

ERIKA MICHELE DAMAS

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL
EM AMOSTRA DE FERRO FUNDIDO CINZENTO**



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

2020

ERIKA MICHELE DAMAS

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL
EM AMOSTRA DE FERRO FUNDIDO CINZENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica da **Universidade Federal de Uberlândia**, como requisito parcial para obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica.**

Orientador: Prof. Dr. Washington Martins da Silva Júnior

Uberlândia – MG

2020

Agradecimentos

Primeiramente quero agradecer a Deus que me deu a oportunidade de viver toda a experiência de cursar um curso superior e me deu sabedoria de chegar até o presente momento. Quero também agradecer aos amigos e familiares que me suportaram durante toda essa trajetória, me aconselhando em momentos difíceis e comemorando comigo momentos felizes.

Quero agradecer a todo o corpo docente da faculdade que ajudou a forma a pessoa que sou hoje, em especial meu professor orientador que me desenvolveu como uma pesquisadora e aos companheiros do laboratório de Tribologia e matérias que sempre me ajudaram.

Quero agradecer a todas as pessoas que participaram, direta e indiretamente no desenvolvimento deste trabalho, desde o auxílio para conseguir o material para os testes até a correção do trabalho escrito.

Agradeço ao CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo financiamento

Resumo

A texturização superficial é a formação de microcavidades regulares na superfície do corpo. Em sistemas lubrificados, as microcavidades podem potencializar os efeitos hidrodinâmicos auxiliando a minimizar o atrito e o desgaste. Texturas já são utilizadas nas camisas de cilindros de motores a combustão interna e em mancais de deslizamento. Neste trabalho, foi utilizado o método de texturização eletroquímica sem mascaramento (MECT), para a obtenção de textura no formato de Chevron, em amostras de ferro fundido cinzento. Para avaliar o desgaste, foi utilizado um Microtribômetro desenvolvido no LTM com o objetivo de realizar ensaios de deslizamento com movimento alternado. Os corpos utilizados foram esferas de aço 52100 com 5 mm de diâmetro. Como resultado foi gerado o mapa de triboscopia dos ensaios e os gráficos de coeficiente de atrito instantâneo e médio.

Palavras-Chaves: Tribologia, texturização, deslizamento alternado, lubrificação.

Abstract

Surface texturization is the formation of micro-cavities on the surfaces according certain shapes and patterns. In lubricate systems, those micro-cavities promote hydrodynamic effects that potentially reduce friction and wear. For example, different texturing techniques are applied in cylinders of internal combustion engines and in sliding bearings. In the present study the maskless electrochemical texturing (MECT) method is applied in order to obtain patterns of texture in chevron shape on gray cast iron shape. A microtribometer was used to evaluate the reciprocating wear test. This equipment was specially developed to perform a high sensitive reciprocating sliding wear test. The counter body was a 5 mm sphere of AISI 52100 steel. The input parameters for experiment was frequency, normal load and test time. The efficiency of the presence of texture, tests will be conducted in specimen with and without texture and with and without lubrication.

Keywords: Microtribometer, reciprocating sliding wear, triboscopy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Tipos de movimentos relativos de superfícies: (a) rolamento e (b) deslizamento (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017a).

Figura 2-2 Movimento relativo entre superfícies (A) rugosa e (B) lisa, onde a seta indica o sentido e direção do movimento.

Figura 2-3 Mecanismos microscópicos relacionados ao fenômeno do atrito para superfícies metálicas: (a) adesão, (b) deformação plástica e (c) presença de terceiro corpo na interface de contato. Adaptado de (ASM, 1992).

Figura 2-4 Representação de contatos (a) conformes e (b) não conformes (HUTCHINGS, 1992).

Figura 2-5 Ensaio de deslizamento com movimento alternado

Figura 2-6 Efeito da microcavidade agindo como reservatório de fluido lubrificante. Adaptado de (UEHARA et al., 2004).

Figura 2-7 Curva de Stribeck ilustrando os diferentes tipos de lubrificação para contatos conformes e não conformes. Adaptado por (RODRIGUES, T. A 2018) de (HAMROCK; SCHMID; JACOBSON, 2004; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017b).

Figura 2-8 Energia não aproveitada em veículos de passeio. (Silva, L.R.R.,2016)

Figura 2-9 Exemplo de textura superficial do tipo chevron obtida pelo método MECT (RODRIGUES, T.A, 2018).

Figura 3-1 Fluxograma do desenvolvimento do trabalho

Figura 3-2 Contra corpo e sistema de montagem (DUTRA,2017).

Figura 3-3 Aparato experimental utilizado na MECT.

Figura 3-4 Máscara para usinagem não convencional da textura (RODRIGUES,2018).

Figura 3-5 Micrografia da textura em Chevron.

Figura 3-6 (a) Detalhamento do Microtribômetro, (b) Porta amostra para ensaio lubrificado.

Figura 3-7 Deslizamento alternado

Figura 3-8 Mapa de triboscopia de um ensaio realizado no equipamento microtribômetro DUTRA (2018).

Figura 3-9 Desenho da cuba para ensaios lubrificados.

Figura 3-10 Cuba física.

Figura 4-1 MEV da micrografia da superfície do ferro fundido classe FC 300 (Mo+RG) em (b) temos o zoom da região 1 em (a). (Reis, A.-2020)

Figura 4-2 Micrografia da superfície do ferro fundido classe FC 300 (Mo+RG) com ataque NITAL 3%, obtidas por meio do microscópio óptico. (Reis, A. 2020)

Figura 4-3 Imagem microscópio óptico da (a) trilha de desgaste e a (b) marca de desgaste do contra corpo do ensaio sem lubrificação e sem textura.

Figura 4-4 Microscopia eletrônica de varredura, utilizando elétrons retroespalhados, do ensaio sem lubrificação e sem textura, da marca de desgaste (a) da amostra e (b) do contra corpo, com análise e EDS (c) para área 1 da amostra e (d) para área 2 do contra corpo.

Figura 4-5 Imagem microscópio óptico da (a) trilha de desgaste e a (b) marca de desgaste do contra corpo do ensaio com lubrificação e sem textura.

Figura 4-6 Microscopia eletrônica de varredura, utilizando elétrons retroespalhados, do ensaio com lubrificação e sem textura, da marca de desgaste (a) da amostra e (b) do contra corpo.

Figura 4-7 Triboscopia das amostras sem textura no regime (a) a seco e (b) com lubrificação.

Figura 4-8 Imagem microscópio óptico da (a) trilha de desgaste e a (b) marca de desgaste do contra corpo do ensaio sem lubrificação e com textura.

Figura 4-9 Microscopia eletrônica de varredura, utilizando elétrons retroespalhados, do ensaio sem lubrificação e com textura, da marca de desgaste (a) da amostra e (b) do contra corpo, com análise e EDS (c) para área 1 e (d) para área 2 da amostra e (e) para área 3 do contra corpo. A seta vermelha indica o sentido do deslizamento.

Figura 4-10 Imagem microscópio óptico da (a) trilha de desgaste e a (b) marca de desgaste do contra corpo do ensaio com lubrificação e com textura.

Figura 4-11 Microscopia eletrônica de varredura, utilizando elétrons retroespalhados, do ensaio com lubrificação e com textura, da marca de desgaste (a) da amostra e (b) do contra corpo, com análise e EDS (c) para área 1 e (d) para área 2 da amostra. A seta vermelha indica o sentido do deslizamento.

Figura 4-12 Triboscopia das amostras com textura no regime (a) a seco e (b) com lubrificação.

Figura 4-13 (a) Coeficiente de atrito médio dos 4 ensaios. (b) Desempenho do coeficiente de atrito durante os ensaios (azul- superfície lisa e sem lubrificante, amarelo - textura e com lubrificante, alaranjado - textura e sem lubrificante, cinza- superfície lisa e com lubrificante).

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 Composição química do aço AISI 52100 (porcentagem em peso) (MELO, D.B,2018).

Tabela 3-2 Dureza e resistência mecânica dos ferros fundidos.

Tabela 3-3 Quantidade de ensaios realizados

Sumário

| | |
|---|----|
| Capítulo 1 | 11 |
| INTRODUÇÃO | 11 |
| Capítulo 2 | 14 |
| REVISÃO BIBLIOGRAFICA | 14 |
| 2.1 Mecanismo de Desgaste | 14 |
| 2.1.1. Adesão..... | 17 |
| 2.1.2. Deformação | 17 |
| 2.1.3. Presença de terceiro corpo | 17 |
| 2.2 Desgaste por Deslizamento..... | 18 |
| 2.3 Texturização..... | 19 |
| 2.4 Lubrificação..... | 21 |
| 2.5 Aplicação de Texturas | 23 |
| Capítulo 3 | 25 |
| METODOLÓGIA | 25 |
| 3.1 Materiais..... | 26 |
| 3.2 Texturização..... | 27 |
| 3.3 Ensaio de Deslizamento Alternado..... | 29 |
| 3.4 Triboscopia..... | 30 |
| 3.5 Desenvolvimento da cuba para ensaios imersos | 32 |
| Capítulo 4 | 34 |
| RESULTADOS | 34 |
| 4.1 Análise da microestrutura dos materiais..... | 34 |
| 4.2 Ensaio de desgaste - amostra com superfície lisa..... | 35 |
| 4.3 Ensaio de desgaste - amostra com texturização..... | 39 |
| 4.4 Média dos coeficientes de atrito | 43 |
| Capítulo 5 | 45 |
| CONCLUSÃO | 45 |
| Capítulo 6 | 46 |
| TRABALHO FUTUROS..... | 46 |
| Capítulo 7 | 47 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 47 |

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Desde o processo de escrever um bilhete utilizando um lápis de grafite em um pedaço de papel, até quando uma pessoa dobra o joelho para pegar algo no chão, há a presença da interação tribológica. A palavra Tribologia é derivada do grego, onde “TRIBO” significa fricção ou deslizamento e “LOGOS” significa estudo, ou seja, a ciência que estuda a interação entre corpos focada em fricção, desgaste e lubrificação. Esta ciência é relativamente nova, e ela foi definida em 1967, pelo governo do Reino Unido (JOST 1966).

O desgaste é o principal responsável pela perda de performance em elementos mecânicos, já o atrito é a resistência enfrentada pelo corpo quando colocado em movimento relativo, podendo gerar a perda de material dos corpos envolvidos, e assim resultando em desgaste e dissipação de energia. Neste contexto, para diminuir os prejuízos causados pelos dois fatores citados, existe o processo de lubrificação, que adiciona uma camada com tensão cisalhante inferior a presente no contato, reduzindo o contato de asperezas e prolongando a vida útil dos componentes.

O que torna o estudo da interação entre as superfícies (Tribologia) mais complexo são as várias condições de entrada, como por exemplo a dureza dos corpos envolvidos e seus materiais, a temperatura, a presença de oxigênio no ambiente, a carga normal envolvida, o acabamento das superfícies, dentre várias outras condições internas e externas, englobando a escala microscópica. E todos estes processos de interação se intensificam quando há movimento relativo entre as superfícies gerando outras variáveis, como a formação de tribocamada e a presença de um terceiro corpo. Todos os componentes mecânicos possuem essas interações de ambiente e movimento, tornando o estudo da Tribologia uma necessidade imprescindível.

O coeficiente de atrito (um valor adimensional) habitualmente possui um valor maior durante os primeiros instantes de contato entre as superfícies (*running-in*) e depois tende a ter uma regressão e se estabilizar (*steady state*) (BLAU,2008),

entretanto esta lógica nem sempre pode ser aplicada ao desgaste, pois devido a interação das superfícies, pode ocorrer a presença de outros corpos que intensifiquem o processo de desgaste, e para diminuir estes danos são utilizados lubrificantes. Quando mencionada a lubrificação, os elementos mais conhecidos são os óleos e graxas, que são usualmente empregados em motores de combustão interna em automóveis. Porém também existe outros tipos de lubrificação como a lubrificação sólida, que utiliza principalmente a grafita, que apresenta resultados similares ou superiores aos demais, dependendo da utilização.

Além da utilização de lubrificante para diminuir o atrito, e conseqüentemente o processo de desgaste, está sendo estudada a aplicação de padrões superficiais, que é o processo de formação de micros cavidades com padrões regulares classificado como texturização. Para obter esse ganho, a texturização utiliza-se de alguns mecanismos: (i) reservatório de lubrificante (SAEIDI et al., 2016), (ii) retenção de debris (VARENBERG; HALPERIN; ETSION, 2002), (iii) micro mancais hidrodinâmicos (ETSION; HALPERIN, 2002) e (iv) efeito de sucção na entrada (FOWELL et al., 2007; VLĂDESCU et al., 2016).

Para desenvolver o estudo da tribologia em laboratórios de uma maneira controlada são utilizados tribômetros, são equipamentos sensíveis a qualquer variação de força, permitindo mensurar o atrito facilmente. Fatores como velocidade e carga normal são introduzidos como parâmetros de entrada, podendo ser controlada a adição de lubrificante. Além de apresentar resultados mais confiáveis, possui uma facilidade da experimentação, instrumentação e otimização dos recursos disponíveis (STACHOWIAK ;BATCHELOR, 2005). Como um dos seus resultados este equipamento mensura a força de atrito que é utilizada para gerar a triboscopia, que é um gráfico tridimensional que possibilita a analisar a evolução do coeficiente de atrito ao longo do tempo, e dos ciclos do teste (ciclos e quando o contra corpo parte de um ponto de repouso, acelera e desacelera chega ao outro ponto de repouso e depois retorna ao primeiro ponto de repouso).

A Tribologia requer estudos rigorosos, pois além de ser uma ciência relativamente nova, ela estuda uma das principais perdas de energia devido ao contato e interações de superfícies, que é o atrito e o desgaste. Em motores a combustão interna, um terço da energia gerada é gasta para vencer as forças de atrito entre os componentes mecânicos (HOLMBERG; ANDERSSON; ERDEMIR, 2012). Para aumentar a eficiência destes motores são utilizados lubrificantes, e para diminuir o atrito gerado e aumentar os ganhos na lubrificação é apresentado em estudos mais recentes a possibilidade a utilização de textura superficial.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento do coeficiente de atrito na amostra de ferro fundido cinzento com refino de grafita, implementado alterações no tipo de superfície, texturizada e lisa, e no ambiente, lubrificado e ao ar. Através de ensaios realizados em um Microtribômetro utilizando o movimento alternado, visando a replicação do comportamento em motores de combustão interna. A amostra foi texturizada com padrões superficiais do tipo *Chevron*.

A disposição do trabalho é feita da seguinte maneira: inicia-se explicando os principais temas a serem discutidos no trabalho, expondo como foi feita a metodologia, os equipamentos desenvolvidos para o auxílio da experimentação, a discussão dos resultados obtidos, a conclusão dos mesmos e é encerrado com temas proposto para futuros trabalhos.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 Mecanismo de Desgaste

Quando uma bola é rolada ou um ser humano caminha, é gerado movimento relativo entre a bola e a superfície, e entre o pé com o chão. Estes movimentos são denominados de rolamento e de deslizamento (Figura 2-1), respectivamente. Para que o movimento seja possível, é necessário aplicar uma força no sentido do movimento do corpo (força tangencial), porém através da terceira lei de Isaac Newton, toda ação possui uma reação, e a reação a este movimento é a força de atrito, que é a resistência que qualquer corpo encontra ao se movimentar. Para que o movimento de um corpo seja possível, a força tangencial deve ser maior que a força de atrito.

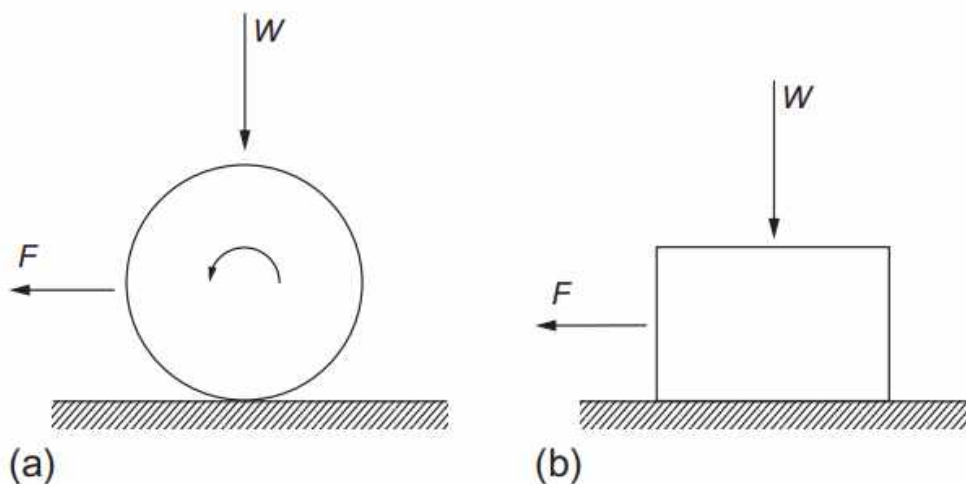


Figura 2-1 Tipos de movimentos relativos: (a) rolamento e (b) deslizamento (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017a).

A força de atrito é a reação contrária ao movimento, dada pela multiplicação da força aplicada e do coeficiente de atrito entre as superfícies. Este coeficiente depende tanto do estado da superfície dos materiais envolvidos, quanto do meio onde esses se encontram (ar ou vácuo). Quando duas superfícies irregulares ou ásperas estão em contato, tendem a ter uma maior dificuldade em movimentarem entre si quando comparado a superfícies planas ou lisas, devido a interação microscópica das asperezas. Quanto mais picos (Figura 2-2(A)) uma superfície possuir, maior dificuldade haverá para movimentação, já para as superfícies lisas (Figura 2-2 (B)), estas interações são consideravelmente menores.

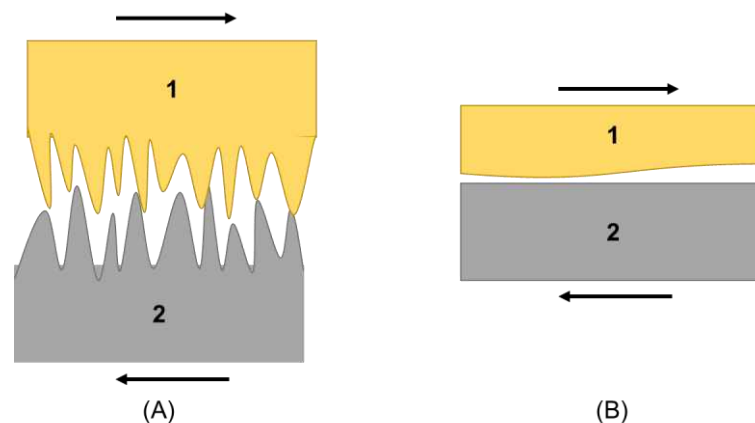


Figura 2-2 Movimento relativo entre superfícies (A) rugosa e (B) lisa, onde a seta indica o sentido e direção do movimento.

O coeficiente de atrito pode variar de valores pequenos como 0,001, em situações de carregamentos pequenos ou superfícies extremamente lisas, até valores superiores a 10, para deslizamentos de metais no vácuo (HUTCHINGS, 1992), sendo uma grandeza empírica. A equação (1) mostra como é obtida o coeficiente, onde F é a força de atrito, W é a carga normal e μ é o coeficiente de atrito.

$$\mu = \frac{F}{W} \quad (1)$$

Os primeiros relatos de estudo sobre atrito são datados do ano de 1493 por Leonardo Da Vinci (1452-1510), e mais tarde em 1699 o inventor e físico francês Guillaume Amontons (1663-1705), que publicou algumas descobertas sobre o tema, porém as equações matemáticas foram desenvolvidas pelo físico francês Charles Coulomb (1736-1806) onde esse diferenciou o estudo, afirmando ser necessário aplicar uma força maior pra movimentar um corpo em repouso (atrito estático) que a força para

o manter em movimento (atrito dinâmico). Como resultados, temos três leis do atrito por deslizamento:

- O coeficiente de atrito (i) *independe da área aparente de contato*, como mostrado na equação (1), a força de atrito depende da carga normal ou compressão entre os corpos. Se temos duas caixas com a mesma dimensão, porém uma é maciça e a outra oca, teremos maior dificuldade em movimentar a que é maciça por possuir uma maior massa (o que resulta em maior peso), mesmo as duas apresentando a mesma área de contato. Isto leva à conclusão de que (ii) a força de atrito é *proporcional à força de carregamento normal aplicada*. E para a terceira lei temos que (iii) a força de atrito *independe da velocidade de escorregamento entre as superfícies*.

O atrito existe em decorrência do contato entre duas superfícies, podendo resultar em desgaste. Quando o desgaste é analisado microscopicamente (INTERNATIONAL, 1992), podem ser encontrados os seguintes mecanismos de desgaste: adesão, deformação plástica e presença de terceiro corpo na interface de contato (Figura 2-3).

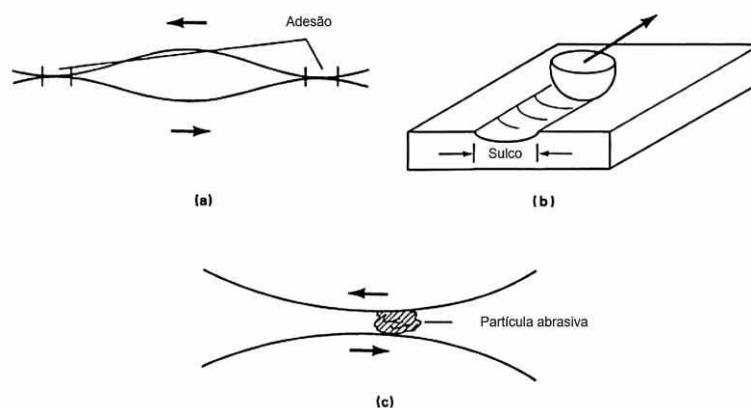


Figura 2-3 Mecanismos microscópicos de desgaste relacionados ao fenômeno do atrito para superfícies metálicas: (a) adesão, (b) deformação plástica e (c) presença de terceiro corpo na interface de contato. Adaptado de (ASM, 1992).

2.1.1. Adesão

A adesão é um mecanismo que ocorre na interface de contato das superfícies, onde suas asperezas se aderem devido a forças geradas pelos átomos presentes nessa região, de forma interatômica, conforme ilustrado na Figura 2-3– a (LANDMAN et al., 1990). As forças interfaciais causadas pela adesão, são dominantes no fenômeno do atrito seco, quando as superfícies estão limpas e livres de camadas de óxidos. Sob essas condições, as forças interatômicas de atração entre os átomos são capazes de promover a adesão no contato das asperezas, podendo esta força, variar de acordo com a proximidade entre as superfícies, carregamento e principalmente acabamento superficial. Por serem inertes, os óxidos formados nas superfícies metálicas, quando na presença de oxigênio, dificultam a ocorrência do fenômeno de adesão, o que em termos de aplicações de engenharia, torna-se uma vantagem, já que a maioria das aplicações ocorrem em ambientes com presença de oxigênio (PROFITO, 2010; WILLIAMS, 2005).

2.1.2. Deformação

As asperezas das superfícies quando em contato, podem sofrer deformações elásticas e plásticas, para acomodar a tensão aplicada sobre as mesmas, conforme proposto por Bowden e Tabor (1950). A deformação plástica pode ser vista como uma forma de dissipação de energia. Na interação de superfícies com durezas diferentes, as asperezas provenientes da face com maior dureza serão capazes de formar sulcos visíveis (*plowing*) na superfície com menor dureza, de forma semelhante ao ilustrado na Figura 2-3 b (WILLIAMS, 2005).

2.1.3. Presença de terceiro corpo

A presença de um terceiro corpo na interface de contato (partícula abrasiva), pode ser responsável por aumentar o coeficiente de atrito do sistema. Pois haverá um aumento de deformações plásticas resultantes das interações destes corpos na interface de contato, conforme ilustrado na Figura 2-3 c, podendo essas partículas serem provenientes do desgaste do próprio sistema ou provenientes do meio (OKTAY; SUH, 1992; SUH, 1986). Para que ocorra o desgaste esta terceira partícula deve possuir uma dureza igual ou superior a dureza das superfícies

2.2 Desgaste por Deslizamento

Quando há duas superfícies em contato e se inicia um movimento relativo entre as partes, inicia-se também o processo de desgaste, que é a perda progressiva de material. Este desgaste possui a tendência de ser mais severo no início ou até que as primeiras asperezas sejam desgastadas, caso a carga normal seja constante.

O contato entre as superfícies podem ser de dois tipos, o conforme e não conforme. No primeiro caso, toda a carga é distribuída em toda face de contato como na Figura 2-4(a). Já no segundo caso, temos que o contato é concentrado em uma linha ou ponto como na Figura 2-4(b). Em contatos não conforme o desgaste é mais severo, e durante o desenvolvimento do teste há a possibilidade de evolução para um contato conforme.

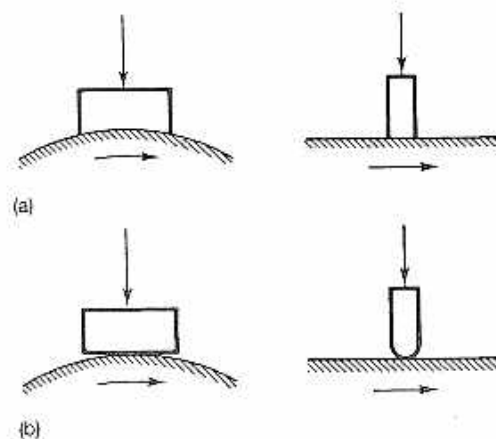


Figura 2-4 Representação de contatos (a) conformes e (b) não conformes (HUTCHINGS, 1992).

Outro aspecto do desgaste por deslizamento é seu tipo de movimento, ele pode ser categorizado por contínuo ou alternado. No movimento contínuo as duas superfícies são postas uma sobre a outra com um movimento relativo em uma única direção, como exemplo o movimento circular. No movimento alternado existe a mudança do sentido do movimento, como exemplo oscilação de um pêndulo, como mostra a Figura 2-5. Para ocorrer o deslizamento alternado há a necessidade da variação da aceleração, variando entre positiva e negativa, da variação da intensidade da velocidade e da presença de pontos de repouso. Comparando os movimentos contínuo e alternado, o último possui

uma maior interação entre os corpos devido à maiores forças de inercia atuantes, resultando em um maior coeficiente de atrito e um desgaste mais severos.

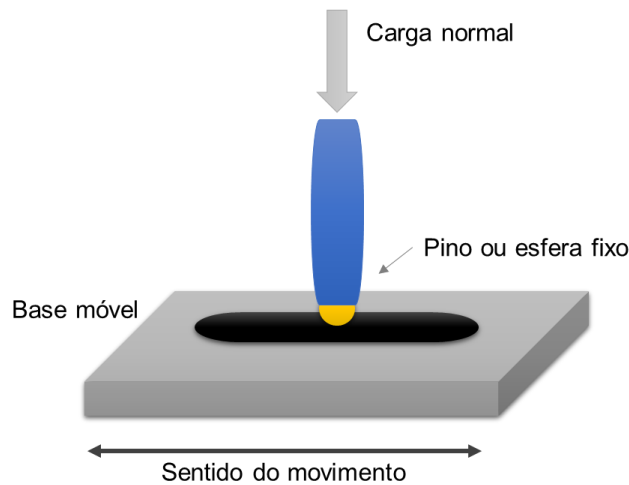


Figura 2-5 Ensaio de deslizamento com movimento alternado.

Os ensaios de deslizamento podem ser divididos em duas fases, a inicial chamada de regime transitório e a segunda de regime permanente. No regime transitório existe o período de adaptação das duas superfícies, a pressão de contato é elevada pois estão concentrados nos picos das asperezas, ocorrendo mudança nas geometrias e propriedades físico-químicas do par tribológico (BLAU,2008). Neste período prevalecem os mecanismos de desgaste como abrasão e adesão, resultando em atrito elevado, e esta fase pode ser caracterizada como *running-in*. O regime permanente ocorre quando o coeficiente de atrito atinge um valor constante. Nesta fase há estabilidade no coeficiente de atrito, taxa de desgaste, temperatura do contato, rugosidade superficial, dentre outros parâmetros (BLAU,2008), podendo ser caracterizada como *steady state*.

2.3 Texturização

Texturização superficial é um processo de formação de micros cavidades com padrões regulares, visando obter um melhor desempenho de um par tribológico em que suas superfícies são postas em movimento relativo. Seu principal benefício é a redução e/ou o alívio do atrito e desgaste das superfícies, obtido através de quatro mecanismos: (i) mecanismo de reservatório de lubrificante (SAEIDI et al., 2016), (ii) mecanismo de retenção de debris (VARENBERG; HALPERIN; ETSION, 2002), (iii) mecanismo de

micro mancais hidrodinâmicos (ETSION; HALPERIN, 2002) e (iv) efeito de sucção na entrada (FOWELL et al., 2007; VLĂDESCU et al., 2016).

Quando no ensaio possui a presença de óleo lubrificante, as cavidades das texturas atuam como (i) reservatório de lubrificante, favorecendo a separação das superfícies e diminuindo assim o atrito e principalmente o desgaste. Outro efeito observado é que o lubrificante retido nas cavidades é succionado para o contato, através da força do fluxo viscoso do fluido, como mostra a Figura 2-6.

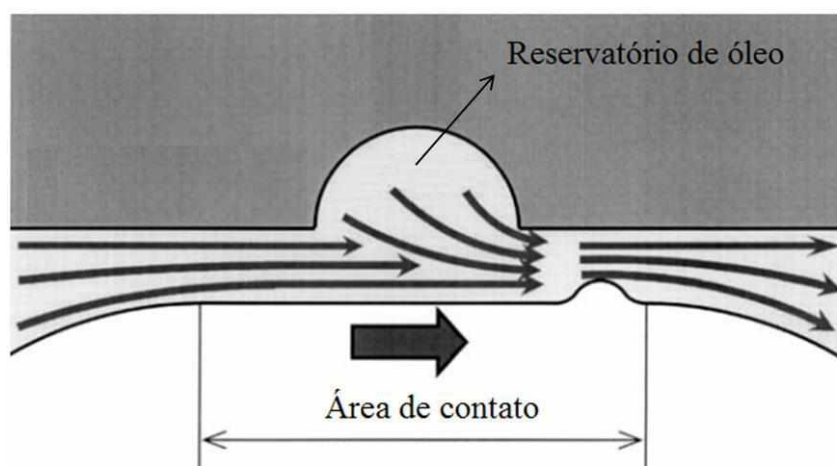


Figura 2-6 Efeito da microcavidade agindo como reservatório de fluido lubrificante. Adaptado de (UEHARA et al., 2004).

O (ii) mecanismo de retenção de debris consiste na armazenagem de partículas com potencial abrasivo presentes entre superfícies lubrificadas, tendo como principal resultado a melhora na resistência ao desgaste abrasivo do meio (PROFITO,2010). Em um trabalho desenvolvido por Borghi et al., (2008) foi estudado o efeito da texturização superficial em aços nitretados nos três regimes de lubrificação (limitrofe, misto e hidrodinâmico). A textura utilizada foi no formato circular esférico, denominado dimples, produzidas pelo processo a laser. Como resultado, obteve-se menores coeficientes de atrito e desgaste nas superfícies texturizadas em relação às lisas, e nas superfícies texturizadas pôde-se perceber claramente a presença de debris no interior das texturas.

Os (iii) mecanismos de micro mancais hidrodinâmicos e (iv) efeito de sucção na entrada não serão abordados na referencial bibliográfico, pois não foram mecanismos observados no decorrer dos teste do presente trabalho.

2.4 Lubrificação

Quando duas superfícies estão em contato e são exposta ao movimento de deslizamento, suas asperezas atuam como adversidade ao movimento, resultando em desgaste. Para reduzir este desgaste e os demais danos superficiais, lubrificantes são utilizados. Essa redução é possível devido as seguintes propriedades dos lubrificantes: viscosidade, capacidade de aguentar altas cargas e possuir resistência a tensão cisalhantes menor que a das superfícies envolvidas no contato. Não são em todos os sistemas lubrificadas que apresentam a completa separação do contato das asperezas. Mas a presença do lubrificante, mesmo que pequena, traz uma redução na ocorrência do contato das rugosidades, nas forças de resistências entre as superfícies e como resultado diminui o desgaste e o coeficiente de atrito (HUTCHINGS, 1992).

Os lubrificantes podem ser encontrados em vários estados, como gasoso, líquido, pastoso e sólido. Os gasosos são utilizados em sistemas de altíssimas rotações, sistemas esses que apresentam folgas extremamente pequenas e onde possa haver a combustão ou congelamento dos demais lubrificantes. Os lubrificantes líquidos são os mais frequentemente utilizados, são encontrados em aplicações desde motores de combustão interna até maquinários grandes, se diferenciando dos demais lubrificantes pela sua facilidade de aplicação. Lubrificantes pastosos, comumente chamados de graxas, são aplicados onde os líquidos não executam suas funções satisfatoriamente, eles possuem a habilidade de barrar a entrada de partículas indesejadas e atuam também contra os vazamentos de líquidos. Os lubrificantes sólidos possuem um baixo coeficiente de atrito, uma baixa resistência ao cisalhamento, forte aderência a metais e resistem a altas temperaturas e pressões. Eles são usados, geralmente, como aditivos de lubrificantes líquidos ou pastosos, e são feitos a partir da grafita, molibdênio, mica e talco.

As variáveis no sistema de lubrificação que devem ser levadas em consideração são: (i) as propriedades do fluido lubrificante, (ii) o carregamento do sistema, (iii) a geometria, (iv) a rugosidade das superfícies envolvidas e (v) a velocidade de deslizamento, que resultam em três regimes de lubrificação. Estes regimes são classificados como: hidrodinâmico, misto e limítrofe (Figura 2-7) (HAMROCK e SCHMID,2004), cujas definições seguem listadas abaixo:

- Hidrodinâmico: neste regime não há o contato das superfícies, pois elas estão separadas pelo filme fluido. A pressão hidrostática no filme causa pequenas distorções nas superfícies, em função de sua espessura, fazendo com que

essas possam ser tratadas como rígidas. A principal propriedade do fluido lubrificante nesse regime é a viscosidade, pois é ela que determina quanta carga irá suportar. A viscosidade está diretamente ligada à resistência ao cisalhamento do fluido, e conforme ela aumenta mais difícil se torna o movimento entre as superfícies, resultando em um maior coeficiente de atrito.

- Misto: quando a carga normal sobre as superfícies aumenta, faz com que em sistemas lubrificados aumente as pressões locais e diminua o filme lubrificante, ocasionando a deformação elástica das superfícies e também sendo possível o contato de algumas asperezas.
- Limite ou limítrofe: na lubrificação limítrofe, as superfícies são separadas por filmes moleculares adsorvidos (super fina camada de lubrificante), normalmente depositados a partir de um óleo ou graxa contendo um lubrificante de limite adequado. Há o contato entre as asperezas formando junções, causando deformação plástica em maior incidência, quando comparado à lubrificação mista.

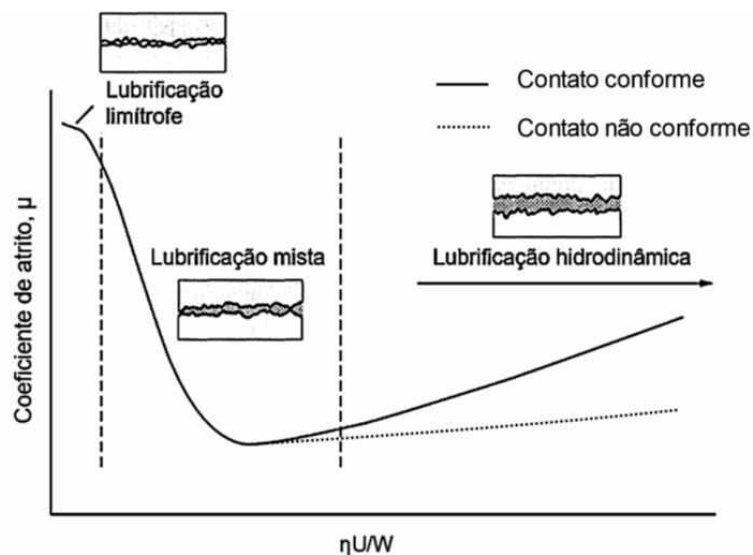


Figura 2-7 Curva de Stribeck ilustrando os diferentes tipos de lubrificação para contatos conformes e não conformes. Adaptado por (RODRIGUES, T. A 2018) de (HAMROCK; SCHMID; JACOBSON, 2004; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017b).

2.5 Aplicação de Texturas

Em todos sistemas mecânicos busca-se a máxima eficiência com a menor perda de energia possível, seja esta perda por calor, por vibração, por arraste ou por desgaste.

Em sistemas de motores de combustão interna as principais perdas de energia são: (i) resfriamento, (ii) exaustão e (iii) perdas mecânicas. Das perdas mecânicas, é comprovado que 33% são devido ao atrito entre componentes mecânicos (Figura 2-8). Com a redução da perda dessa energia é possível obter um excelente ganho de eficiência. No mercado existem vários recursos que visam diminuir o atrito utilizando óleos lubrificantes, com e sem aditivos.

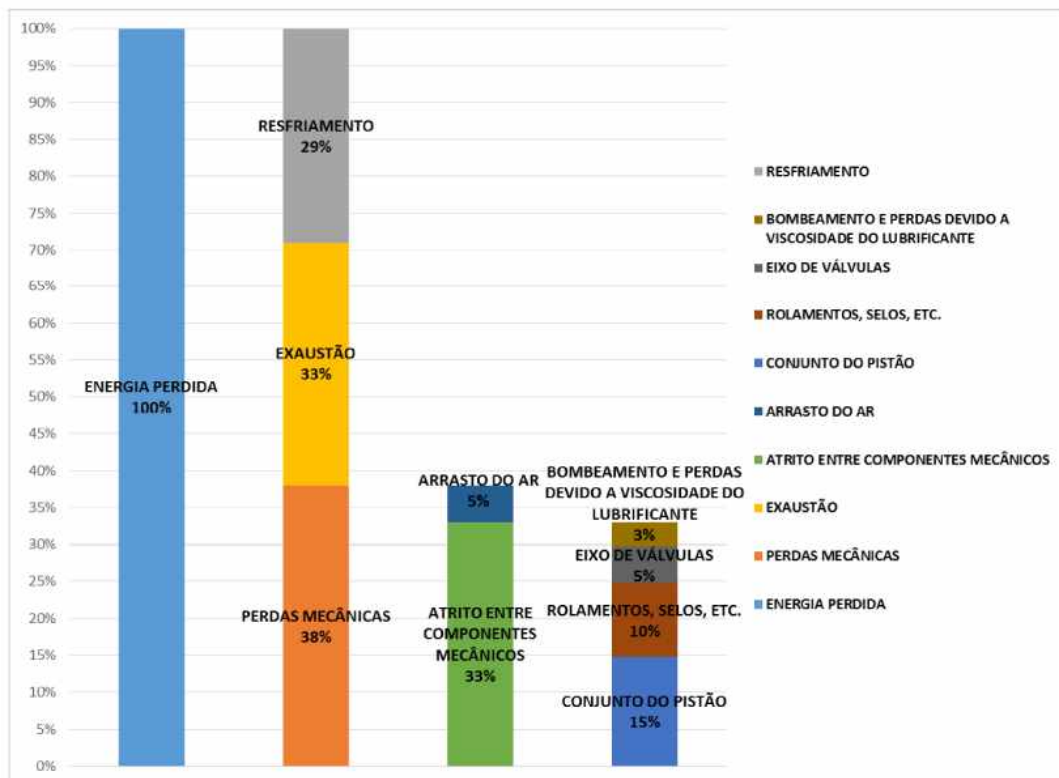


Figura 2-8 Energia não aproveitada em veículos de passeio (HOLMBERG,ANDERSSON; ERDEMIR, 2012)

Além dos lubrificantes outros métodos estão sendo estudados para diminuir o desgaste e o atrito em sistemas mecânicos. A texturização superficial é apresentada como uma alternativa ou combo para a lubrificação, bem como melhorar as propriedades funcionais dos sistemas. Na Figura 2-9 mostra um exemplo destes

padrões topográficos do tipo Chevron, obtidos através da texturização superficial sem mascaramento (MECT).

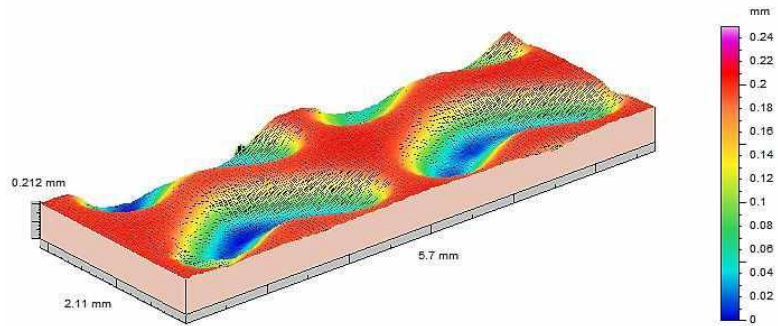


Figura 2-9 Exemplo de textura superficial do tipo chevron obtida pelo método MECT (RODRIGUES, T.A, 2018).

Capítulo 3

METODOLÓGIA

Neste capítulo é detalhado os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do estudo do desgaste por deslizamento de ferro fundido cinzento texturizado. No fluxograma da Figura 3-1 tem-se como o trabalho foi desenvolvido.

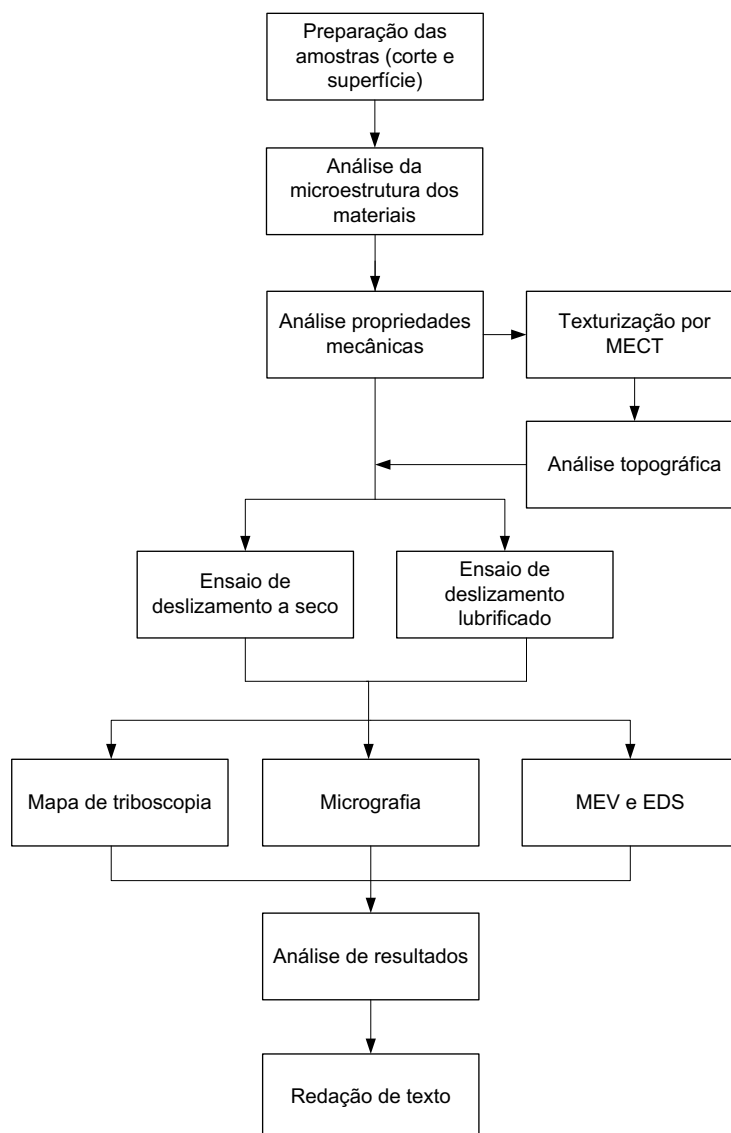


Figura 3-1 Fluxograma do desenvolvimento do trabalho

3.1 Materiais

Para realização dos testes, os contra corpos utilizados foram esferas de 5 mm de diâmetro (Figura 3-2) de aço AISI 52100, com dureza de 772 kgf/mm². Sua composição química nominal se encontra na Tabela 3-1.



Figura 3-2 Contra corpo e sistema de montagem (DUTRA,2017).

Tabela 3-1 Composição química do aço AISI 52100 (porcentagem em peso) (MELO, D.B,2018).

| Elemento | C | Si | Mn | P | S | Cr |
|----------------|-------|------|------|-------|-------|------|
| Percentual (%) | 0.994 | 0.27 | 0.32 | 0.013 | 0.005 | 1.49 |

O material das amostras utilizadas é de ferro fundido cinzento com molibdênio (Mo) e refino de grafita, sua matriz é 100% perlítica e sua dureza está na Tabela 3-2. Para a análise da matriz foi utilizado a microscopia óptica, utilizando um microscópio óptico da marca Olympus e o microscopia eletrônica de varredura (MEV), conforme o trabalho de Reis, A 2020. As amostras foram cortadas em formato de blocos no tamanho 35x15x8 mm para as amostras que iriam receber a textura e 35x25x8 mm sem textura. Para a preparação da superfície primeiramente as amostras foram retificadas, depois foram lixadas até a lixa 600 e polidas utilizando a POLITRIZ.

Tabela 3-2 Dureza e resistência mecânica dos ferros fundidos.

| Dureza [HB] | LR [Mpa] |
|-------------|----------|
| 217 | 283 |

Para os ensaios lubrificandos foi utilizado o óleo BP 68 (YPF), utilizado em unidades geradoras de energia.

3.2 Texturização

Para a texturização foi utilizado o processo de texturização superficial sem mascaramento (MECT), que se trata de uma usinagem não convencional. Para exemplificar o processo pode-se utilizar a usinagem de uma amostra de ferro puro (Fe^{++}). Ao se colocar a amostra em uma solução eletrolítica de cloreto de sódio ($NaCl$), que está sujeita a um diferencial de potencial (ddp), sucede-se a dissociação da água (H_2O) e do sal. Com a ddp da amostra de ferro (ânodo) e a ferramenta (cátodo), os íons positivos se movem em direção a ferramenta e os negativos em direção à amostra. Conforme íons de hidrogênio (H^+) levam elétrons em direção a ferramenta, ocorre a formação de hidrogênio gasoso (H_2), enquanto no ânodo ocorre a dissolução dos átomos de ferro (Fe) em (Fe^{++}). Essa dissolução ocorre devido à desestabilização das ligações metálicas devido à perda de elétrons. Os íons de sódio (Na^+) se combinarão com a hidroxila (OH^-), formando hidróxido de sódio ($NaOH$) e os íons de ferro se combinam tanto com os íons de cloro (Cl^-) quanto com a hidroxila, formando cloreto de ferro ($FeCl_2$) e hidróxido de ferro II ($Fe(OH)_2$), que pode se precipitar em forma de “lama”.

Utilizando o princípio da usinagem não convencional, foi realizada a texturização das amostras de ferro fundido cinzento, o aparato utilizado é semelhante ao utilizado por PARREIRA; GALLO; COSTA, (2012), indicado na Figura 3-3.

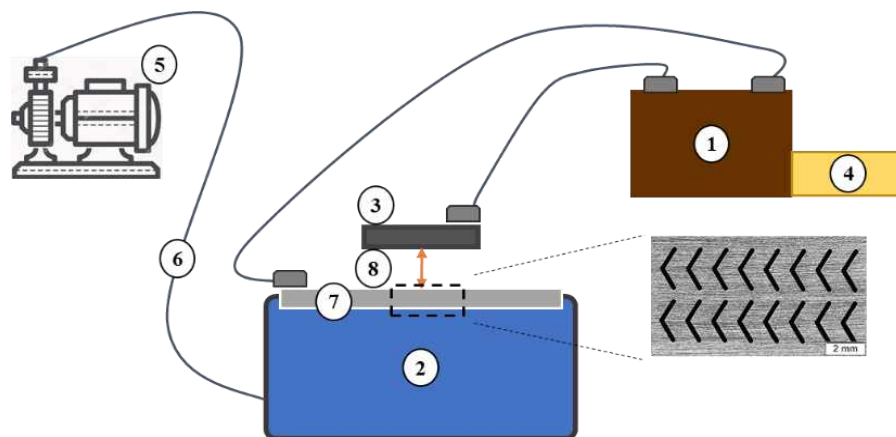


Figura 3-3 Aparato experimental utilizado na MECT.

Recentemente esse equipamento passou por uma reconfiguração da parte de controle eletrônico. Constituem o aparato ilustrado na Figura 3-3 uma fonte de voltagem contínua (1), que fornece a corrente necessária para a dissolução eletroquímica, sendo o polo negativo conectado à ferramenta (7) e o positivo à peça a ser texturizada (3). O eletrólito (2) é bombeado por uma tubulação (6) através de uma bomba peristáltica, entrando em contato com a peça (3) por meio de furos na ferramenta (7), escoando posteriormente pela distância entre a ferramenta e a peça (DFP) (8). Um circuito eletrônico (4) é utilizado para pulsar a corrente, visando assim durante os pulsos não eletrizados limpar os produtos oriundos da dissolução anódica bem como arrefecer a superfície. Foram obtidos bons resultados para pulsos eletrizados de 3.2 ms intercalados por pulsos de limpeza e arrefecimento por 18.2 ms (PARREIRA et al., 2012), bem como com o uso de NaNO_3 (COSTA E HUTCHINGS, 2009) e NaCl (PARREIRA et al., 2012) como eletrólitos.

Os parâmetros de texturização tempo e tensão foram definidos em 60 s e 7,5 V respectivamente. Essa parametrização foi extensivamente estudada em trabalhos anteriores (SILVA 2016) e os parâmetros escolhido se referem ao melhor desempenho para o ferro fundido cinzento. Na Figura 3-4 temos a micrografia da ferramenta com a padronagem da textura foi de Chevron.

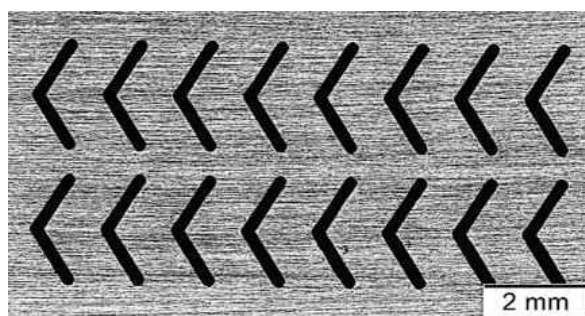


Figura 3-4 Máscara para usinagem não convencional da textura (RODRIGUES,2018).

Padrões de microcavidades obtidos através de texturização, como o Chevron, objetiva uma melhor performance tribológica em superfícies deslizantes, quanto a reduzir ou aliviar o atrito e desgaste entre as mesmas.

Na Figura 3-5 temos a micrografia da textura de Chevron obtida através do MECT.

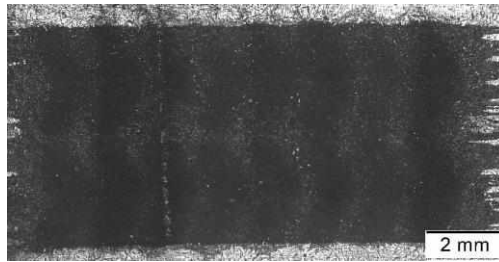
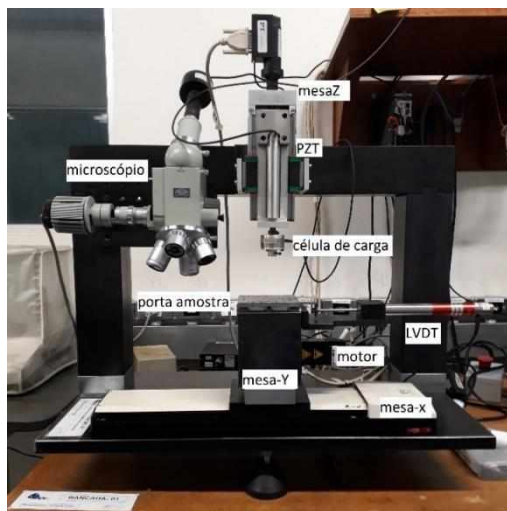


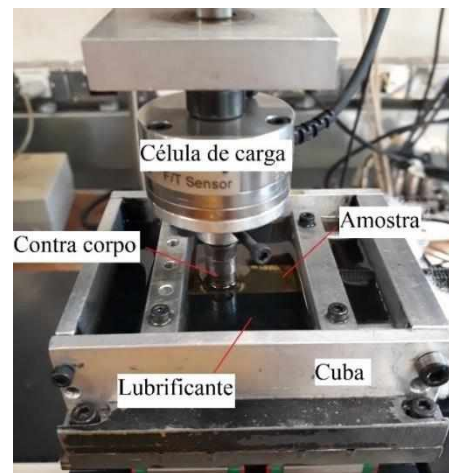
Figura 3-5 Micrografia da textura em Chevron.

3.3 Ensaio de Deslizamento Alternado

Para realização dos ensaios de deslizamento alternado, foi utilizado o Microtribômetro (Figura 3-6 (a)) desenvolvido no LTM-UFU (DUTRA,2017). O equipamento possui um sistema de mesas coordenadas, um motor conectado a um sistema mecânico que possibilita o movimento alternado. A força de contato é imposta por um atuador piezoelétrico e mensuradas por uma célula de carga com sensibilidade de 0,020 N.



(a)



(b)

Figura 3-6 (a) Detalhamento do Microtribômetro, (b) Porta amostra para ensaio lubrificado.

Para performar os ensaios com óleo lubrificante foi necessário desenvolver um porta amostra especialmente para os testes. A construção e desenvolvimento desse porta amostra será abordado no capítulo de resultados.

O programa de controle desse equipamento foi desenvolvido utilizando a plataforma LabView®. Nesse programa os principais parâmetros do ensaio são: força, tempo e frequência ensaio (BARBOSA,2018). O tipo de deslizamento realizado foi deslizamento alternado, como no esquema representado na Figura 3-7.

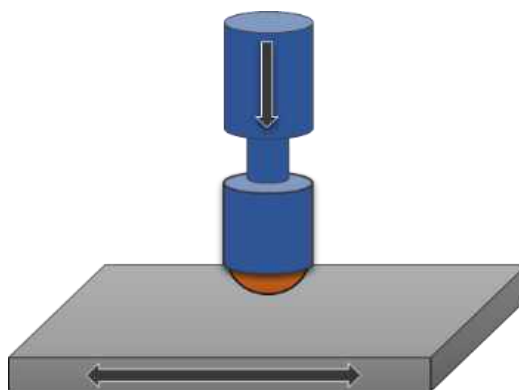


Figura 3-7 Deslizamento alternado.

O estudo de ensaios de deslizamento alternado apresenta características de aceleração positivas e negativas (desaceleração), conseqüentemente com alternância de velocidade e pontos de repouso. Com isso está suscetível a forças de inércia que geram um desgaste maior (WARD,1970), tendo maiores variáveis mais expressivas para o estudo.

Para a realização dos testes, foram utilizados os seguintes parâmetros de entrada: frequência de 0,5 Hz, força normal de 5 N, amplitude de deslizamento de 10 mm, realizando ensaios com duração de 60 min. Foram realizados quatro tipos de ensaios com três repetição cada ensaio, os tipos de ensaios estão representados na Tabela 3-3

Tabela 3-3 Quantidade de ensaios realizados

| Superfície/ Regime | Seco | Com lubrificante |
|--------------------|------|------------------|
| Lisa | 3 | 3 |
| Texturizada | 3 | 3 |

3.4 Triboscopia

Os gráficos do coeficiente médio do atrito e o mapa triboscópico (Figura 3-8) foram gerados através de um programa desenvolvido utilizando o software Matlab®, adaptado por DUTRA (2018).

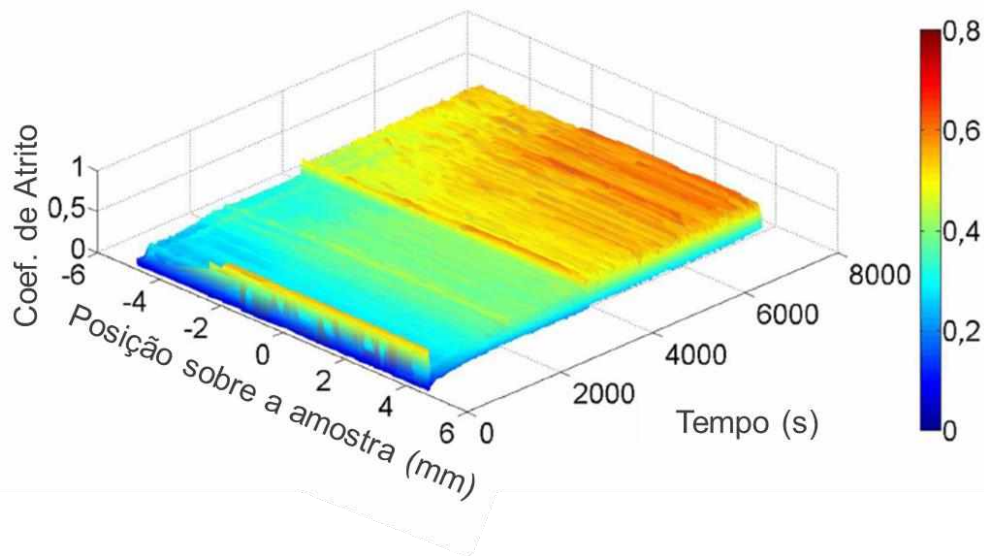


Figura 3-8 Mapa de triboscopia de um ensaio realizado no equipamento microtribômetro DUTRA (2018).

O sistema tribológico possui várias variáveis sobre seu comportamento dependendo do sistema que está envolvido, o tempo que aqueles corpos estão em interação, gerando assim um resultado irreversível. Para auxiliar na análise temos o mapa de triboscopia (como no exemplo da Figura 3-8), nele demonstra o comportamento da superfície durante o deslizamento com movimento alternado, através de um gráfico tridimensional. Podemos observar como o coeficiente de atrito se comportou durante a extensão da área de deslizamento em função temporal. Nele podemos verificar que no início o coeficiente de atrito teve um comportamento totalmente diferente do final, evidenciando que não é possível escolher um período representativo como um todo. Outro ponto interessante a se notar é que em um ciclo (ida e volta do corpo sobre a amostra) também temos a variação do coeficiente de atrito e fica claro ao analisar o esquema de cores (Figura 3-8). Durante o ensaio de deslizamento alternado apresenta parte do ciclo que temos aceleração, velocidade máxima e desaceleração do

deslizamento para ter mudança de sentido e em alguns mapas triboscópicos podemos verificar este processo com facilidade (SANTOS, COSTA e Mello,2014).

Em resumo o mapa triboscópico possibilita observar toda a evolução do sistema durante o teste, sendo possível observar heterogeneidade específicas e localizar eventos que podem ser de grande relevância para o estudo da interação das superfícies.

O coeficiente de atrito foi escolhido como parâmetro principal de comparação entre os diferentes tipos de ensaios, apresentado neste trabalho, e como o mapa de triboscopia apresenta o desenvolvimento do atrito durante os ciclos facilita a comparação e a análise de qual sistema apresenta o menor coeficiente de atrito.

Para análise qualitativa dos mecanismos de desgaste presentes foi utilizado um microscópio ótico. E o estudo químico da superfície foi por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por dispersão de energia de raios X (EDS).

3.5 Desenvolvimento da cuba para ensaios imersos

Para realizar ensaios lubrificados foi necessário desenvolver um porta amostra, para que a amostra fosse posicionada corretamente e o óleo lubrificante ficasse retido. Com auxílio do software SolidWorks2017® foi projetado esse porta amostras como descrito na Fig.3-9.

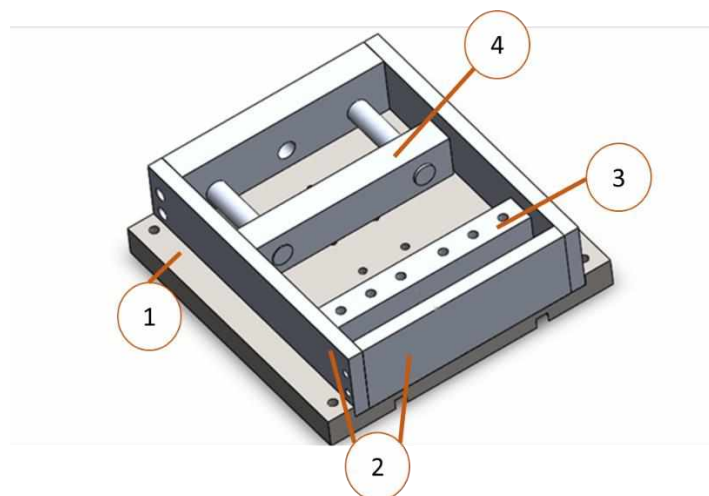


Figura 3-9 Desenho da cuba para ensaios lubrificados.

O dimensionamento do projeto da cuba foi pensando para ser instalado no microtribômetro. A cuba possui paredes (2), para reter o fluido, que foram feitas de alumínio. A base da cuba (1) é feita de aço e nela há vários furos para fazer a fixação da base de apoio (3) para amostra, onde a amostra é fixada através de a base de apoio móvel (4), que possui dois guias que garante paralelismo das bases de fixação, a movimentação segue o princípio de uma morsa. A morsa é atuada através de um parafuso M8. Todas as dimensões do projeto da cuba estão no ANEXO I. Na Cuba física temos a cuba física.

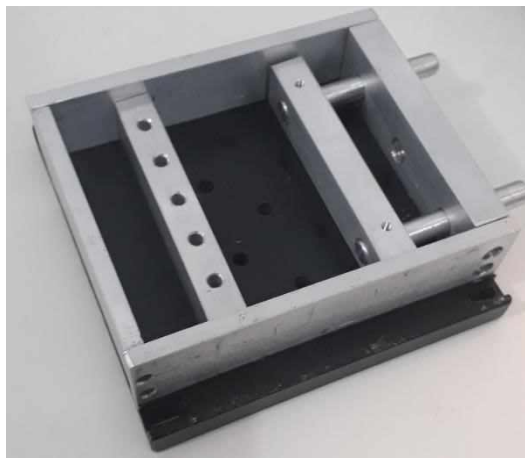


Figura 3-10 Cuba física.

Capítulo 4

RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos testes de desgaste por deslizamento alternado. As análises foram baseadas nos mapas triboscópicos, gráficos de coeficiente de atrito, imagens de MEV e EDS.

4.1 Análise da microestrutura dos materiais

Na Figura 4-1 apresenta a microestrutura da amostra de ferro fundido com Molibdênio e refino de grafita. Observa-se que os veios de grafitas são placas finas e uniformes com orientação aleatória.

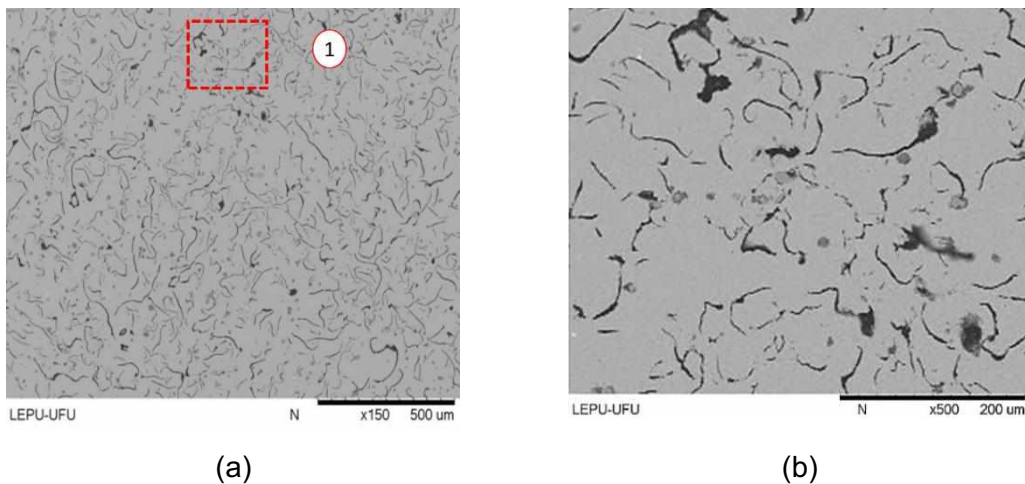


Figura 4-1 MEV da micrografia da superfície do ferro fundido classe FC 300 (Mo+RG) em (b) temos o zoom da região 1 em (a). (Reis, A.-2020)

Com o ataque da superfície com uma solução NITAL 3% (Figura 4-2) os veios das grafitas ficam mais perceptíveis, eles são igualmente distribuídos em toda a superfície.

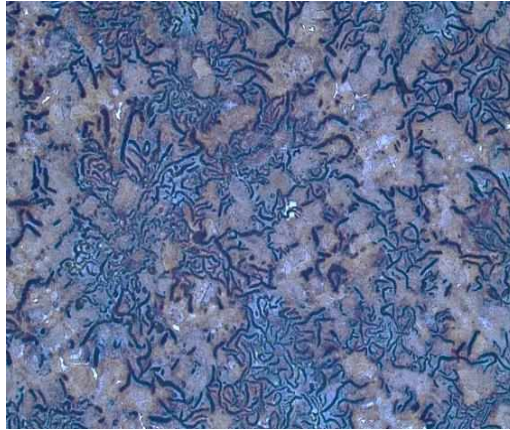
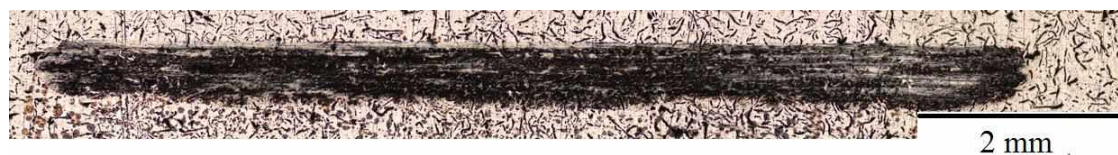


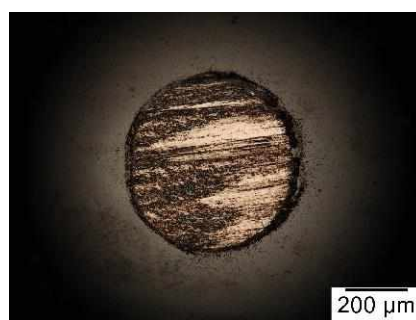
Figura 4-2 Micrografia da superfície do ferro fundido classe FC 300 (Mo+RG) com ataque NITAL 3%, obtidas por meio do microscópio óptico. (Reis, A. 2020)

4.2 Ensaio de desgaste - amostra com superfície lisa

Na Figura 4-3 mostra a micrografia do ensaio sem textura e sem lubrificação, é possível observar que a trilha de desgaste é constante e demarcada, o mesmo se observa na esfera onde a marca de desgaste formou um círculo.



(a)



(b)

Figura 4-3 Imagem microscópio óptico da (a) trilha de desgaste e a (b) marca de desgaste do contra corpo do ensaio sem lubrificação e sem textura.

Na Figura 4-4 apresenta imagens de MEV da amostra, onde a seta vermelha indica o sentido do movimento alternado e o tracejado a borda da marca de desgaste

do contra corpo. Analisando a trilha de desgaste (Figura 4-4 (a)) não é possível perceber nenhum risco que poderia evidenciar um desgaste abrasivo, somente um acúmulo de material, o mesmo acontece no contra corpo. Pela análise de EDS Figura 4-4 (c) da área 1 da amostra e Figura 4-4 (d) área 2 no contra corpo evidencia a presença de oxigênio, indicando uma provável tribocamada. Essa possível tribocamada não foi formada de forma contínua, no contra corpo ela está concentrada na borda (na linha tracejada) já na amostra está dispersa.

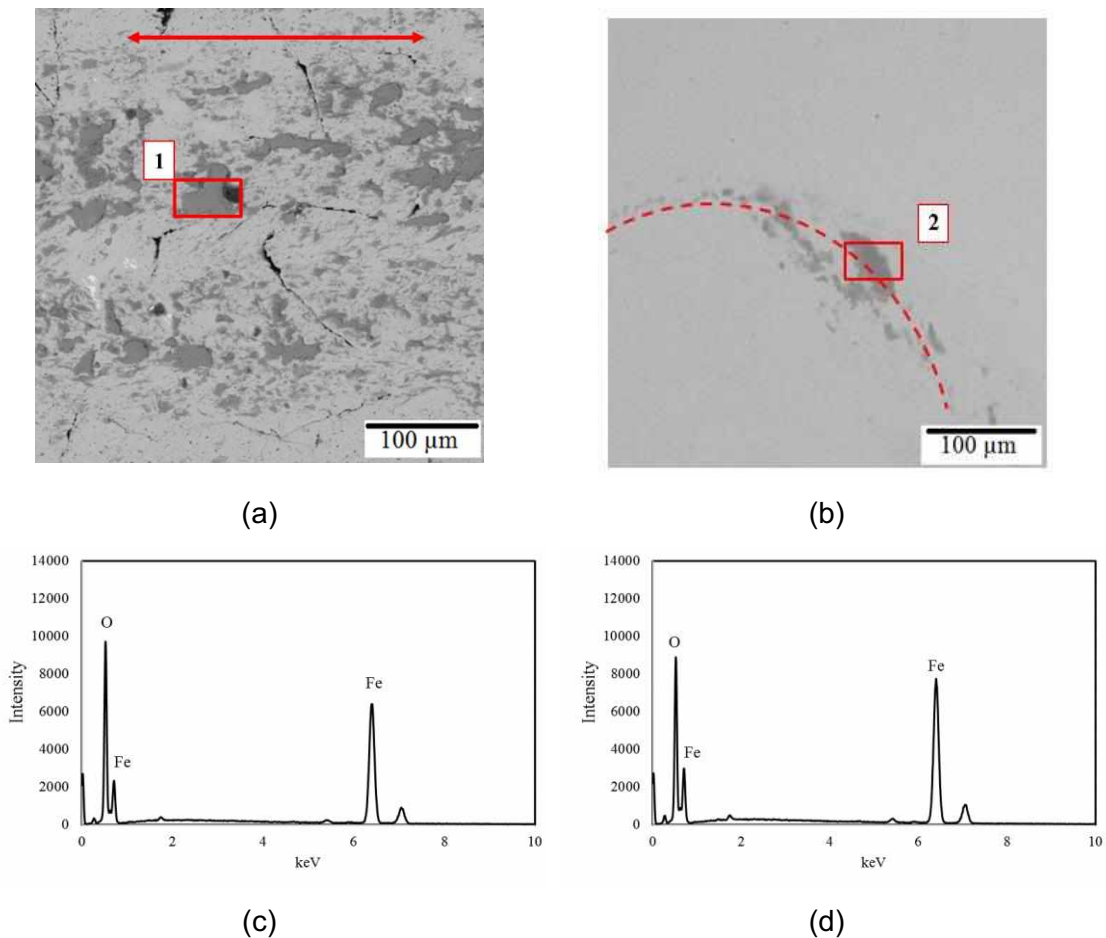
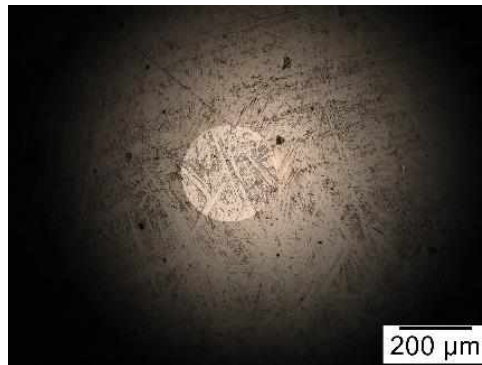


Figura 4-4 Microscopia eletrônica de varredura, utilizando elétrons retroespalhados, do ensaio sem lubrificação e sem textura, da marca de desgaste (a) da amostra e (b) do contra corpo, com análise e EDS (c) para área 1 da amostra e (d) para área 2 do contra corpo.

O teste de desgaste por deslizamento realizado com adição de lubrificante apresentou uma drástica mudança na dimensão da trilha de desgaste (Figura 4-5 (a)), sua largura diminuiu 66,7% quando comparada com o teste sem lubrificante. A marca de desgaste do contra corpo (Figura 4-5 (b)) também apresentou a mesma mudança de dimensão, apenas apontando uma pequena deformação plástica na região de contato.



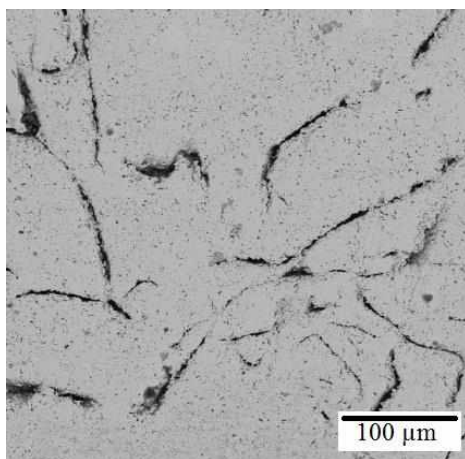
(a)



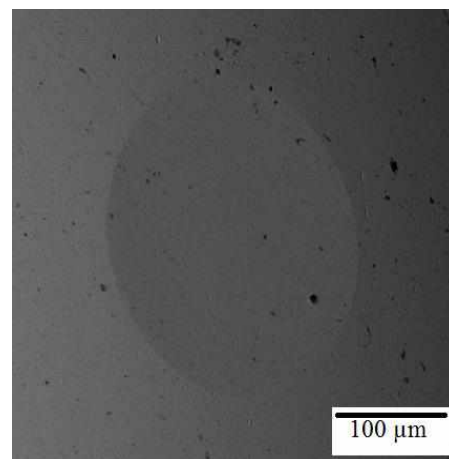
(b)

Figura 4-5 Imagem de microscópio óptico da (a) trilha de desgaste e a (b) marca de desgaste do contra corpo do ensaio com lubrificação e sem textura.

Com o estudo das imagens de MEV (Figura 4-6 (c) e (d)) não é evidente a formação de tribocamada. A esfera apresenta uma pequena deformação plástica, enquanto a trilha de desgaste quase não é perceptível a direção de deslizamento, exibindo que o desgaste foi o mínimo possível. Como não houve presença de regiões mais escuras, que revelaria a presença de tribocamada, não foi feita a análise de EDS.



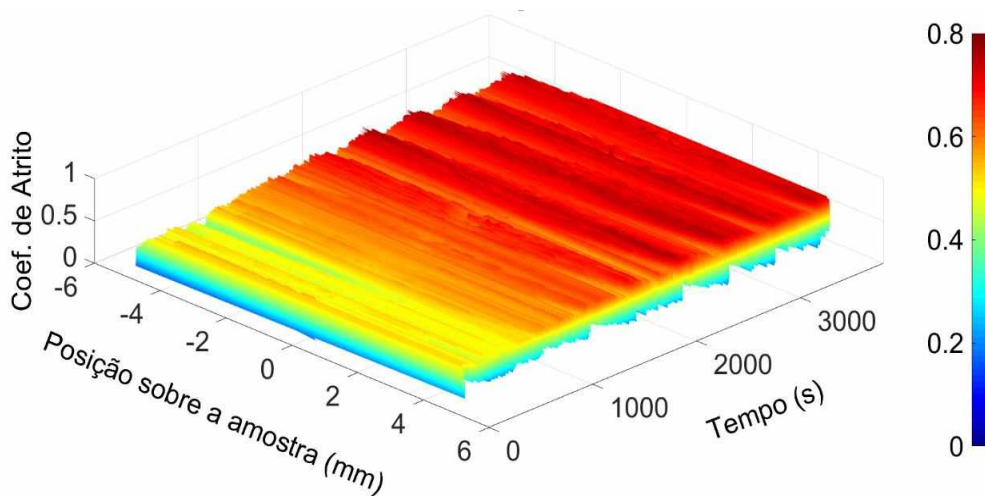
(a)



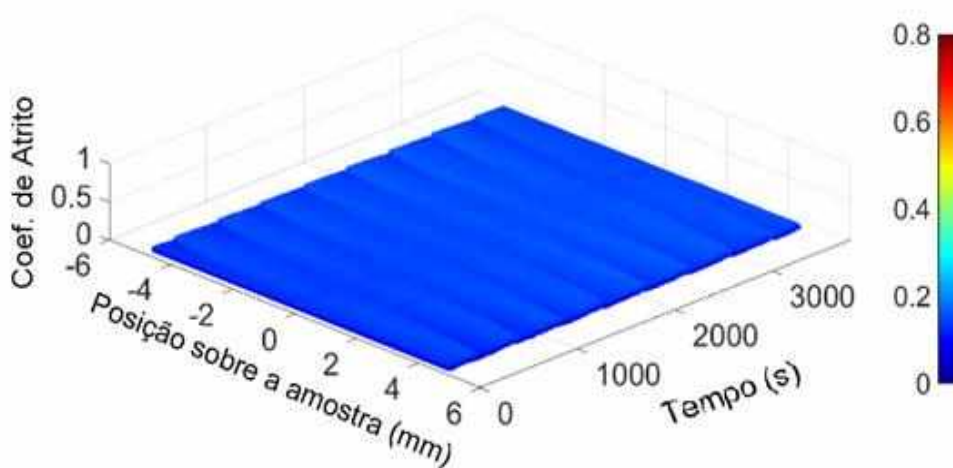
(b)

Figura 4-6 Microscopia eletrônica de varredura, utilizando elétrons retroespalhados, do ensaio com lubrificação e sem textura, da marca de desgaste (a) da amostra e (b) do contra corpo.

Na Figura 4-7 apresenta os mapas de triboscopia, na Figura 4-7. (a) do ensaio sem óleo lubrificante e na Figura 4-7 (b) com BP 68 (YPF). O lubrificante possui ação de evitar o contato entre as asperezas das superfícies de contato, diminuindo a ocorrência do contato entre os metais, resultando em um coeficiente de atrito menor. É notável a queda do coeficiente de atrito quando foi adicionado lubrificante, reduzindo de 0,45 para 0,10. Outra condição que pode ter contribuído para redução do coeficiente atrito, é o fato de que a amostra possui veios de grafita, que podem agir como bolsões para o armazenamento de lubrificante.



(a)



(b)

Figura 4-7 Mapa de triboscopia das amostras sem textura no regime (a) a seco e (b) com lubrificação.

4.3 Ensaios de desgaste - amostra com texturização

Observa-se que a trilha de desgaste apresentada na Figura 4-8 (a) não foi uniforme, nos vales da textura não houve o contato efetivo do contra corpo com a amostra, havendo contato somente entre os Chevron deixando assim a trilha de desgaste. A marca no contra corpo (Figura 4-8 (b)) não foi circular e é possível observar acúmulo de material nas extremidades, principalmente no sentido do deslizamento.

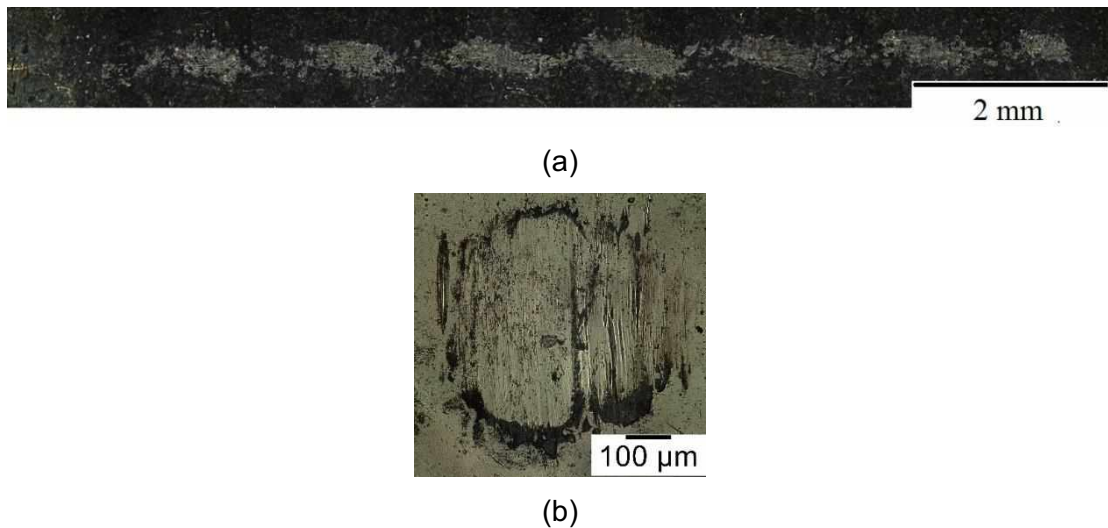
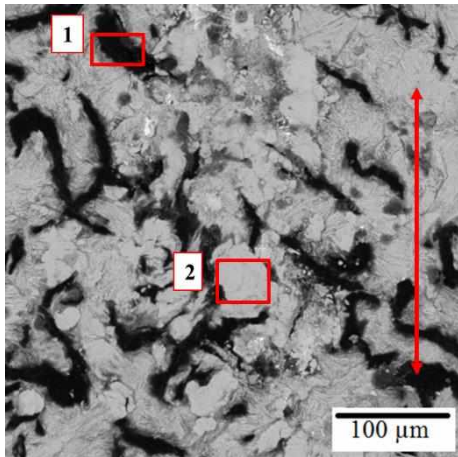
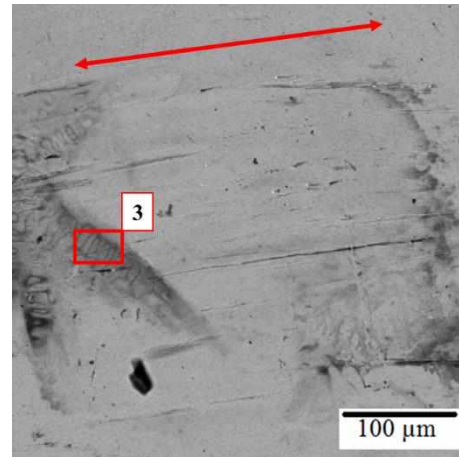


Figura 4-8 Imagem de microscópio óptico da (a) trilha de desgaste e a (b) marca de desgaste do contra corpo do ensaio sem lubrificação e com textura.

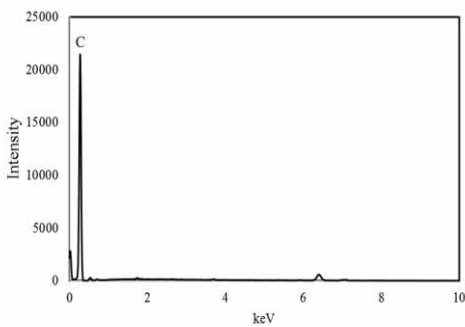
Com o processo MECT os veios de grafitas ficam evidentes, sendo comprovado pelo MEV juntamente com a análise EDS, na Figura 4-9 (c) pela análise da região dos veios é identificado somente a presença de carbono (C). A análise de EDS da trilha de desgaste (Figura 4-9 (d)) possui a presença de oxigênio e ferro dando indício de formação de óxido. É possível observar a transferência de material da amostra para o contra corpo pela análise de EDS (Figura 4-9 (e)) onde há presença de carbono.



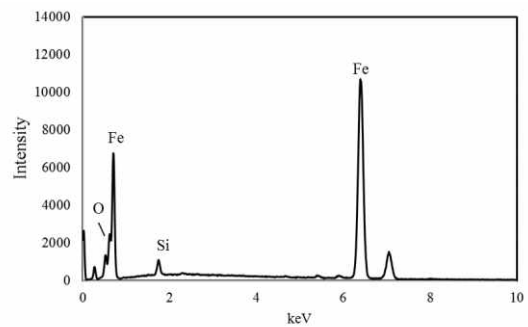
(a)



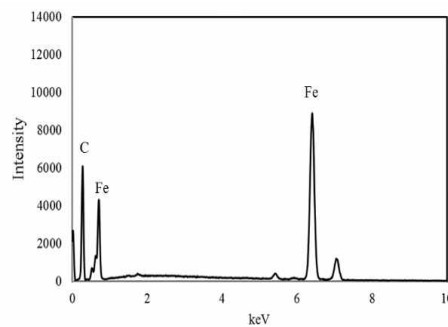
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4-9 Microscopia eletrônica de varredura, utilizando elétrons retroespalhados, do ensaio sem lubrificação e com textura, da marca de desgaste (a) da amostra e (b) do contra corpo, com análise e EDS (c) para área 1 e (d) para área 2 da amostra e (e) para área 3 do contra corpo. A seta vermelha indica o sentido do deslizamento.

A Figura 4-10 possui a micrografia do ensaio da superfície texturizada com adição óleo lubrificante. A formação da trilha de desgaste foi bem similar ao ensaio não lubrificado, tendo a presença da trilha de desgaste entre os Chevron e a marca no contra corpo não é circular e possui riscos bem evidentes no sentido do deslizamento.



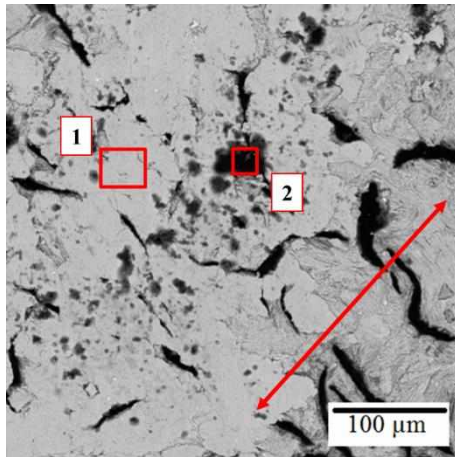
(a)



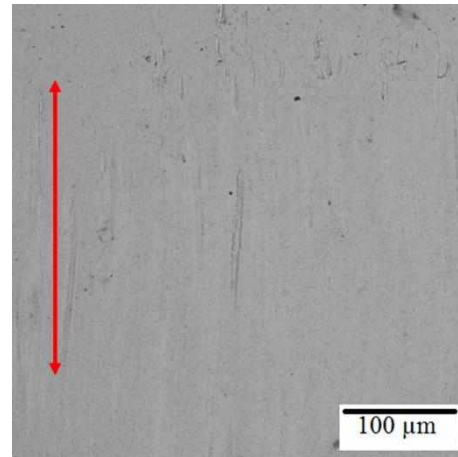
(b)

Figura 4-10 Imagem microscópio óptico da (a) trilha de desgaste e a (b) marca de desgaste do contra corpo do ensaio com lubrificação e com textura.

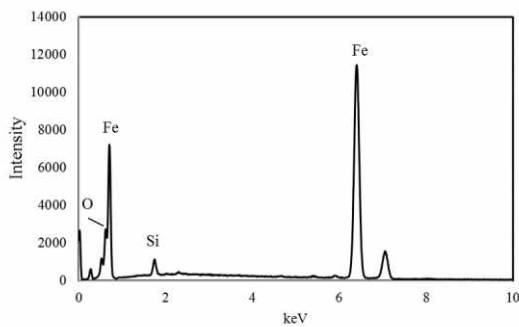
Pela análise da EDS da trilha de desgaste, ponto 1 da Figura 4-11 (a), observa-se a presença de ferro e oxigênio indicando uma possível presença de óxido. Ao longo da trilha é possível verificar a presença de carbono pela análise de EDS da Figura 4-11 (c). A aparência e a distribuição da trilha de desgaste são mais uniformes quando comparada com o ensaio sem lubrificante. No contra corpo não é possível identificar a presença de nenhum elemento da amostra, dando evidência que não teve transferência.



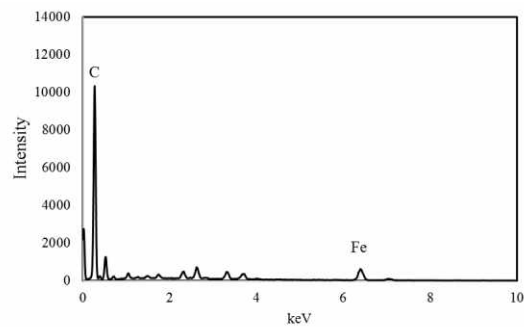
(a)



(b)



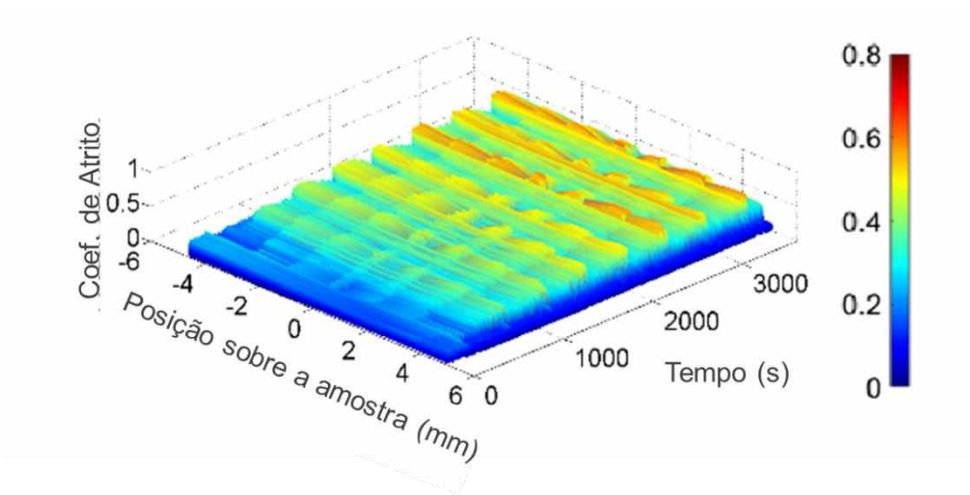
(b)



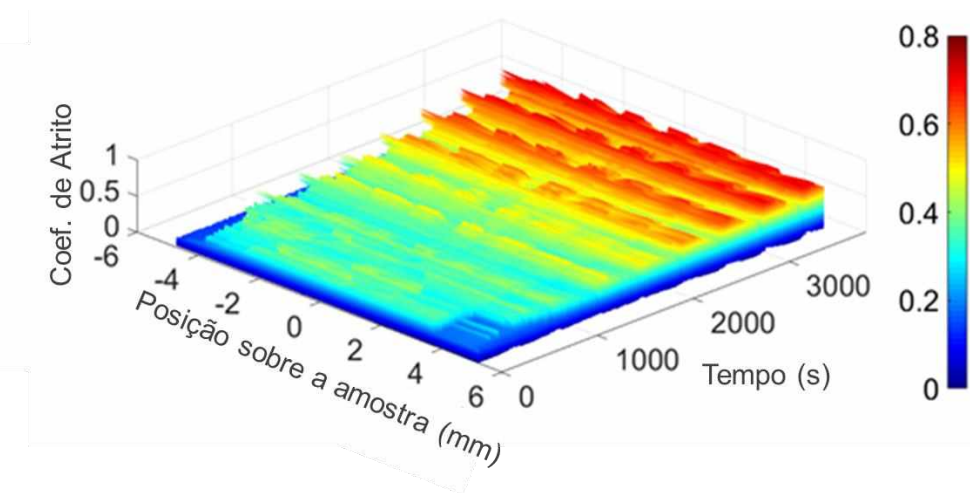
(c)

Figura 4-11 Microscopia eletrônica de varredura, utilizando elétrons retroespalhados, do ensaio com lubrificação e com textura, da marca de desgaste (a) da amostra e (b) do contra corpo, com análise e EDS (c) para área 1 e (d) para área 2 da amostra. A seta vermelha indica o sentido do deslizamento.

No mapa triboscópico Figura 4-12 é possível perceber a variação do coeficiente de atrito durante o decorrer da posição do contra corpo sobre a amostra, onde na região que possui textura não há contato efetivo do contra corpo com a amostra e o coeficiente de atrito é mínimo, já na região entre os vales dos Chevrons há o contato efetivo apresentando o maior coeficiente de atrito. Nos dois ensaios o coeficiente de atrito apresentou um crescimento gradativo até o regime permanente, por volta de 2000 s no ensaio sem lubrificante e 2500 s no ensaio com lubrificante. O ensaio a seco apresentou um coeficiente de atrito menor, nele os veios de grafitas estão expostos e participaram ativamente do contato desempenhando a função de lubrificante sólido. Na segunda condição as superfícies de contatos foram separadas pela presença do óleo lubrificante, e a ação da grafita como lubrificante sólido foi deixada como secundária ou inexistente.



(a)



(b)

Figura 4-12 Mapa de triboscopia das amostras com textura no regime (a) a seco e (b) com lubrificação.

4.4 Média dos coeficientes de atrito

Uma outra abordagem de análise do coeficiente de atrito é através do gráfico de coeficiente de atrito médio do ensaio Figura 4-13 (a), comparando os dois testes sem óleo lubrificante (sem textura - azul e com textura - alaranjado) a amostra com textura apresentou uma redução de 63% no coeficiente de atrito. Quando é comparado os testes que utilizaram óleo lubrificante (com textura - amarelo e sem textura - cinza) a redução não é expressiva como no caso anterior, onde o teste com amostra texturizada

teve um coeficiente de atrito maior, mostrando que aplicação da mesma não trouxe vantagem.

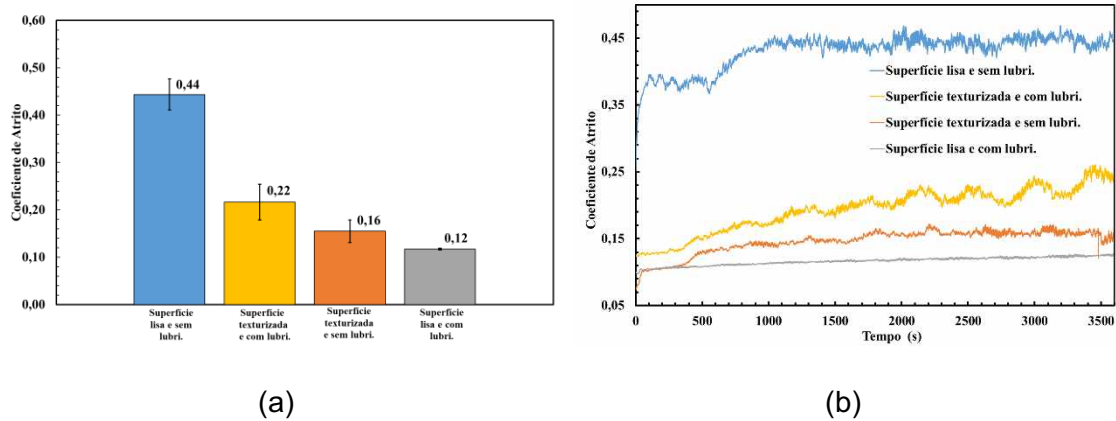


Figura 4-13 (a) Coeficiente de atrito médio dos 4 ensaios. (b) Desempenho do coeficiente de atrito durante os ensaios (azul- superfície lisa e sem lubrificante, amarelo - textura e com lubrificante, alaranjado - textura e sem lubrificante, cinza- superfície lisa e com lubrificante).

Na Figura 4-13 (b) apresenta como foi o comportamento do coeficiente de atrito médio instantâneo durante o teste. No teste com superfície lisa e sem lubrificação é possível observar que depois de 1100 s o teste entra em regime permanente, já no teste de superfície lisa e com lubrificação acontece nos primeiros 200 s. Já nos testes com textura o coeficiente de atrito apresentou ser mais instável devido a presença de mais variáveis, como veios de grafita e os vales da textura.

Atualmente em motores a combustão interna há um sistema de lubrificação com óleo lubrificante, para diminuir o coeficiente de atrito, a presença dele traz a melhor eficiência como vimos na Figura 4-13 (a), onde o ensaio que apresentou o menor coeficiente de atrito foi o de superfície lisa e com óleo lubrificante. Porém quando procuramos uma alternativa onde não utilizamos óleo lubrificante a texturização traz excelentes resultados e o coeficiente de atrito mais próximo do ensaio de superfície lisa com lubrificante. Quando comparado o coeficiente de atrito do ensaio de superfície texturizada sem lubrificante com a superfície lisa com lubrificante, o coeficiente apresentou um aumento de 33%, saindo de 0,12 para 0,16, respectivamente.

Capítulo 5

CONCLUSÃO

Ao adicionar lubrificante em um par tribológico o objetivo é diminuir o coeficiente de atrito, e é o que mostram os resultados dos testes realizados em amostra sem textura, onde foi obtido uma redução de 70 % no coeficiente de atrito. Esta redução corresponde a separação das superfícies devido ao lubrificante e os veios de grafita que serviram como reservatório. Outro ponto observado é a estabilização do sistema, onde no mesmo período de tempo de teste, obteve-se uma estabilização mais rápida quando se realizou o teste com lubrificante e a marca de desgaste também diminuiu.

Com o processo MECT temos a exposição dos veios de grafitas, que durante os ensaios de deslizamento atuam como lubrificante sólido. Porém quando realizados os testes de amostras texturizadas com adição de lubrificante líquido, esse efeito foi mascarado, tendo um coeficiente de atrito maior. Com a separação das superfícies, devido ao lubrificante líquido, os veios de grafitas e algumas partículas de ferro que se soltaram devido ao processo MECT se desprenderam e atuaram como um abrasivo, contribuindo para um coeficiente de atrito maior.

Quando se implementa a texturização de Chevron através do processo MECT, para realização de ensaios de deslizamento alternado, com parâmetros semelhantes como o deste trabalho, objetivando a diminuição do coeficiente de atrito, é recomendado que não se utilize lubrificante líquido, pois o resultado já é obtido pela texturização.

A prática de texturização pelo processo MECT pode ser uma nova forma de diminuir o coeficiente de atrito em motores de combustão interna, já que quase um terço da sua energia gerada é utilizada para vencer a força de atrito. Como apresentado neste trabalho é possível diminuir o coeficiente de atrito em 63%, de uma superfície lisa para uma superfície com textura, ambos testados ao ar.

Capítulo 6

TRABALHO FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se:

- Utilizando termopares e termo câmeras e analisar como se comporta a temperatura durante o ensaio;
- Avaliar o desgaste das amostras;
- Estudar outros padrões geométricos de texturas superficiais.

Capítulo 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BLAU, P. J. On the nature of running-in. *Tribology International*, v. 38, n. 11-12, p. 10071012. 2005. ISSN 0301-679X.
- Barbosa, L. M., “Ortomicrotribômetro”, 2018. Uberlândia. Tese de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia.
- COSTA, H. L.; HUTCHINGS, I. M. Hydrodynamic lubrication of textured steel surfaces under reciprocating sliding conditions. *Tribology International*, v. 40, n. 8, p. 1227–1238, 2007.
- Dutra, R. M. A.. “Controle e validação de um microtribômetro instrumentado para observar a evolução da marca de desgaste via microscopia óptica.” 2017. 85f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.
- ETSION, I. et al. Experimental Investigation of Laser Surface Textured Parallel Thrust Bearings. *Tribology Letters*, v. 17, n. 2, p. 295–300, ago. 2004.
- FOWELL, M. et al. Entrainment and Inlet Suction: Two Mechanisms of Hydrodynamic Lubrication in Textured Bearings. *Journal of Tribology*, v. 129, n. 2, p. 336, 2007.
- HAMILTON, D. B.; WALOWIT, J. A.; ALLEN, C. M. A Theory of Lubrication by Microirregularities. *Journal of Basic engineering*, v. 88, n. 1, p. 177–185, 1966.
- HUTCHINGS, I. M. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. [s.l.] Edward Arnold, 1992.
- INTERNATIONAL, A. *ASM Handbook: Volume 18: Friction, Lubrication, and Wear Technology*. [s.l: s.n.].
- LANDMAN, U. et al. Atomistic Mechanisms and Dynamics of Adhesion, Nanoindentation, and Fracture. *Science*, v. 248, n. 4954, p. 454–461, abr. 1990.
- MELO, D.B,2019 "EFEITO DA ADIÇÃO DE ÓXIDOS DE FERRO (FE2O3 E FE3O4) COMO ADITIVOS NO DESGASTE POR DESLIZAMENTO LUBRIFICADO DE UM PAR AÇO-AÇO." 2018

OKTAY, S. T.; SUH, N. P. Wear Debris Formation and Agglomeration. *Journal of Tribology*, v. 114, n. 2, p. 379, 1992.

PARREIRA, J. G. Texturização Superficial Eletroquímica Sem Mascaramento Com Finalidades Tribológicas. [s.l.] Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

PROFITO, F. J. Modelagem Unidimensional Do Regime Misto De Lubrificação Aplicada a Superfícies Texturizadas. [s.l.] Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 2010.

Reis, A., "FRESAMENTO FRONTAL DE FERROS FUNDIDOS CINZENTOS DE ALTA RESISTENCIA" 2020

Rodrigues, T. A., "Efeito do controle da topografia na eficiência de contatos lubrificados [recurso eletrônico] : avaliação experimental"

SAEIDI, F. et al. Effect of surface texturing on cast iron reciprocating against steel under starved lubrication conditions: A parametric study. *Wear*, v. 348–349, p. 17–26, fev. 2016.

Silva, L. R. R., "Texturização superficial de cilindros automotivos", 2016. Uberlândia. Tese de Mestrado –Universidade

STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A. W. *Engineering Tribology*. [s.l.] Elsevier Science, 2005.

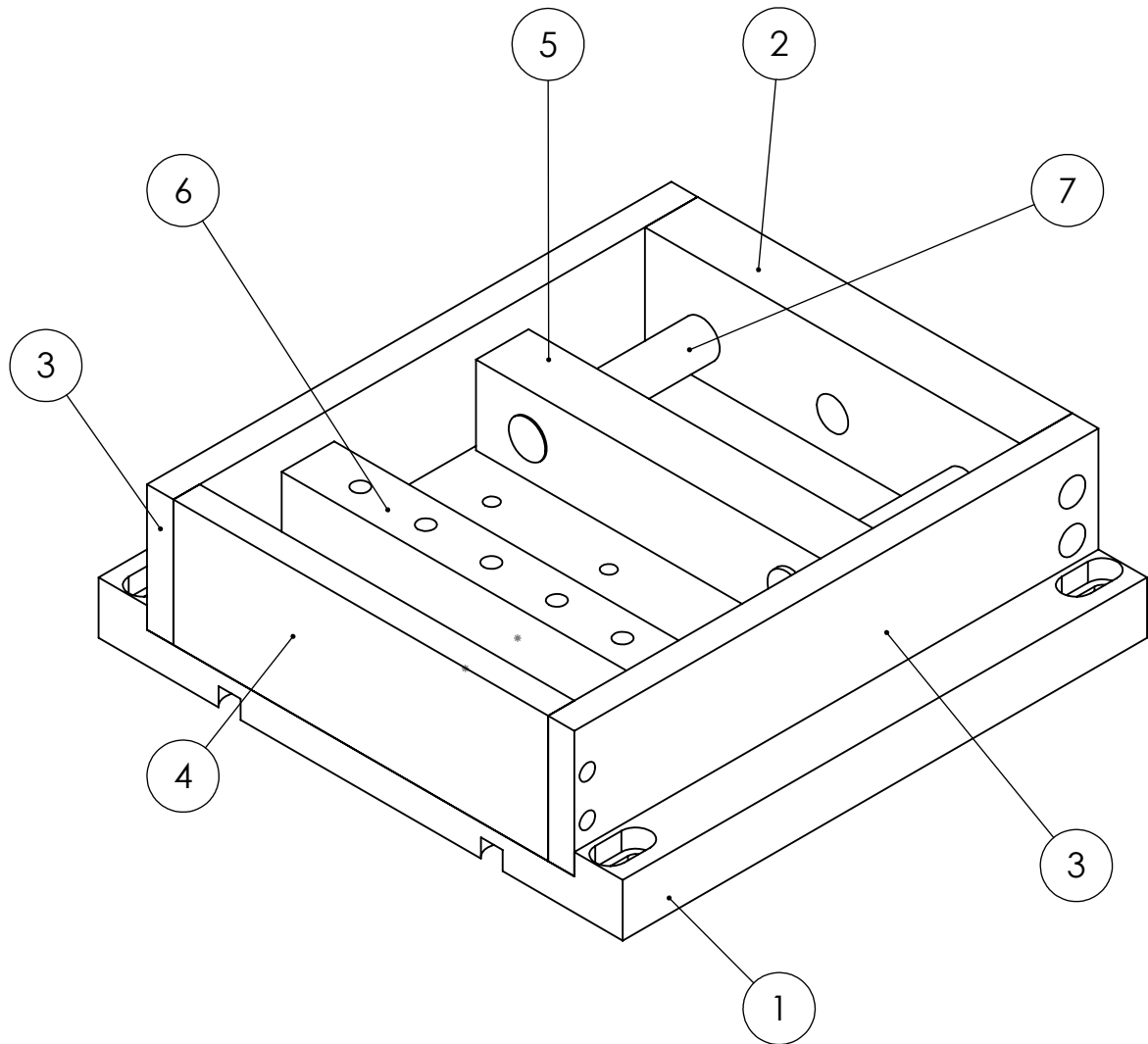
SUH, N. P. *Tribophysics*. [s.l.] Prentice-Hall, 1986.

VARENBERG, M.; HALPERIN, G.; ETSION, I. Different aspects of the role of wear debris in fretting wear. *Wear*, v. 252, n. 11–12, p. 902–910, jul. 2002.

VLĂDESCU, S. C. et al. Combined friction and wear reduction in a reciprocating contact through laser surface texturing. *Wear*, v. 358–359, p. 51–61, 2016.

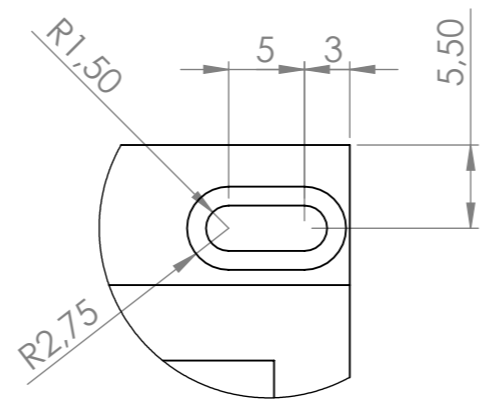
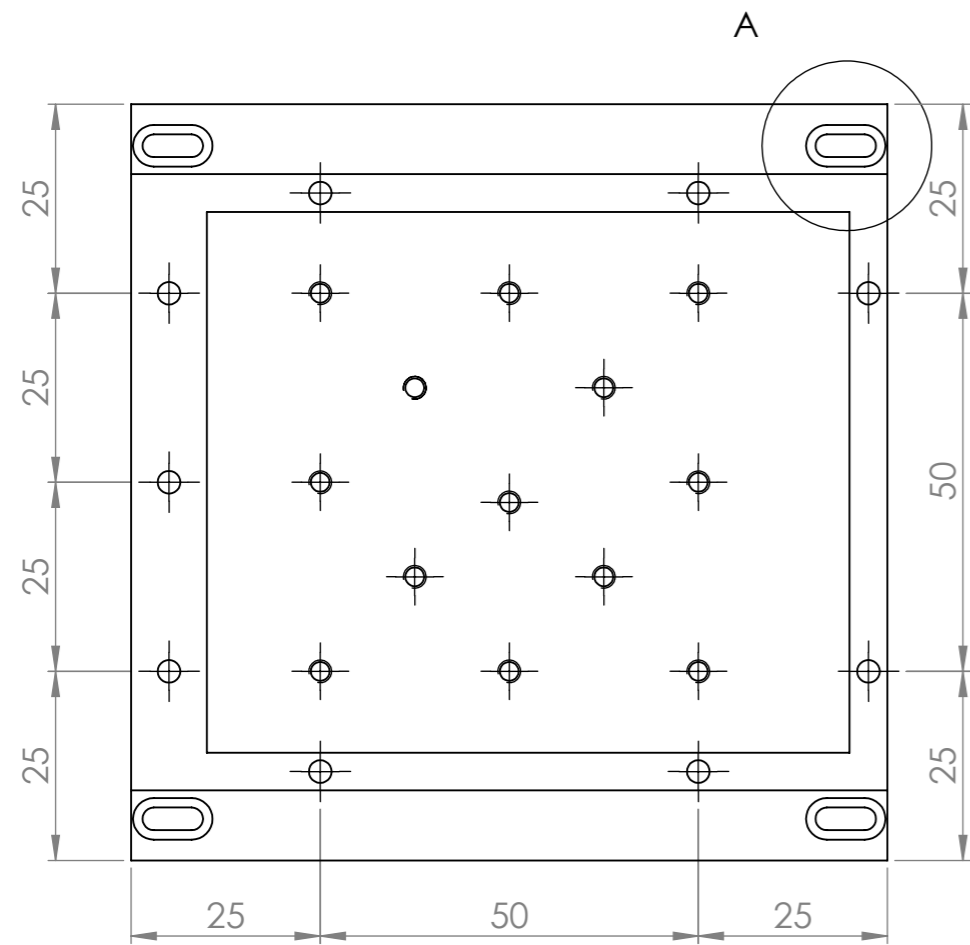
WARD, R. A comparison of reciprocating and continuous sliding wear. *Wear*, v. 15, n. 6, p. 423-434. 1970. ISSN 0043-1648.

WILLIAMS, J. *Engineering Tribology*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

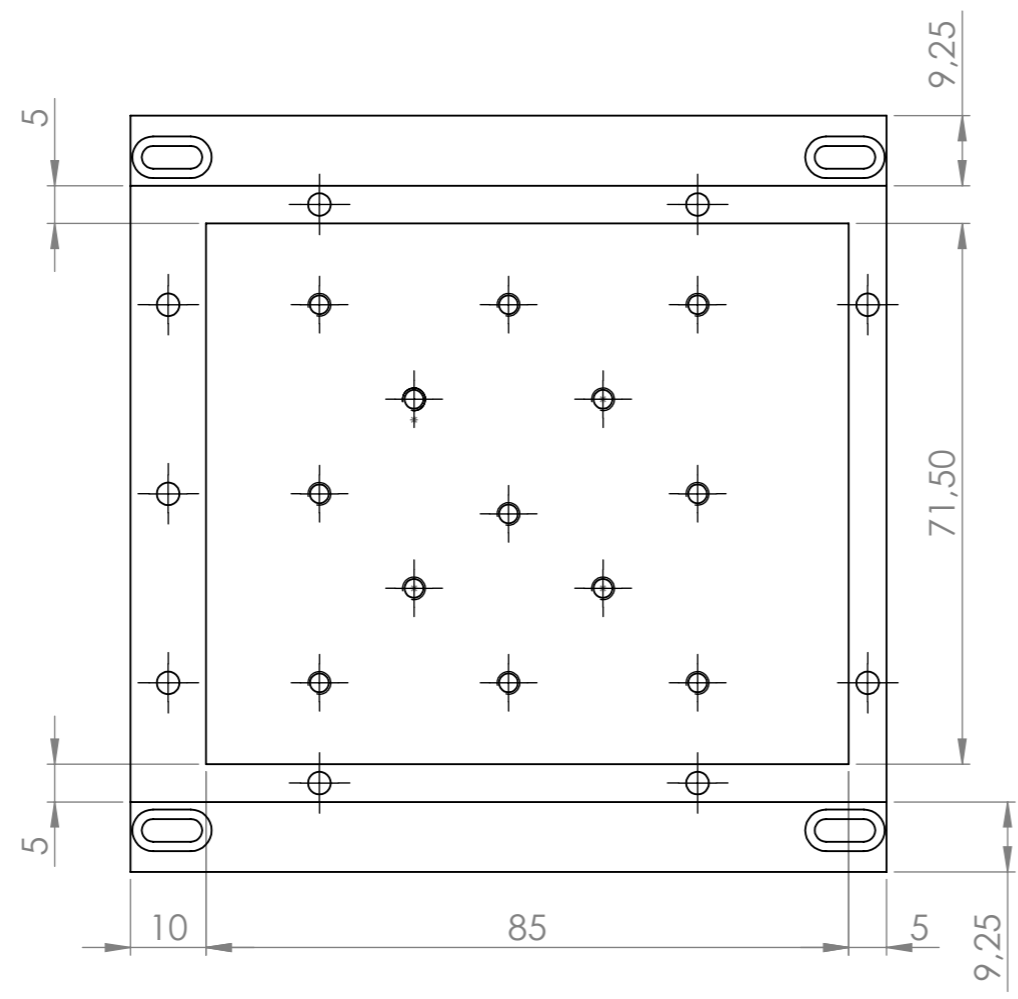
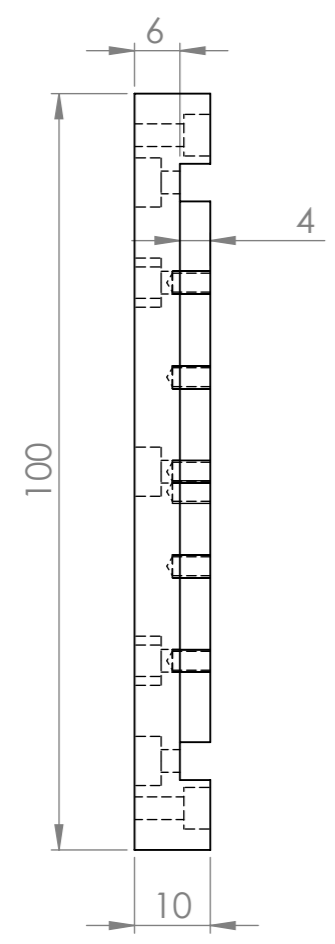
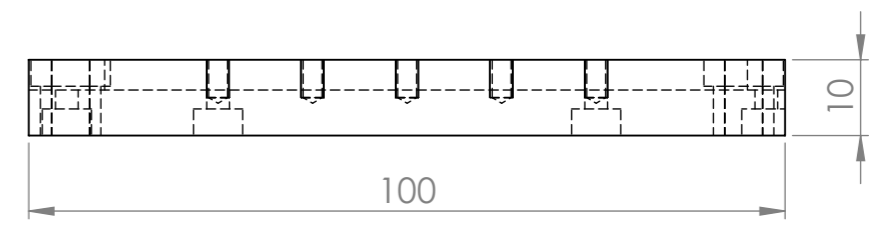
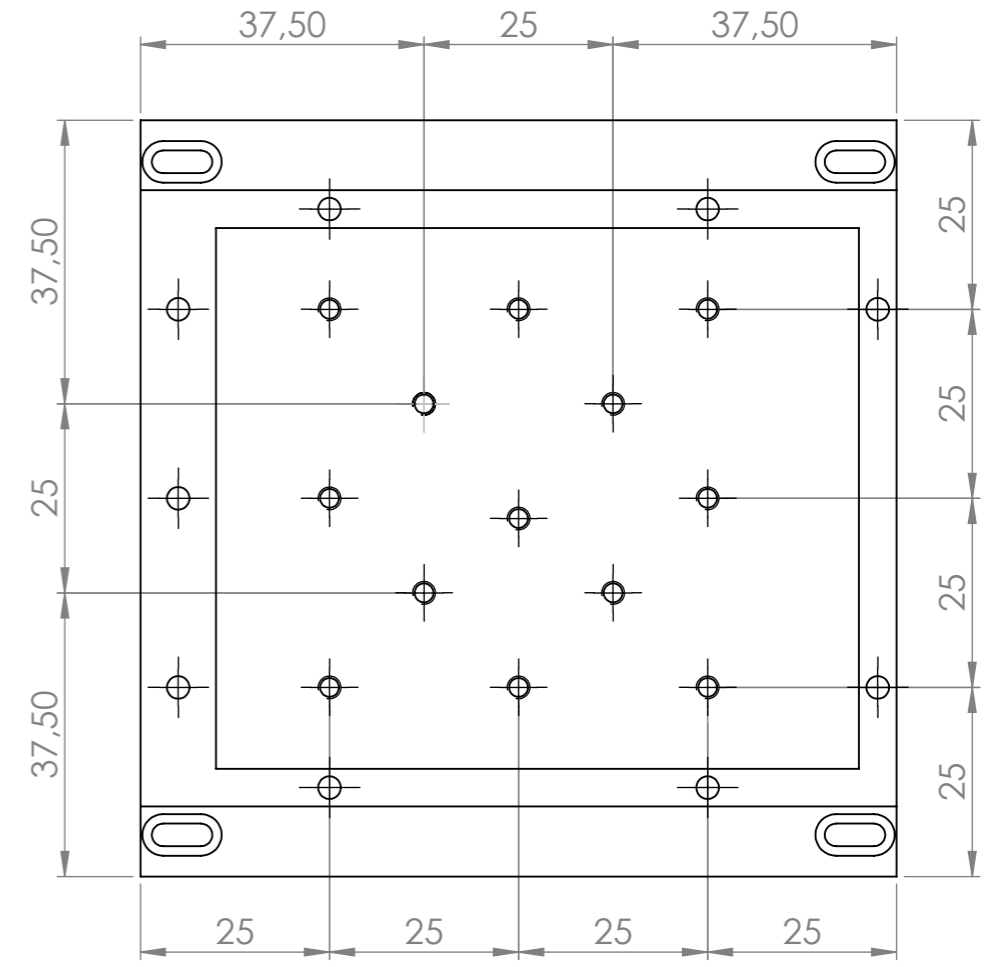


| ITEM NO. | PART NUMBER | MATERIAL | QTY. |
|----------|--------------------------|----------|------|
| 1 | Base | AÇO 1020 | 1 |
| 2 | Lateral furo | ALUMÍNIO | 1 |
| 3 | Lateral | ALUMÍNIO | 2 |
| 4 | Lateral sem furo | ALUMÍNIO | 1 |
| 5 | apoio movel com parafuso | ALUMÍNIO | 1 |
| 6 | apoio movel | ALUMÍNIO | 1 |
| 7 | guia | ALUMÍNIO | 2 |

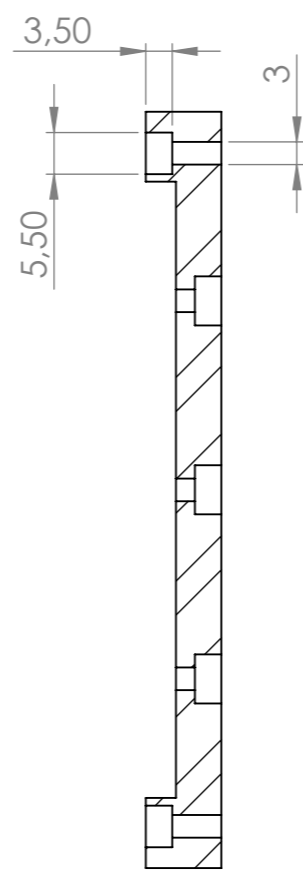
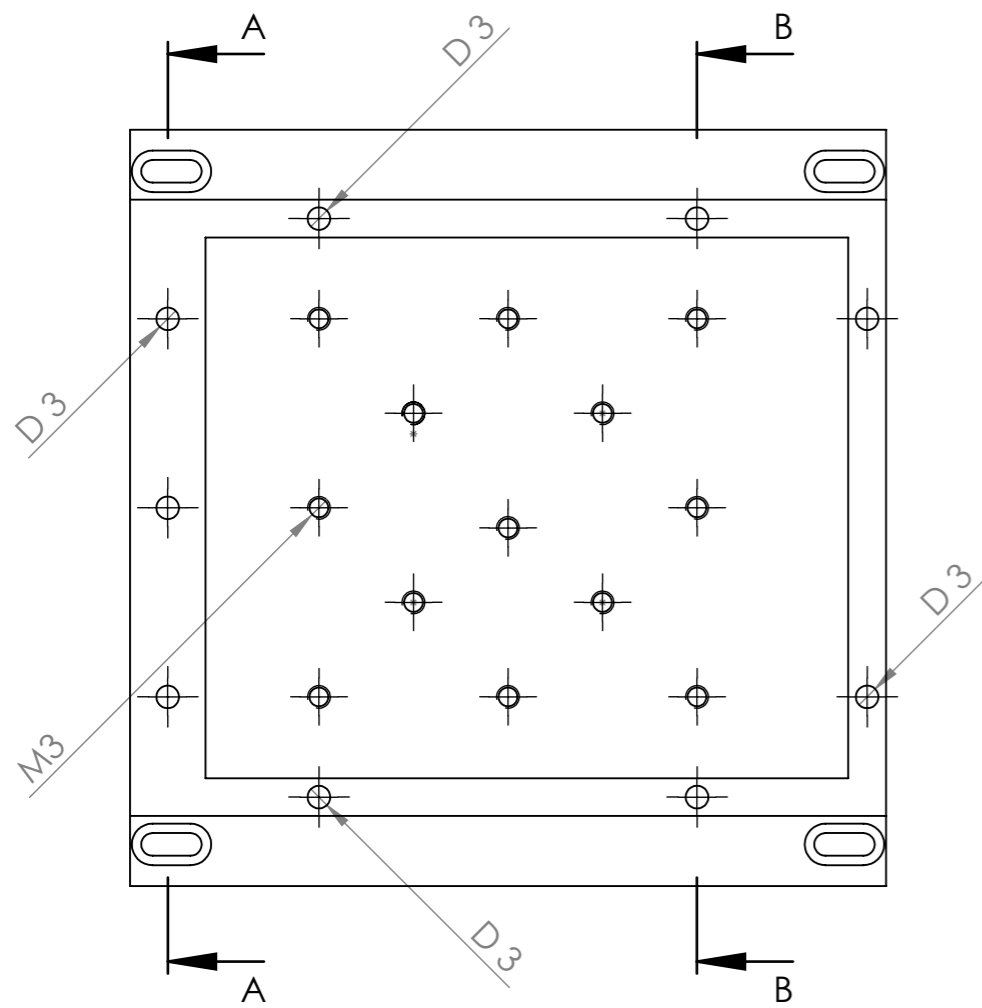
| | | |
|-----------------|---------------------------------|---------|
| UFU FEMEC | Projetista: Erika Michele Damas | Escalas |
| | Nome: | 1:2 |
| Montagem | | Nº: |



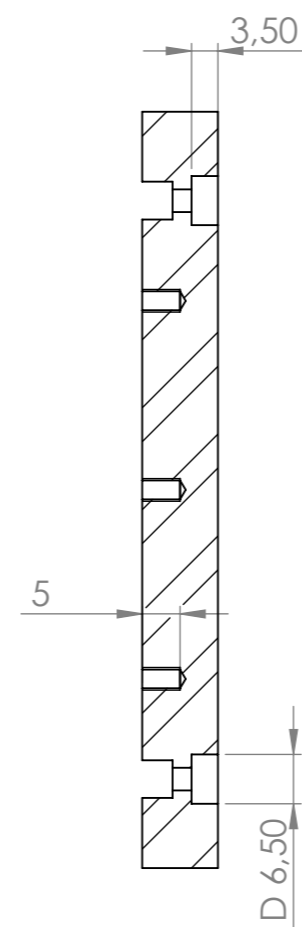
DETAIL A
SCALE 2 : 1



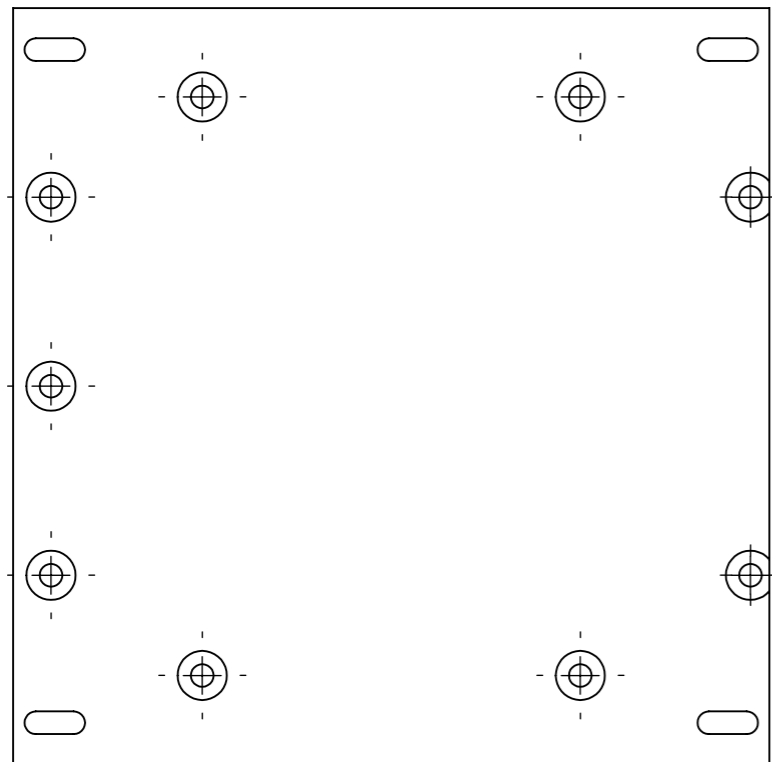
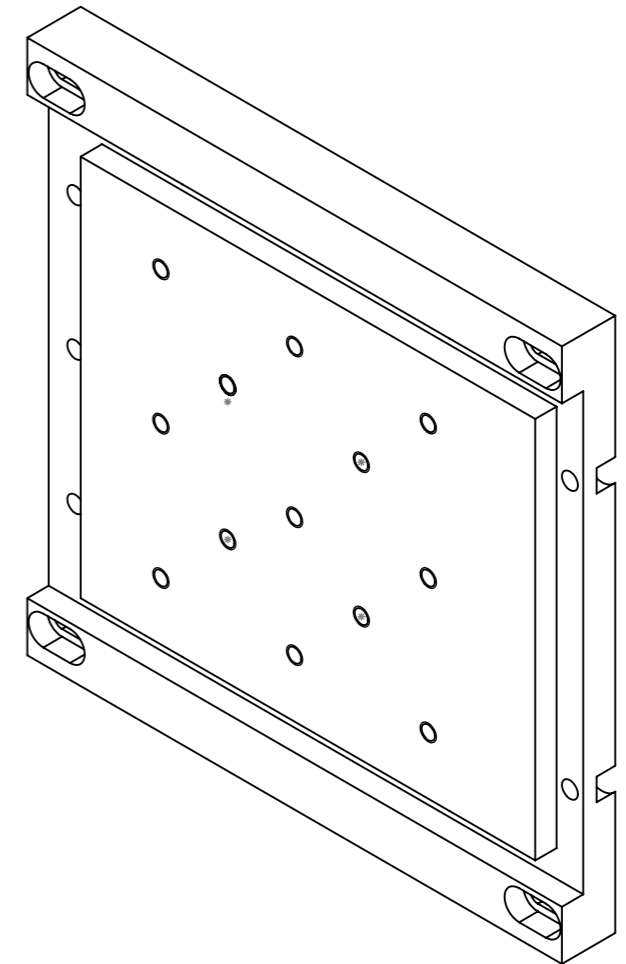
| | | |
|---------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| UFU FEMEC | Projeta: Erika Michele Damas | Escalas 1:1 |
| | Nome: 1- Base 1de2 | Material: Aço 1020 |
| | | Nº: 1/2 |



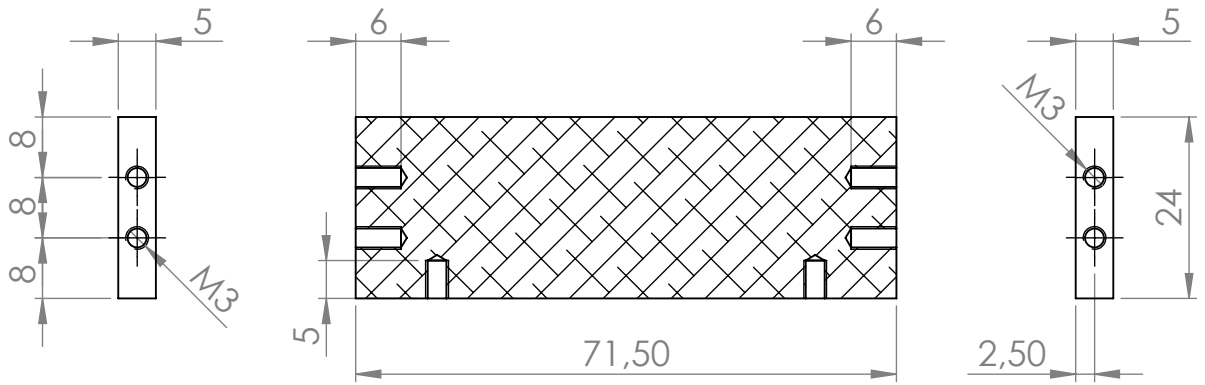
SECTION A-A



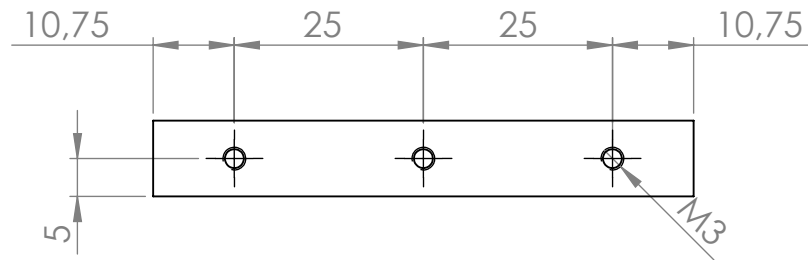
SECTION B-B



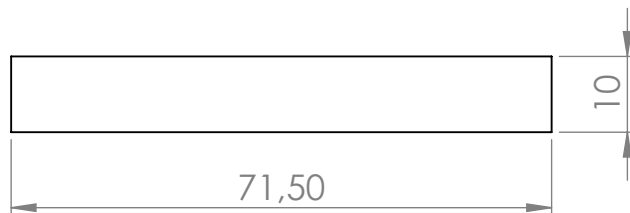
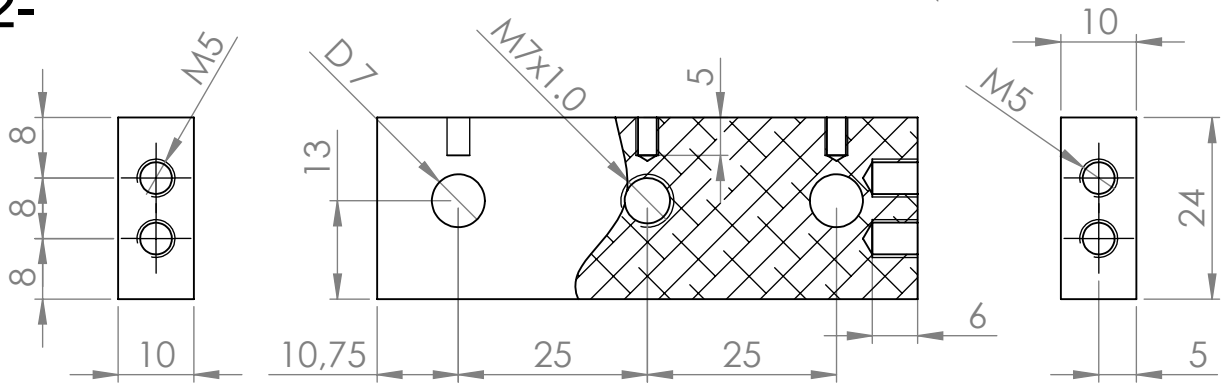
| | | |
|--------------|---------------------------------|-----------------------|
| UFU FEMEC | Projetista: Erika Michele Damas | Escalas 1:1 |
| | Nome: 1- Base 2de2 | Material: Aço 1020 |
| | | Nº: 1/2 |



4-

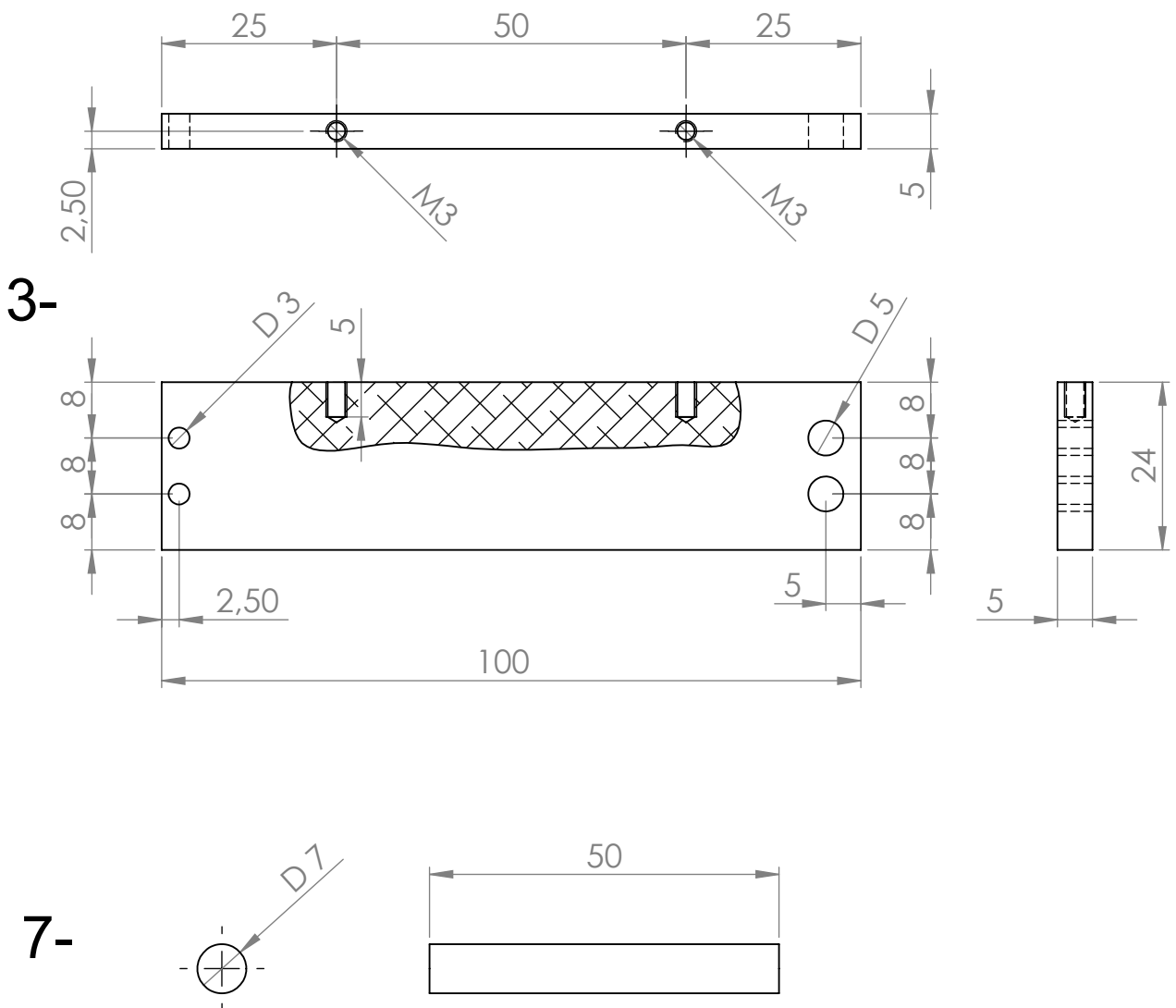


2-



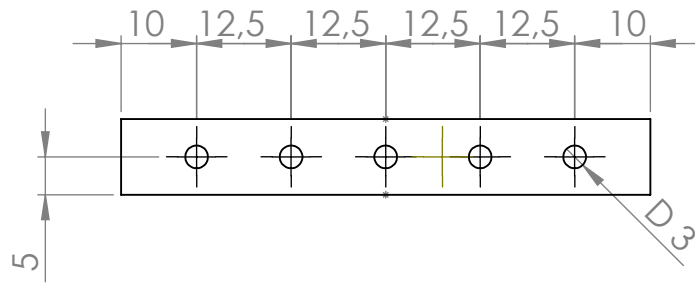
Quantidade:
1 de cada peça

| | | |
|--------------|--|-----------------------|
| UFU FEMEC | Projetista: Erika Michele Damas | Escalas |
| | Nome: 4- Lateral sem furo, 2- Lateral furo | 1:1 |
| | | Material: Alumínio |

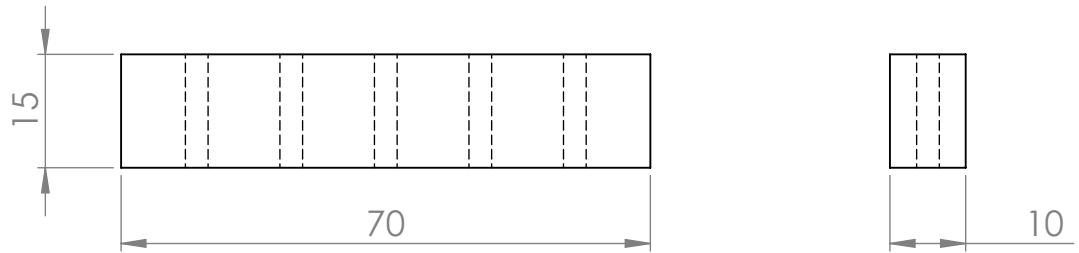


Quantidade:
2 de cada peça

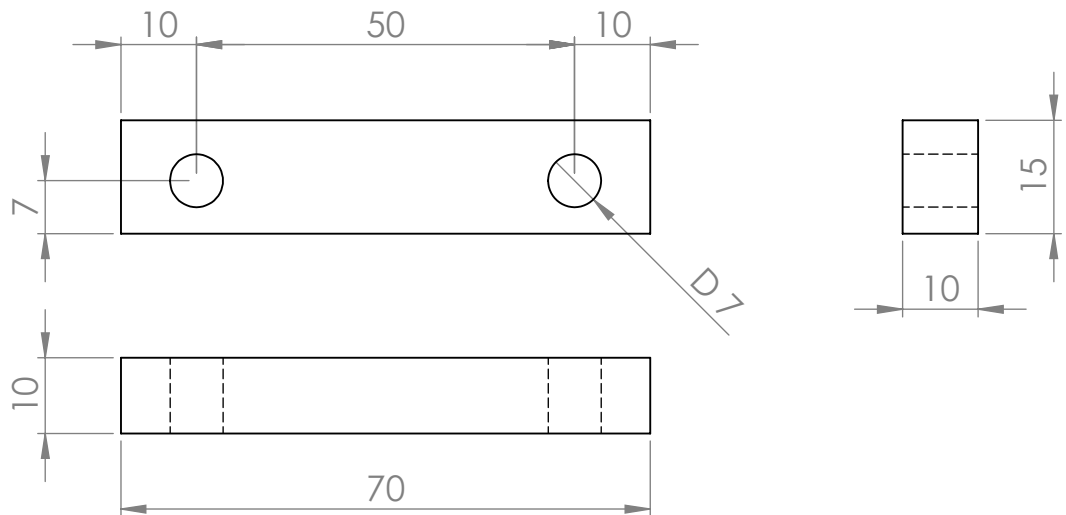
| | | |
|-----------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| UFU FEMEC | Projetista: Erika Michele Damas | Escalas |
| | Nome: | 1:1 |
| 3- lateral , 7- guia | | Material: Alumínio |



6-



5-



| | | |
|--------------|---|-----------------------|
| UFU FEMEC | Projetista: Erika Michele Damas | Escalas |
| | Nome: 6- apoio movel, 5- apoio movel com parafuso | 1:1 |
| | | Material: Alumínio |