figura 23.

Figura 23– Desenho para confecção da junta inferior da cuba



Fonte: Elaborada pelo autor

#### g) Limpeza dos componentes

O procedimento de limpeza dos componentes se divide entre os componentes móveis e os fixos no dispositivo. Utiliza-se para a limpeza o tiner, um pincel de ½ polegada e um de 1 polegada, trapo de pano e ar comprimido.

A cuba e o eixo devem ser limpos com tiner, após a remoção de todos os componentes móveis do dispositivo. Com o auxílio de um pincel de 1 polegada, deve-se aplicar diretamente o tiner, atingindo todas as regiões do eixo e da cuba. O processo deve ser repetido 3 vezes e entre os passos do removedor, deve-se secar o excesso com um trapo e em seguida utilizar ar comprimido. Todo o procedimento deve ser feito em local aberto.

Todo o conjunto de componentes removíveis da bancada deve ser limpo seguindo os mesmos procedimentos adotados para o eixo e a cuba, por fim, realizar uma inspeção visual para a observação de uma possível anormalidade, presença de resíduos e desgastes nos componentes.

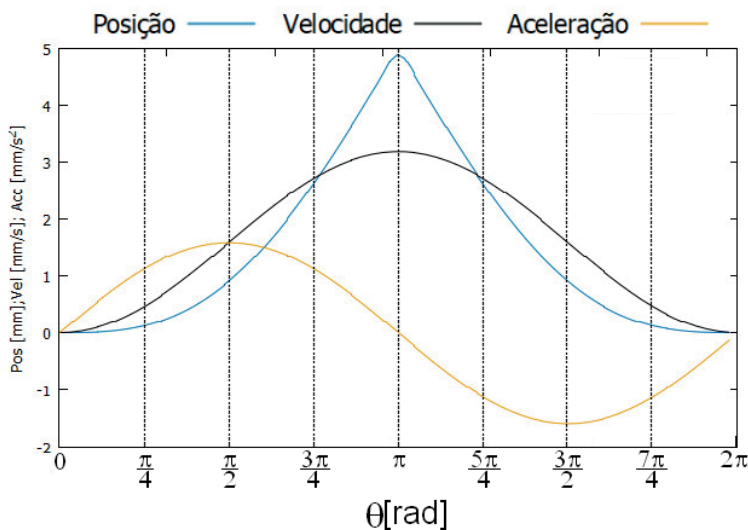
Para todas as etapas de limpeza e adição do lubrificante, recomenda-se utilizar todos os EPI's necessários para a não ocorrência de danos à saúde.

### 2.1.4 Caracterização do mecanismo came-seguidor

O sistema came seguidor em questão é caracterizado por ser robusto e possuir movimento de translação, onde a força de uma mola garante o contato permanente entre os dois elementos. O came possui formato cilíndrico e é considerado radial, por deslocar o seguidor de face plana (disco/êmbolo) na direção radial ao seu eixo. Por não possuir restrições de movimentação, o tipo de movimento é considerado de sobe-desce (SD) sem espera.

Uma das características do movimento SD é a situação em que  $\beta_1 = \beta_2$  ( $t_1 = t_2$ ), onde, o came não permanece em repouso na posição de deslocamento máximo do seguidor, isto é, ao atingir a posição  $h_{\text{máx}}$ , imediatamente é iniciado o movimento de descida. Dessa forma, por meio das equações descritas anteriormente (equação 6 a 11), aplicando-se as condições de contorno assumidas, para o came desenvolvido, obteve-se através do *software* Gnuplot perfis de posição, velocidade e aceleração, mostrados na figura 24.

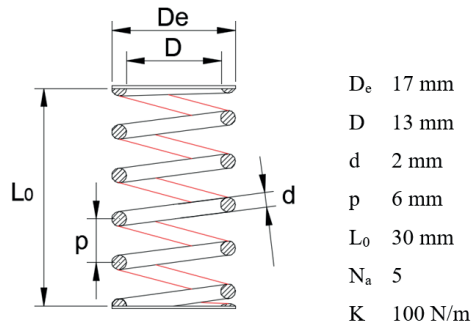
Figura 24 – Diagrama de movimento cicloidal.



Fonte: Elaborada pelo autor

A mola promove a força que mantém o contato contínuo do cilindro com o disco foi escolhida com intuito de equiparar a mesma carga que é aplicada no elemento da bomba de alta pressão do sistema de injeção *Common Rail*. Ela é caracterizada como do tipo helicoidal de compressão de extremidade esquadrejada e esmerilhada. Suas medidas nominais e a carga foram mensuradas no laboratório de metrologia do IFRN, de forma empírica, seguindo os conceitos básicos de medições do  $k$  da mola. Os valores estão apresentados na figura 25 a seguir.

Figura 25 – Parâmetros de caracterização da mola



Fonte: Elaborada pelo autor

### 2.1.5 Caracterização do par tribológico

Por se tratar de um came cilíndrico, a pressão de contato sobre os discos é do tipo cíclica e contínua, devido o constante contato que a força da mola promove sobre os êmbolos. Diante dessas informações, podemos determinar a pressão e tensão de contato no par tribológico came-seguidor, aplicado nesse dispositivo, recorrendo às equações expostas no capítulo anterior.

Para definição do mecanismo came-seguidor em questão, aplicou-se o conjunto de equações 12 a 19 apresentadas anteriormente na revisão deste livro. Os valores obtidos para caracterização geométrica, juntamente com os valores de pressão de contato e tensões normais e de cisalhamento, foram encontrados simultaneamente.

Na sequência, temos:

Equações de caráter geométrico:

$$\text{Constante dos materiais: } m_1 = \frac{1-\nu_1^2}{E_1}, m_2 = \frac{1-\nu_2^2}{E_2}; \quad (14)$$

$$m_1 = m_2 = \frac{1-0,29^2}{2E_{11}} = 4,82E-12$$

$$\text{Constante geométrica do contato: } B = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right); \quad (15)$$

$1/R_2 = 0$ ; para o segundo elemento como um disco

$$B = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_1} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{0,012} \right) = 41,70$$

Para determinar a força  $F$ , que é a força que a mola aplica sobre o embolo, usamos:

$F = kX$ , onde  $k$  é a constante elástica da mola e  $X$  o deslocamento

$$F = 100(0,005) = 0,5N$$

Metade da largura da região de contato:  $a = \sqrt{\frac{2}{\pi} \frac{m_1 + m_2}{B} \frac{F}{L}}$  (1)

$$a = \sqrt{\frac{2}{\pi} \frac{2(4,82E-12)}{41,70} \frac{0,5}{0,0127}} = 0,024 \text{ mm}$$

Área de contato:  $\text{área} = 2aL$  (2)

$$\text{área} = 2 \cdot 0,024 \cdot 0,0127 = 6,096E-4 \text{ mm}^2$$

- Equações de Pressão de Contato

Pressão média de contato:  $P_{\text{média}} = \frac{F}{\text{área}}$  (17)

$$P_{\text{média}} = \frac{0,5}{6,096e-7} = 820 \text{ KPa}$$

Pressão máxima de contato:  $P_{\text{máx}} = \frac{2F}{\pi aL}$  (3)

$$P_{\text{máx}} = \frac{2(0,5)}{\pi(6,096e-7)0,0127} = 41,1 \text{ MPa}$$

- Equações de Tensão de Contato

*Tensões normais:*

$$\sigma_{z\text{máx}} = -p_{\text{máx}} = -41,1 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{x\text{máx}} = \sigma_{y\text{máx}} = -\frac{1+2\gamma}{2} p_{\text{máx}} \quad (18)$$

$$\sigma_{x\text{máx}} = \sigma_{y\text{máx}} = -\frac{1+2(0,29)}{2} 41,1 = -32,706 \text{ MPa}$$

*Tensões de cisalhamento:*

No plano yz – linha de centro:

$$\tau_{yz} = \frac{p_{\text{máx}}}{2} \left[ \frac{(1-2\gamma)}{2} + \frac{2}{9}(1+\gamma)\sqrt{2(1+\gamma)} \right] \quad (19)$$

$$\tau_{yz} = \frac{41,1}{2} \left[ \frac{(1-2(0,29))}{2} + \frac{2}{9}(1+0,29)\sqrt{2(1+0,29)} \right] = 13,78 \text{ MPa}$$

Plano xy – Nas bordas da região de contato:



$$\tau_{xy} = \frac{(1 - 2\gamma)}{3} p_{m\acute{a}x} \quad (20)$$

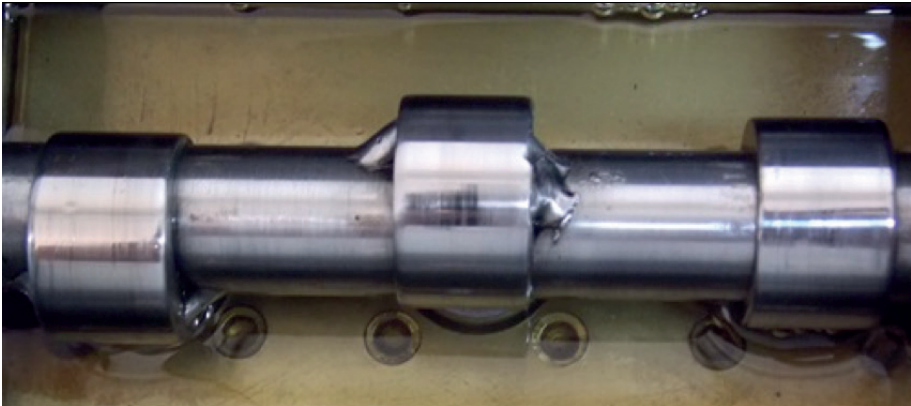
$$\tau_{xy} = \frac{(1 - 2(0,29))}{3} 41,1 = 5,75 \text{ MPa}$$

### 2.1.6 Definição do lubrificante

A escolha do diesel S10 B10 como lubrificante líquido, foi definida em função do sistema em que está sendo estudado. O volume de 35 ml inseridos na cuba, visou garantir a quantidade mínima para que o par tribológico esteja plenamente e continuamente lubrificado. A substituição do lubrificante era feita ao final do período de cada ciclo de ensaios, visando garantir sempre um lubrificante sem nenhum tipo de contaminação.

A figura 26 exibe a acomodação do lubrificante na cuba do dispositivo.

Figura 26 – Vista superior da cuba contendo o lubrificante no local de ensaio



Fonte: Elaborada pelo autor

Aplicando os valores estabelecidos pela carga normal de trabalho entre o came e o disco, em função de sua velocidade de giro e viscosidade do lubrificante, na equação (4) e (5), tem-se a espessura do lubrificante:

$$P_m = \frac{F_n}{2rl} = \frac{0,5}{2 \times 0,012 \times 0,0127} = 1.640,42 \text{ N/mm}^2 \quad (5)$$

$$H = \frac{\eta \omega}{P_m} = \frac{3,5 \times 60,31 \times 10^{-2}}{1.640,42} = 0,00128 \text{ mm} \quad (4)$$

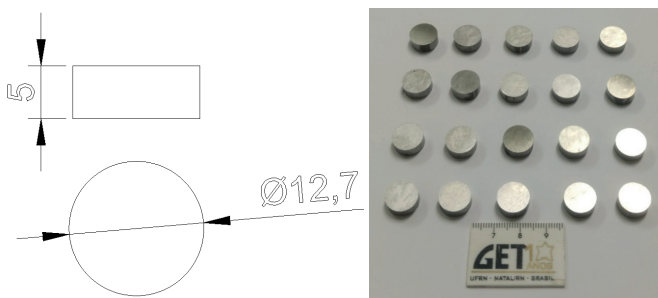
Tal espessura remete ao regime de um sistema com lubrificação Elasto-hidrodinâmica (EHD), característica de quase uma totalidade de projetos de mecanismos cames seguidores, para um sistema imerso em um lubrificante de baixa viscosidade (ROTHBART, 2004).

## 2.2 CORPOS DE PROVA

### 2.2.1 Confeção e caracterização dos corpos de prova

Uma barra circular de 12,70 mm de diâmetro foi utilizada para a confecção dos corpos de prova (discos) utilizados no trabalho. Foram confeccionados 20 discos através do corte refrigerado em uma poli corte metalográfica, deixando-os com sobremetal de 0,127 mm (OBERG et al., 1963). No processo de retificação, removeu-se os 0,127 milímetros de material sobressalente, utilizando um rebolo abrasivo de óxido de alumínio branco, grão 60, de 6 polegadas de diâmetro, realizando 4 passes de 0,03 mm a 3500 rpm e avanço de 10 mm/min, dressado para o acabamento, obtendo um valor nominal de ~5,00 mm de altura dos corpos de prova, como é mostrado esquematicamente na figura 27.

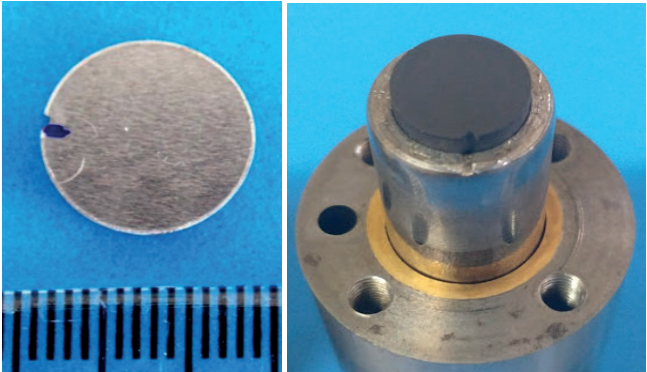
Figura 27 – Vistas em 2D e 3D e materialização do corpo de prova



Fonte: Elaborada pelo autor

Após o processo de retificação com auxílio de uma micro retífica manual, os corpos de prova foram identificados e referenciados em suas laterais, objetivando fazer coincidir a mesma posição de montagem em todos os ciclos durante o decorrer dos ensaios. A figura 28, mostra a referência e a montagem de um corpo de prova na sede do êmbolo.

Figura 28 – (a) Corpo de prova referenciado e (b) montado na sede do êmbolo



2.3 ENSAIO TRIBOLÓGICO

A duração do ensaio baseou-se na contagem de ciclos de revolução do eixo de cames ligado ao motor elétrico, onde, previamente foram estabelecidos 3 pontos de parada significativos para a caracterização do par tribológico.

De forma continuada, as paradas ocorreram em 10.000, 100.000 e 1.000.000 ciclos onde a duração de tempo de cada ensaio, foi obtido a partir da razão entre número de ciclos programados e o número de rotações por minuto do motor, convertido em horas, mostrada na equação a seguir.

$$\text{Tempo de ensaio} = \frac{N^{\circ} \text{ de ciclos}}{RPM} \times 60$$

A tabela 3 apresenta os valores de ciclos estabelecidos para o ensaio, convertidos em tempo de ensaio (horas e minutos) e distância percorrida.

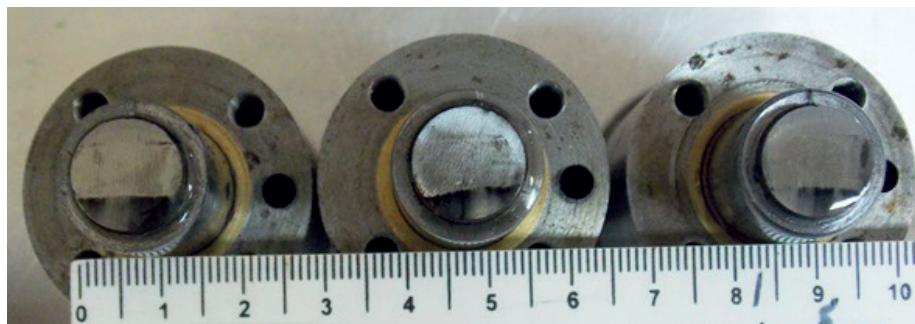
Tabela 4 – Número de ciclos e tempo de ensaio no tribômetro e distância percorrida

Nº de ciclos	Tempo de ensaio (hh: mm)	Dist. percorrida (m)
10.000(10k)	00:21	754
100.000(100k)	03:29	7.540
1.000.000(1M)	34:44	75.400

Fonte: Elaborada pelo autor

Na conclusão de cada etapa, foram feitas paradas, onde as partes móveis da bancada eram removidas, fotografadas e limpas. Em seguida, os três corpos de prova eram retirados do alojamento dos êmbolos e levados para limpeza em banho ultrassônico imersos em álcool isopropílico, para que pudessem ser encaminhados às análises de estrutura e de superfície dos filmes nos devidos laboratórios (figura 29).

Figura 29 – Corpos de prova recém ensaiados, pronto para a desmontagem



Fonte: Elaborada pelo autor

Ao fim das análises realizadas, os corpos de prova eram remontados, sempre na mesma posição e no mesmo êmbolo, tomando como referência as indicações feitas nos êmbolos e nos corpos de prova.

O volume 35 ml do lubrificante novo era repostado dentro da cuba, onde o motor era posto em funcionamento e observado por dois minutos a fim de estabelecer a confiabilidade do uso. Em seguida era feita uma inspeção para possíveis vazamentos, onde em todos os casos foram negativos.

Ao encerrar o ensaio de 1 milhão de ciclos, havia a necessidade de retificar as superfícies dos cames. Este procedimento era feito com o eixo no próprio local de funcionamento utilizando uma sequência de lixas de SiC de maior para menor granulometria, #180 > #400 > #600 > #1200 > #2000.

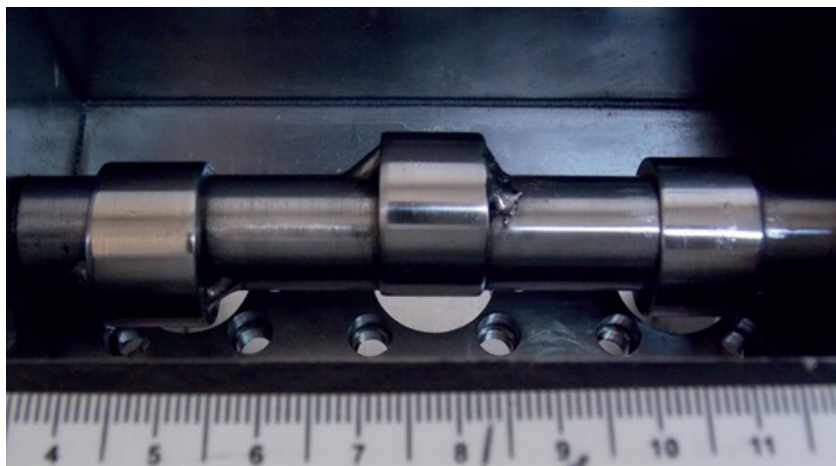
O processo para lixamento foi executado colocando o eixo em movimento e, com auxílio de um apoio plano para a lixa, juntamente com um fluxo contínuo de água, o procedimento era realizado durante o mesmo período de tempo para cada grão de lixa e cada came.

Após o lixamento, os cames, juntamente com a cuba foram submetidos ao procedimento de limpeza, onde foram utilizados álcool isopropílico e acetona, em seguida secados com um soprador térmico.

O acabamento manteve-se sempre dentro das mesmas especificações iniciais, devido a repetitividade do processo, com valores de rugosidade Ra entre 0,2 e 0,25.

A figura 30 mostra a condição do eixo após o processo de lixamento.

Figura 30 – Eixo de cames após o processo de lixamento



Fonte: Elaborada pelo autor

## CONCLUSÕES

O dispositivo tribológico desenvolvido neste livro atendeu satisfatoriamente às necessidades para o qual foi desenvolvido. O mesmo possibilitou a geração de desgaste abrasivo sobre os corpos de prova que foram utilizados neste trabalho, além de ter funcionado adequadamente com o lubrificante. Como sugestão de aprimoramento, pode-se ainda inserir pequenas melhorias nas quais foram observadas no decorrer do trabalho, como a opção de travamento do corpo de prova na parte superior do êmbolo e, inserir um guia lateral para que não ocorra rotação entre o bloco cilíndrico e o êmbolo.

## REFERÊNCIAS

ASTM D3702-94, **Standard Test Method for Wear Rate and Coefficient of Friction of Materials in Self-Lubricated Rubbing Contact Using a Thrust Washer Testing Machine**. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D 6079-05. – **Standard test method for evaluating lubricity of diesel fuels by the high-frequency reciprocating rig (HFRR)**. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM G77-17. **Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test**. . ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM G40-01. **Standard Terminology Relating to Wear and Erosion**. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM G83-96 **Standard Test Method for Wear Testing with a Crossed-Cylinder Apparatus**. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM G99-04, **Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus**. American Society for Testing and Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM G133-05 (2016), **Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-onFlat Sliding Wear**, ASTM International, West Conshohocken, PA.

BEASLEY, C A e TING, Irwin P. **Effects of Plant Growth Substances on in Vitro Fiber Development from Unfertilized Cotton Ovules**. American Journal of Botany, v. 61, n. 2, p. 188–194, 1974.

BHUSHAN, B. **Principles and Applications of Tribology**. 2. ed. [S.l.]: Wiley, 2013. (Tribology Series).

BHUSHAN, Bharat. **Modern tribology handbook**. Volume one ed. Columbus, Ohio: Departament of Mechanical Engineering, Ohio State University, 2001.

BHUSHAN, Bharat (Org.). **Nanotribology and Nanomechanics**. XXVIII ed. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/3-540-28248-3>>.

BUDYNAS, R G e KEITH NISBETT, J. **Elementos de máquinas de Shigley**. 8. ed. [S.l.]: AMGH, 2011.

BURWELL, Jr. J. T. **Survey of possible wear mechanisms**. Wear. Volume 1, p 119 – 141, 1957/58

DOWSON, D. **History of Tribology**. [S.l.]: Wiley, 1998.

HERSEY, Mayo Dyer. **Viscosity of lubricants under pressure**. Mechanical Engineering, v. v. 50, n. n. 3, p. 221–232, 1928.

HUTCHINGS, I M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. [S.l.]: Edward Arnold, 1992. (Friction and Wear of Engineering Materials).

HUTCHINGS, Ian; e SHIPWAY, Philip. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. Second edi ed. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2017.

JOHNSON, K L. **Contact Mechanics**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1987.

JOST, H. Peter. **Lubrication (tribology) : education and research; a report on the present position and industry's needs**. viii ed. London: H.M.S.O., 1966.

KNOTHE, Gerhard. **Evaluation of ball and disc wear scar data in the HFRR lubricity test**. Lubrication Science, v. 20, n. 1, p. 35–45, Jan 2008.

LACEY, P.I., SHAVER, B. D.; **Evaluation of the wear mechanisms present in the HFRR fuel lubricity test**. international colloquium on fuels, Germany, 1999. , p. 678 p.

MARU, Marcia Marie. **Estudo do desgaste e atrito de um par metálico sob deslizamento lubrificado**. 2003. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

NEALE, Michael J. **Tribology Handbook**. [S.l.]: Elsevier, 1995.

NEIS, Patric Daniel. **Projeto e construção de um tribômetro com controle independente da temperatura do disco**. 2012.

NEY FRANCISCO, FERREIRA e PATRIC DANIEL, NEIS e MARCOS ROBERTO FARIAS., SOARES. **Equipamento tribômetro com controle de temperatura e processo de produção**. . Brasil: PI10015167A2. , 2010.

LI, Duanjie e LEROUX, Pierre. **Block on Ring Sliding Wear Evaluation**. [S.l.]: Nanovea, 2016.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas - Uma abordagem integrada**. 4. ed. [S.l: s.n.], 2013.

OBERG, Erik e JONES, Franklin e HORTON, Holbrook. **Manual universal do engenheiro**. 6. ed. [S.l.]: Hemus Livraria, 1963.

RABINOWICZ, Ernest. **The least wear**. Wear, v. 100, n. 1, p. 533–541, 1984.

RADI, Polyana Alves et al. **Tribologia, conceitos e aplicações**. ANAIS DO 13º ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DO ITA (XIII ENCITA). XIII., São José dos Campos. Anais [...]. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica , 2007.

ROTHBART, Harold A. **Cam design handbook**. Nova York: McGraw-Hill, 2004.

SIQUEIRA, Augusto Pereira e colab. **Desenvolvimento de um came para troca de marcha de um veículo off road tipo baja**. 2018, [S.l: s.n.], 2018.

STACHOWIAK, G.W. **ENGINEERING TRIBOLOGY**. 4th.ed. Perth, Australia: ButterworthHeinemann, 2014.

Trezona, R. I., Allsopp, D. N. e Hutchings, I. M. 1999 “**Transitions between two-body and three-body abrasive wear : influence of test conditions in the microscale abrasive wear test**”, Wear, 215, pp. 139–146

TURKISH, Michael Charles. **Valve gear design - A handbook for designers**. [S.l: s.n.], 1946.



VIEIRA, L. Belichi. **Análise do comportamento tribológico em ensaios de microabrasão da superliga de cobalto Co-30cr-19fe nitretada a plasma**. 2017. 117 f. Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.

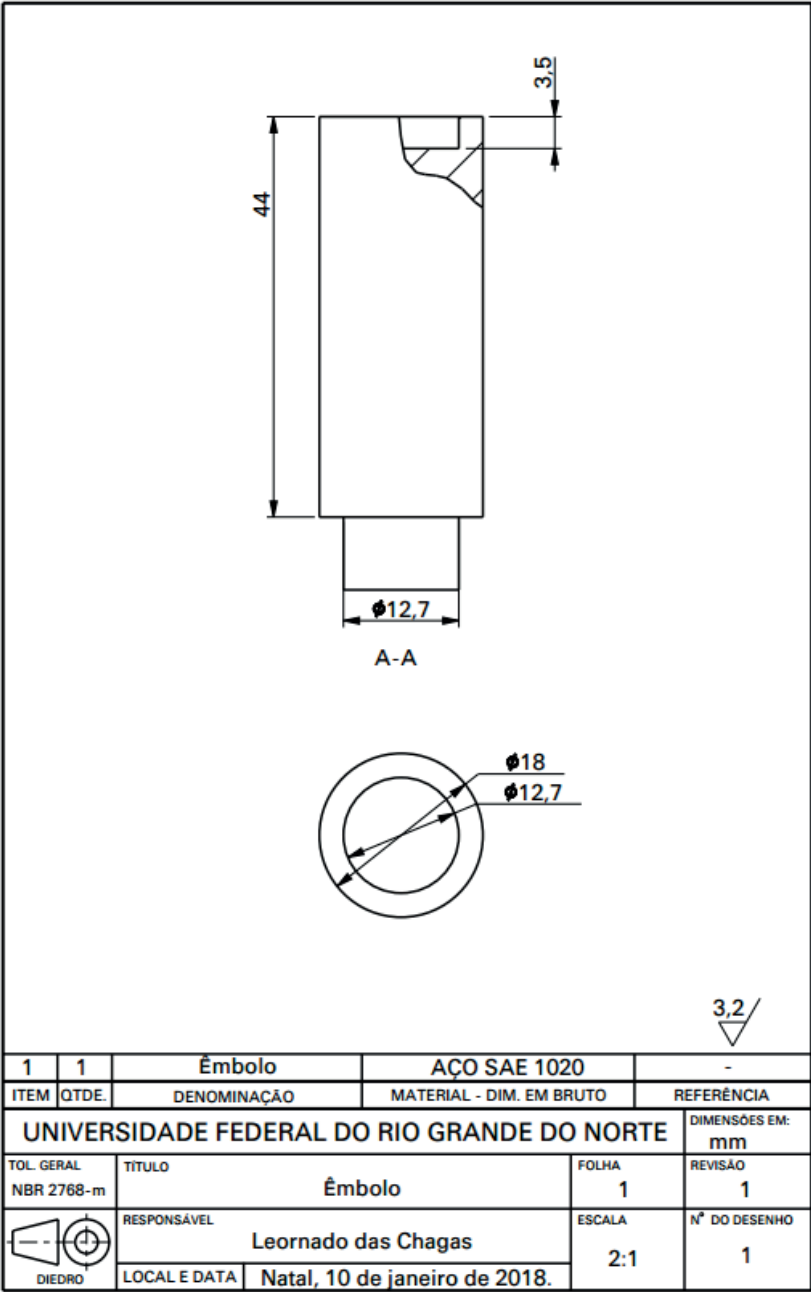
WOYDT, Mathias e WÄSCHE, Rolf. **The history of the Stribeck curve and ball bearing steels: The role of Adolf Martens**. Wear, v. 268, n. 11–12, p. 1542–1546, Maio 2010.

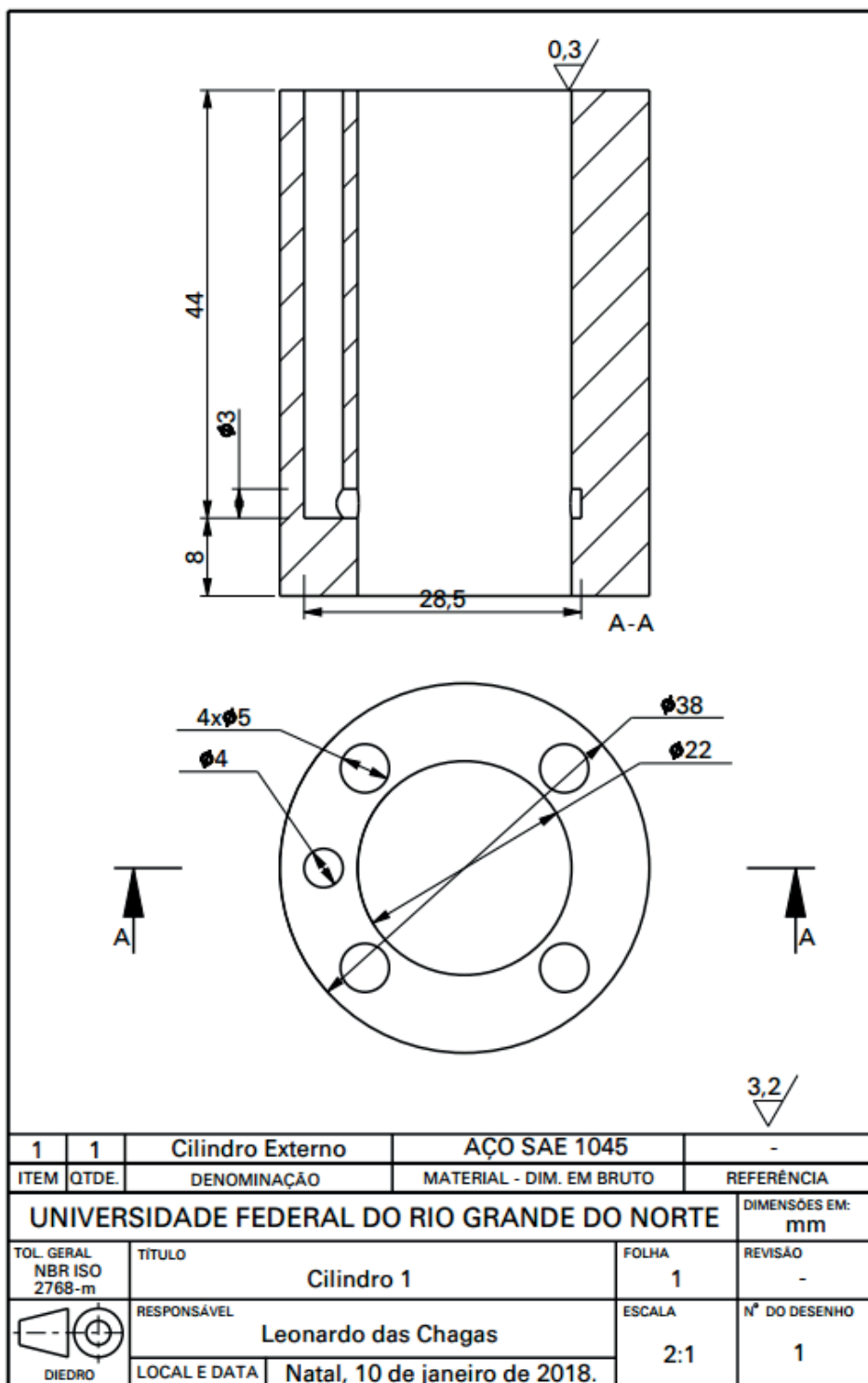
ZUM GAHR, Karl-Heinz. **Microstructure and wear of materials**. [S.l.]: Elsevier, 1987.

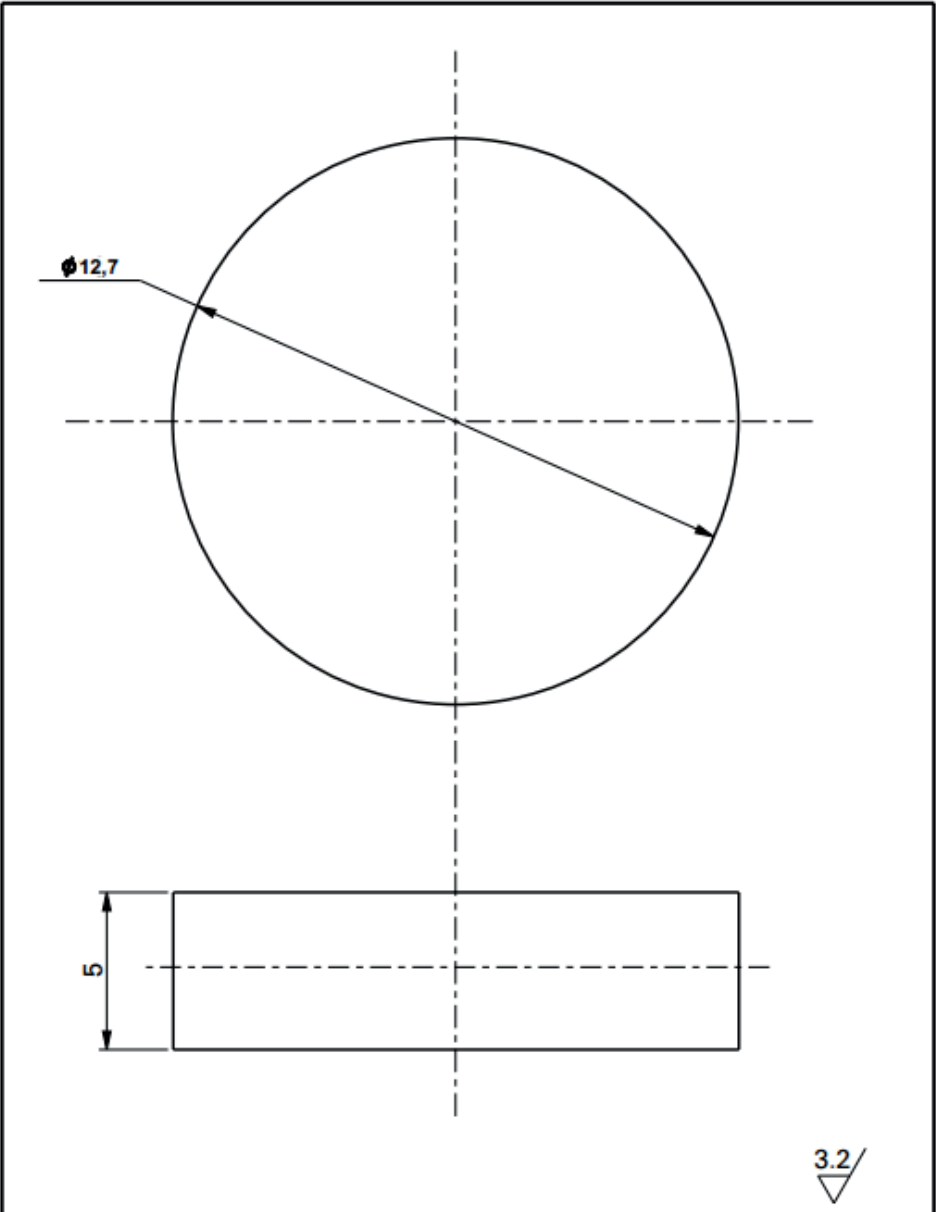
# APÊNDICES

## APÊNDICE A – DESENHOS INDIVIDUAIS DOS COMPONENTES DO TRIBÔMETRO CILINDRO SOBRE DISCO – TRIBOCAME

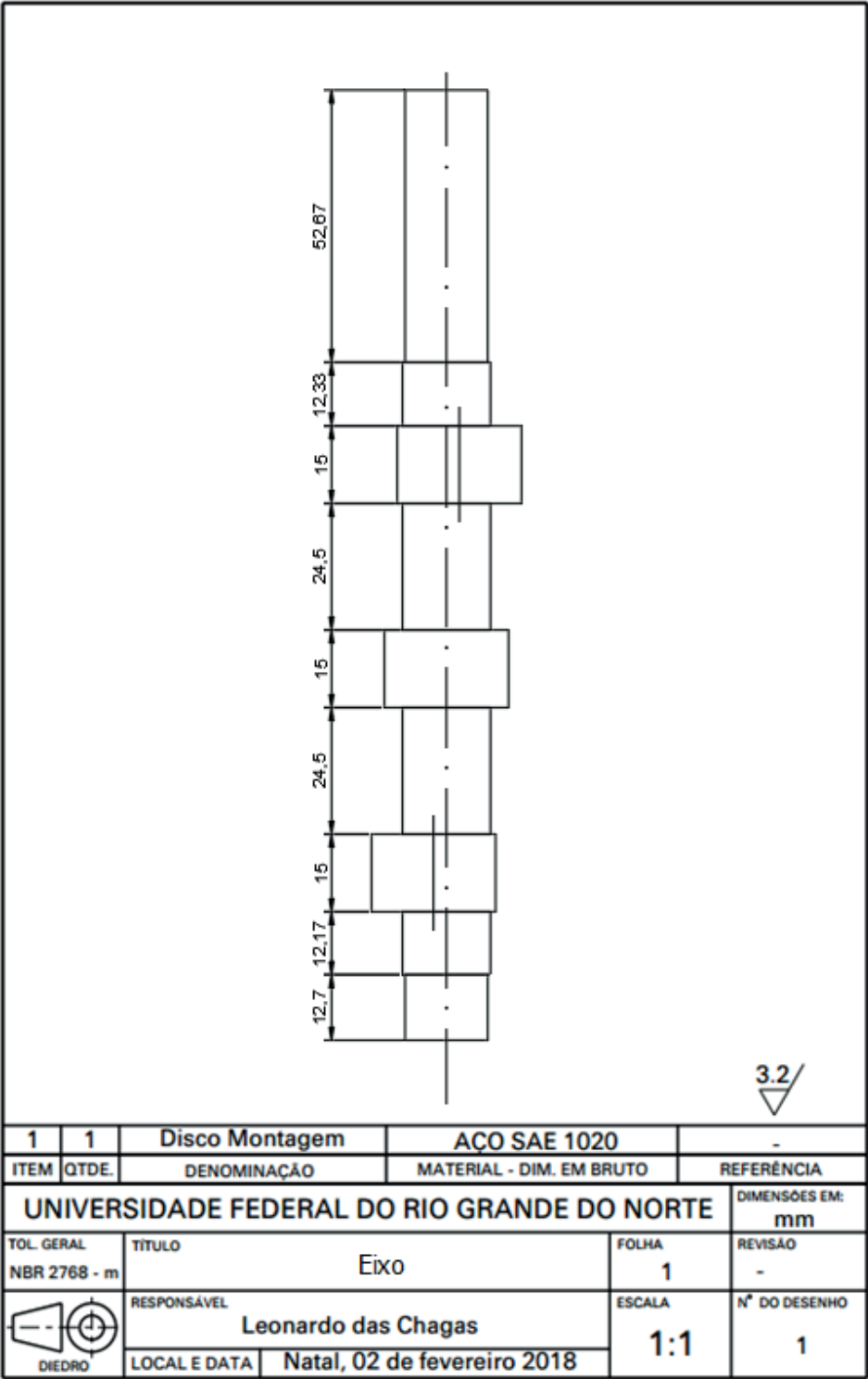
Desenho [001] – Êmbolo

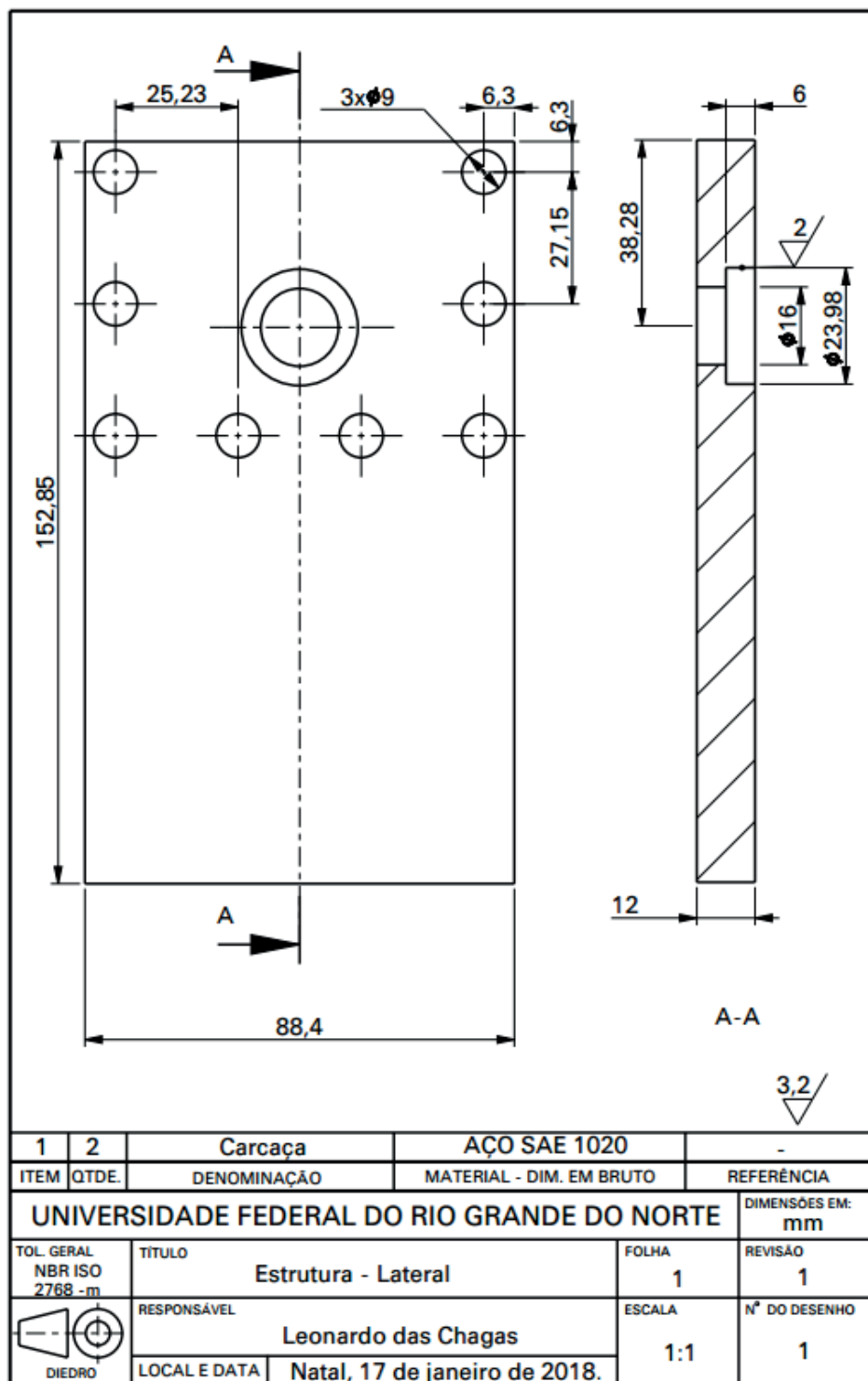


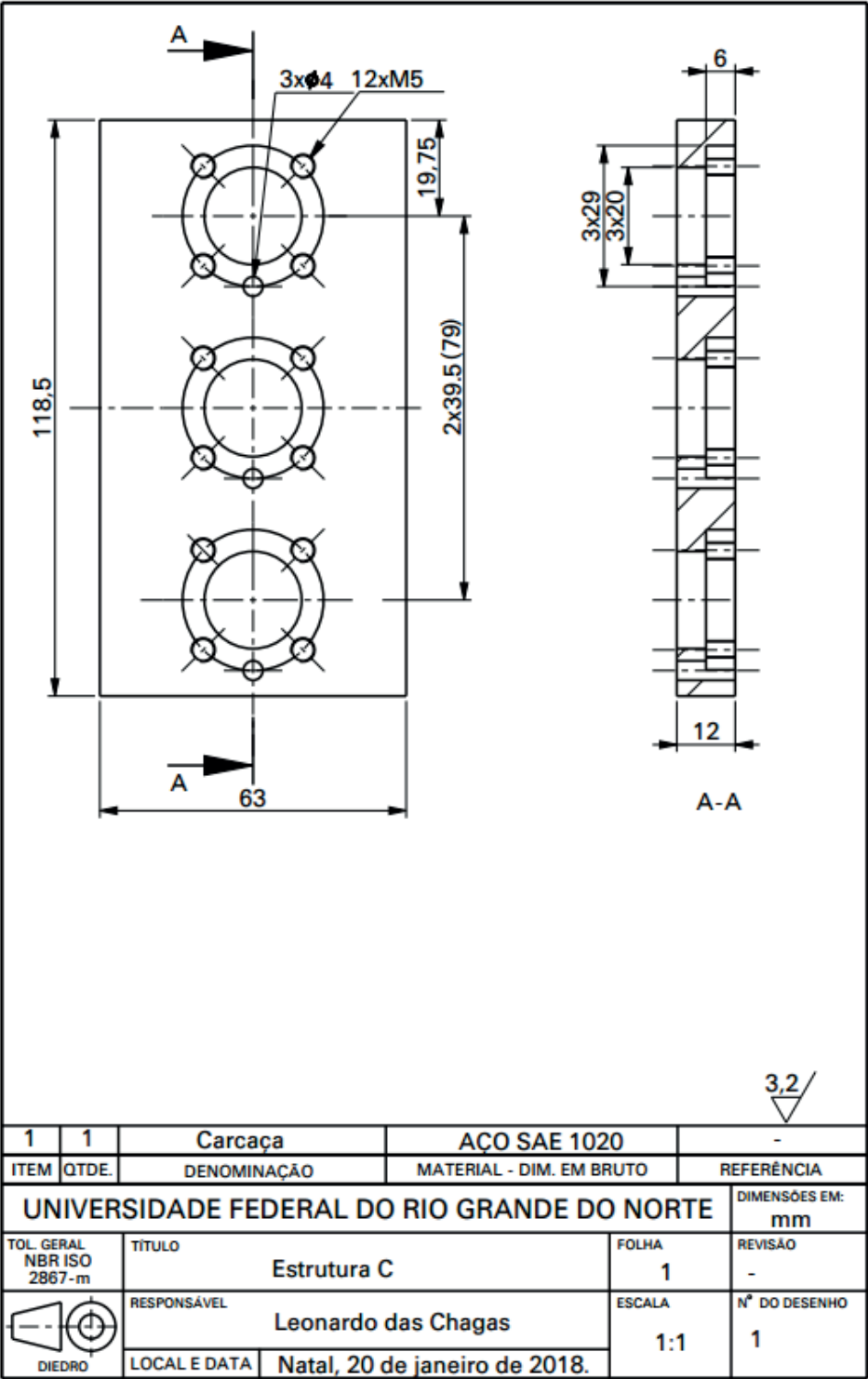


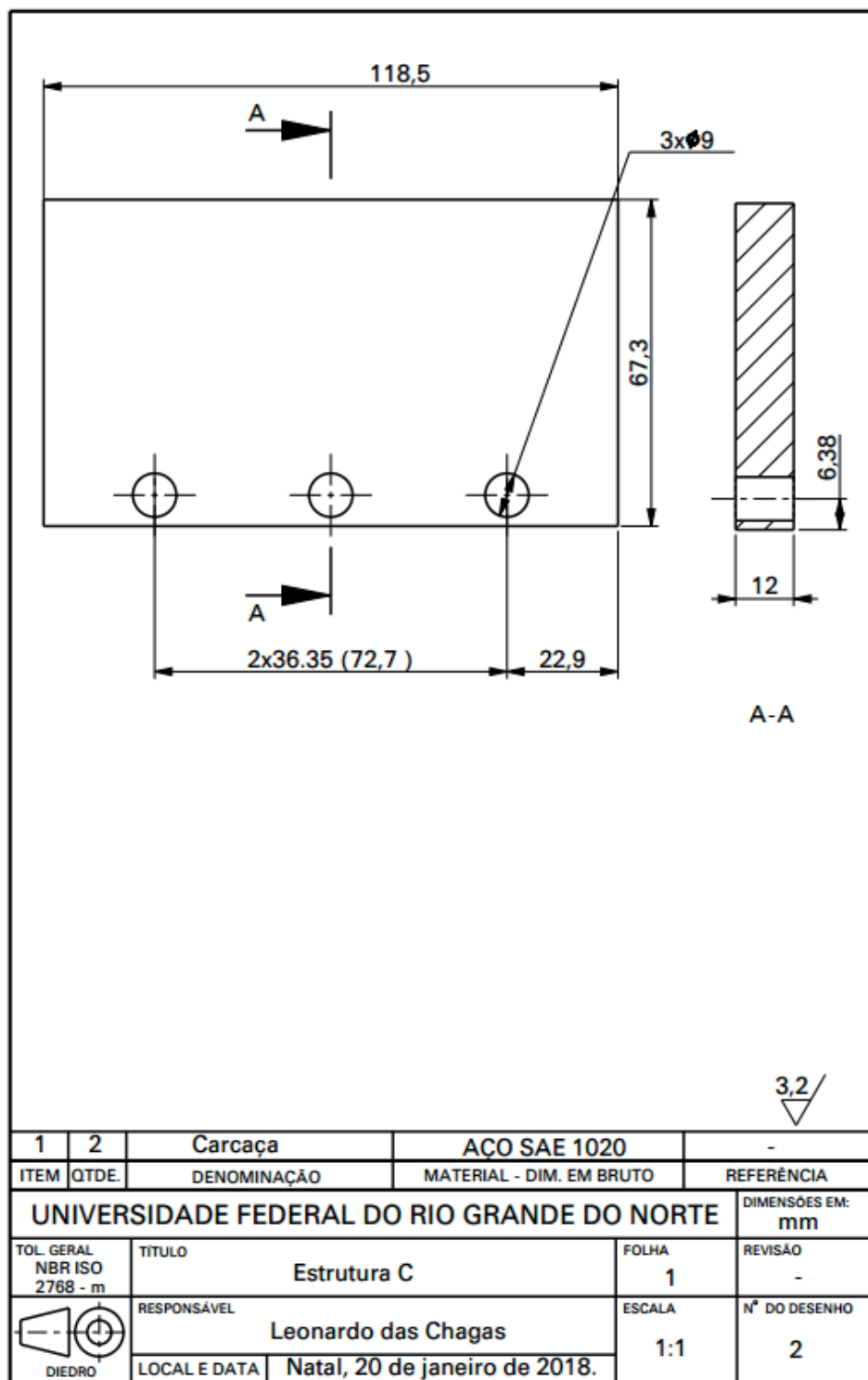


1	1	Disco Montagem	AÇO SAE 1020	-
ITEM	QTDE.	DENOMINAÇÃO	MATERIAL - DIM. EM BRUTO	REFERÊNCIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE				DIMENSÕES EM: mm
TOL. GERAL NBR 2768 - m	TÍTULO Disco		FOLHA 1	REVISÃO -
	RESPONSÁVEL Leonardo das Chagas		ESCALA 6:1	Nº DO DESENHO 1
	LOCAL E DATA	Natal, 02 de fevereiro 2018		











## **APÊNDICE B – PATENTE DE INVENÇÃO (PI) – BR 10 2019 026447 0 PARA “DISPOSITIVO PARA ENSAIOS TRIBOLÓGICO DO TIPO CILINDRO SOBRE DISCO EM MEIO FLUIDO OU SECO”**

### **Relatório descritivo da Patente de Invenção para “DISPOSITIVO PARA ENSAIOS TRIBOLÓGICO DO TIPO CILINDRO SOBRE DISCO EM MEIO FLUIDO OU SECO”**

#### Campo da Invenção

[001] A presente patente de invenção tem por finalidade apresentar um dispositivo de ensaio tribológico do tipo cilindro sobre disco, que permite promover ensaios de desgaste abrasivo por deslizamento entre uma superfície cilíndrica que gira sobre um disco fixo. O dispositivo é adequado e eficiente para provocar esse tipo de desgaste, em um meio lubrificado por um fluido ou a seco.

#### Fundamento da Invenção e Estado da Técnica

[002] A constante busca pela economia de energia, aumento na produção e na vida útil dos sistemas mecânicos, tem reflexos consideráveis no estudo do coeficiente de atrito e na taxa de desgaste. Segundo Zum Gahr (1987), tanto o atrito quanto o desgaste não são propriedades intrínsecas dos materiais, entretanto, dependem fortemente das variáveis do tribossistema.

[003] O atrito entre materiais e, conseqüentemente, o desgaste por abrasão, representa um dos maiores impactos financeiros em qualquer esfera econômica produtiva (HUTCHINGS, 1992). O desgaste abrasivo é definido como a perda de material de um corpo, pelo contato entre superfícies (STACHOWIAK, 2014). O mecanismo em que esse tipo de perda ocorre possui diferentes variações, dentre elas, as mais comuns são por deslizamento e fricção (TREZONA, et al., 1999).

[004] Diante do alto número de ocorrências de falhas e pela necessidade de ensaio de produtos que venham a ser postos no mercado, surge a busca pelo entendimento dos mecanismos de desgaste e desenvolvimento de dispositivos que possibilitem a reprodução das diferentes formas de desgaste nestes produtos.

[005] Via de regra, são conhecidos como tribômetros todos os dispositivos de aplicações genéricas, normalmente utilizados na determinação de coeficientes de atrito e obtenção de desgaste entre superfícies de diferentes materiais, promovendo com segurança, repetibilidade e qualidade, a medição dos itens básicos definidos pela tribologia: atrito, desgaste e lubrificação de novos materiais, desenvolvidos e em desenvolvimento como, por exemplo, compósitos, polímeros, cerâmicas, metais, lubrificantes e aditivos de fluidos de sistemas de lubrificação (NEIS, 2012; RADT, et al., 2007).

[006] O documento DE202011105181U1 descreve um aparato tribológico que gera desgaste das superfícies internas do cilindro de um corpo a ser testado. Um contra corpo é pressionado contra as paredes internas de um cilindro que gira.

[007] A presente invenção difere desse documento por avaliar desgaste em posições diferente, no entanto possuindo semelhanças entre os elementos envolvidos.

[008] O documento JPH04273040A descreve um equipamento capaz de avaliar as propriedades superficiais de filmes finos por meio de ensaio de abrasão, utilizando uma carga leve, possuindo amostras em formas de cilindros, em contato constante com um bloco.

[009] A presente invenção difere desse documento por possuir a condições de ensaios em até três corpos de prova, com dimensões reduzidas, tornando-o assim um aparato compacto e de repetibilidade.

[0010] O documento BR102014022869A2 descreve um tribômetro que proporciona desgaste por meio de atrito utilizando um fluido, onde, é possível analisar a dissipação de calor que esse fluido pode proporcionar.

[0011] A presente invenção difere desse documento por utilizar o fluido apenas como lubrificante não interessando em dissipação de calor em relação aos pares tribológicos.

[0012] O documento JP2001091436A descreve um tribômetro onde é possível avaliar a força de atrito e a quantidade de desgaste da superfície de um material metálico ou cerâmico, utilizando um sistema de bloco em V e um pino rotativo em contato sob uma pressão predeterminada em ambas as superfícies.

[0013] A presente invenção difere desse documento por possuir amostras e forma de contato diferente. No entanto, a possibilidade do uso ou não uso de lubrificante e a intercambialidade dos materiais que constituem as amostras, se assemelha a presente invenção desse texto.

[0014] O documento US20050276532A1 descreve uma invenção direcionada a promover o desgaste de rolamento por meio de um aparelho e método tribológico que incorpora uma bola, um suporte e meios para manter uma força substancialmente constante entre a bola e uma superfície de teste. Como produto de desgaste, tem-se uma pista circular onde a bola rolou e provocou o desgaste e fadiga.

[0015] A presente invenção difere deste dispositivo, por possuir arquitetura de aparato e amostras voltadas para obtenção de desgaste de rolamento e fadiga, obtendo perfis e modelos não similares ao encontrados nesse dispositivo.

[0016] Em se tratando de patentes, pode-se encontrar registros de alguns desses equipamentos em diversos repositórios, os quais estão voltados a produzir desgaste e, caracterizá-lo de forma quantitativa e controlada, por meio de diferentes formas, pressões e mecanismos de desgaste entre os pares tribológicos. No entanto, não foram encontrados documentos antecipando ou sugerindo os ensinamentos da presente invenção, de forma a caracterizar que a solução aqui proposta possui novidade e atividade inventiva ao estado da técnica.

[0017] Comercialmente, pode-se encontrar tribômetros classificados em rotativos ou alternativos, conforme o tipo de movimento entre as superfícies atritadas. O modo de

contato, velocidade, forma de lubrificação, material aplicado, faixa de temperatura, índice de umidade, etc, são alguns dos principais parâmetros possíveis para haver variação nos ensaios. Outro fator determinante na maioria dos tribômetros é o valor da carga, a forma geométrica e o número de amostras, que, normalmente, diferem dos encontrados em sistemas reais, o que não implica na não representação de funcionamento de sistemas reais.

[0018] No geral, os tribômetros são regidos por normas que especificam os parâmetros de funcionamento de acordo com o ensaio e o material que está sendo avaliado. Estas normas determinam as condições adequadas para que sejam realizados os ensaios conforme as condições citadas anteriormente.

[0019] Para tribômetros rotativos, semelhantes ao cilindro sobre discos, as principais normas são as ASTM G77 – 17 e ASTM G83 – 96, que tratam da padronização de ensaios de resistência de materiais ao desgaste deslizante, em que são utilizados componentes similares ao dispositivo tribológico desenvolvido nesta patente.

[0020] No entanto, o equipamento sugerido pelas normas mencionadas anteriormente permite utilizar apenas amostras de perfis em prisma de base quadrada ou cilindros com dimensões superiores ao utilizado no dispositivo desenvolvido, tornando-os pouco flexíveis sob a perspectiva mecânica e instrumental. Deve-se, ainda, levar em conta que, ainda, não há um procedimento ou uma norma de ensaio específica quando se deseja conhecer a resistência ao desgaste de superfícies não conformes em contato, por meio de atrito de deslizamento, onde os objetos ensaiados sejam um cilindro que gira contra um disco sob uma força atuante de uma mola, imersos em lubrificante.

[0021] Assim, nesta invenção, o dispositivo desenvolvido diferencia-se dos demais, por contemplar a intercambialidade quanto à especificação de materiais a serem analisados, pelo formato característico do contato descrito anteriormente e pela capacidade de escolha do uso ou não uso do lubrificante no contato entre os pares tribológicos com dimensões reduzidas.

[0022] Dessa forma, o presente pedido de patente compreende-se em um modelo experimental de um tribômetro definido por cilindro sobre disco, que funciona a partir de um cilindro que gira continuamente contra um disco, posicionado e pressionado constantemente na posição horizontal/ortogonal (em relação ao cilindro), tendo por finalidade produzir como resultados dos ensaios nas amostras, riscos (escaras) com características abrasivas oriundas do contato entre o par tribológico.

#### Descrição da abordagem do problema técnico

[0023] De acordo com Hutchings (1992) e Burwell (1957), é possível haver diferentes tipos de desgaste, dentre eles os mais comuns são desgaste por abrasão, contato, erosão, riscamento e esclerometria. A ASTM G40-01 (ASTM, 2001) define a terminologia padrão referente ao desgaste e erosão, sendo o desgaste abrasivo descrito como a perda de massa resultante da interação entre partículas ou asperezas duras que são forçadas contra uma superfície, ao longo da qual se movem.

[0024] Em sistemas onde há deslizamento, o desgaste pode ocorrer por mecanismos de adesão, oxidação, fadiga e/ou abrasão, sendo possível existir a ocorrência de um mecanismo isolado ou mesmo a interação entre eles. Os danos resultantes nas superfícies em contato, são denominados por desgaste abrasivo, devido o mecanismo de desgaste ocorrido ter sido a abrasão (ZUM GAHR, 1987).

[0025] A proposta do tribômetro está direcionada à promoção de desgaste abrasivo, sobre a superfície de uma amostra em forma de disco, que estará fixa em um suporte e em contato com o cilindro em movimento rotativo contínuo. A estrutura desse tribômetro permite obter desgaste em três amostras simultaneamente, sob as mesmas condições de ensaio, diferenciando-se dos sistemas habituais onde, normalmente, só se é possível o ensaio em apenas uma amostra. A opção de utilização de um lubrificante confere, também, a possibilidade de ensaiar um lubrificante comercial ou que esteja sendo desenvolvido.

#### Descrição detalhada da invenção e das figuras

[0026] Todos os elementos relevantes do sistema sugerido estão identificados na Figura 1, onde é exibida uma vista em corte da montagem do conjunto que funciona como suporte do êmbolo, juntamente com o contato entre o cilindro (2) e o disco (amostra) (3) no momento do ensaio.

[0027] O disco (3) é inserido em um certo alojamento na extremidade superior de um êmbolo (4) de aço que funciona como suporte. Este, encontram-se montado em pequena estrutura cilíndrica (6) de aço, que contém um revestimento de bronze (6a) em seu interior, servindo como guia para deslizamento do êmbolo (4).

[0028] São utilizadas três estruturas idênticas, onde, em cada uma delas há um canal interno de lubrificação e armazenamento (6b) do fluido que pode ser utilizado nos ensaios e, também, aloja uma mola (5) utilizada para exercer a força contínua de expansão que mantém o contato entre o par cilindro (2) - disco (3).

[0029] Os três cilindros estão defasados em 120° e são fixados em um eixo (1) que é montado e suportado por mancais de rolamento inseridos na estrutura (7) do aparato da bancada como mostrado na Figura 2. Em uma extremidade do eixo é utilizado um acoplamento flexível (9) que, por sua vez, está conectado a um motor elétrico (10) DC de potência na faixa de 0,5 a 2 cv, que mantém o sistema em funcionamento a uma rotação de trabalho entre 30 e 1720 rpm, com velocidade tangencial equivalente ao diâmetro e rotação de trabalho.

[0030] Por meio de programação, a velocidade de rotação do eixo (1) é controlada por um inversor de frequência eletrônica (11), possibilitando registrar a quantidade de horas ensaiadas com o motor (10) em funcionamento, estabelecendo o controle de rotação e incrementando o tipo de partida e desligamento de forma suave (tipo rampa) do motor (10), reduzindo, assim, impactos e trancos nesses dois momentos.

[0031] A Figura 2 exibe uma vista superior e a Figura 3 exibe uma vista lateral de todo o conjunto do dispositivo de ensaio tribológico do tipo cilindro sobre disco. Nelas estão apresentados e identificados todos os elementos relevantes do sistema.

[0032] A estrutura do aparato (7) é confeccionada em aço e possui função estrutural e de suporte para montagem do eixo (1) e dos blocos cilíndricos (6). Ela também é utilizada como recipiente do fluido lubrificante, para isso, é necessário que o recipiente interno (8) seja hermético na região que entrará em contato com o fluido. Na parte superior é inserida uma tampa (14) de material transparente, com função de promover a vedação e manter a acústica da estrutura.

[0033] Todos os componentes são montados e fixados em uma base (13) rígida revestida por folha de alumínio. O acionamento do motor elétrico é feito por um interruptor (12) padrão e toda instalação elétrica é embutida, minimizando o risco de acidente. A contagem do tempo de ensaio é feita pelo inversor de frequência (11) ou de forma manual.

[0034] O sistema cilindro sobre disco utilizado nesse dispositivo é caracterizado por ser robusto e possuir movimento de translação, onde a força exercida pela mola (5) garante o contato permanente entre os dois elementos. O par encontra-se imerso em um baixo volume de um fluido lubrificante à temperatura ambiente ou de trabalho.

[0035] O cilindro (2) possui formato um came cilíndrico e é considerado radial, por deslocar a amostra (3) junto ao êmbolo (4) na direção radial ao seu eixo. Por não possuir restrições de movimentação, o tipo de movimento é considerado de sobe-desce (SD), sem espera.

[0036] Uma das características do movimento SD é a situação em que os intervalos angulares  $\beta_1$  e  $\beta_2$  e os intervalos de tempo  $t_1$  e  $t_2$  se igualem ( $\beta_1 = \beta_2$ ) e ( $t_1 = t_2$ ), onde, o cilindro (2) não permanece em repouso na posição de deslocamento máximo da amostra (3) e êmbolo (4), isto é, ao atingir a posição altura máxima ( $h_{max}$ ), imediatamente, é iniciado o movimento de descida.

[0037] A mola (5) que promove a força que mantém o contato contínuo do cilindro (2) com a amostra (3) é do tipo helicoidal de compressão de extremidade esquadrejada e esmerilhada, sendo a mesma aplicada no elemento da bomba de alta pressão do sistema *common rail* da bomba Bosch CP1H.

[0038] A escolha da lubrificação é facultativa, sendo que o volume de lubrificante contido na cuba (8) visa garantir a quantidade mínima para que o par tribológico esteja plenamente e continuamente lubrificado. A substituição deve ser feita ao final do período de cada ciclo para garantia de um lubrificante livre de qualquer tipo de contaminação.

[0039] A amostra (3) padrão utilizada no aparato possui 12,70 mm diâmetro e 5 mm de altura. Recomenda-se deixar um sobrematerial de 0,127 mm (OBERG et al., 1963), para, se necessário, passar pelo processo de retificação.

[0040] A duração do ensaio baseia-se na contagem de ciclos de revolução do eixo (1) ligado ao motor elétrico (10), sendo este número obtido a partir da razão entre o número de ciclos desejados e o número de rotações por minuto do motor, convertido em horas:  $Tens = (N^\circ \text{ ciclos} \times 60)/rpm$ .

[0041] Diante dessas configurações, é possível simular as falhas ocorridas em sistemas que aplicam esse mecanismo, entender melhor o processo evolutivo do desgaste por deslizamento em componentes mecânicos e propor melhorias e inovações em termos acadêmicos e industriais, no que diz respeito ao estudo do desgaste e engenharia de superfícies.

[0042] Tempo e velocidade são parâmetros definidos pelo usuário e são facilmente adaptáveis, permitindo, também, paradas para desmontagem e análises evolutivas do desgaste em outros equipamentos (como MEV, EDS, rugosímetros, perda mássica, etc.).

[0043] O dispositivo de ensaio permite ainda variantes, podendo também ser utilizado para análise do lubrificante, alterando apenas o fluido; da variação na velocidade de giro do eixo; do aumento da pressão de contato, utilizando uma mola (5) com  $k$  maior; e também pode-se utilizar até três materiais de composições diferentes ensaiados simultaneamente. A intercambialidade e as alterações no parâmetro formam um grande leque de opções de ensaio no presente equipamento.

[0044] Ademais, o aparato desenvolvido é compacto, permitindo facilmente sua instalação em laboratório. Possui um baixo consumo de energia, por movimentar uma carga de baixa resistência, além de possuir um motor elétrico (10) e um sistema de controle moderno tornando-o eficiente e robusto para realização dos ensaios.

## REIVINDICAÇÕES

1. **“DISPOSITIVO PARA ENSAIO TRIBOLÓGICO DO TIPO CILINDRO SOBRE DISCO EM MEIO FLUIDO OU SECO”**, caracterizado por ser constituído de três cilindros (2) independentes, fixados em um eixo (1), que giram simultaneamente, cada um sobre uma amostra (3) plana, em forma de disco, alojadas em êmbolos (4), onde, o contato é mantido por força de uma mola (5), inserida em um bloco cilíndrico (6) montados na estrutura (7) metálica do aparato, possuindo a opção de ajuste na velocidade linear, sentido de giro e partida/desligamento de forma suave promovidos por um controlador eletrônico (11); fundamentado em um sistema completo para avaliar desgaste de materiais por abrasão, caracterizando-se pelo movimento relativo entre os componentes (2) e (3), realizando ensaios em triplicata de forma simultânea.
2. **“DISPOSITIVO PARA ENSAIO TRIBOLÓGICO DO TIPO CILINDRO SOBRE DISCO EM MEIO FLUIDO OU SECO”**, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por utilizar qualquer fluido lubrificante em um reservatório (8) com baixo volume para ensaio abrasivo do tipo cilindro sobre disco, ou ainda, a realização do ensaio sem fluido lubrificante (ensaio tribológico a seco);
3. **“DISPOSITIVO PARA ENSAIO TRIBOLÓGICO DO TIPO CILINDRO SOBRE DISCO EM MEIO FLUIDO OU SECO”**, de acordo com a reivindicação 1 e 2, caracterizado por admitir um formato plano de amostra (3) com dimensões de diâmetro:  $12,7 \pm 0,1$  mm e espessura:  $5 \pm 0,5$  mm, admitindo a diversificação de materiais das amostras (3);

## DESENHOS

Figura 1

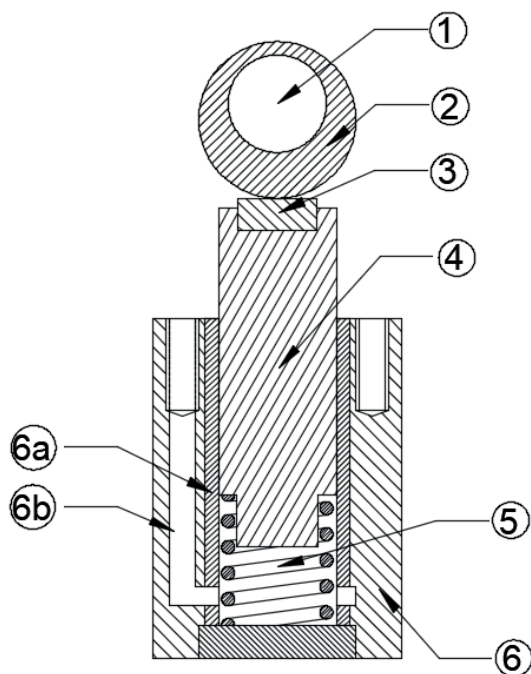


Figura 2

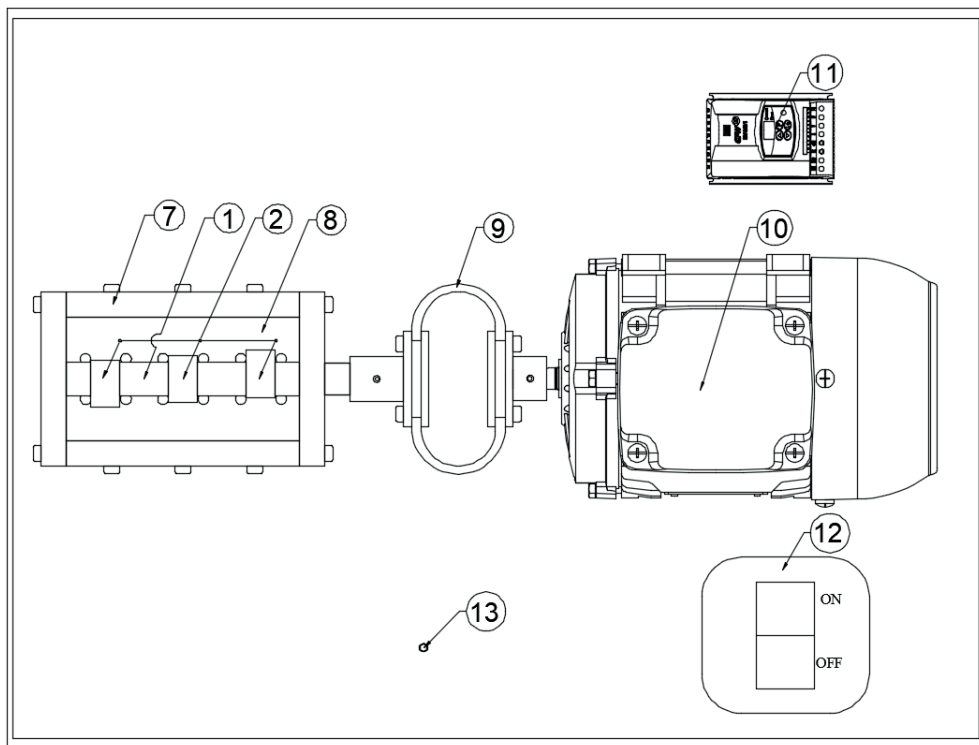
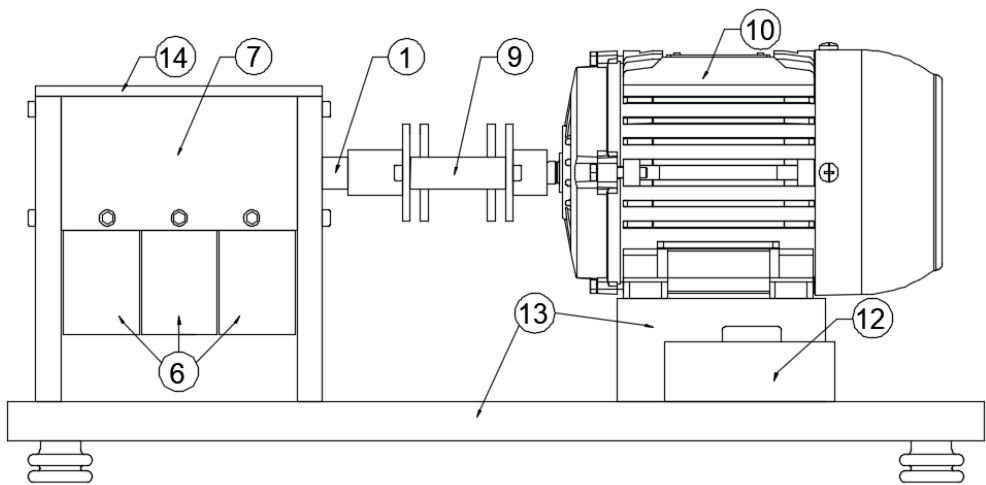




Figura 3



## RESUMO





### Patente de Invenção para “**DISPOSITIVO PARA ENSAIO TRIBOLÓGICO DO TIPO CILINDRO SOBRE DISCO EM MEIO FLUIDO OU SECO**”

A presente invenção trata de um dispositivo utilizado para realizar ensaios tribológicos do tipo cilindro sobre discos em meio fluido ou não, suprimindo a falta de um dispositivo específico para ensaios abrasivos em meio fluido, baseado nas limitações encontradas em determinados tribômetros para este fim. A forma de desgaste abrasiva, semelhante à obtida neste ensaio, está presente em diversas situações do campo da mecânica, como em mancais de deslizamento, sistema came seguidores, (etc). A finalidade do dispositivo desenvolvido neste invento é utilizar o contato entre o cilindro e um disco para promover o desgaste em suas superfícies e, em termos de funcionalidades, o modelo aqui descrito deixa a operacionalidade metodológica de ensaio, sob critério e escolha do operador, onde é possível ter controle do tempo, velocidade e carga, assim como, a possibilidade de ser avaliado o fluido que esteja sendo utilizado no trabalho. A disposição da bancada permite a realização de ensaio em triplicata, de forma a obter avaliações comparativas entre três superfícies, em amostras distintas, simultaneamente, desgastadas.

**LEONARDO CHAGAS DA SILVA** - Formado como Técnico em Mecânica Industrial pelo Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), em 2010, com ênfase em Desenho técnico mecânico; Motores de combustão interna; Usinagem mecânica convencional. Engenheiro Mecânico formado pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), em 2012, com destaque na avaliação de manutenção e consumo de combustível em frotas de transporte coletivo. Possui o título de Mestre em Engenharia Mecânica pela UFRN (2015), com ênfase em Tribologia de motores de combustão interna e suas emissões. Concluiu o Doutorado em Engenharia Mecânica pela UFRN (2020), com expertise em ciências tribológicas, na relação entre alguns materiais que compõe o subsistema de injeção de combustível do tipo Common Rail - combustíveis - tratamento de superfície para melhoramento por meio de plasma. Atualmente técnico de laboratório do IFRN. Área de atuação em MCI, combustíveis e emissões, tratamento de superfície por meio de plasma, projetos mecânicos.

**MANOEL FERNANDES DE OLIVEIRA FILHO** - Professor Titular do IFRN. Possui graduação em engenharia mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN (1983) e especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho pela UFRN (1987). É mestre (2011) e doutor (2016) em Engenharia Mecânica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFRN. Atualmente desenvolve pesquisa na área de Motores de Combustão Interna, Tribologia e Uso de Biodiesel.

PROJETO  
E CONSTRUÇÃO DE UM  
TRIBÔMETRO:  
T R I B O C A M E

 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
 [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)  
 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)  
 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

PROJETO  
E CONSTRUÇÃO DE UM  
TRIBÔMETRO:  
T R I B O C A M E

🌐 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
✉ [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)  
📷 @atenaeditora  
📘 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)