

**ALESSANDRO AUGUSTO OLIMPIO FERREIRA
VITTORINO**

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO ATRITO EM
CORPOS CONFORMES TEXTURIZADOS VISANDO
OTIMIZAÇÃO TRIBOLÓGICA EM MANCAIS DE
USINAS HIDRELÉTRICAS**



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

2022

**ALESSANDRO AUGUSTO OLIMPIO FERREIRA
VITTORINO**

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO ATRITO EM CORPOS
CONFORMES TEXTURIZADOS VISANDO OTIMIZAÇÃO
TRIBOLÓGICA EM MANCAIS DE USINAS HIDRELÉTRICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Washington Martins da Silva Junior

UBERLÂNDIA – MG

2022

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da
UFU com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

V853 Vittorino, Alessandro Augusto Olimpio Ferreira, 1994-2022
AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO ATRITO EM CORPOS CONFORMES
TEXTURIZADOS VISANDO OTIMIZAÇÃO TRIBOLÓGICA EM MANCAIS DE
USINAS HIDRELÉTRICAS [recurso eletrônico] / Alessandro Augusto Olimpio
Ferreira Vittorino. - 2022.

Orientador: Washington Martins da Silva Junior.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.464>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica. I. Silva Junior, Washington Martins da ,1977-, (Orient.).
II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia
Mecânica.
III. Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, nº 615, PPGEM				
Data:	26/08/2022	Hora de início:	14:00	Hora de Encerramento:	17:00
Matrícula do Discente	12012EMC001				
Nome do Discente	Alessandro Augusto Olimpio Ferreira Vittorino				
Título do Trabalho	Avaliação Experimental do Atrito em Corpos Conformes Texturizados Visando Otimização Tribológica em Mancais de Usinas Hidrelétricas				
Área de Concentração	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de Pesquisa	Tribologia e Materiais				
Projeto de Pesquisa de vinculação	FAPEMIG Processo: APQ-01702-16 Projeto, desenvolvimento e calibração de um interferômetro óptico para a avaliação da topografia produzida em ensaios de desgaste por deslizamento				

Reuniu-se por meio de videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Aldemir Aparecido Cavallini Junior - FEMEC/UFU; Flávio José da Silva - UFPE; e Washington Martins da Silva Junior - FEMEC/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Washington Martins da Silva Júnior, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora



Documento assinado eletronicamente por **Aldemir Aparecido Cavalini Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 26/08/2022, às 16:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Washington Martins da Silva Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 26/08/2022, às 16:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **FLAVIO JOSE DA SILVA, Usuário Externo**, em 26/08/2022, às 16:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 3869587 e o código CRC 214F52F5.

"O Espírito do Senhor está sobre mim, porque me ungiu; e enviou-me para anunciar a Boa-Nova aos pobres, para sarar os contritos de coração, para anunciar aos cativos a redenção, aos cegos a restauração da vista, para pôr em liberdade os cativos, para publicar o ano da graça do Senhor."

Evangelho segundo Lucas 4, 18-19

Dedico este trabalho ao Deus Trino, Santa Maria e Francisco de Assis que sempre estiveram ao meu lado, me motivando e dando forças para continuar e não desistir nas dificuldades encontradas ao longo do curso.

Dedico também aos meus familiares, em especial a meus pais Marco Antonio Vittorino e Marilya Ferreira, avó Maria José Vittorino e tias Maria do Rosário Vittorino e Maria Valéria Vittorino.

Dedico a minha namorada Suzane, que me ajudou e me deu o apoio necessário para continuar na busca dos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Uberlândia e ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e seus professores, por toda estrutura física e de ensino que me ajudaram a ser uma pessoa mais madura, instruída e responsável, ao longo desses anos e pela oportunidade e suporte para realização deste mestrado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Washington Martins da Silva Junior, por todo o conhecimento transmitido, pela paciência, atenção, disponibilidade e por acreditar em mim desde o início.

Agradeço também aos professores Dra. Henara Lillian Costa Murray e Jose Daniel Biasoli de Mello que tanto me inspiraram a conhecer mais sobre Tribologia com seu ensino, conhecimento e referências acadêmicas.

Aos professores Dr. Enio Pedone Bandarra Filho, Dra. Elaine Kikuti e aos técnicos Jonas Profeta Borges e Flaysner Magayver Portela, que me auxiliaram nos laboratórios da FEMEC e PPQUI, me orientando sempre que necessário no esclarecimento de dúvidas e realização dos experimentos A instituição da FEMEC e seus professores, por toda estrutura física e de ensino que me ajudaram a ser mais instruído e responsável, ao longo desses anos.

Aos meus colegas e amigos Paulo Lourenço Monteiro Junior, Tulio Alves RODRIGUES, Marco Aurélio de Freitas Santos Jr Guilherme Henrique Alves Andrade e Letícia Raquel de Oliveira, membros do Laboratório de Tribologia e Materiais - LTM, e David Fernando Marcucci Pico do Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e nanotecnologia (LEST-nano) da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU, pela experiência, e conhecimento compartilhados.

Aos órgãos de fomento CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo apoio financeiro que possibilitaram a realização deste trabalho.

VITTORINO, A. A. O. F. **Avaliação Experimental do Atrito em Corpos Conformes Texturizados Visando Otimização Tribológica em Mancais de Usinas Hidrelétricas.** 2022. 102p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.

Resumo

Sobre a problemática do consumo em energia e material nas trocas de mancais de usinas hidrelétricas, foi levantada a hipótese de investigar métodos de fabricação de padrões topográficos em superfícies cilíndricas usando usinagem eletroquímica. Além da busca de uma metodologia ideal, o presente trabalho questionou sobre as vantagens do uso de texturas com geometria simples, formada por bolsos circulares, e composta, de círculos e elipses. A investigação ocorreu considerando os três regimes de lubrificação em contatos conformes: limítrofe, misto e hidrodinâmico. A eficiência do sistema foi avaliada em termos de coeficiente de atrito para amostras de aço ABNT 1045 submetidas aos ensaios tipo bloco-sobre-anel. Os dados de coeficiente de atrito apontaram para reduções na ordem de 52% para texturas simples e 31% para texturas compostas, considerando o regime limítrofe de lubrificação em comparação com amostras não texturizadas. Para o regime hidrodinâmico, as amostras com texturas compostas apresentaram reduções de 9% no coeficiente de atrito, enquanto as texturas simples apresentaram decréscimos de até 36% considerando o regime limítrofe de lubrificação em comparação com amostras não usinadas. As amostras sem alteração topográfica, operando no regime de lubrificação misto, apresentaram valores de coeficiente de atrito 74% maiores, em comparação com amostras com texturas compostas e de até 85% superiores para amostras com textura de geometria única. O conjunto de informações mostrado por este trabalho, corroborados por mecanismos de desgaste semelhantes entre as amostras e os casos em campo, inferem potencial aplicação da técnica de texturização determinística em mancais utilizados em sistemas de geração de energia.

Palavras-chave: Mancais lubrificados. Desgaste por deslizamento. Curva de Stribeck. Texturização superficial. Ensaio bloco sobre anel. Texturas compostas.

VITTORINO, A. A. O. F. **Experimental Evaluation of Friction in Texturized Bodies Aiming for Tribological Optimization in Hydroelectric Power Plants Bearings.** 2022. 102p. M. Sc. Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

Regarding the problem of energy and material consumption in hydroelectric plant bearings, the hypothesis was raised to investigate methods of manufacturing topographic patterns on cylindrical surfaces using electrochemical machining. In addition to the search for an ideal methodology, this present work questioned the advantages of using textures with simple geometry, formed by circular pockets, and composed of circles and ellipses. The investigation took place considering the three lubrication regimes in conformal contacts: boundary, mixed and hydrodynamic. The system efficiency was evaluated in terms of friction coefficient for ABNT 1045 steel samples submitted to block-on-ring wear tests. The friction coefficient data pointed to reductions in the order of 52% for simple textures and 31% for composite textures, considering the borderline lubrication regime compared to non-textured samples. For the hydrodynamic regime, samples with composite textures showed reductions of 9% in the friction coefficient, while simple textures showed decreases of up to 36% considering the boundary lubrication regime compared to unmachined samples. The samples without topographical change, operating in the mixed lubrication regime, presented values of friction coefficient 74% higher, compared to samples with composite textures and up to 85% higher for samples with single geometry texture. The set of information shown by this work, corroborated by similar wear mechanisms between the samples and the cases in the field, infers potential application of the deterministic texturing technique in bearings used in power generation systems.

Keywords: Lubricated bearings. Sliding wear. Stribeck curve. Surface texturing. Block-on-ring test. Composite textures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Distribuição do consumo de energia por fonte em 2022 (ABSOLAR, 2022).....	1
Figura 2.1 – Importância do contato em várias aplicações de Engenharia. (Adaptado de CZICHOS, 2020).	5
Figura 2.2 – Presença de asperezas no contato mecânico. (Adaptado de BRAINKART).....	5
Figura 2.3 – Ilustrações de contatos conformes (a) e mancal de deslizamento radial (b), e não conformes como dentes de engrenagens (c), came e seguidor (d) e do contato de uma pista e esfera de um mancal de rolamento (e). (HUTCHINGS, 2017).	6
Figura 2.4 – Uso de elementos rolantes das primeiras civilizações Primeiras civilizações para: (a) Construção, (b) Agricultura e Transporte. (a – FORD (2017); b – DUNN (2011)).	6
Figura 2.5 – Recursos energéticos não renováveis consumidos por atrito em automóvel (Adaptado de HOLMBERG, 2012).....	7
Figura 2.6 – Classes de movimentos relativos de superfícies: (a) rolamento e (b) deslizamento (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).....	7
Figura 2.7 – Tipos de curvas de lubrificação para contatos conformes (a) e não conformes (b). (Adaptado de GACHOT, 2016).	8
Figura 2.8 – Ilustração das cadeias carbônicas e grupos polares de aditivos adsorvidos da superfície, provendo uma (a) camada molecular hidrofóbica e exemplos como (b) Hexadecanol, (c) Ácido Esteárico e (d) Ditiofosfato de zinco (a - SPIKES (2004); b - KU (1970); c - STACHOWIAK; d- BATCHELOR (2013)).....	10
Figura 2.9 – Curva de Stribeck de contatos conformes lubrificadas (Adaptado de WUGE, 2017).	11
Figura 2.10 – Mancais com geometria plana e do tipo deslizamento e a sua pequena excentricidade requerida para presença de lubrificação hidrodinâmica (Adaptado de HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017a).....	12
Figura 2.11 – Sustentação gerada pelo comportamento de piezo viscosidade dos lubrificantes em condições de extrema tensão em regime elasto-hidrodinâmico (Adaptado de HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).....	12

Figura 2.12 – Constituintes Básicos de Mancais: de Deslizamento (a) e de Rolamento (b) (TELECURSO 2000, 1997).....	13
Figura 2.13 – Classificação dos mancais conforme a direção da carga solicitante (Adaptado de KÜHL, 2017).....	14
Figura 2.14 – Conjunto de mancais acoplados ao sistema de geração de energia de uma Usina Elétrica (Adaptado de DAIDOMETAL,2022).	15
Figura 2.15 – Gráfico do coeficiente de atrito com mancais axiais de segmento basculante (a) e imagem de uma das amostras de ensaio (b) (Adaptado de MCCARTHY, 2005).	15
Figura 2.16 – Coeficiente de Atrito de amostras com e sem texturas e seus respectivos regimes de lubrificação (Adaptado de KOVALCHENKO, 2010).....	17
Figura 2.17 – Desempenho tribológico de amostras texturizadas (quatro geometrias diferentes) e sem texturas superficiais (Adaptado de VLASDESCU, 2016).	17
Figura 2.18 – Aprisionamento de partículas de desgaste (a) e lubrificante (b) de uma textura; imagem de Microscópio Eletrônico de Varredura de partículas de desgaste em texturas (c) (a e b - LIN, 2018; c - ZHAO, 2016).	18
Figura 2.19 – (a) Representação de uma bolha de Micro Cavitação em uma textura e sua alteração no gradiente de pressão, representado através de um gráfico; (b) mecanismos possíveis causados por texturas superficiais (a - GROPPER, 2016; b - GRÜTZMACHER, 2017).	19
Figura 2.20 – Gráfico do atrito e tempo da estabilização do filme lubrificante de amostras de mancais axiais (HENRY, 2015).....	20
Figura 2.21 – Metodologias de Texturização Superficial (COSTA, 2014).	20
Figura 2.22 – Representação esquemática da usinagem eletroquímica do Ferro (Adaptado de NPTEL, 2008).	21
Figura 2.23 – Aparato experimental utilizado na técnica MECT (Adaptado de COSTA, 2009).	22
Figura 2.24 – Desgaste de amostras Texturizadas para uma mesma carga (a) e para três cargas distintas (b) (Adaptado de ZOU, 2021).	23
Figura 2.25 – Coeficientes de atrito de amostras sem texturização (apenas lixada e polida) e com texturização composta total (Adaptado de SEGU, 2015).....	24
Figura 2.26 – Valores da força de atrito para diferentes RPL (Adaptado de Ronen et al., 2001).	25
Figura 2.27 – Classificação dos mecanismos de desgaste.	25
Figura 2.28 – Representação esquemática de diferentes ensaios tribológicos: (a) Esfera-disco, (b) Pino-disco, (c) Bloco-sobre-anel, (Adaptado de GAYATRI, 2019).	26
Figura 2.29 – Geometria para ensaios com geometria conforme (a) e não conforme (b) (Adaptado de HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017a).	27

Figura 2.30 – Falhas em mancais de Turbinas causadas por: (a) abrasão oriundas de particulados no lubrificante; (b) trincas por fadiga (a - MCCLOSKEY, 1995;b - TAŞGIN, 2021	28
Figura 3.1 – Fluxograma dos ensaios realizados nesta dissertação.....	29
Figura 3.2 – (a) Esquema das amostras utilizadas com suas dimensões em milímetros e (b) microestrutura dos corpos de prova atacados por Nital 5%, durante 30 segundos.	30
Figura 3.3 – Curva de Stribeck com tipos de lubrificação para contatos conformes e não conformes (Adaptado de HUTCHINGS, 2017).....	31
Figura 3.4 – (a) Esquema dos anéis (contracorpo) utilizados com suas dimensões (b) e microestrutura dos corpos de prova atacados por Nital 2%, durante 10 segundos.	32
Figura 3.5 – (a) Matriz de conformação e ferramentas para uso com fluxo de eletrólitos (b) perpendiculares e (c) paralelos.....	33
Figura 3.6 – Desenho com as máscaras cotadas e sentido de deslizamento durante o ensaio.	34
Figura 3.7 – Propriedades físicas do óleo hidráulico BP68 utilizado, os testes deram-se no intervalo de 20 – 90 °C.	34
Figura 3.8 – Sistema Bloco sobre Anel adaptado com sistema refrigerado com água.	35
Figura 3.9 – Ilustração de perfis (a) com Assimetria positivos e negativos, (b) e Curtose maior e menor que três, e suas distribuições relativas. (Adaptado de Straioto, 2006)	36
Figura 3.10 – Ilustração do: (a) perfil de uma superfície; (b) sua Curva de Abbott-Firestone (Adaptado de Olympus, 2022).	37
Figura 3.11 – Ilustração do aparato experimental MECT modelado por Parreira (2011) e da Silva (2016).	37
Figura 3.12 – Sistema aberto com fluxo paralelo de eletrólitos.	38
Figura 3.13 – Sistema com fluxo paralelo de eletrólitos direcionado para região de interesse.	39
Figura 3.14 – Representação Esquemática do: (a) Par metálico utilizado na texturização eletroquímica e (b) suas reações químicas envolvidas no processo de corrosão entre o mancal e a ferramenta.	40
Figura 3.15 – Desenho esquemático do Ensaio Bloco sobre Anel utilizado.	40
Figura 3.16 – Desenho esquemático com a modificação realizada para os ensaios bloco sobre anel.....	41
Figura 3.17 – Curva de calibração do termopar tipo J utilizado nos ensaios.	42
Figura 3.18 – Curva de calibração da célula de carga do tribômetro utilizada nos ensaios. .	42
Figura 4.1 – Perfil de profundidade da textura simples formada em 30 segundos por processo (a) sem e (b) com mascaramento. Os valores indicam a máxima altura.	46

Figura 4.2 – Perfil de profundidade da textura simples formada em 45 segundos por processo (a) sem e (b) com mascaramento. Os valores indicam a máxima altura.	47
Figura 4.3 – Perfil de profundidade da textura simples formada em 60 segundos por processo (a) sem e (b) com mascaramento. Os valores indicam a máxima altura.	48
Figura 4.4 – Medidas das profundidades das texturas com geometria simples.	48
Figura 4.5 – Perfil de textura composta formada em 30 segundos por processo (a) sem e (b) com mascaramento. Os valores indicam a máxima altura.	49
Figura 4.6 – Perfil de textura composta formada em 45 segundos por processo (a) sem e (b) com mascaramento. Os valores indicam a máxima altura.	50
Figura 4.7 – Perfil de textura composta formada em 60 segundos por processo sem (a) e com mascaramento (b). Os valores indicam a máxima altura.	51
Figura 4.8 – Medidas das profundidades das texturas com geometria composta.	52
Figura 4.9 – Medidas da relação profundidade/largura das texturas com geometria simples.	53
Figura 4.10 – Medidas da relação profundidade/largura das texturas com geometria compostas.	53
Figura 4.11 – Medidas da relação profundidade/largura das texturas em tempo de 40 segundos formadas pelo processo de texturização com mascaramento.	55
Figura 4.12 – Interferometria do perfil de Textura Simples selecionado.	56
Figura 4.13 – Interferometria do perfil de Textura composta selecionado.	56
Figura 4.14 – Espaço morfológico $R_{sk} \times R_{ku}$ de: (a) processos de fabricação (Adaptado de Horváth, 2014) e (b) das amostras ensaiadas.	57
Figura 4.15 – Curva de valores R_{vk} e T_p das amostras estudadas.	58
Figura 4.16 – Curva de Stribeck dos Ensaios realizados.	60
Figura 4.17 – Morfologia de amostras (a) não texturizadas, (b) com textura simples e (c) compostas, ensaiadas em regime limítrofe.	63
Figura 4.18 – Superfícies de amostra não texturizadas ensaiadas em regime limítrofe, com suas imagens de MEV e espectros de EDS.	64
Figura 4.19 – Amostra com texturas simples em regime com suas imagens de MEV e espectros de EDS.	64
Figura 4.20 – Amostra com texturas compostas em regime limítrofe, com suas imagens de MEV e espectros de EDS.	65
Figura 4.21 – Morfologia de amostras (a) não texturizadas, (b) com textura simples e (c) compostas, ensaiadas em regime misto.	66
Figura 4.22 – Amostra não texturizadas ensaiadas em regime misto, com suas imagens de MEV e espectros de EDS.	67

Figura 4.23 – Amostra com texturas simples obtidas em ensaios com regime misto, com suas imagens de MEV e espectros de EDS	67
Figura 4.24 – Amostra com texturas compostas em regime misto, com suas imagens de MEV e espectros de EDS	68
Figura 4.25 – Morfologia de amostras não texturizadas (a) não texturizadas, (b) com textura simples e (c) compostas, ensaiadas em regime hidrodinâmico.....	69
Figura 4.26 – Amostra não texturizada em regime hidrodinâmico, com suas imagens de MEV e espectros de EDS	70
Figura 4.27 – Amostra com texturas simples em regime hidrodinâmico, com suas imagens de MEV e espectros de EDS.	70
Figura 4.28 – Amostra com texturas compostas em regime hidrodinâmico, com suas imagens de MEV e espectros de EDS.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação das propriedades de superfícies texturizadas (BRUZZONE; COSTA; LONARDO; LUCCA, 2008; DE CHIFFRE; KUNZMANN; PEGGS; LUCCA, 2003; EVANS; BRYAN, 1999).	16
Tabela 3.1 – Parâmetros utilizados nos ensaios de texturização eletroquímica.	39
Tabela 3.2 – Parâmetros usados nos ensaios de atrito.....	43
Tabela 3.3 – Resumo com os parâmetros dos testes feitos nesta metodologia	44
Tabela 4.1 – RPL das amostras ensaiadas nos tempos de 30, 45 e 60 segundos.....	54
Tabela 4.2 – Valores de RPL para o tempo de 40 segundos.	55
Tabela 4.3 – Valores de Parâmetros Topográficos das amostras utilizadas nos ensaios.....	56
Tabela 4.4 – Fator λ calculado para os sistemas estudados.	59
Tabela 4.5 – Espessura de Filme Lubrificante das amostras em micrometros.	59
Tabela 4.6 – Coeficientes de Atrito referentes aos sistemas tribológicos estudados.....	61

LISTA DE SÍMBOLOS

A = área de contato

cSt = centistokes

Fe = ferro

$Fe(OH)_2$ = hidróxido de ferro

Fe^{++} = íon de ferro

$FeCl_2$ = cloreto de ferro

Cl^- = íon de cloro

e^- = elétron

H^+ = íon de hidrogênio

Na^+ = íon de sódio

$NaCl$ = cloreto de sódio

$NaOH$ = hidróxido de sódio

OH^- = hidroxila

H_2O = molécula de água

I = corrente elétrica (A)

t = tempo de exposição do eletrólito (s)

F = constante de Faraday ($C \cdot mol^{-1}$)

z = número de elétrons de valência da reação de eletrólise

M = concentração molar. (mol/L)

MECT = método de texturização eletroquímica sem mascaramento

TMEMM = método de texturização eletroquímica com mascaramento

MEV = microscópio eletrônico de varredura

EDS = espectroscopia de energia dispersiva

GPa = giga Pascal

η = viscosidade do fluido

h_{min} = espessura mínima de fluido lubrificante

R^2 = coeficiente de determinação

rpm = rotações por minuto

RPL = razão profundidade largura

U = parâmetro adimensional de velocidade

V = Volt

λ = relação entre rugosidade e espessura de filme lubrificante

μ = coeficiente de atrito

U = parâmetro adimensional do material.

G = parâmetro adimensional da velocidade

W = parâmetro adimensional da carga

E = módulo de elasticidade reduzido entre os dois materiais em contato

R = raio de contato (m)

L = largura do contato (m)

α = coeficiente de pressão-viscosidade ($\text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$)

Λ_1 = *Bearing Number*

R_{vk} = Profundidade reduzida do vale

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Tipos de Contato.....	4
2.2 Atrito	6
2.3 Regimes de Lubrificação.....	8
2.4 Mancais.....	13
2.4.1 <i>Texturização Superficial.....</i>	<i>16</i>
2.4.2 <i>Mecanismos e Ensaio de Desgaste</i>	<i>25</i>
CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1 Materiais Utilizados.....	30
3.1.1 <i>Corpos de Prova</i>	<i>30</i>
3.1.2 <i>Aparatos de Texturização</i>	<i>32</i>
3.1.3 <i>Fluido Lubrificante.....</i>	<i>34</i>
3.2 Metodologia.....	35
3.2.1 <i>Acabamento Superficial</i>	<i>35</i>
3.2.2 <i>Texturização Eletroquímica Superficial</i>	<i>37</i>
3.2.3 <i>Ensaio Tribológicos.....</i>	<i>40</i>
CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1 Análise Morfológica das Texturas Fabricadas.....	45
4.2 Análise do Desempenho Tribológico de Amostras Texturizadas com Geometrias Simples, Compostas e sem Texturas	58
4.2.1 <i>Regime de Lubrificação Limítrofe.....</i>	<i>61</i>
4.2.2 <i>Regime de Lubrificação Misto</i>	<i>61</i>
4.2.3 <i>Regime de Lubrificação Hidrodinâmico.....</i>	<i>62</i>
4.3 Mecanismos de Desgaste.....	62

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES	72
CAPÍTULO VI – TRABALHOS FUTUROS.....	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

A economia mundial encontra-se cada vez mais competitiva e em busca de inovações que viabilizem redução de custos, aumento de produtividade e sustentabilidade operacional e ecológica. Diante deste cenário, tem-se utilizado componentes mais eficientes em termos de consumo de energia, cujos recursos vêm sofrendo um aumento de demanda, à medida que a tecnologia evolui e que bens de consumo se tornam mais acessíveis a mais pessoas. Como consequência disso, se faz necessária uma maior disponibilidade de recursos energéticos, em grande parte finitos e poluentes como os combustíveis derivados do petróleo, para suprir a necessidade crescente da economia, como mostra a Figura 1.1.



Figura 1.1 – Distribuição do consumo de energia por fonte em 2022 (ABSOLAR, 2022).

No cenário brasileiro, a energia hidrelétrica corresponde à maior parte da geração anual de energia do país, com 54% da matriz energética em 2022, podendo quadruplicar sua potência para 414,1 TWh em 2030 (SANTOS, 2021).

Até o presente momento, o Brasil conta com 739 centrais geradoras hidrelétricas de médio porte e 219 usinas hidrelétricas de grande geração de energia. Destas, quase um terço possui mais de 40 anos, necessitando manutenções em menores intervalos de tempo, o que ocasiona paradas não previstas ou programadas. Só no período de 2007 a 2018, o Brasil deixou de gerar cerca de 208 963 GWh de energia, levando um prejuízo equivalente a 12,76 bilhões de dólares (RIJEZA, 2022).

A Tribologia, proposta por Jost em 1966, apresenta soluções que visam reduzir o desgaste e as perdas de energia de sistemas mecânicos. Dentro desses estudos, é possível otimizar o desempenho tribológico dos sistemas propondo materiais e lubrificantes mais eficientes ou utilizando-se de técnicas de controle da topografia.

Além dos mecanismos descritos, 15% dos custos de manutenção das usinas se devem a problemas de lubrificação dos mancais que sustentam os geradores (GGBEARINGS, 2019). Nesse sentido, técnicas de engenharia de superfícies podem gerar materiais mais resistentes à abrasão e erosão, além de reduzir o atrito pela otimização de sistemas lubrificados, como é o caso dos mancais, elementos críticos das usinas.

Uma das técnicas de modificação superficial que vem apresentando destaque nos últimos anos é a texturização, que consiste na modificação da topografia com o objetivo de otimização de propriedades funcionais biológicas, ópticas, térmicas, tribológicas dentre outras.

Entre os estudos que atestam os potenciais usos de texturas, pode-se citar o de KOVALCHENKO (2010), cujos resultados mostraram que além de reduzir a dissipação de energia no regime limítrofe em 20%. Segundo os autores, as texturas permitiram uma mudança para o regime de lubrificação misto, atingindo valores de coeficiente de atrito duas vezes menores, para condições semelhantes às de amostras sem alteração topográfica.

Para um desempenho ótimo em termos de redução do atrito e do desgaste, é preciso escolher adequadamente parâmetros de padrões de textura. Estes podem variar conforme o método de fabricação, densidade (razão da área ou volume de texturas em relação a superfície não modificada superficialmente), geometria (bolsos circulares, círculo, elipse, chevron) tamanho, texturização total ou parcial, além de se utilizar vários padrões simultaneamente, também chamados de texturas compostas.

Uma das formas mais econômicas de se produzir texturas padronizadas é pelo processo de usinagem eletroquímica, na qual o metal é removido da peça através de uma dissolução controlada em um sistema de eletrólise. É importante destacar algumas vantagens desta técnica em relação aos métodos tradicionais, tais como: ausência de tensão residual

resultante de deformação mecânica na peça usinada, ausência de formação de cavaco, vida útil da ferramenta.

Visando menores valores de atrito em seus elementos de máquinas, este trabalho tem por objetivo principal estudar a eficiência tribológica, em termos de redução de atrito, de mancais radiais lubrificadas. A análise compreenderá os três principais regimes conhecidos: limítrofe, misto e hidrodinâmico, utilizando amostras de geometria cilíndrica. Foram comparados padrões simples e misto de textura, fabricados por usinagem eletroquímica, e seu desempenho tribológico avaliado comparativamente com superfícies cilíndricas sem alteração topográfica.

Nesse contexto, esse trabalho busca responder a seguinte pergunta: Como melhorar o desempenho de mancais radiais lubrificadas de hidrelétricas utilizando texturas de geometria composta? Para responder essa pergunta, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Projetar e desenvolver um aparato de baixo custo que permita a texturização de superfícies cilíndricas por usinagem eletroquímica com interface/ferramenta polimérica;
- Desenvolver metodologia de texturização adequada e parametrização ótima para fabricação de texturas com geometria simples e composta para fins tribológicos;
- Avaliar o desempenho do atrito de amostras como modelo de mancais nos três regimes característicos para contatos conformes: limítrofe, misto e hidrodinâmico.

A presente dissertação divide-se em seis capítulos: este capítulo introdutório, seguido de uma revisão bibliográfica que aborda os principais fundamentos sobre atrito, texturização e contatos lubrificadas. Na metodologia, abordada no capítulo três, tem-se a descrição dos materiais, métodos de texturização eletroquímico utilizados e dos testes lubrificadas com as amostras de mancais. Em seguida são apresentados os principais resultados e discussões do trabalho, focados no desempenho tribológico e estudo comparativo entre as peças pelo capítulo quatro. Os capítulos cinco e seis englobam as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico são encontrados uma série de registros que dão embasamento científico para o desenvolvimento deste projeto de dissertação.

Para melhor compreensão do trabalho se faz necessário discutir a respeito dos contatos mecânicos e do atrito gerado como consequência deste. Como forma de minimizar os impactos do atrito em mancais, a seção 2.3 apresenta a definição de regimes de lubrificação, assim como as principais estratégias de redução de atrito aplicadas em cada regime. A seção 2.4 se refere aos mancais específicos utilizado em usinas hidrelétricas. Também nesse tópico são apresentados os fundamentos teóricos acerca da texturização eletroquímica e sobre os mecanismos e ensaios de desgaste que possibilitaram explicar os métodos utilizados nesta dissertação.

2.1 Tipos de Contato

Para estudar os fenômenos de atrito e desgaste de amostras texturizadas, se faz necessário entender antes que estes possuem seus fundamentos baseados na topografia, ou seja, possuem dependência do contato. Conforme a Figura 2.1, todo tribossistema é a relação de um contato entre dois corpos em um meio ambiente submetido a temperatura, pressão e elementos contidos nessa interface.

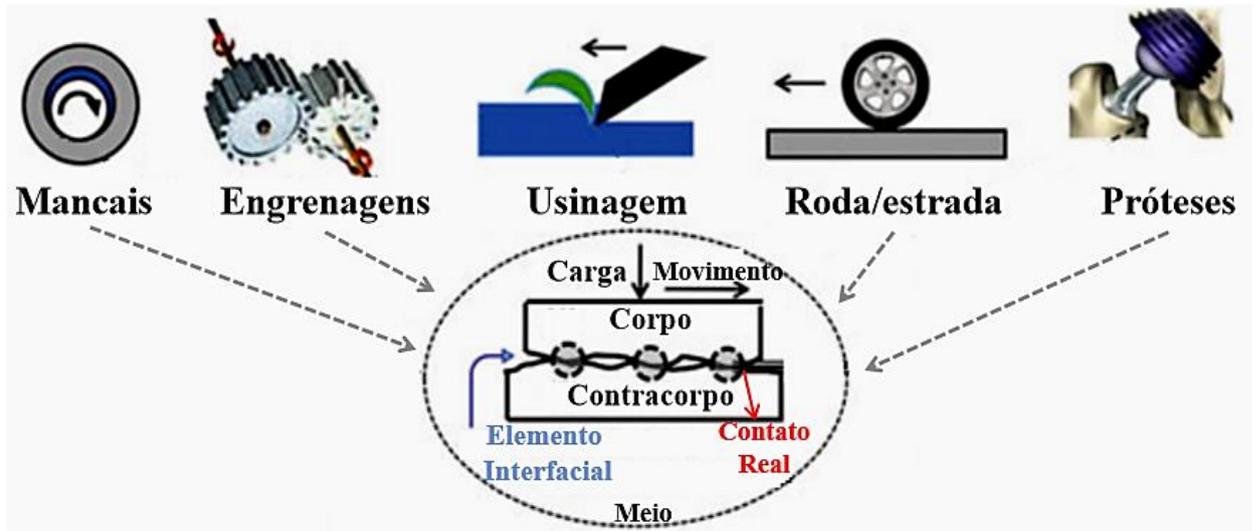


Figura 2.1 – Importância do contato em várias aplicações de Engenharia. (Adaptado de CZICHOS, 2020).

Por mais plano que aparente ser o contato, ele é constituído por irregularidades denominadas asperezas (Figura 2.2). Zum Gahr (1987) define a área de conta real como o somatório das áreas que efetivamente participam do contato, isto é, dos picos mais proeminentes que participam do toque dos corpos.

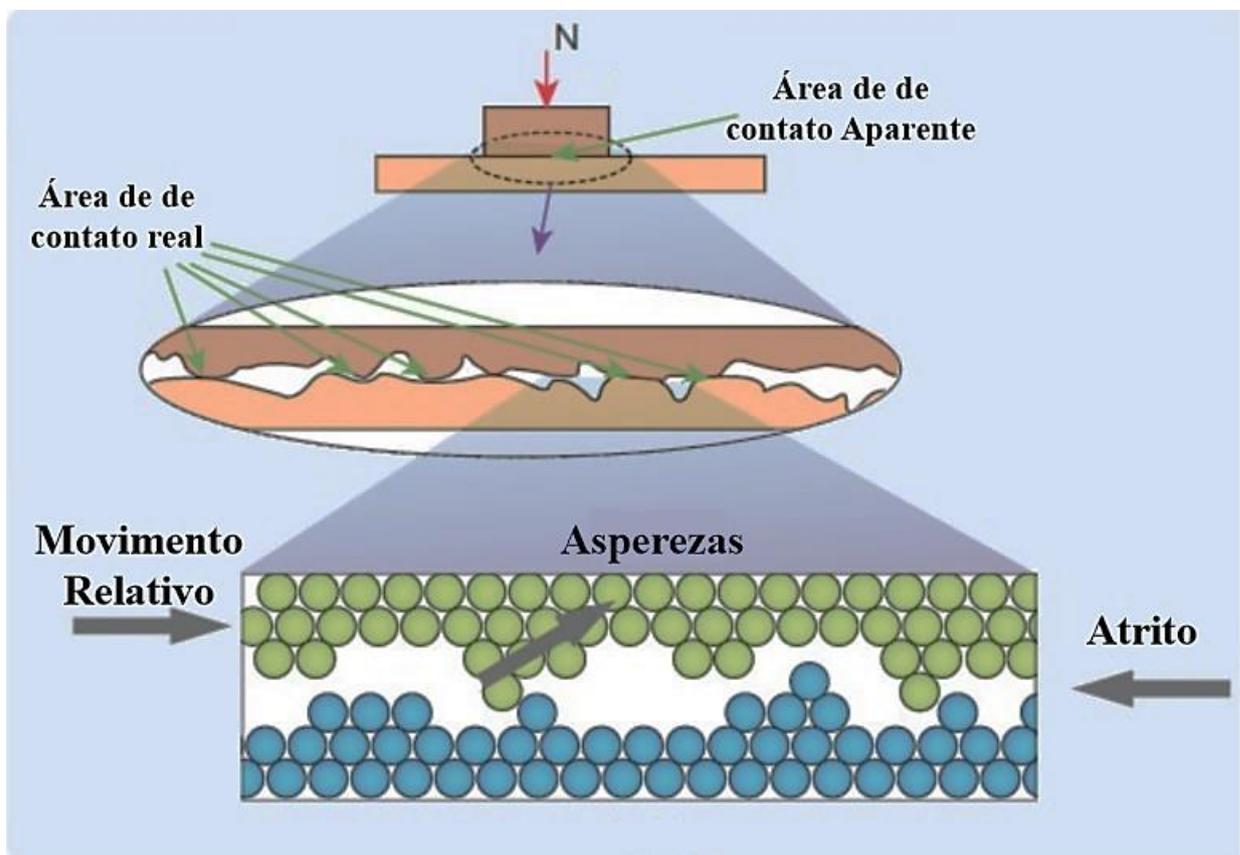


Figura 2.2 – Presença de asperezas no contato mecânico. (Adaptado de BRAINKART).

Os contatos tribológicos, podem ser divididos de dois modos: não conformes e conformes (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Os contatos conformes apresentam um grau elevado de conformidade geométrica entre as superfícies do contato, distribuindo de modo mais uniforme a tensão no contato. Os contatos não conformes possuem perfis de distribuição da tensão mais severos e seus mecanismos não são compreendidos em sua totalidade segundo Hamrock e Anderson (1983). Exemplos de ambos os contatos são ilustrados pela Figura 2.3.

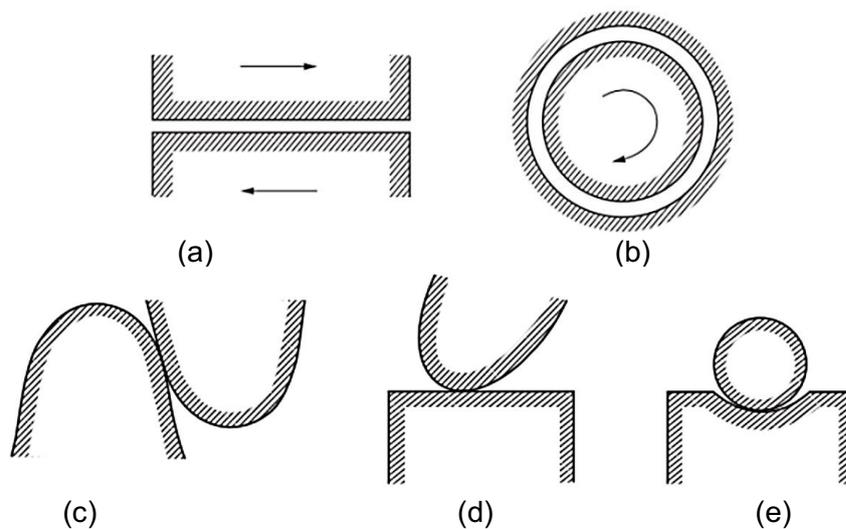


Figura 2.3 – Ilustrações de contatos conformes (a) e mancal de deslizamento radial (b), e não conformes como dentes de engrenagens (c), came e seguidor (d) e do contato de uma pista e esfera de um mancal de rolamento (e). (HUTCHINGS, 2017).

2.2 Atrito

Desde os primórdios da humanidade (Figura 2.4) tem se desenvolvido equipamentos para vencer o atrito e facilitar o transporte de pessoas e cargas. A revolução criada pela roda impulsionou um desenvolvimento na agricultura, transporte e indústria.



Figura 2.4 – Uso de elementos rolantes das primeiras civilizações Primeiras civilizações para: (a) Construção, (b) Agricultura e Transporte. (a – FORD (2017); b – DUNN (2011)).

Como este é um assunto fundamental para o avanço da civilização, o atrito é estudado desde muito cedo por Aristóteles no séc. III a.C. e depois aprofundado por Da Vinci (séc. XVI), Coulomb e Amontou (séc. XVIII) com as leis do atrito que se desenvolveram até o dia de hoje (BUDUNAS, 2016). Ainda em tempos contemporâneos seu estudo se faz fundamental para economia de energia e eficiência mecânica, visto que sistemas, como os automóveis, possuem dissipação de energia de quase 80% (Figura 2.5), ou seja, a cada 100 reais de combustível, somente um quinto são utilizados como energia útil.

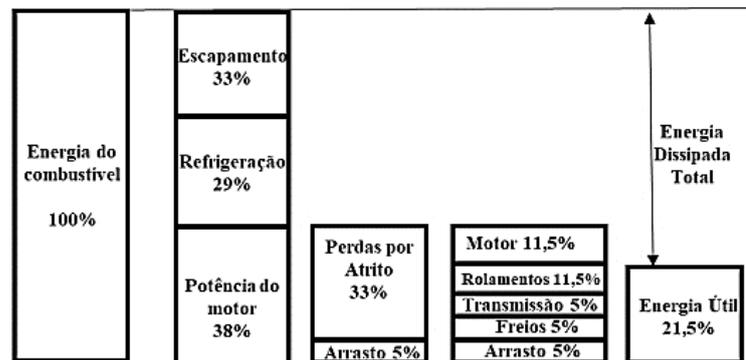


Figura 2.5 – Recursos energéticos não renováveis consumidos por atrito em automóvel (Adaptado de HOLMBERG, 2012).

A força de atrito é entendida como a resistência que um corpo encontra ao se mover em relação a outro e representa a dissipação de energia em situações que geralmente envolvem o contato entre corpos e substâncias (PROFITO, 2010).

Pode-se classificar o movimento associado ao atrito em duas classes: rolamento e deslizamento (Figura 2.6, HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). O presente trabalho é focado em mancais de deslizamento lubrificado. A lubrificação é interessante pois reduz a dissipação do atrito e minimiza o desgaste devido ao menor contato direto entre as superfícies.

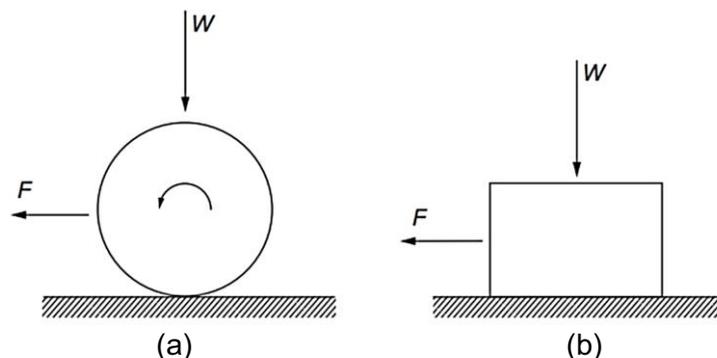


Figura 2.6 – Classes de movimentos relativos de superfícies: (a) rolamento e (b) deslizamento (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

2.3 Regimes de Lubrificação

Os lubrificantes atuam no contato mecânico com movimento relativo no sentido de diminuir a tensão cisalhante entre os corpos (PROFITO, 2010; STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013). Os lubrificantes têm sua atuação dependente de fatores como: 1- temperatura, cujo aumento reduz sua viscosidade, isto é, aumenta a tensão cisalhante entre as camadas de fluido e assim o atrito; 2- velocidade de deslizamento, que quando insuficiente, reduz a capacidade do fluido sustentar e preencher as asperezas; 3- condições de carga e geometria do contato, que podem facilitar ou não que o lubrificante permaneça em um vale ou que seja pressionado para fora da interface. Conforme variam esses parâmetros, têm-se os regimes de lubrificação do sistema mecânico.

Analisando a Figura 2.7, pode-se afirmar que segundo a geometria do contato existe a condição elasto-hidrodinâmica, para contatos não conformes, e hidrodinâmica, para o caso de geometria complementar das superfícies. Apesar de ambos acontecerem em maiores valores de número de Hersey Equação (2.1), onde se tem maiores valores de viscosidade (η) e/ou velocidade de deslizamento (U) em comparação a carga aplicada (P), somente para contatos conformes é que existe total separação das superfícies em contato pelo lubrificante.

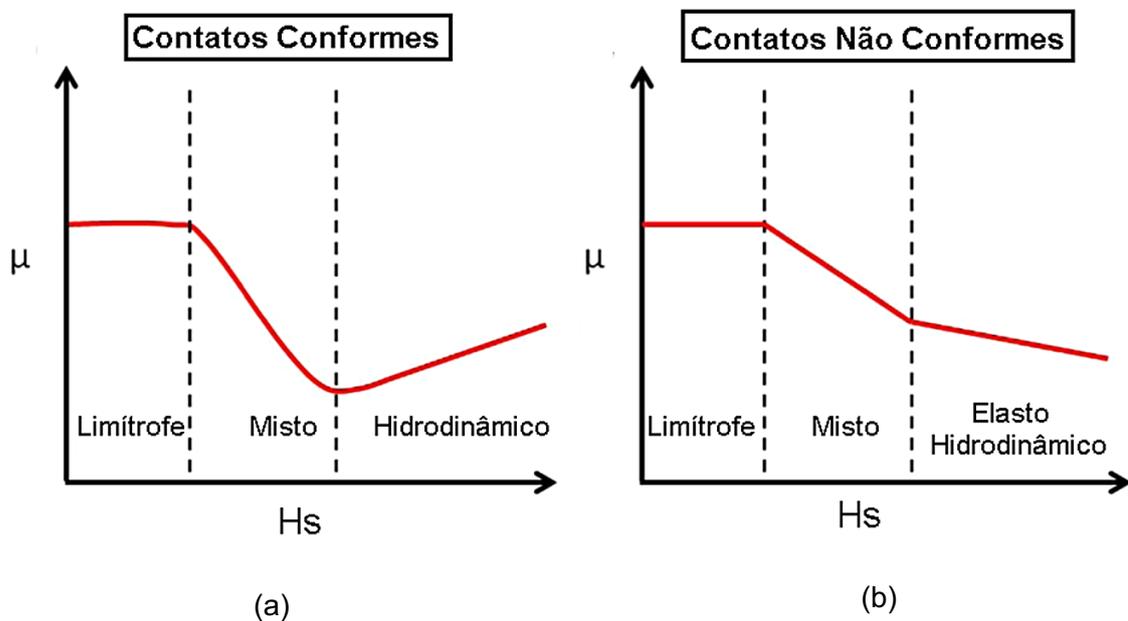


Figura 2.7 – Tipos de curvas de lubrificação para contatos conformes (a) e não conformes (b). (Adaptado de GACHOT, 2016).

$$H_s = \frac{\eta \cdot U}{P} \quad (2.1)$$

Além do número de Hersey (adimensional) equacionado acima, dado pela razão do produto da viscosidade dinâmica η (m/s²) pela velocidade de deslizamento U (m/s) dividido pela carga P (N), os regimes de lubrificação podem ser especificados Equação (2.2) conforme o parâmetro λ , que é a relação entre a espessura mínima de filme lubrificante (h_{\min}) e o desvio padrão das alturas das asperezas das duas superfícies ($\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$) em contato.

$$\lambda = \frac{h_{\min}}{\sigma} \quad (2.2)$$

Para esta dissertação foi possível estimar a espessura de filme mínima de lubrificante (h_{\min}) para contatos conformes de forma analítica (STOLARSKI, 1990), conforme a Equação (2.3). Para o caso não conforme, utilizado nos ensaios de RODRIGUES (2018), utiliza-se o modelo de Dowson-Higginson (STACHOWIAK; 2013) conforme equações (2.4), (2.5), (2.6) e (2.7).

$$h_{\min} = 4,9 \cdot \frac{\mu \cdot U \cdot R}{P} \quad (2.3)$$

$$h_{\min} = 2,5 \cdot \bar{U}^{0,7} \cdot \bar{G}^{0,54} \cdot \bar{W}^{-0,13} \cdot R \quad (2.4)$$

$$\bar{G} = \alpha \cdot R \quad (2.5)$$

$$\bar{U} = \frac{U \cdot \eta}{E \cdot R} \quad (2.6)$$

$$\bar{W} = \frac{P}{E^* \cdot R \cdot L} \quad (2.7)$$

Das equações acima tem-se que \bar{U} , \bar{G} e \bar{W} são parâmetros adimensionais do material, velocidade e carga respectivamente. E^* é o módulo de elasticidade reduzido entre os dois materiais em contato, R é o raio de contato (m), L é a largura do contato (m) e α o coeficiente de pressão-viscosidade (m² · N⁻¹).

O gráfico de lubrificação, conhecido como Curva de Stribeck, classifica os regimes da seguinte forma:

Regime Limítrofe ($\lambda < 1$): Nessa condição existem as maiores tensões de contato, seja pelas altas temperaturas ou baixas velocidades de deslizamento, as forças hidrodinâmicas não são suficientes para manter um filme de fluido lubrificante contínuo entre as superfícies, gerando os maiores valores de atrito e desgaste em comparação as outras condições de lubrificação.

Para essas condições severas de operações, aditivos são somados a composição dos óleos base formando grupos polares que se adsorvem na superfície, permitindo a formação de um filme nanométrico (Figura 2.8a) na interface evitando o contato metálico. Nesse caso a viscosidade do fluido não tem tanta relevância, fazendo o atrito e desgaste estar dependendo do filme monomolecular orgânico (Figuras 2.8b e 2.8c) modificadores como sulfetos, cloretos ou fosfatos (Figura 2.8d) na interface da superfície.

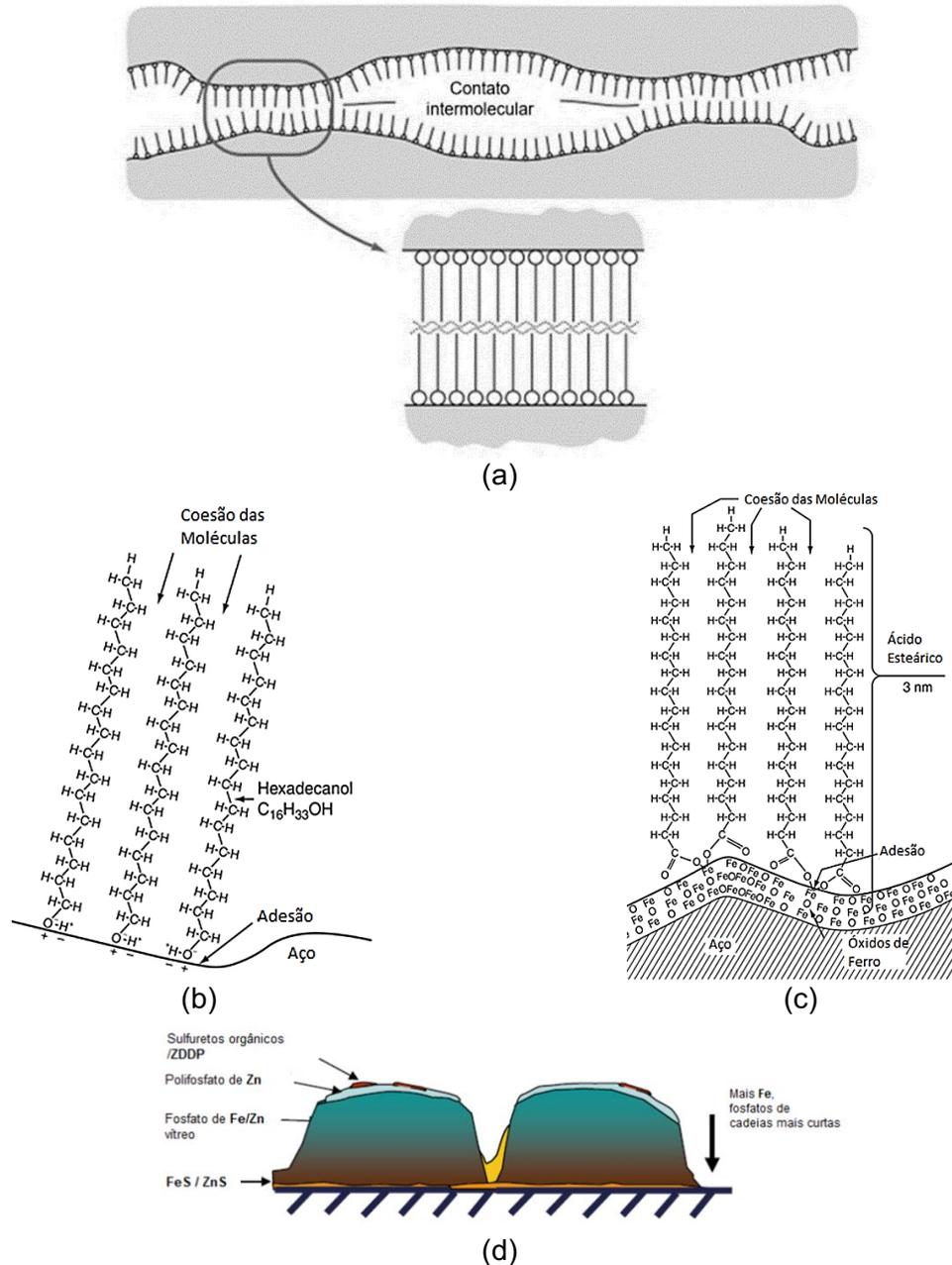


Figura 2.8 – Ilustração das cadeias carbônicas e grupos polares de aditivos adsorvidos da superfície, provendo uma (a) camada molecular hidrofóbica e exemplos como (b) Hexadecanol, (c) Ácido Esteárico e (d) Ditiolfosfato de zinco (a - SPIKES (2004); b - KU (1970); c - STACHOWIAK; d- BATCHELOR (2013)).

Regime Misto ($1 < \lambda < 3$): Neste regime, devido ao aumento da velocidade de deslizamento e/ou redução da carga ou maior refrigeração do contato suficiente para aumentar a viscosidade do lubrificante, tem início a separação da interface. Nesse sentido ocorre uma mistura de efeitos dinâmicos e fluido dinâmicos gerando coeficientes de atrito menores e espessuras maiores que o caso anterior (Figura 2.9);

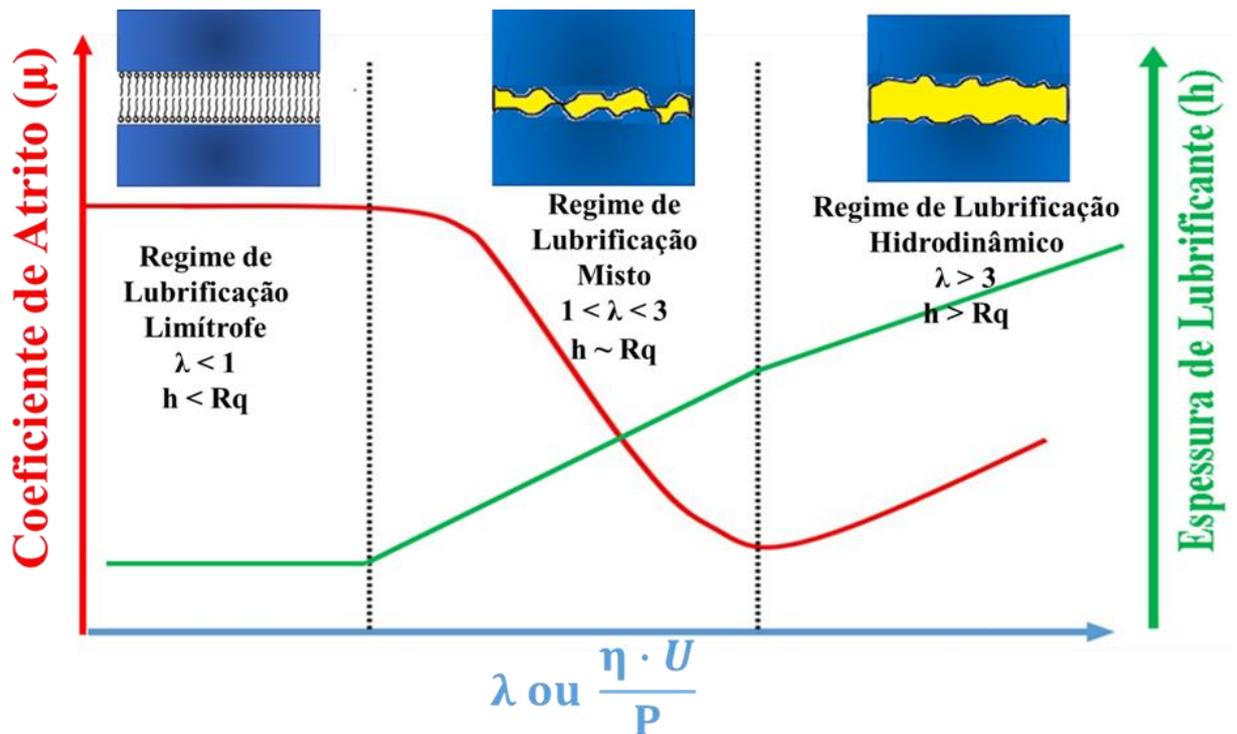


Figura 2.9 – Curva de Stribeck de contatos conformes lubrificados (Adaptado de WUGE, 2017).

Regime Hidrodinâmico ($\lambda > 3$): Condição pela qual a maior parte dos mancais são projetadas. O fluido se encontra plenamente desenvolvido e separa completamente o contato. Necessitando ter uma pequena inclinação para corpos planos e uma excentricidade suficiente para se ter um campo de pressão (Figura 2.10), este regime é regido pelas equações de Navier Stokes desenvolvidas por Reynolds (1886). Nele o carregamento é totalmente suportado pelo filme lubrificante, com a ausência do contato entre asperezas, de forma que se tem os menores valores de atrito e desgaste que os outros dois regimes. Contudo, conforme a Figura 2.9 permite ilustrar, aumentos expressivos de velocidade tendem a tornar a película fluida espessa o suficiente a gerar um aumento de atrito pelo maior número de camadas a serem cisalhadas até que ocorra deslizamento entre as superfícies, esta condição é conhecida como atrito viscoso (HAMROCK, 2004; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

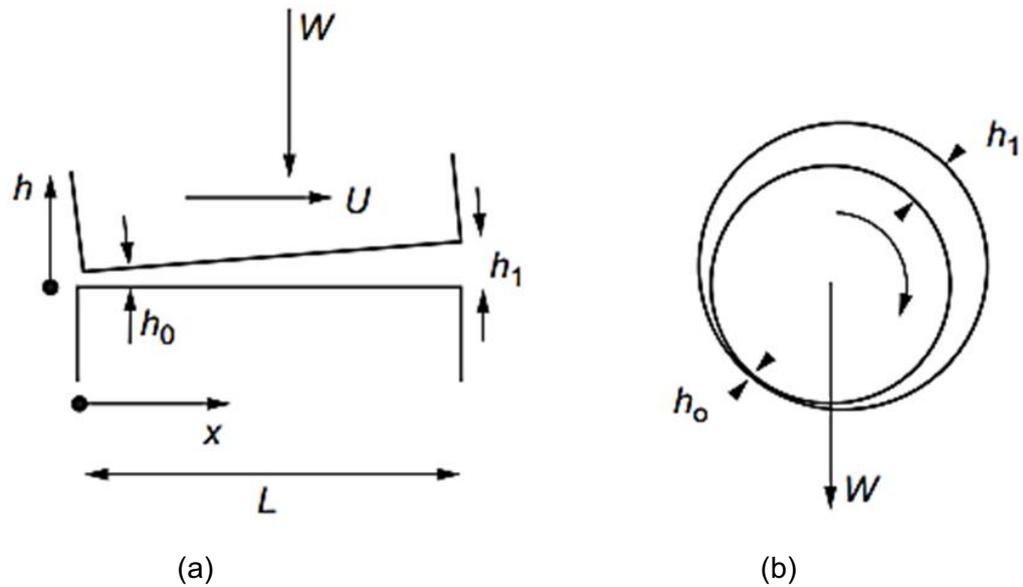


Figura 2.10 – Mancais com geometria plana e do tipo deslizamento e a sua pequena excentricidade requerida para presença de lubrificação hidrodinâmica (Adaptado de HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017a).

Para os contatos não conformes os valores de λ são diferentes dos citados, sendo menor que 0,01 para o regime limítrofe, até 0,05 para o misto e maiores que 0,06 para o elasto-hidrodinâmico (ZHU e WANG 2012). Vale ressaltar que neste último as tensões de contato podem chegar na ordem de GPa (BHUSHAN, 2000). Neste caso o lubrificante começa a ter comportamento não newtoniano fazendo com que o lubrificante altere sua viscosidade no sentido de redução, reduzindo a tensão cisalhante e assim o atrito do contato. Essa alteração no campo de tensão pode ser ilustrada pela Figura 2.11.

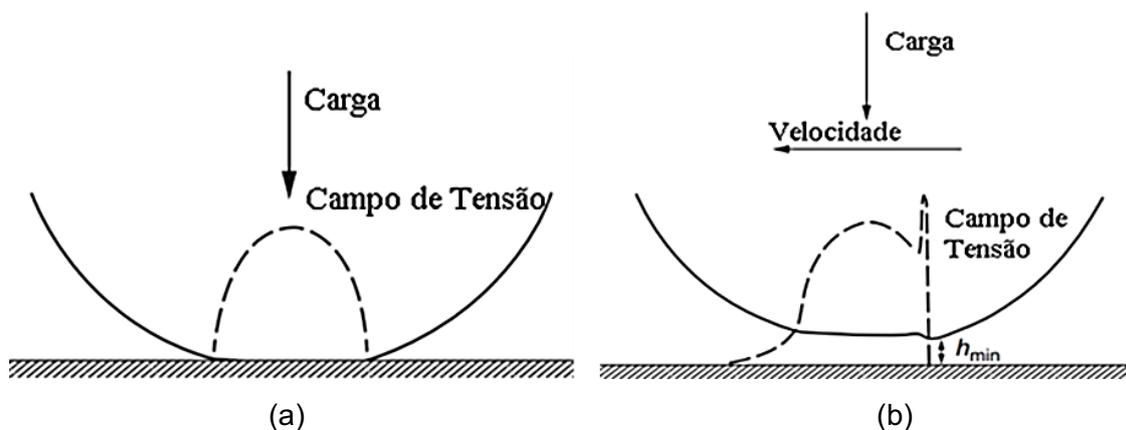


Figura 2.11 – Sustentação gerada pelo comportamento de piezo viscosidade dos lubrificantes em condições de extrema tensão em regime elasto-hidrodinâmico (Adaptado de HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

2.4 Mancais

Os mancais são elementos que possuem funções dinâmicas, como transmissão de potência (SHIGLEY, 2010); estruturais, servindo de suporte (tanto para cargas radiais, axiais ou combinadas) de elementos girantes de máquinas mantendo também seu alinhamento (De MATOS, 1998); tribológicas, podendo juntamente com lubrificantes, minimizar o atrito e desgaste, aumentando assim, o rendimento do sistema mecânico, entre partes que se movem entre si. São classificados, geralmente, pela sua construção mecânica, em duas categorias: mancais de deslizamento e mancais de rolamento conforme ilustrado pela Figura 2.12.

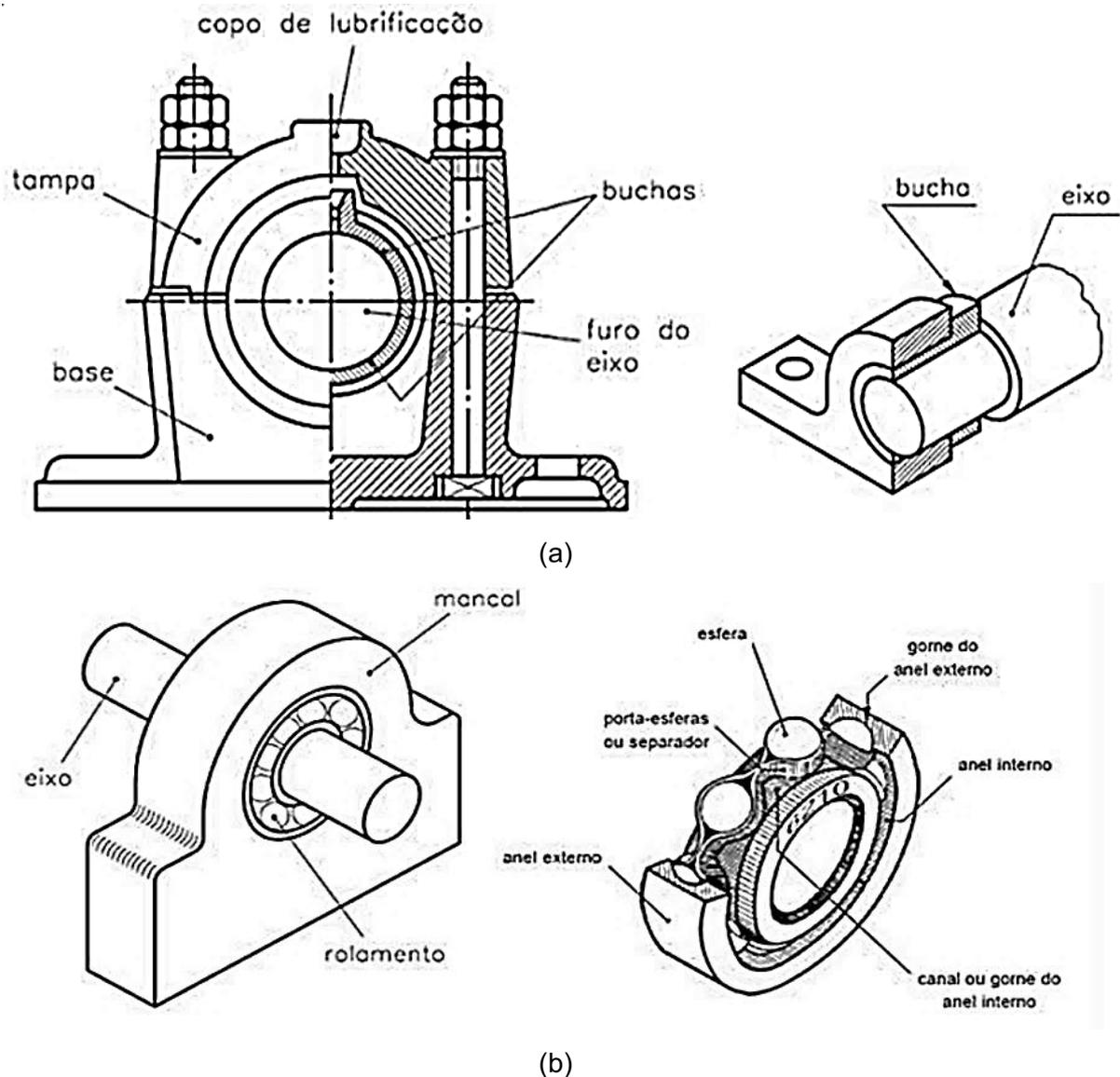


Figura 2.12 – Constituintes Básicos de Mancais: de Deslizamento (a) e de Rolamento (b) (TELECURSO 2000, 1997).

Segundo a solicitação, os mancais podem ser divididos entre radiais, axiais e mistos. Os primeiros impedem o deslocamento no sentido transversal (direção do raio) ao eixo e resistem a cargas no mesmo sentido. Os mancais axiais são resistentes a esforços na direção do eixo. E mistos suportam ambas as cargas. A síntese dessa classificação pode ser vista na Figura 2.13.

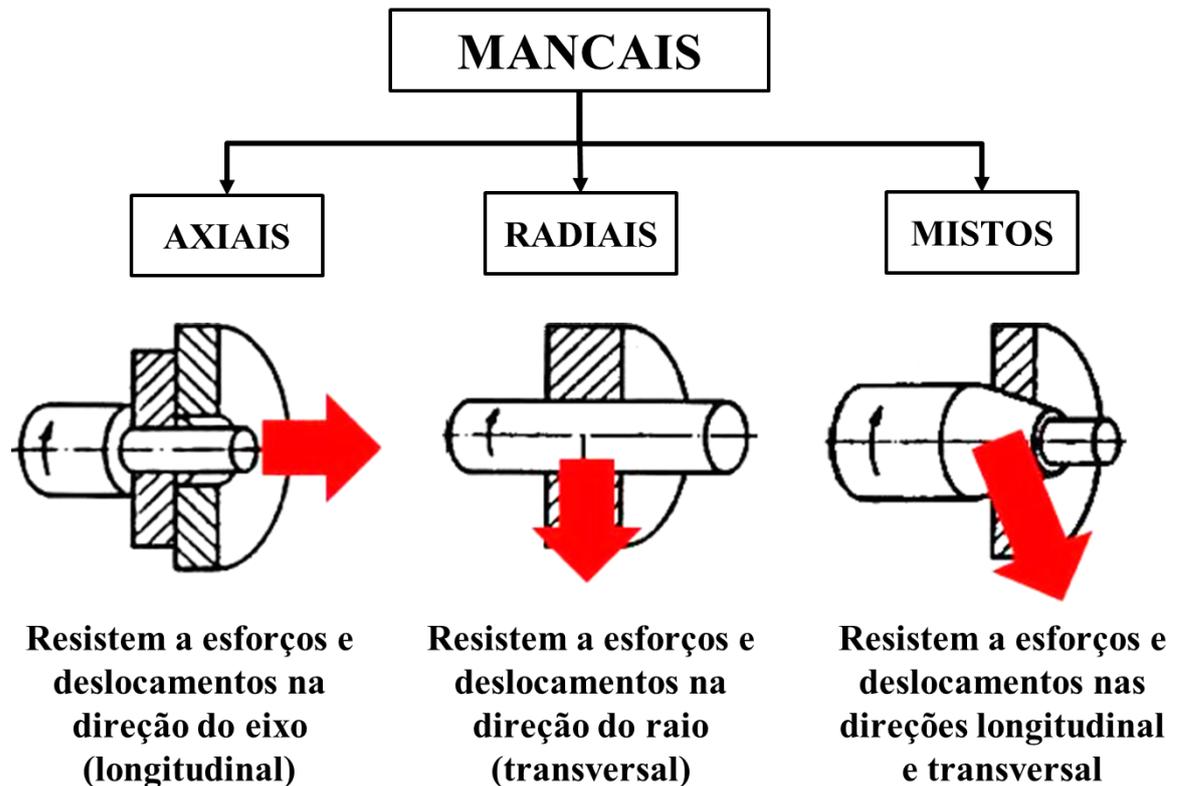


Figura 2.13 – Classificação dos mancais conforme a direção da carga solicitante (Adaptado de KÜHL, 2017).

Como são elementos com funções críticas, sua construção/montagem/manutenção deve garantir alta confiabilidade e segurança. Para isso se faz necessário a escolha adequada de materiais que permitam suportar (sobre) cargas, temperaturas e diversas condições de operação. Nesse sentido, novos estudos de engenharia de materiais e superfície são desenvolvidos possibilitando a obtenção de estruturas mais eficientes.

Dentro de uma usina hidrelétrica, os mancais desempenham funções críticas suportando toda a casa de força com seus geradores e turbinas. Conjunto semelhante ao existente em campo, pode ser visualizado na Figura 2.14.

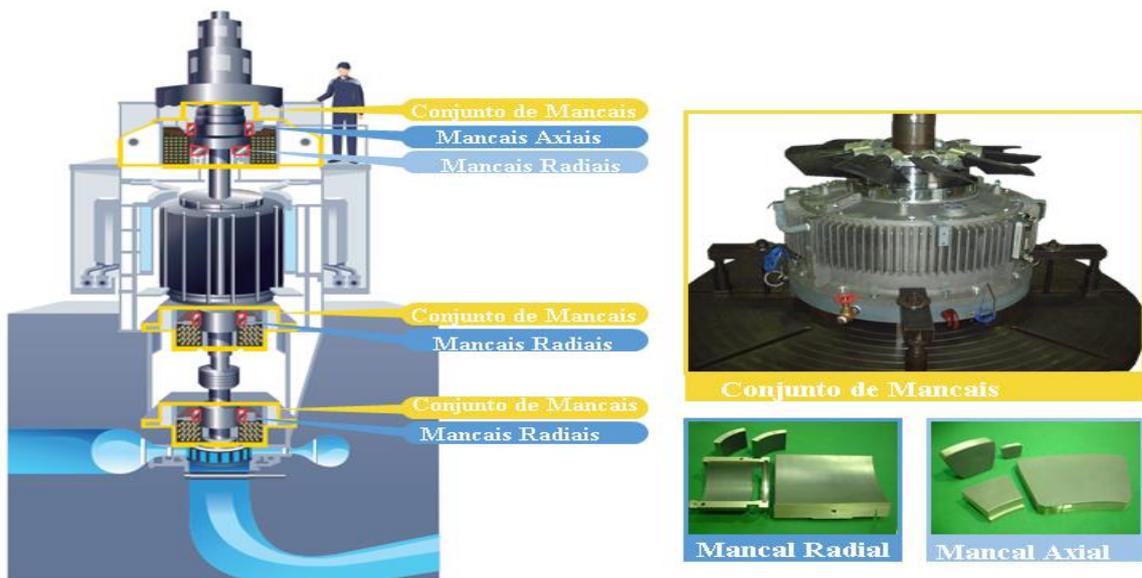
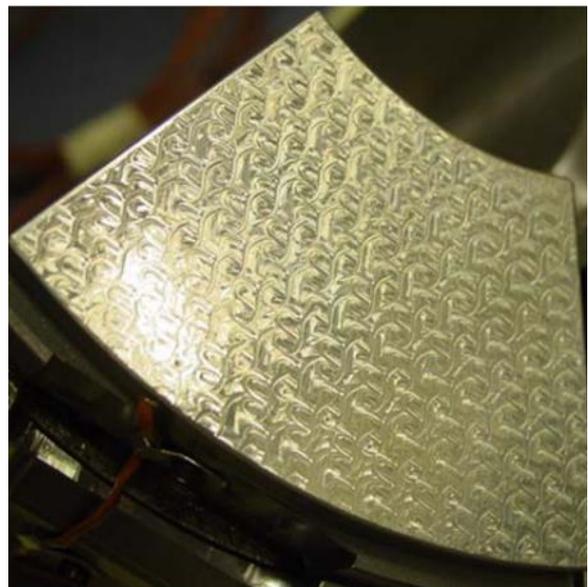
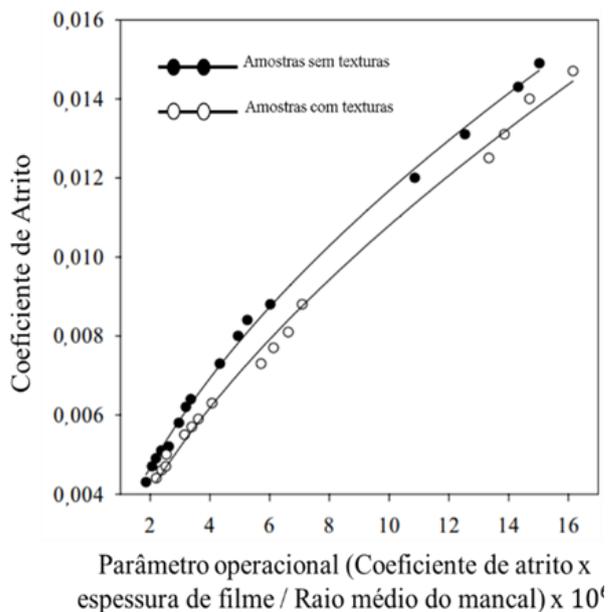


Figura 2.14 – Conjunto de mancais acoplados ao sistema de geração de energia de uma Usina Elétrica (Adaptado de DAIDOMETAL,2022).

Estudos como os de MCCARTHY (2005) e GLAVATSKIY (2008), provaram que o uso de texturas em mancais, aplicados em usinas, conseguiram reduzir, respectivamente, o coeficiente de atrito em 10% (Figura 2.15) e aumentar o tempo de manutenção em 50 horas, gerando superfícies mais bem lubrificadas e, com maior resistência ao desgaste abrasivo.



(a)

(b)

Figura 2.15 – Gráfico do coeficiente de atrito com mancais axiais de segmento basculante (a) e imagem de uma das amostras de ensaio (b) (Adaptado de MCCARTHY, 2005).

Este trabalho se propôs a estudar um modelo de mancal texturizado visando aplicações em usinas hidrelétricas semelhante ao proposto por Rodrigues (2017), mas considerando corpos côncavos, como os existentes em campo. Para melhor compreender sobre a texturização superficial, o próximo tópico discorre sobre.

2.4.1 Texturização Superficial

A texturização superficial é definida como a modificação proposital, de forma controlada, da topografia de uma superfície, onde são gerados um arranjo de padrões geométricos, constituídos por protuberâncias ou pequenas depressões com geometria controlada, dando origem a um relevo ordenado (COSTA, HUTCHINGS; 2015). Suas aplicações se dão nas áreas da física, biologia com funcionalidades diversas como otimização de propriedades mecânicas, ópticas e tribológicas, conforme ilustrado pela Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Classificação das propriedades de superfícies texturizadas (BRUZZONE; COSTA; LONARDO; LUCCA, 2008; DE CHIFFRE; KUNZMANN; PEGGS; LUCCA, 2003; EVANS; BRYAN, 1999).

Propriedades	Funcionalidade	Fenômeno	Aplicação
Físicas	<ul style="list-style-type: none"> • Térmicas; • Ópticas; • Energia Superficial 	Adesão, capilaridade, molhabilidade, refletividade;	Lentes de Fresnel, sinais de trânsito reflexivos, óptica difrativa, aletas de trocadores de calor.
Biológicas	<ul style="list-style-type: none"> • Adsorção; 	Compatibilidade, osseointegração,	Implantes.
Tecnológicas	<ul style="list-style-type: none"> • Mecânica; • Tribológica 	-Fadiga, dureza; -Desgaste, atrito	Macrot textura dos pneus, bolas de golfe, ferramentas, abrasivos.

Os estudos de KOVALCHENKO (2010) corroboram com a ideia de que, além de reduzir a dissipação de energia no regime limítrofe, as texturas permitiram uma mudança para o regime de lubrificação misto com parâmetros de velocidade inferiores e cargas maiores atingindo valores de atrito duas vezes menor, para condições semelhantes a amostras sem alteração topográfica (Figura 2.16).

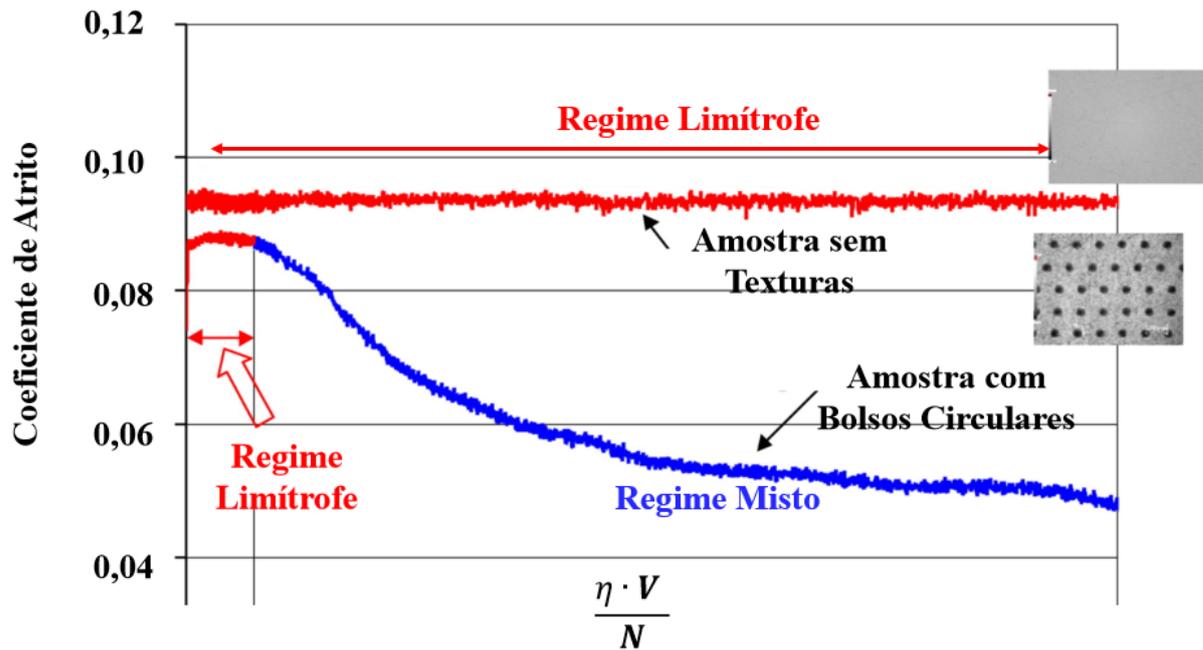


Figura 2.16 – Coeficiente de Atrito de amostras com e sem texturas e seus respectivos regimes de lubrificação (Adaptado de KOVALCHENKO, 2010).

Também Vlasdescu (2016) conseguiu configurações superficiais que atingiram valores três vezes menores de desgaste e 70% inferiores no coeficiente de atrito ao se comparar resultados de amostras sem texturas (Figura 2.17).

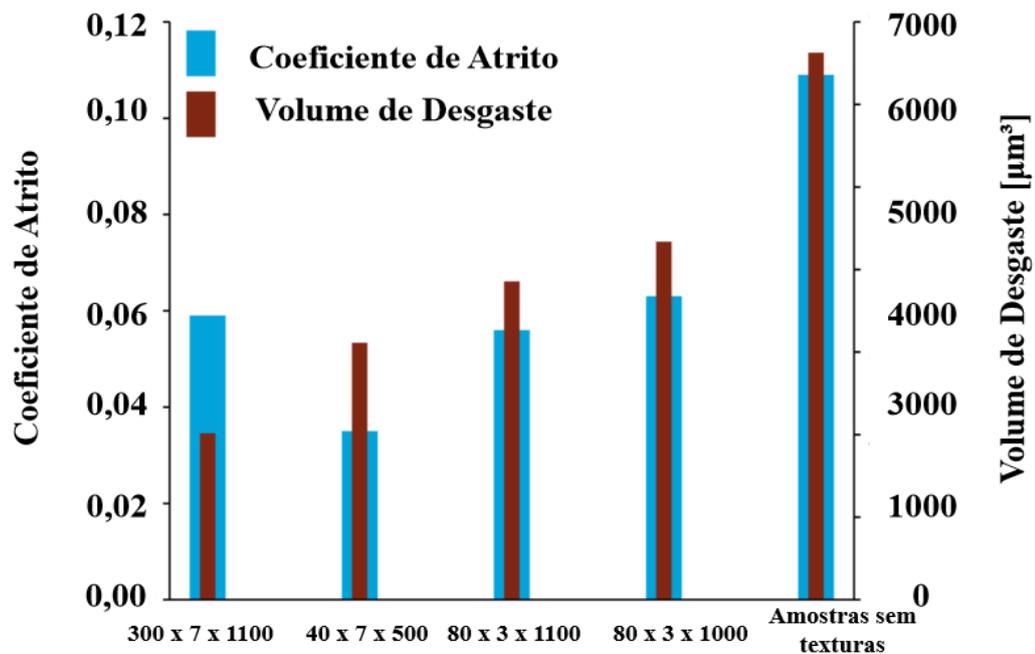
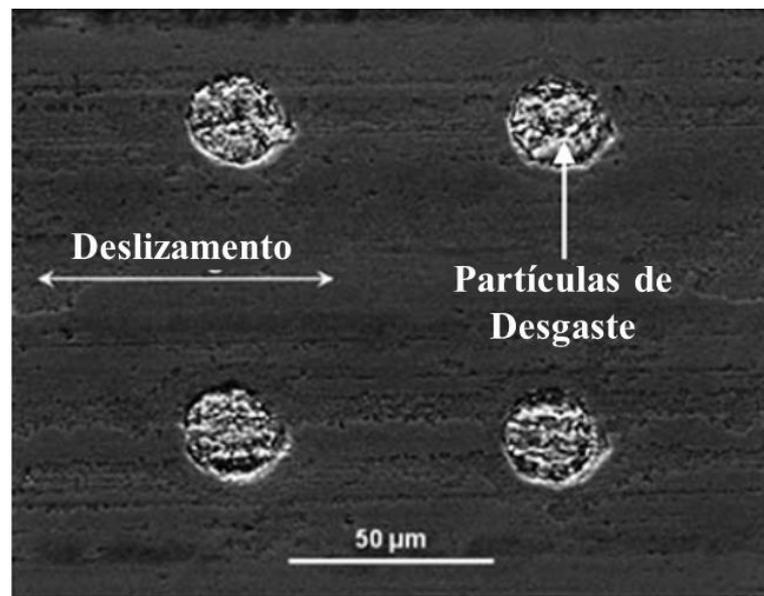
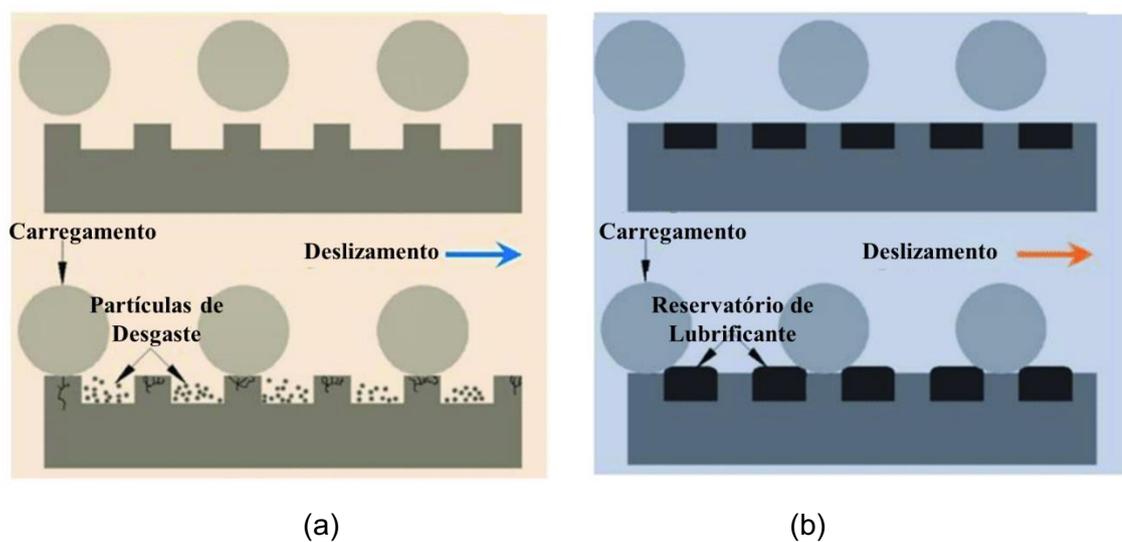


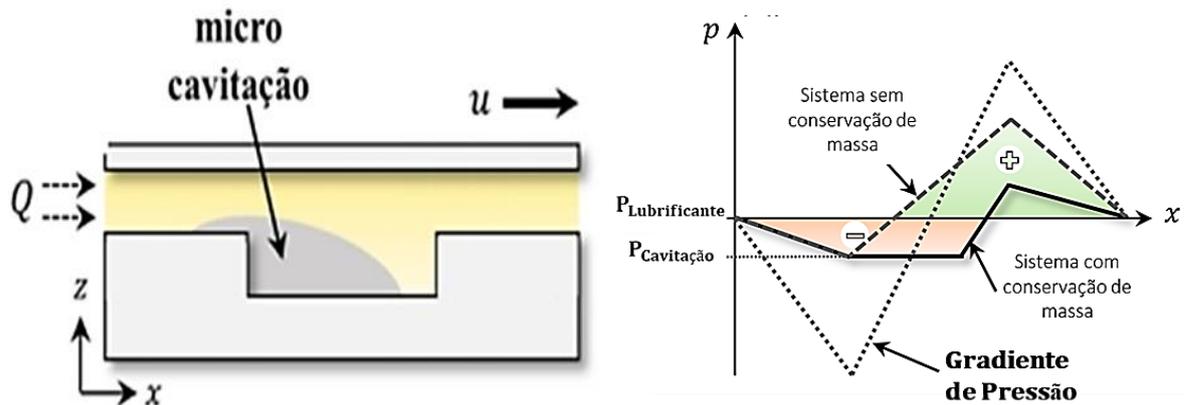
Figura 2.17 – Desempenho tribológico de amostras texturizadas (quatro geometrias diferentes) e sem texturas superficiais (Adaptado de VLASDESCU, 2016).

Também estudado na literatura (RONEN, 2002; UEHARA, 2004; FOWELL, 2007; LU, 2007; PROFITO, 2010; SAEIDI, 2016), o melhor desempenho tribológico de superfícies texturizadas pode se justificar devido a quatro mecanismos principais: reservatório de lubrificante (Figura 2.18b); retenção de partículas abrasivas (Figura 2.18a e Figura 2.18c); mecanismo de micro mancais hidrodinâmicos causado pelo gradiente de pressão da microcavitação (Figura 2.19a); e devido ao efeito de sucção na entrada (Figura 2.19b). Estes mecanismos já são conhecidos e foram descritos em trabalhos anteriores como Profito (2010) e Rodrigues (2018).

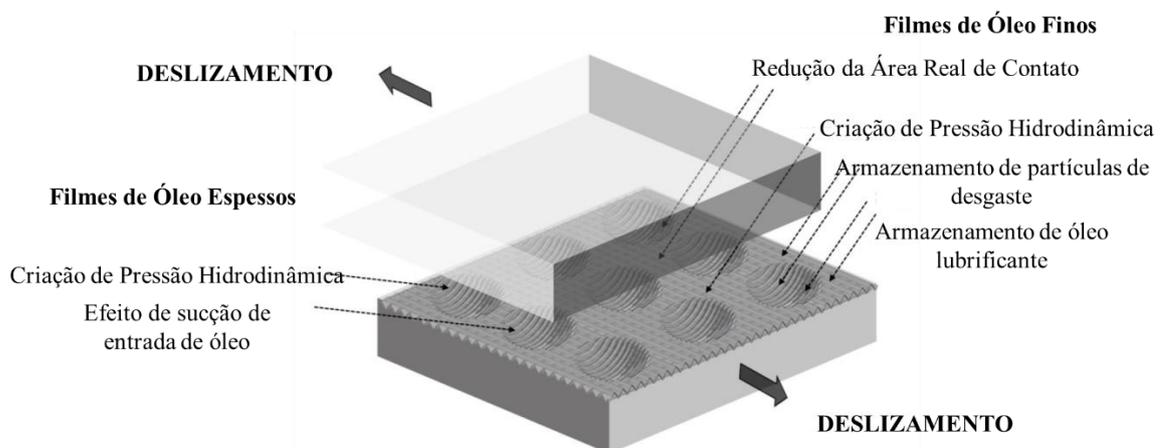


(c)

Figura 2.18 – Aprisionamento de partículas de desgaste (a) e lubrificante (b) de uma textura; imagem de Microscópio Eletrônico de Varredura de partículas de desgaste em texturas (c) (a e b - LIN, 2018; c - ZHAO, 2016).



(a)



(b)

Figura 2.19 – (a) Representação de uma bolha de Micro Cavitação em uma textura e sua alteração no gradiente de pressão, representado através de um gráfico; (b) mecanismos possíveis causados por texturas superficiais (a - GROPPER, 2016; b - GRÜTZMACHER, 2017).

As texturas permitem otimização no desempenho de mancais de usinas hidrelétricas, em termos dinâmicos e térmicos. Segundo Khonsari (2007) e Profito (2010), a assimetria no campo de pressão, acentuada pelas microcavitações no interior de bolsos (Figura 2.19a), possibilita a ocorrência de pressões hidrodinâmicas maiores resultando em filmes mais espessos de óleo e coeficientes de atrito menores.

Estudos realizados por Henry (2015), atestam que amostras padronizadas com sulcos e bolsos, tendem a alterar o campo de pressão, reduzir a componente de atrito e, em alguns casos, reduzir o tempo de estabilização do filme completo de óleo no regime hidrodinâmico de lubrificação em mancais axiais (Figura 2.20).

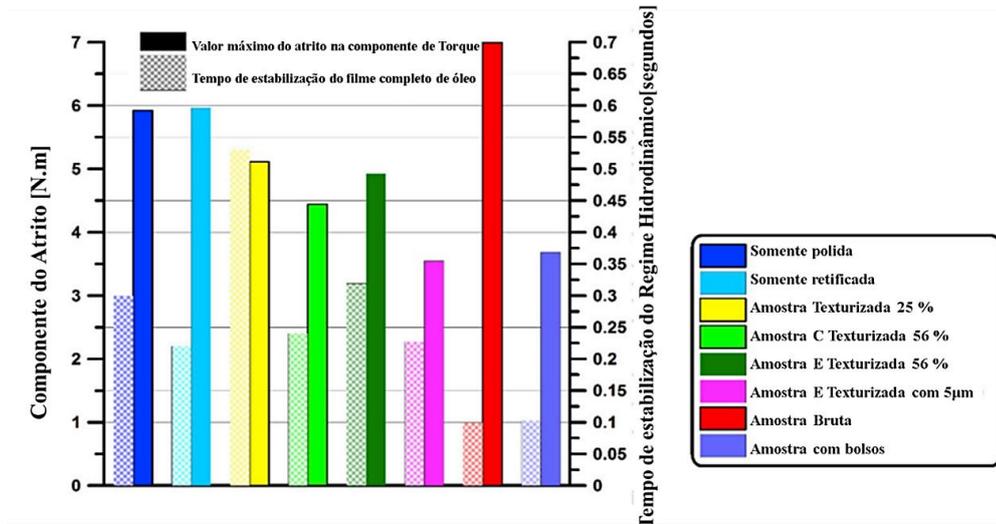


Figura 2.20 – Gráfico do atrito e tempo da estabilização do filme lubrificante de amostras de mancais axiais (HENRY, 2015).

Segundo os estudos de Costa e Hutchings (2008), para a criação de texturas, são quatro os principais métodos: Remoção, Adição, Movimentação de material e Autogeração por desgaste. Conforme a nomenclatura indica, os dois primeiros envolvem a adição de material (por ação física ou química) ou remoção de parte da superfície (por métodos químicos, mecânicos ou químicos). Para o terceiro, a modificação superficial ocorre através da deformação plástica e redistribuição do material da superfície. Por fim, na autogeração, texturas são formadas devido ao desgaste de regiões com menor resistência mecânica. Uma síntese dos métodos pode ser vista na Figura 2.21.

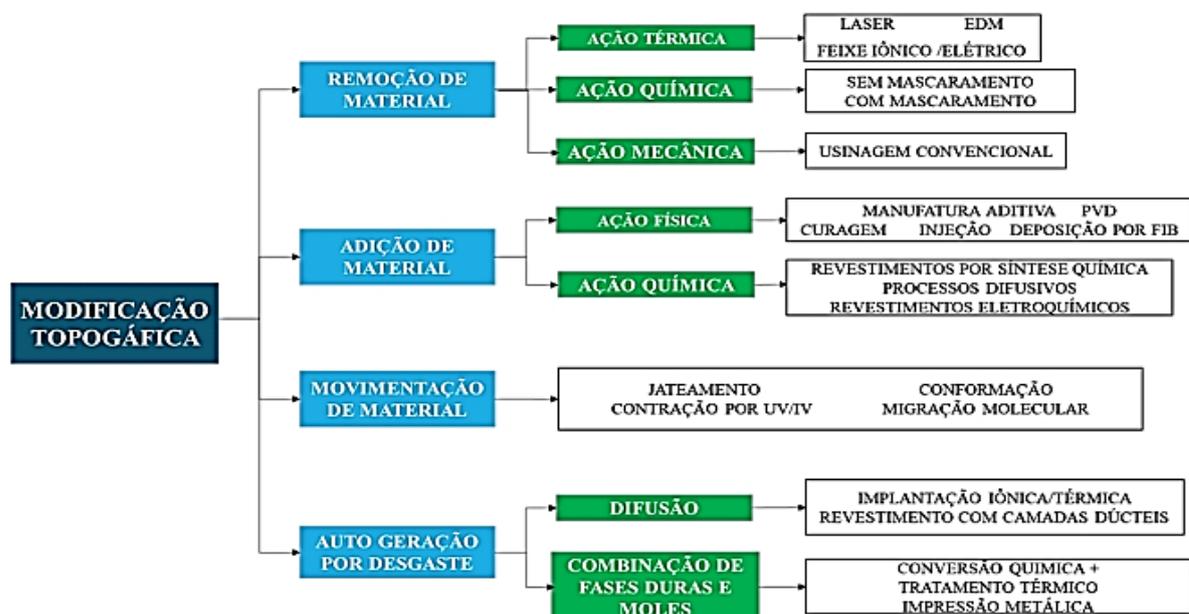


Figura 2.21 – Metodologias de Texturização Superficial (COSTA, 2014).

Os principais métodos encontrados na literatura são: texturização por laser (GACHOT, 2022), fotoquímico (ZHANG e MENG 2012) e por usinagem por brunimento (SHREEHAH, 2020). Uma das formas mais econômicas de se produzir texturas padronizadas, segundo Costa e Hutchings (2008), é pelo processo de usinagem eletroquímica. Nesse processo o metal é removido da peça através de uma dissolução controlada em um sistema de eletrólise. A ferramenta e a peça são, respectivamente, cátodo e ânodo, os quais são separados por uma solução eletrolítica. A Figura 2.22 exemplifica a usinagem eletroquímica de um corpo de prova de aço.

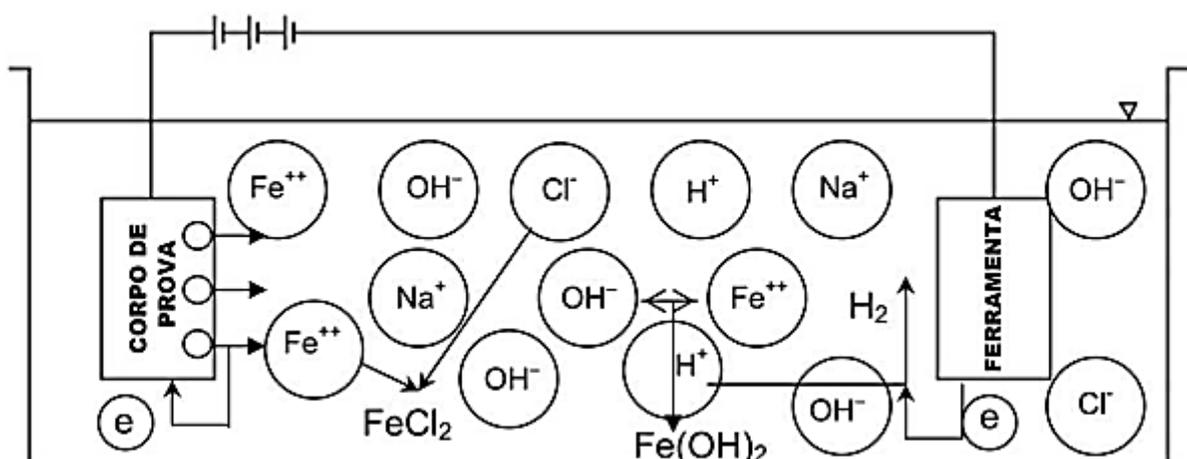


Figura 2.22 – Representação esquemática da usinagem eletroquímica do Ferro (Adaptado de NPTEL, 2008).

Neste caso, a amostra de ferro puro (Fe), quando se encontra em uma solução salina, neste caso, de cloreto de sódio (NaCl), e submetida a um diferencial de potencial (DDP), acontecerá a dissolução da água (H_2O) e do sal. Por conta da DDP entre a amostra (ânodo) e a ferramenta (cátodo), os íons positivos (cátions) se deslocarão na direção da ferramenta, enquanto os negativos (ânions) para a amostra. Conforme ânions H^+ transportam elétrons em direção ao cátodo, tem-se a geração de gás hidrogênio (H_2), no ânodo, porém, ocorre a dissolução dos átomos de ferro em Fe^{++} . Esta se dá devido à desestabilização das ligações metálicas gerada pela perda de elétrons. Por fim, os cátions de sódio (Na^+) se ligam com a hidroxila (OH^-), resultando em hidróxido de sódio (NaOH) e os cátions de Fe^{++} se combinam tanto com os íons de cloro (Cl^-) quanto com OH^- , formando $FeCl_2$ e $(Fe(OH)_2)$, que são, respectivamente, cloreto de ferro e hidróxido de ferro, que podem se precipitar.

A taxa de remoção de material no ânodo pode ser prevista pela primeira lei de Faraday Equação (2.8) desde que as seguintes condições sejam atendidas: valência dos íons produzidos conhecida; dissolução iônica deve ser a única reação no ânodo; e o metal deve

ser removido apenas por dissolução e não por desintegração da ferramenta. A equação abaixo mostra os parâmetros para calcular a taxa de remoção de material onde I é a corrente elétrica (A), t é o tempo de exposição do(s) eletrólito(s), F é a constante de Faraday de 96500 C·mol⁻¹, M a massa molar dos elementos químicos da amostra (g·mol⁻¹), e z o número de elétrons de valência da reação de eletrólise.

$$m = \left(\frac{I \cdot t}{F}\right) \cdot \left(\frac{M}{z}\right) \quad (2.8)$$

Importante destacar algumas vantagens desta técnica, tais como: ausência de tensão residual resultante de deformação mecânica na peça usinada, ausência de formação de cavaco, vida útil da ferramenta relativamente longa e superfícies resultantes com bom acabamento (RODRIGUES, 2018).

Com base na metodologia de usinagem citada acima, COSTA E HUTCHINGS (2008), desenvolveram, conforme ilustrado pela Figura 2.23, uma técnica de Texturização Eletroquímica sem Mascaramento (em inglês *Maskless Electrochemical Texturing* - MECT). Seu diferencial está em ser mais rápido e simples, pois no método com mascaramento (ou em inglês *Through-mask Electrochemical Micromachining* - TMEMM) é necessário confeccionar máscaras para cada amostra, tornando o processo menos viável. Sua aplicação mostrou potencial através dos estudos dos próprios autores e em estudos posteriores como Parreira (2011), Da Silva (2016), Rodrigues (2018), Ferri (2019) e Dias (2021).

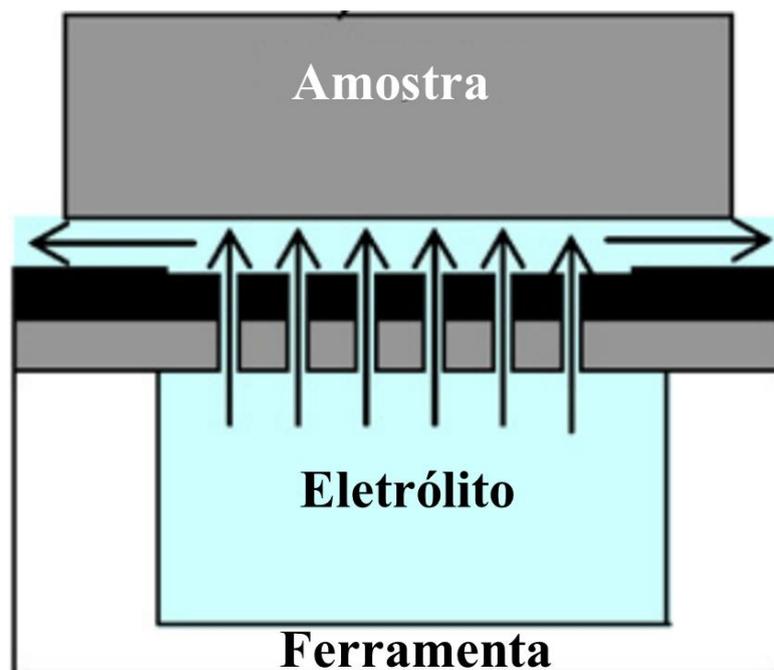


Figura 2.23 – Aparato experimental utilizado na técnica MECT (Adaptado de COSTA, 2009).

Para um desempenho ótimo em termos de redução de atrito e desgaste, é preciso a escolha de parâmetros adequados de padrões de textura. Estes podem variar conforme o método de fabricação, densidade (razão da área ou volume de texturas em relação a superfície não modificada superficialmente), formato (Bolsos circulares, círculo, elipse, chevron), tamanho, texturização total ou parcial além de se utilizar vários padrões (Texturas compostas). Os estudos destes três últimos casos têm mostrado resultados relevantes, em especial nas pesquisas COSTA (2007), ZHANG (2017) e UDDIN (2016) para geometria; PROFITO (2010) e RODRIGUES (2018) para amostras parcialmente texturizadas, e ZOU (2021) e SEGU (2015) para texturas compostas e podem ser visualizados na Figura 2.24.

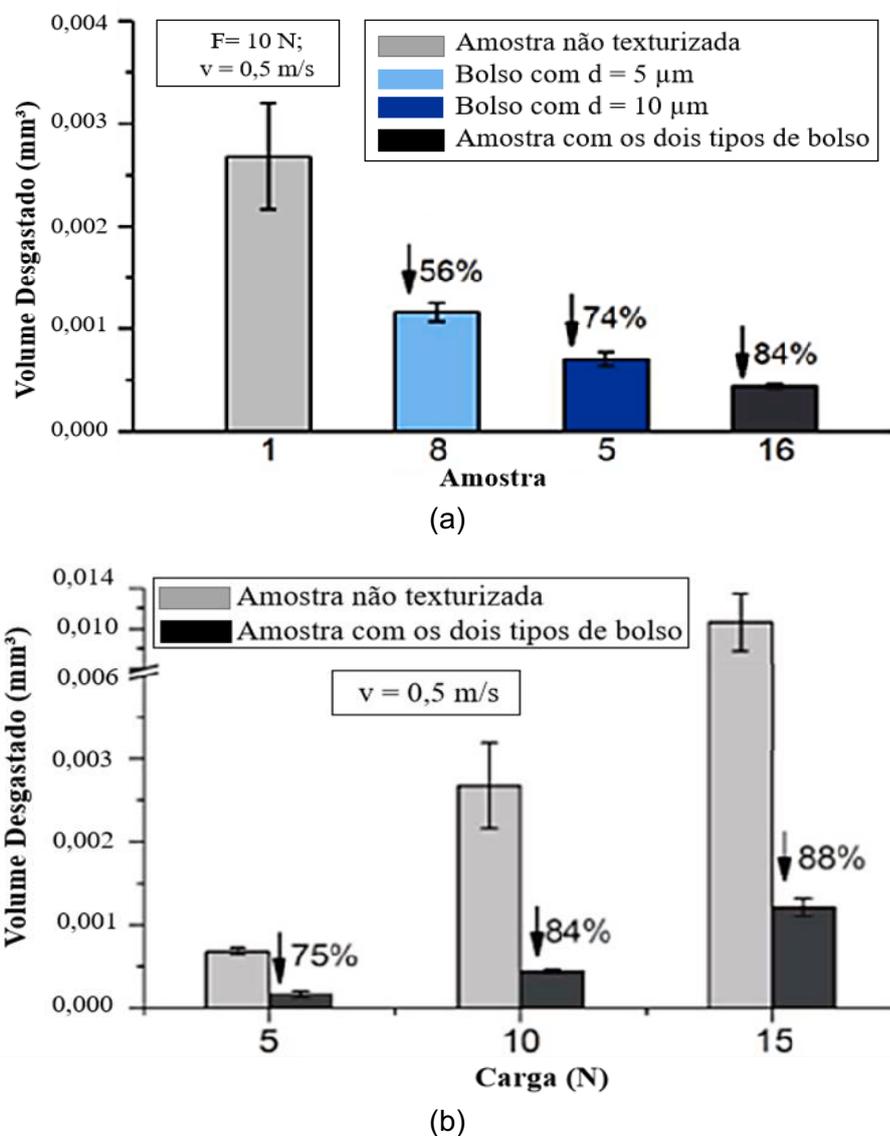


Figura 2.24 – Desgaste de amostras Texturizadas para uma mesma carga (a) e para três cargas distintas (b) (Adaptado de ZOU, 2021).

O trabalho da Figura 2.25 utilizou ensaios de desgaste por deslizamento com amostras sem texturas, com texturas simples (apenas um diâmetro) e composta se utilizando de força constante, velocidade constante e variando ambas. Os autores concluíram que as texturas simples conseguiram desgastes 72% menores ao utilizar-se bolsos circulares com diâmetro de 10 μm . Mas, ao analisarem amostras com geometria composta, esta redução chegou a 88% em relação a amostras não texturizadas.

Os potenciais de se utilizar texturas compostas, isto é, com formatos e/ou tamanhos diferentes podem ser incorporados ao estudo, de modo a permitir uma maior quantidade de informações e, deste modo, fornecer mais respostas sobre os benefícios e dificuldades que o processo de modificação superficial descrito, venha a oferecer pela pesquisa e indústria. Pesquisas como as feitas por Segu e Hwang (2015) mostram que aplicações de texturas compostas podem permitir aos sistemas mecânicos, alcançarem coeficientes de atrito são da ordem 10^{-3} . Parte dos resultados deste são encontrados na Figura 2.25.

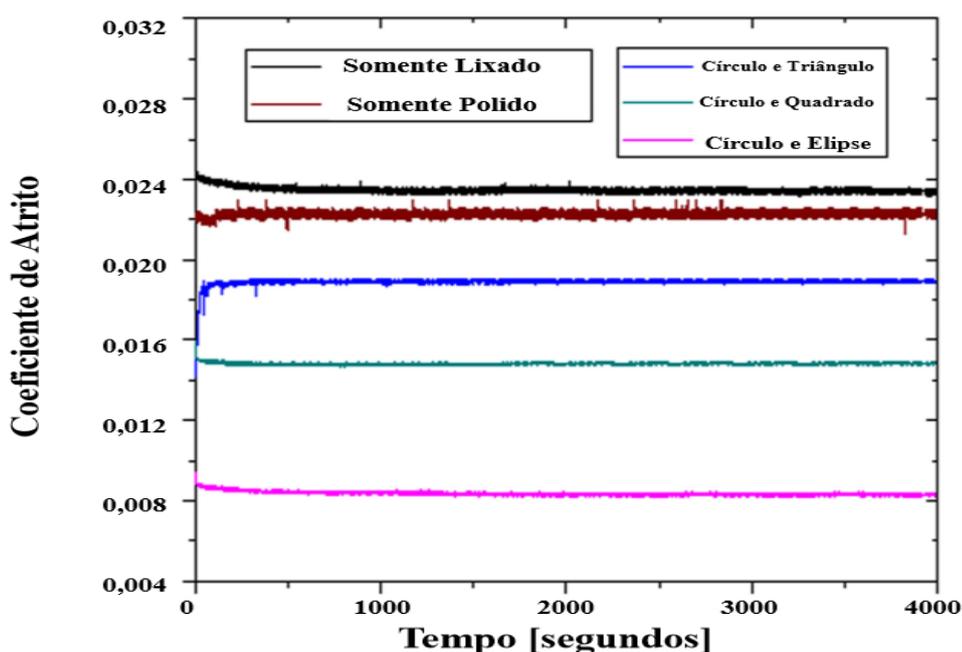


Figura 2.25 – Coeficientes de atrito de amostras sem texturização (apenas lixada e polida) e com texturização composta total (Adaptado de SEGU, 2015).

Além da escolha adequada das texturas, para otimização tribológica de mancais, deve-se considerar, segundo Ronen(2001), a razão entre os valores de profundidade e largura das texturas (RPL). Conforme os estudos, para valores de Λ_1 da ordem de 10^{-3} , o parâmetro RPL no intervalo de 0,10 – 0,18 pode proporcionar condições que permite a ocorrência do regime hidrodinâmicos em superfícies texturizadas. Este resultado pode ser visto conforme destacado em vermelho na Figura 2.26.

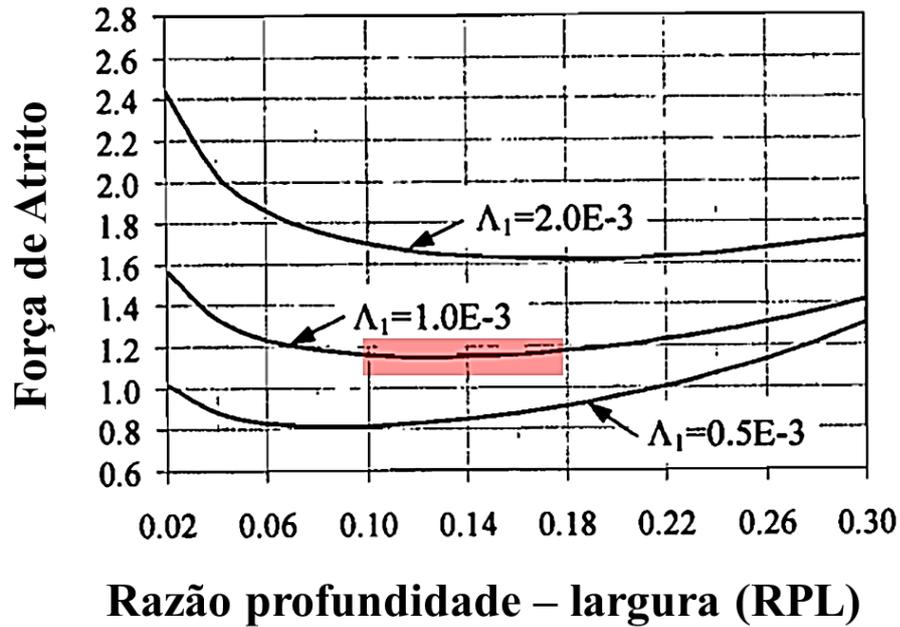


Figura 2.26 – Valores da força de atrito para diferentes RPL (Adaptado de Ronen et al., 2001).

No estudo acima, foram realizadas simulações seguindo o modelo de Reynolds para diferentes valores de RPL e de Λ_1 . Segundo os autores este último parâmetro é um produto entre o triplo da viscosidade cinemática e a velocidade de deslizamento divididos pela carga e é chamado, em inglês, de *bearing number*. Para esta dissertação valores semelhantes deste parâmetro foram considerados nas amostras texturizadas.

2.4.2 Mecanismos e Ensaio de Desgaste

Para uma avaliação experimental fiel às condições existentes, se faz necessário conhecer os mecanismos tribológicos semelhantes aos reais. Para isso existem formas de classificação como a Figura 2.27, que seguiu o raciocínio proposto por Hutchings (2017), dividindo conforme a presença de partículas duras ou não, com este sendo apenas decorrente da interação das superfícies em movimento relativo.



Figura 2.27 – Classificação dos mecanismos de desgaste.

Muitas são as formas de se simular as condições de desgaste, e para isso os aparatos podem ser desenvolvidos de forma específica com a demanda. Entre os modelos já existentes e normatizados tem-se: esfera-disco (Figura 2.28a), pino sobre disco (Figura 2.28b), bloco sobre anel (Figura 2.28c) variando a geometria do contato entre conforme e não conforme.

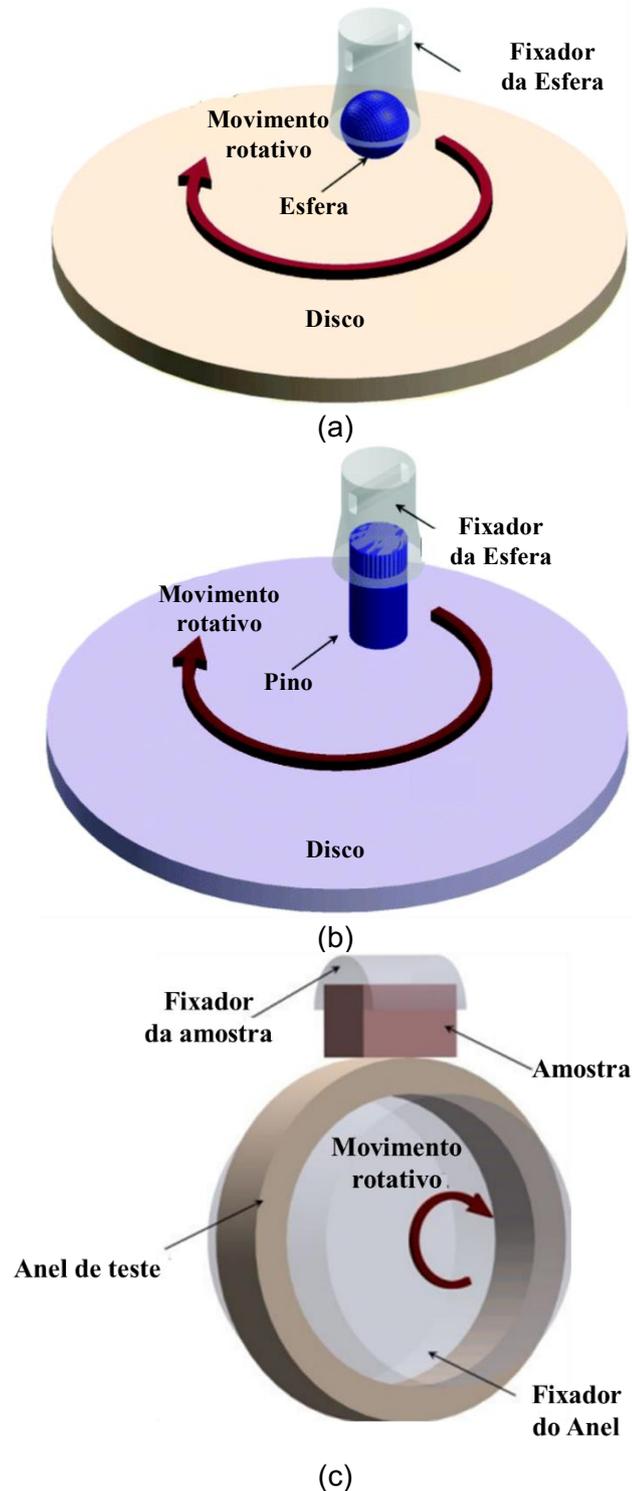


Figura 2.28 – Representação esquemática de diferentes ensaios tribológicos: (a) Esfera-disco, (b) Pino-disco, (c) Bloco-sobre-anel, (Adaptado de GAYATRI, 2019).

Segundo Hutchings (2017), a geometria do contato é fundamental para a escolha do regime de lubrificação a ser atingido. Nesse sentido se torna possível simular mancais texturizados através de um sistema de bloco sobre anel conforme, semelhante ao ilustrado pela Figura 2.29b.

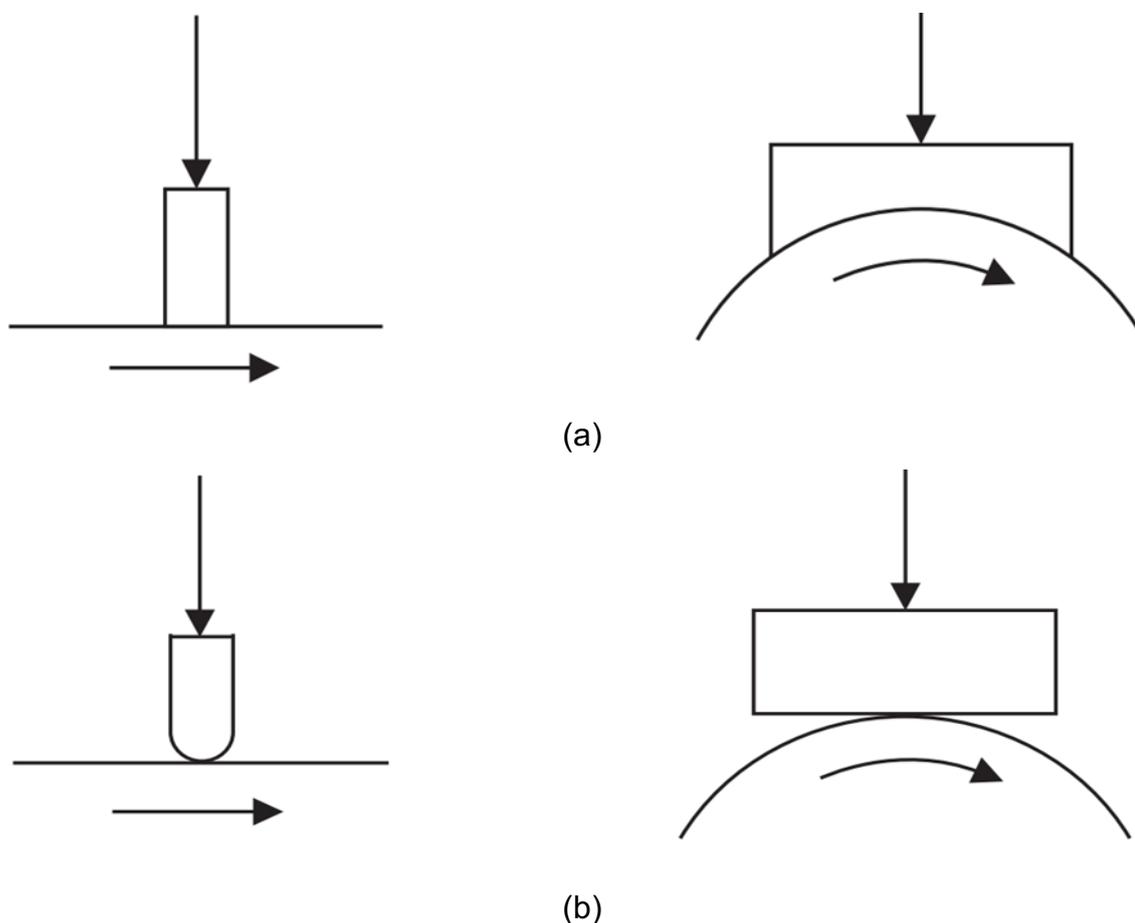


Figura 2.29 – Geometria para ensaios com geometria conforme (a) e não conforme (b) (Adaptado de HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017a).

Para ensaios de desgaste, conforme as duas figuras anteriores evidenciam, podem ser utilizados diversos tipos de ensaio. Também para superfícies texturizadas, já foram ensaiadas amostras por diversos aparatos como pino sobre disco (BORGHI, 2008; SUN, 2015), esfera sobre disco (QIN, 2015; ROSENKRANZ, 2015) e bloco sobre anel (HERNÁNDEZ BATTEZ, 2008; KOSZELA, 2010; NIKOLAKOPOULOS, 2015; RODRIGUES, 2018).

Segundo Lu (2005) e Khonsari (2007), mancais radiais texturizados podem ser reproduzidos experimentalmente usando a configuração bloco sobre anel, além disso, ao utilizar-se amostras conformes, existem uma simulação mais fiel do comportamento de mancais.

Segundo McCloskey (1995) um terço das falhas de turbinas são causadas por falha de lubrificante. Entre os seis principais modos, segundo os autores, destacam-se corrosão, fadiga de contato e abrasão (Figura 2.30a). Com relação a estudos mais recentes, têm-se os feitos por Taşgin (2021), que estudaram principais modos de falhas de mancais lubrificados de turbinas, que também indicou que a falta de lubrificante é responsável pela falha das turbinas, que são solicitadas por cargas cíclicas em aplicações de hidrelétricas (Figura 2.30b).

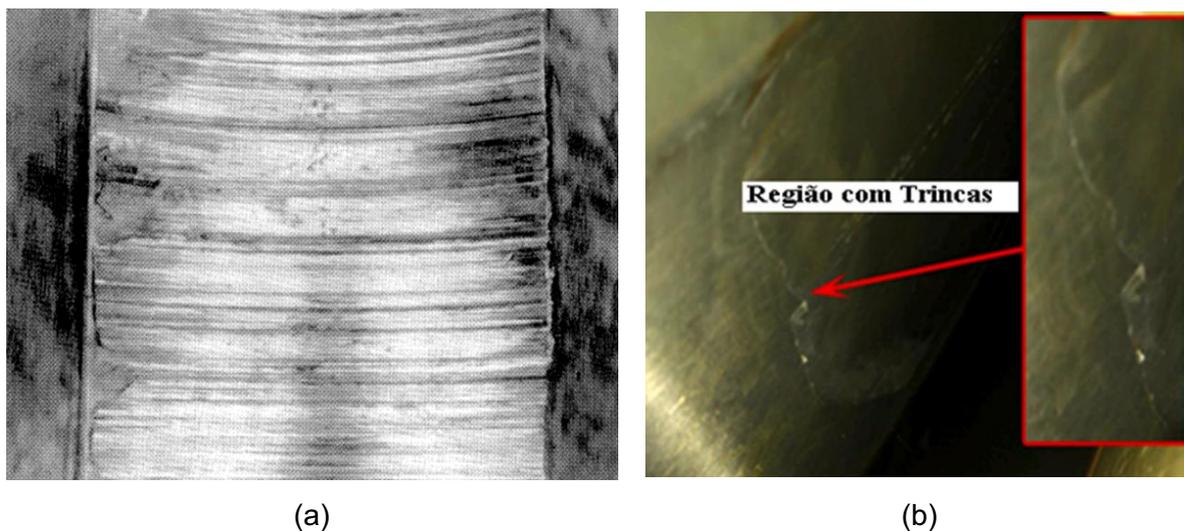


Figura 2.30 – Falhas em mancais de Turbinas causadas por: (a) abrasão oriundas de particulados no lubrificante; (b) trincas por fadiga (a - MCCLOSKEY, 1995;b - TAŞGIN, 2021

Nesse contexto, fica evidente que mancais de turbinas hidrelétricas apresentam problemas tribológicos associados a dissipações, desgaste e até mesmo a falha. Essa revisão também aponta que o atrito pode ser diminuído nesse tipo de mancal levando ao aumento da eficiência global da turbina. Para este trabalho, ensaios de desgaste por deslizamento do tipo bloco sobre anel com contatos conformes foram selecionados para simular fenômenos de mancais radiais lubrificados como os presentes em hidroelétricas. Assim como nos trabalhos apresentados acima, espera-se encontrar entre os resultados deste trabalho, amostras com marcas de abrasão, trincas por fadiga e filmes de óxidos.

CAPÍTULO III

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O capítulo três engloba todo o enredo experimental utilizado para o desenvolvimento deste trabalho, bem como a identificação dos elementos utilizados, como os equipamentos envolvidos na fabricação de superfícies texturizadas, nos ensaios tribológicos e nas análises superficiais, além dos materiais que compõem o sistema tribológico em questão. Em síntese, a Figura 3.1 apresenta o fluxograma das principais etapas da metodologia utilizada para este projeto.

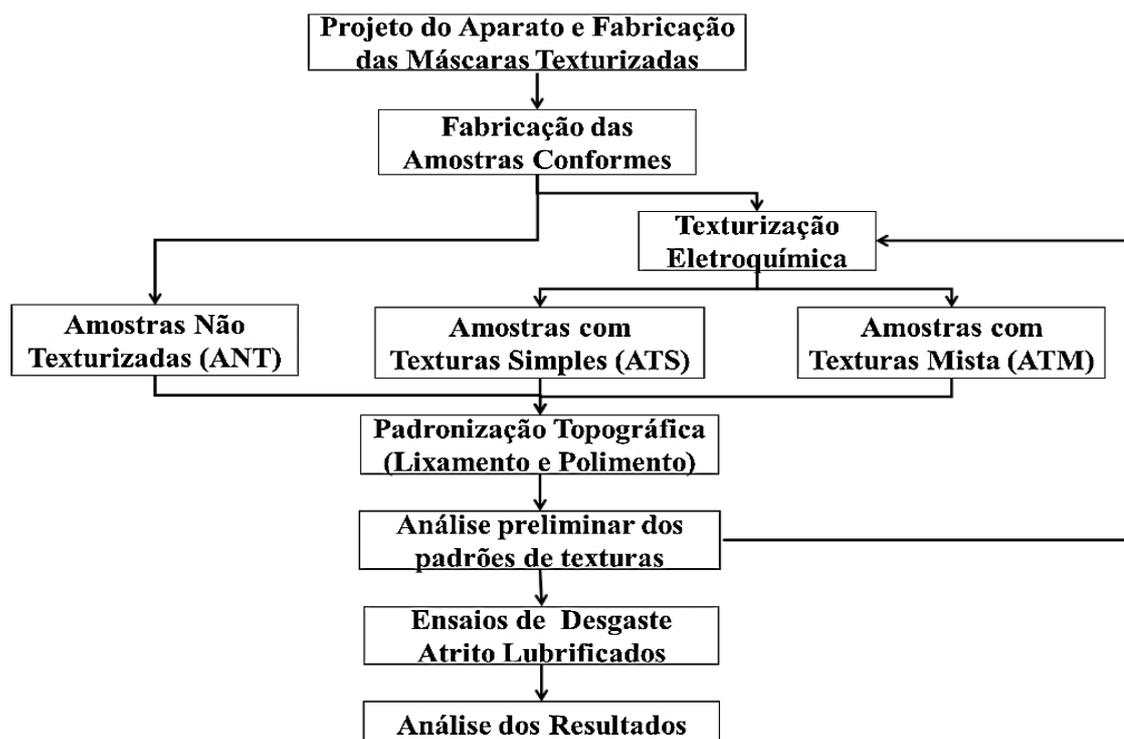


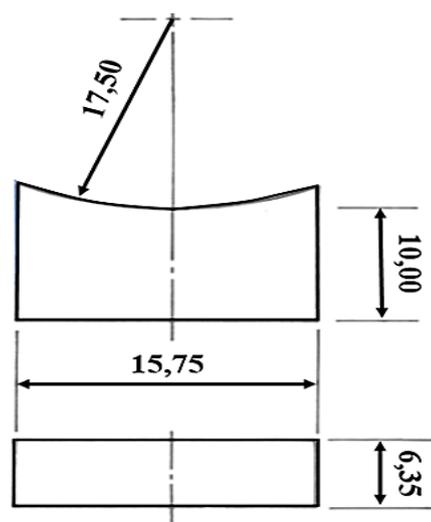
Figura 3.1 – Fluxograma dos ensaios realizados nesta dissertação.

A partir da Figura 3.1 tem-se a seguinte sequência estudo e projeto das características das máscaras e aparatos utilizados, fabricação das amostras com geometria conforme para os ensaios de atrito, processo de texturização simples e composta dessas amostras. Após estas etapas, amostras com e sem alteração topográfica são padronizadas em seu acabamento, selecionadas e analisadas. Algumas amostras foram descartadas ou lixadas/polidas novamente até se atingir a rugosidade, próxima as demais amostras, e texturas padronizadas em formas de bolsos circulares e elípticos com acabamento e dimensões semelhantes às de Segu (2015). As duas últimas partes correspondem aos ensaios de desgaste e análise do conjunto de informações adquiridas conforme serão detalhados nesta e na próxima seção.

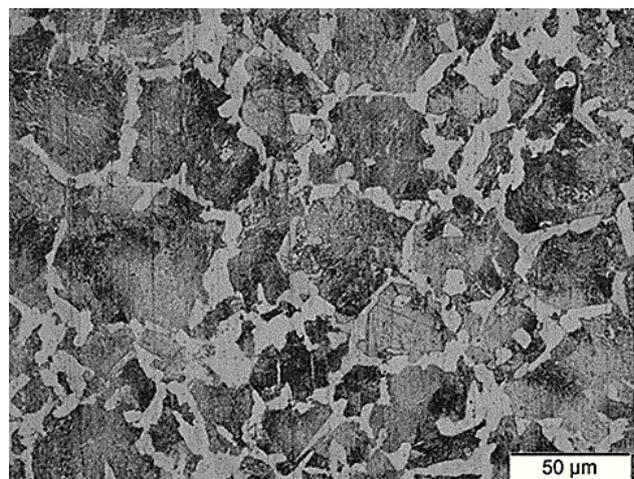
3.1 Materiais Utilizados

3.1.1 Corpos de Prova

Para os ensaios propostos por este trabalho, amostras foram confeccionadas seguindo a norma ASTM D271 94 (2014) para ensaios do tipo bloco sobre anel. Elas são constituídas de aço AISI 1045, com módulo de elasticidade 210 GPa, coeficiente de Poisson 0,33 (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2013), dureza Vickers no intervalo de $1,714 \pm 0,035$ GPa e cujas dimensões e microestrutura com estrutura perlítica e formação de ferrita proeutetóide nos contornos de grão se encontram, respectivamente, na Figura 3.2.



(a)



(b)

Figura 3.2 – (a) Esquema das amostras utilizadas com suas dimensões em milímetros e (b) microestrutura dos corpos de prova atacados por Nital 5%, durante 30 segundos.

Conforme ilustrado na Figura acima, a geometria côncava possui o mesmo raio que o seu contracorpo (Figura 3.2a). Isto se justifica devido ao objetivo deste trabalho analisar o regime de lubrificação hidrodinâmica, somente possível nesta configuração (HUTCHINGS, 2017). A Figura 3.3 ilustra o comportamento do atrito para os dois tipos de pares deslizantes lubrificados em questão.

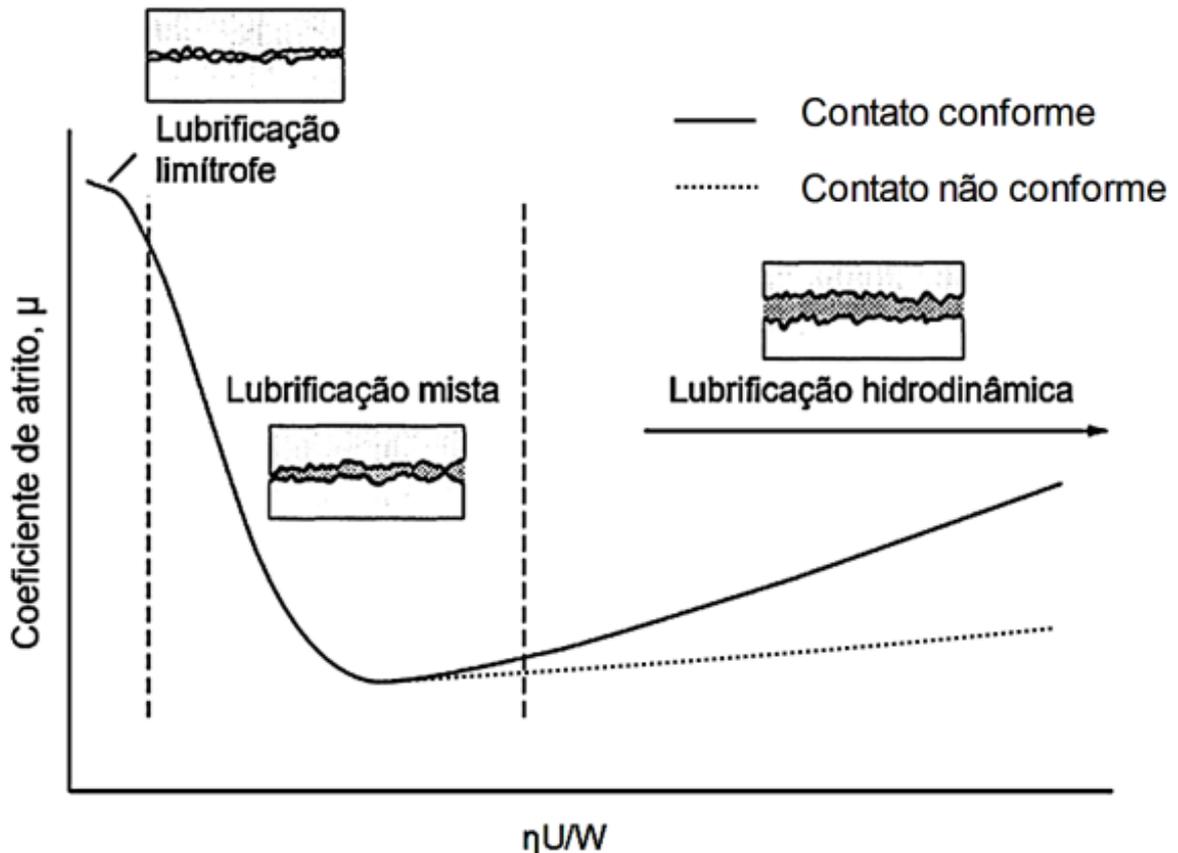


Figura 3.3 – Curva de Stribeck com tipos de lubrificação para contatos conformes e não conformes (Adaptado de HUTCHINGS, 2017).

Pela Figura acima, o regime de lubrificação hidrodinâmico ocorre somente em sistema de contato conforme, existindo a condição elasto-hidrodinâmica para a condição não conforme, igual explicitado na seção 2.3 sobre os regimes de lubrificação.

Para o par de contato, além das amostras supracitadas, foram utilizados anéis padrões fornecidos pela Falex® de aço AISI 4620 (Aço níquel-molibdênio), também normatizados consoante ASTM D271 94 (2014), com dureza superficial Vickers variando entre $6,796 \pm 0,098$ GPa. Suas dimensões e microestrutura podem ser identificados pela Figura 3.4.

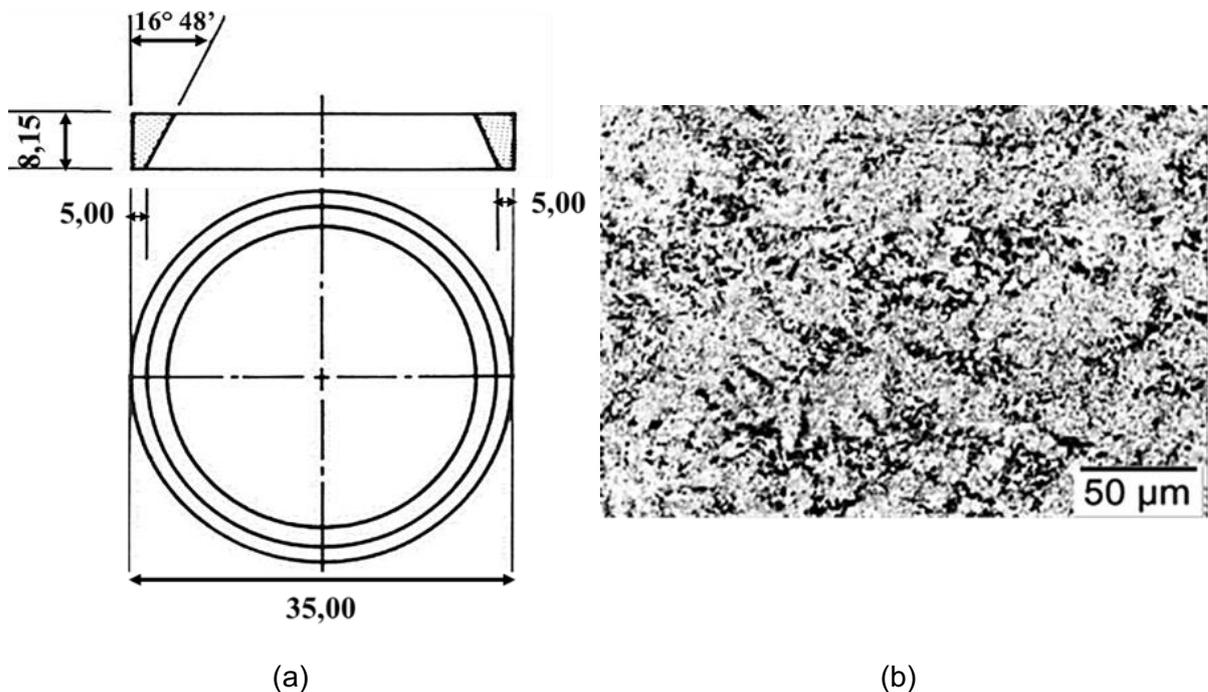


Figura 3.4 – (a) Esquema dos anéis (contracorpo) utilizados com suas dimensões (b) e microestrutura dos corpos de prova atacados por Nital 2%, durante 10 segundos.

Pela Figura 3.4b tem-se a microestrutura de uma seção do anel utilizado, nela sua constituição possivelmente é de matriz ferrítica (branco) com significativa quantidade de perlita (escura).

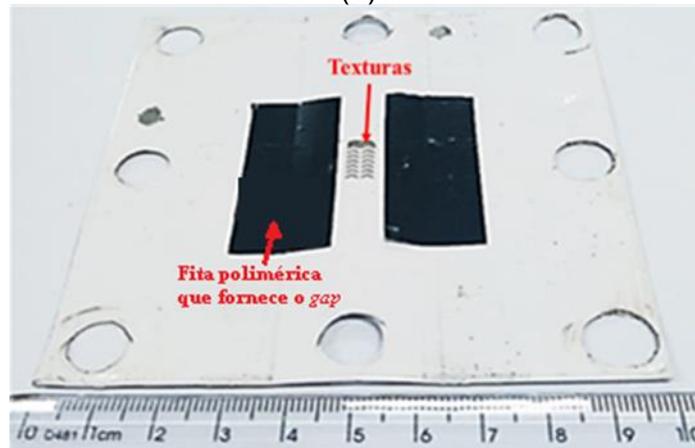
3.1.2 Aparatos de Texturização

Diferente das amostras utilizadas por Rodrigues (2018) para os ensaios do tipo bloco sobre anel, para este trabalho foram usadas amostras com geometria interna complementar ao anel, isto é, circular. Deste modo, a partir do processo de conformação mecânica, chapas de aço foram deformadas plasticamente com o intuito de fabricar ferramentas para processo de eletrólise eletroquímica, e ser possível introduzir padrões superficiais por usinagem com fluxo perpendicular e paralelo de eletrólitos, em amostras cilíndricas.

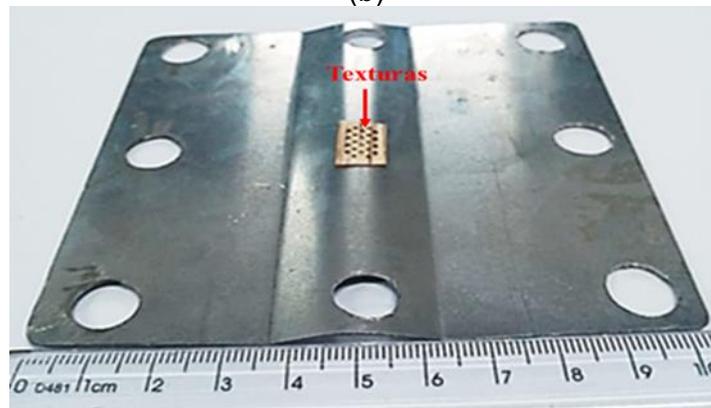
As ferramentas eram constituídas por aço AISI 304 austenítico e tiveram texturas em sua região côncava. O primeiro aparato possuía padrões de chevrons fabricadas por processo laser diretamente no metal, enquanto o segundo, a exemplo de Ferri (2021), possuía um adesivo polimérico baseado em vinil com as geometrias de interesse, também gravadas por laser. As imagens da matriz de conformação e das ferramentas se encontram a seguir, já seus respectivos aparatos (Figuras 3.5b e 3.5c), serão apresentados nas Figuras 3.11 e 3.12.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.5 – (a) Matriz de conformação e ferramentas para uso com fluxo de eletrólitos (b) perpendiculares e (c) paralelos.

Para o caso de texturização com e sem mascaramento, seus revestimentos poliméricos possuíram geometrias simples e composta (Figura 3.6). Segu (2015) apresentaram resultados de coeficiente de atrito da ordem de 10^{-3} para textura com padrões circulares e elípticos, como apresentado na Figura 2.25. Com base nesses estudos, foram construídas texturas misturando as formas elípticas e circulares, desta forma foram desenhadas máscaras com círculos de mesma dimensão, para terem seu desempenho tribológico comparados. Suas dimensões são ilustradas pela Figura 3.6.

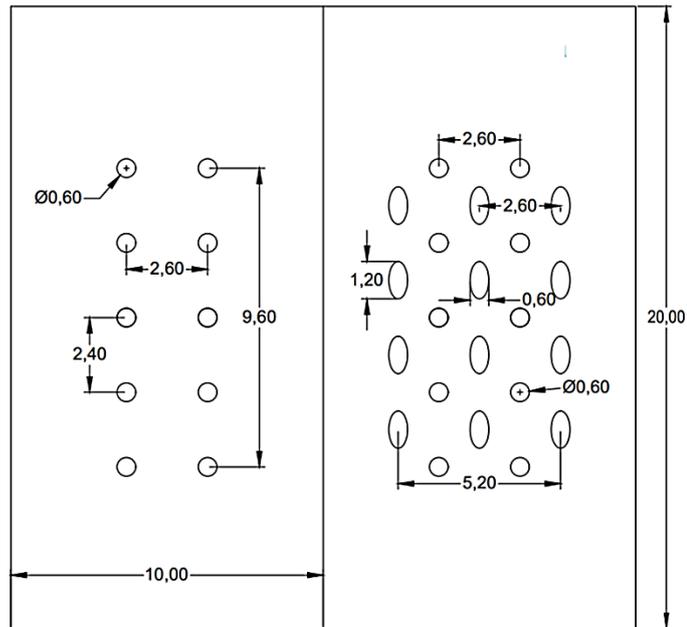


Figura 3.6 – Desenho com as máscaras cotadas e sentido de deslizamento durante o ensaio.

3.1.3 Fluido Lubrificante

Pensando em aplicações de mancais utilizados em usinas hidroelétricas, para os ensaios lubrificadas foi utilizado o mesmo fluido que RODRIGUES (2018): óleo hidráulico BP68 da fabricante YPF® Brasil. Sua viscosidade cinemática mensurada é de 159,60 cSt a 20 °C e 7,16 cSt a 100 °C, suas outras propriedades físicas como massa específica (ρ) e viscosidade dinâmica (ν), utilizadas para o cálculo de espessura de filme teórico, podem ser identificados no gráfico (Figura 3.7), cujos valores foram adquiridos pelo viscosímetro da marca ANTON-PAAR® modelo SVM-3000.

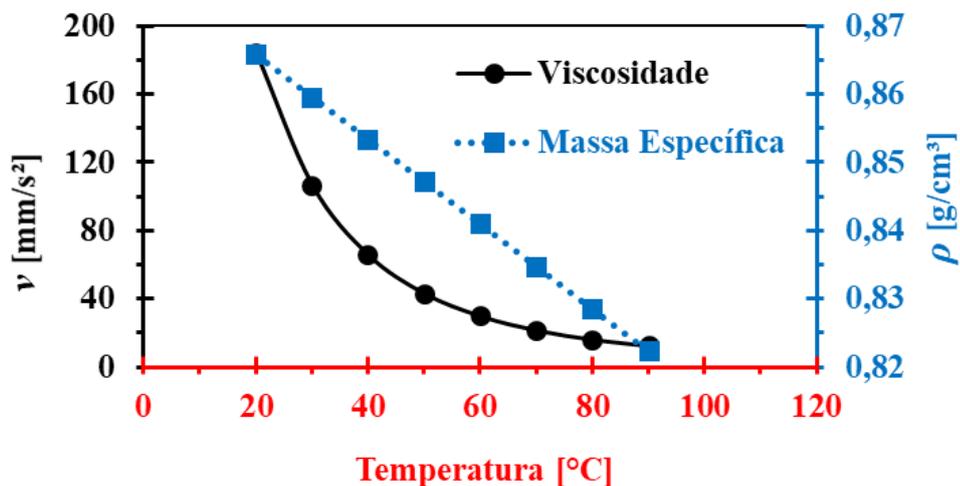


Figura 3.7 – Propriedades físicas do óleo hidráulico BP68 utilizado, os testes deram-se no intervalo de 20 – 90 °C.

Com o objetivo de uma refrigeração mais eficiente dos ensaios do tipo bloco sobre anel, buscou-se adaptar um sistema de troca de calor (óleo-água) em um circuito hidráulico (Figura 3.8). Contudo este aparato não conseguiu manter sua estanqueidade em baixas rotações, resultando na redução de óleo na câmara, não sendo utilizado durante os ensaios realizados nesta dissertação.

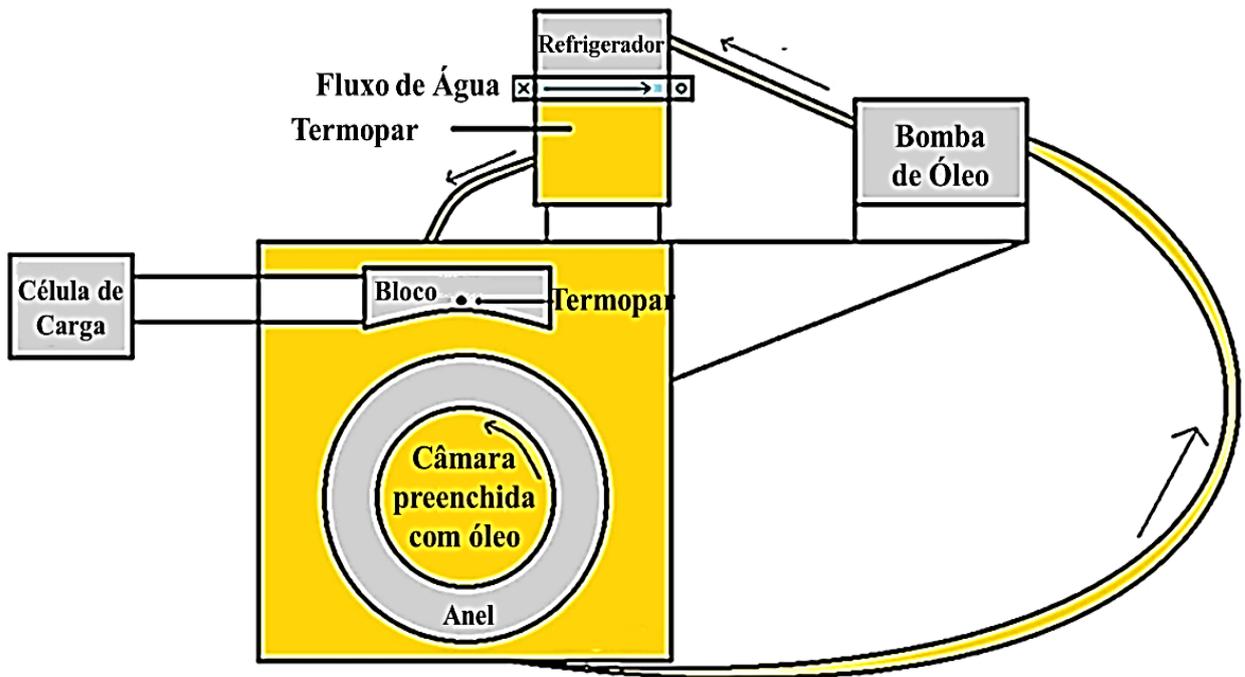


Figura 3.8 – Sistema Bloco sobre Anel adaptado com sistema refrigerado com água.

3.2 Metodologia

3.2.1 Acabamento Superficial

Após um estudo feito durante o trabalho de Santos Júnior (2022), as peças foram padronizadas em seu acabamento de metodologia semelhante. Os contracorpos foram lixados até 1200 mesh, resultando em um parâmetro R_q de $0,22 \pm 0,03 \mu\text{m}$.

Para os blocos conformes, foi realizado o lixamento com micro retífica modelo Dremel® 4000, usando lixa #1200, em uma velocidade de 20000 rpm durante 120 segundos, seguido de polimento em solução de Al_2O_3 (1 μm de tamanho médio de partícula) em feltro cilíndrico com velocidade de 5000 rpm durante 180 segundos.

As amostras texturizadas foram novamente lixadas para adquirirem rugosidade semelhante às não texturizadas. Este procedimento justifica-se pelo acabamento de superfícies texturizadas por usinagem eletroquímica serem, conforme Arlsan (2017) e

Rodrigues (2020) possuírem superfícies mais rugosas ao redor dos bolsos, quando comparados aos processos de usinagem convencionais.

Os principais parâmetros topográficos foram acessados via perfilometria de contato (Taylor Hobson Talysurf Intra 2[®]), cujos parâmetros foram velocidade de medição de 0,5 mm/s, *cut off* de 0,25 e filtro Gaussiano.

Apesar de possuírem valores de Rq semelhantes (conforme Tabela 4.3), a topografia das amostras possui diferenças em outros aspectos. Para melhor caracterizar os perfis de asperezas, foram mensurados os parâmetros de Assimetria e Curtose.

No que tange ao Coeficiente de Assimetria (do inglês *Skewness* - Rsk) resultados com valores negativos indicam, dentro do estudo de topografia, perfis com menos picos proeminentes e mais vales com potencial de reservatório lubrificante, no caso positivo, os perfis tendem a ter mais vales preenchidos ou altos picos. As informações acima estão ilustradas nos gráficos da Figura 3.9a.

O parâmetro de Achatamento ou Curtose (do inglês *Kurtosis*- Rku) descreve o achatamento da curva de densidade probabilidade, em relação a uma curva gaussiana de pontos, valores maiores que três, indicam que as asperezas estão em maior concentração de pontos, indicando presença de muitos picos altos e vales profundos. Valores menores que três, contudo, indicam asperezas mais espaçadas, gerando picos em menor número.

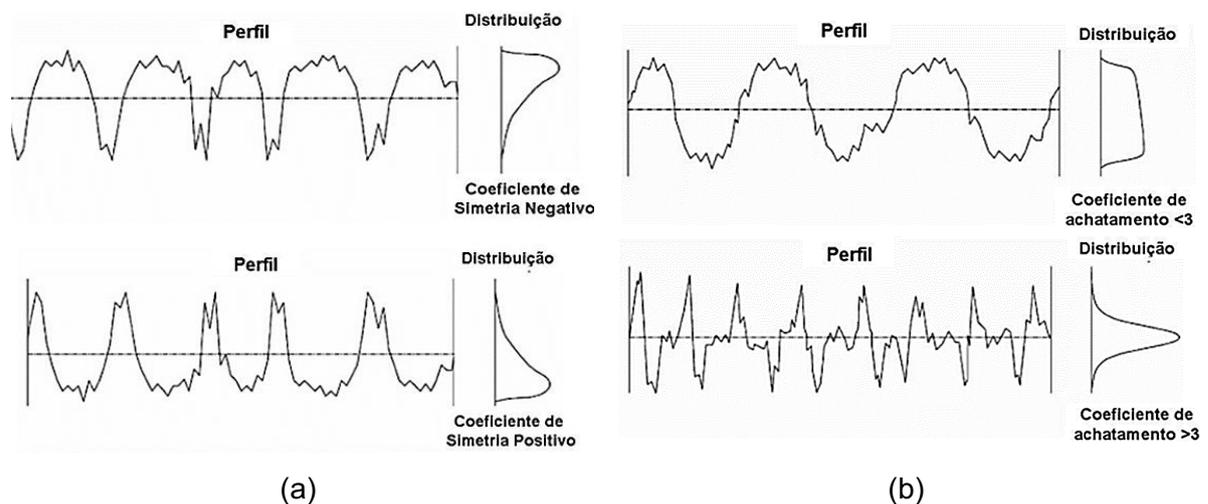


Figura 3.9 – Ilustração de perfis (a) com Assimetria positivos e negativos, (b) e Curtose maior e menor que três, e suas distribuições relativas. (Adaptado de Straioto, 2006)

Para avaliar a capacidade de suportar carregamentos e armazenar maior quantidade de lubrificantes, pode-se utilizar os parâmetros da Curva de Abbot-Firestone. A partir dela um perfil topográfico de interesse (Figura 3.10a), pode ter parâmetros quantificados, como seus picos proeminentes (mensurados pelo parâmetro Rpk) e vales (Rvk), além de porções do perfil

($Mr1$ e $Mr2$) ou a porcentagem de área que irá suportar o carregamento após o destacamento das asperezas mais agudas (Parâmetro tp) através de uma curva (Figura 3.10b), como ocorrerá no próximo capítulo desta dissertação.

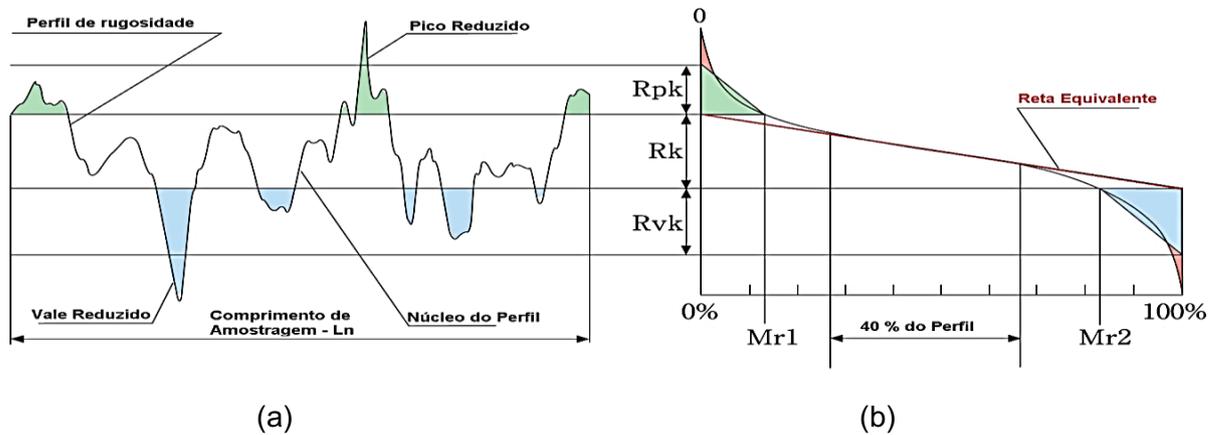


Figura 3.10 – Ilustração do: (a) perfil de uma superfície; (b) sua Curva de Abbott-Firestone (Adaptado de Olympus, 2022).

3.2.2 Texturização Eletroquímica Superficial

Inicialmente buscou adaptar o aparato e metodologia utilizados por da Silva (2016) e RODRIGUES (2018) conformando uma ferramenta texturizada com geometria de chevrons, e aplicando MECT proposto por Costa e Hutchings (2009) com fluxo de eletrólito perpendicular a amostra, cujo esquema está descrito na Figura 3.11.

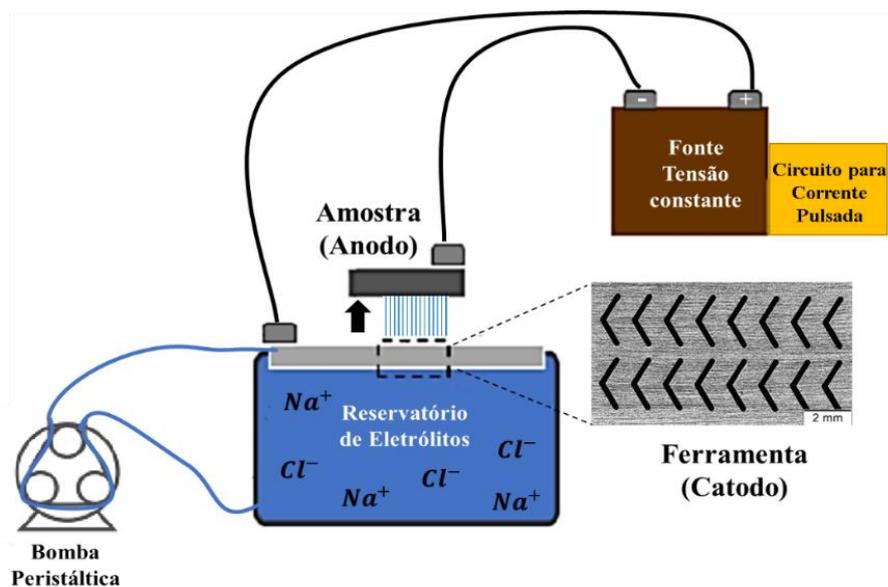


Figura 3.11 – Ilustração do aparato experimental MECT modelado por Parreira (2011) e da Silva (2016).

Para a geometria cilíndrica estudada, utilizou-se a ferramenta conformada apresentada na Figura 3.5b, mas essa metodologia não se mostrou funcional e não conseguiu marcar as amostras com os chevrons. A complexidade dos micros padrões, tal como a conformidade irregular, influenciando em um espaçamento entre o par eletroquímico variável, além da perda de carga que o sistema proporciona, podem ser explicações para a ineficiência deste nas amostras estudadas neste projeto.

Dessa forma observando a proposta utilizada por Ferri (2019), e com o intuito de reduzir a perda de carga do modelo anterior, buscou-se adaptar aquele aparato para um fluxo paralelo de eletrólitos (Figura 3.12). A ferramenta de aço inoxidável (Figura 3.5c) teve uma máscara colada em sua superfície côncava, de modo a ocorrer interação química com maior intensidade nessa região, mantendo o espaço entre a ferramenta e peça mais constante ao longo do contato cilíndrico.

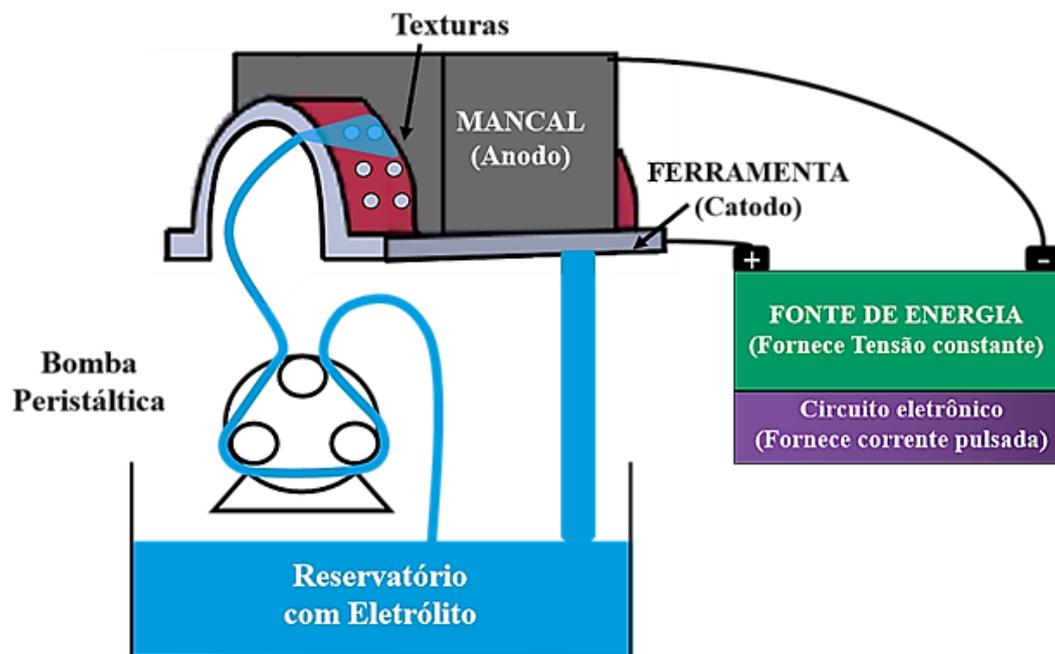


Figura 3.12 – Sistema aberto com fluxo paralelo de eletrólitos.

Mesmo esta metodologia não se mostrou eficiente devido a perda de carga e fuga de eletrólitos pela superfície frontal do mancal, não conseguindo atingir a parte côncava de interesse, independente do tempo de exposição de eletrólitos.

Conseqüentemente, um segundo aparato foi desenvolvido (Figura 3.13), com a finalidade de melhorar a circulação de eletrólitos de forma direcionada na região de interesse de texturização. Uma vez que o jato com íons possui menor fuga do aparato, o sistema eletrolítico operou com maior eficiência e, as texturas, foram impressas com maior definição.

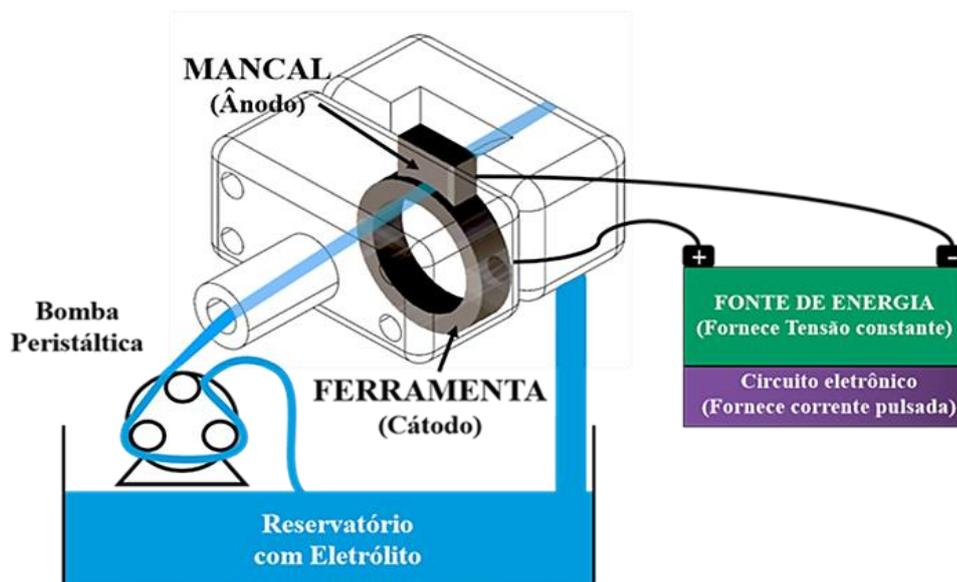


Figura 3.13 – Sistema com fluxo paralelo de eletrólitos direcionado para região de interesse.

A partir do aparato acima, foram realizados ensaios com e sem mascaramento da amostra, em intervalos de tempo diferentes. Os testes seguiram o modelo descrito por Parreira (2011), utilizando a distância entre a ferramenta e a peça de 100 μm e tensão de 30 V variando o tempo, conforme Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Parâmetros utilizados nos ensaios de texturização eletroquímica.

Parâmetro	Tempo de Ensaio (s)			
Texturização sem Mascaramento	30	-	45	60
Texturização com Mascaramento	30	40	45	60

Conforme a Tabela 3.1 acima, os ensaios se deram através dos dois modos em que a Usinagem Eletroquímica se dá, com mascaramento, em tempos iguais aos testados por Pereira (2011), com o acréscimo do tempo de 40 segundos no primeiro caso.

Neste sistema o fluxo com eletrólitos, constituídos por uma solução de NaCl 200 g/L (8,55 M), se dá na vazão de 20 mL/s seguindo trabalhos anteriores (PARREIRA, GALLO e COSTA, 2012). O aparato desenvolvido neste projeto permitiu manter a concentração salina em 1 L de água destilada e não mais 5 L como nos últimos estudos, e através do uso de um anel padrão do teste Falex como ferramenta de usinagem eletroquímica, conseguiu formar o par cátodo – ânodo (Figura 3.14) mais eficiente para a geometria côncava da amostra, que as outras peças testadas (Figura 3.5b e 3.4c).

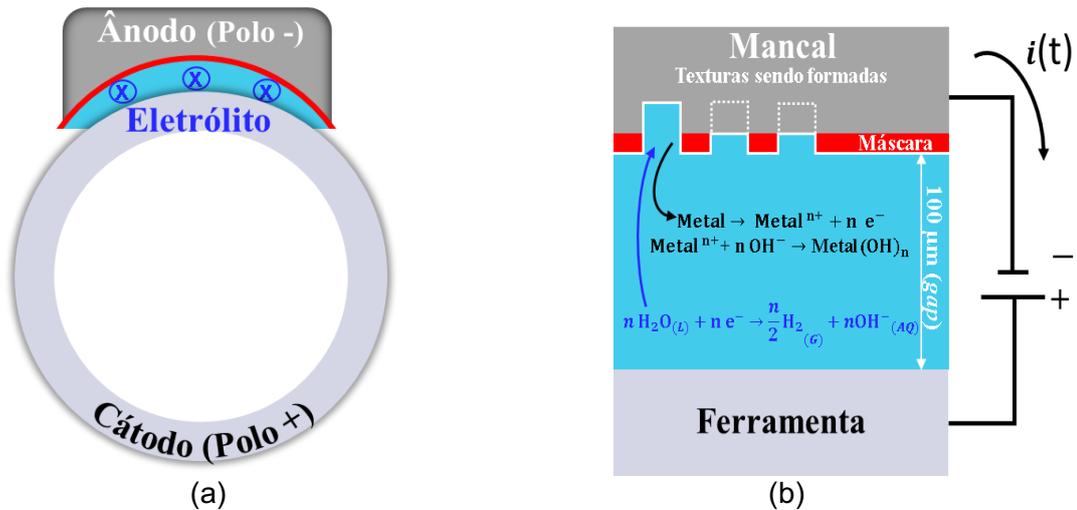


Figura 3.14 – Representação Esquemática do: (a) Par metálico utilizado na texturização eletroquímica e (b) suas reações químicas envolvidas no processo de corrosão entre o mancal e a ferramenta.

3.2.3 Ensaios Tribológicos

Neste trabalho, seguindo a abordagem utilizada por RODRIGUES (2018) e da Silva (2016) para ensaios tribológicos de mancais lubrificados, utilizou-se o tribômetro Falex® tipo bloco sobre anel (*Block on Ring test machine* modelo 6100B). Essa configuração de teste foi escolhida para simular o comportamento do contato conforme característico de mancais radiais. Nesse teste é possível avaliar a influência de texturas superficiais, com geometria simples e composta, no atrito e desgaste de materiais para mancais de deslizamento lubrificados. Para o teste em questão, foram utilizados corpos de prova conforme, imersos em 150 mL de fluido lubrificante em movimento unidirecional como ilustrado na Figura 3.15.

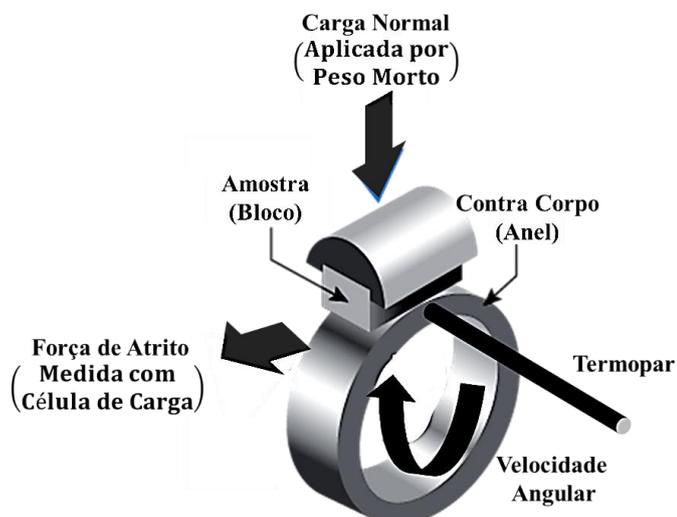


Figura 3.15 – Desenho esquemático do Ensaio Bloco sobre Anel utilizado.

Para melhorar a fixação da amostra e, alinhá-la ao eixo de rotação acoplado ao anel fixo na máquina, foi realizado um furo de 5 mm no ponto central da concha. Esta é fixada ao porta-amostra através de parafuso M8 que se conecta ao equipamento. Uma vez com contato conforme entre anel e amostra, pode-se atingir o regime hidrodinâmico, que ocorre em conexões mecânicas complementares com menor excentricidade possível (HUTCHINGS, 2017b). Seu desenho esquemático pode ser visualizado na Figura 3.16.

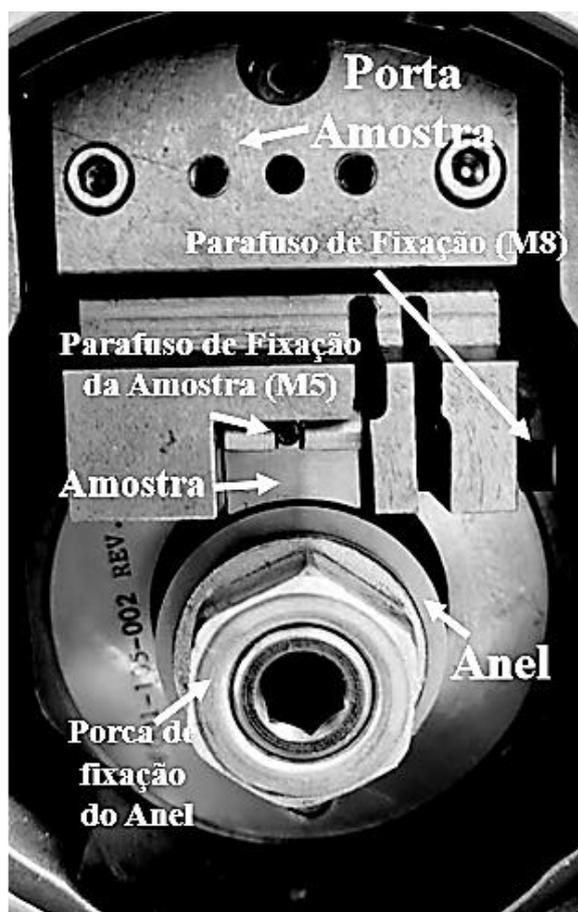


Figura 3.16 – Desenho esquemático com a modificação realizada para os ensaios bloco sobre anel.

Para utilização desse equipamento foram realizadas duas calibrações: a do termopar e da célula de carga. A primeira ocorreu variando a temperatura a cada 10 °C aproximadamente, através de um banho termostático com o sistema de aquecimento modelo Bibby HB502, a partir da temperatura de fusão do gelo até a temperatura de ebulição da água na pressão atmosférica de Uberlândia, e medindo os valores da resposta de tensão do termopar do tipo J da Falex e da temperatura de termômetros de referência, do tipo analógico e de mercúrio marca INCOTERM. A curva de calibração está apresentada na Figura 3.17.

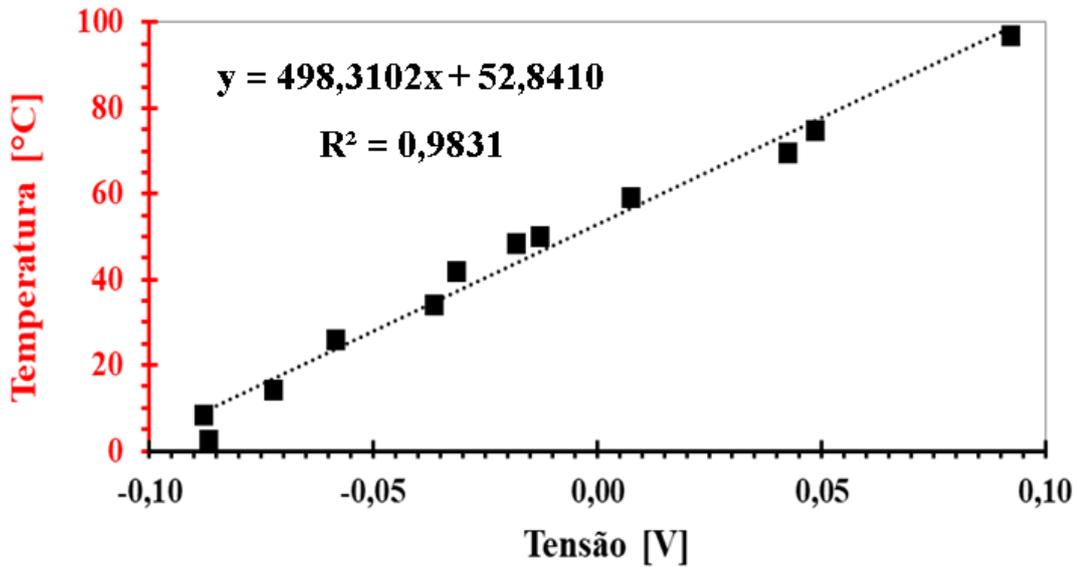


Figura 3.17 – Curva de calibração do termopar tipo J utilizado nos ensaios.

Através de um sistema de polias e cargas foi feita a calibração da célula de carga modelo SM-100 da marca Interface®. Estas possuíam massas de 0,5 a 3,0 kg, com a padronização ocorrendo com 0,1 kg de incremento. Tanto a primeira curva como a força de atrito foram realizadas em ambiente com temperatura de 25 °C e 50% de umidade relativa, e a curva de calibração deste último é apresentada na Figura 3.18.

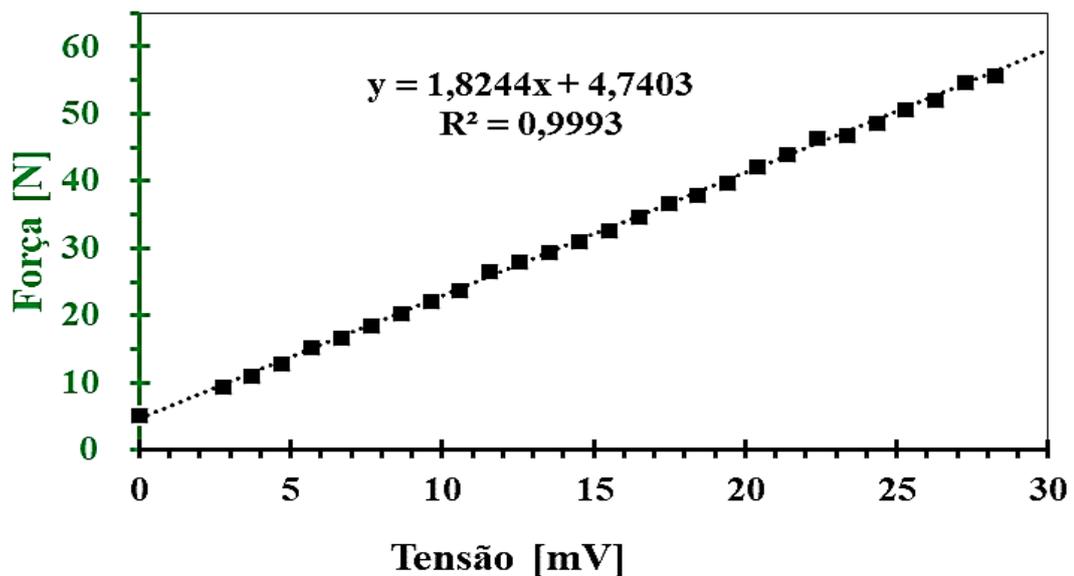


Figura 3.18 – Curva de calibração da célula de carga do tribômetro utilizada nos ensaios.

Para atingir-se os três regimes de lubrificação existentes, em sistemas com fluidos, optou-se por variar a velocidade linear dos sistemas para uma carga normal fixa de

2004,18 N seus valores se encontram na Tabela 3.2. Os ensaios ocorreram durante o intervalo de 1800 segundos, com três repetições para cada rotação e tipo de superfície.

Tabela 3.2 – Parâmetros usados nos ensaios de atrito.

Parâmetro	Velocidade Linear (m/s)	Velocidade Rotação (rpm)
Regime Limítrofe	0,14 ± 0,01	19,78 ± 5,00
Regime Misto	0,18 ± 0,02	40,33 ± 8,88
Regime Hidrodinâmico	0,33 ± 0,02	100,22 ± 1,68

Pela Tabela 3.2 pode-se ver o desvio padrão das velocidades utilizadas nos ensaios. Elas se devem às limitações do equipamento nas rotações escolhidas, que tendem a variar a rotação, conforme mostrador digital do equipamento. Seus valores foram previamente testados e calculados Equação (2.3), de modo a obter-se os três regimes de lubrificação estudados.

Antes e depois de cada etapa de ensaio (acabamento – texturização – bloco sobre anel), as amostras foram armazenadas em uma câmara de vácuo com pressão relativa de - 500 mbar para evitar degradação por oxidação delas, e possibilitar estudos futuros destas. Após o último ciclo de testes, as amostras desgastadas tiveram sua topografia obtida por um interferômetro modelo Taylor Hobson Talysurf CLI 2000®, com densidade de 500 pontos/minuto, taxa de medição de 2 mm/s e frequência de 1000 Hz usando modo de medição contínua. Essa análise permitiu acessar as dimensões da textura remanescente e o volume desgastado.

A síntese dos ensaios e parâmetros, utilizados nesta dissertação, pode ser descrita na Tabela 3.3. Nela ratifica-se as etapas descritas nesta metodologia como a caracterização em termos de dureza das amostras, os aparatos utilizados e seus parâmetros eletroquímicos, os detalhes das calibrações dos sensores de temperatura e de força de atrito. Também são detalhados os ensaios de perfilometria, texturização e desgaste pelo tribômetro com configuração bloco sobre anel com seus valores e tipos, respectivamente, de filtros, tempo, velocidade e quantidade de óleo lubrificante. Conforme será detalhado no próximo capítulo, foram realizadas as análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) instrumentado com um módulo de espectroscopia por dispersão de energia de raios X (EDS). Foram realizadas análises qualitativas da composição química das amostras via EDS e de eventos encontrados em suas superfícies desgastadas.

Tabela 3.3 – Resumo com os parâmetros dos testes feitos nesta metodologia

Caracterização Física das Amostras	Corpo	AISI 1045 (Aço Carbono)	H = 1,714 ± 0,035 GPa
	Contracorpo	AISI 4620 (Aço Níquel + Molibdênio)	H = 6,796 ± 0,098 GPa
Ataque Químico	Corpo	Imersão em Nital (5%) durante 30 segundos	
	Contracorpo	Imersão em Nital (2%) durante 10 segundos	
Microscopia Óptica para Caracterização Metalográfica	Corpo	estrutura perlítica e formação de ferrita proeutetóide nos contornos de grão	
	Contracorpo	matriz ferrítica com perlita.	
Projeto de Aparato para Texturização Eletroquímica	Ferramenta (AISI 304) usada por RODRIGUES (2018), com texturas chevrons conformada por Matriz		Fluxo de eletrólito passante/perpendicular a ferramenta
	Ferramenta (AISI 304) com texturas circulares em máscara polimérica, conformada por Matriz		Fluxo de eletrólito paralelo a ferramenta
	Anel usado como Ferramenta (AISI 4620), texturas circulares em máscara polimérica, por Matriz		Fluxo de eletrólito paralelo a ferramenta
Caracterização do óleo Lubrificante	Viscosímetro (ANTON-PAAR®) modelo SVM-3000 Óleo Hidráulico BP68 (YPF® Brasil) viscosidade cinemática de 159,60 cSt a 20 °C e 7,16 cSt a 100 °C		
Calibração dos Equipamentos	Termopar	Intervalo de 0 - 100 °C, com incremento de 10 °C. Foram usados termômetros de referência, do tipo analógico e de mercúrio	
	Célula de Carga	Uso de massas de 0,5 a 3,0 kg, com 0,1 kg de incremento.	
Aparato de circulação de óleo Lubrificante	Houve testes visando adaptar um trocador de calor (óleo-água) em um circuito hidráulico com óleo em circulação. Aparato não conseguiu manter sua estanqueidade em baixas rotações, resultando na redução de óleo na câmara, não sendo utilizado durante os ensaios finais.		
Caracterização Topográfica das Amostras	Lixamento com micro retífica (Dremel® 4000), usando lixa #1200, rotação de 20000 rpm durante 120 segundos, seguido de polimento em solução de Al ₂ O ₃ (1 µm) em feltro cilíndrico com velocidade de 5000 rpm durante 180 segundos.		
	Perfilometria de contato com velocidade de medição de 0,5 mm/s, Parâmetro de <i>cut off</i> de 0,25 e filtro Gaussiano. Foram catalogados: Rq, Rsk, Rku, Rkv e Tp		
Ensaio de Texturização Eletroquímica	MECT	t = 30, 45 e 60 segundos	Geometria Simples e Composta
	TMEMM	t = 30,40, 45 e 60 segundos	Geometria Simples e Composta
Ensaio de Desgaste por Deslizamento	Padronização térmica do ambiente de Ensaio (T = 25 °C) Tempo de 60 segundos para acomodação do contato Carga e tempos fixos de 2004,18 N e 1800 segundos 150 mL de óleo hidráulico BP68 da fabricante YPF® Brasil Limpeza do equipamento com álcool 99,5% (1500 rpm durante 300 segundos) e ar comprimido Armazenamento das amostras em estufa em pressão de - 600 mbar		
	Limítrofe	Rotação de 19,78 ± 5,00 rpm (0,14 m/s)	
	Misto	Rotação de 40,33 ± 8,88 rpm (0,18 m/s)	
	Hidrodinâmico	Rotação de 100,22 ± 1,68 rpm (0,33 m/s)	
Análise Superficial	MEV	MEV (CARL ZEISS) modelo EVO MA 10, com módulo de espectroscopia por dispersão de energia de raios X (EDS).	

CAPÍTULO IV

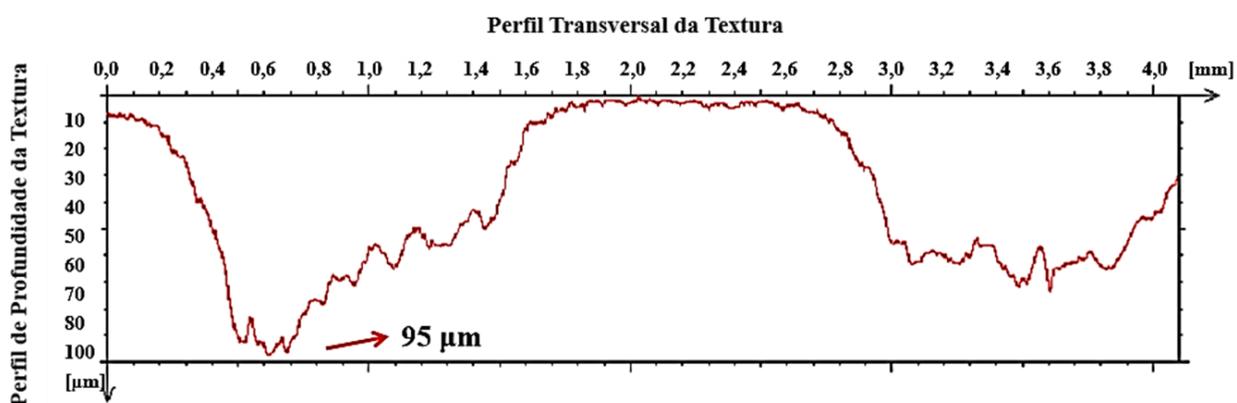
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo é dedicado aos resultados encontrados nesta pesquisa e foi organizado em três partes: Na primeira são descritos os resultados e análises referentes à topografia das amostras produzidas, destacando o perfil das texturas e sua relação profundidade/largura, parâmetro escolhido para seleção das amostras que seriam ensaiadas no sistema bloco sobre anel. Esta seção também inclui um estudo de diversos parâmetros da superfície como rugosidade quadrática média (R_q), curtose (R_{sk}), assimetria (R_{ku}) e fator de apoio (T_p); A segunda parte contém a descrição dos resultados em termos de coeficiente de atrito nas três condições de lubrificação (limitrofe, misto e hidrodinâmico). A terceira seção traz as imagens das marcas de desgaste, obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), e sua relação com a seção anterior e com os mancais presentes em usinas hidrelétricas em campo.

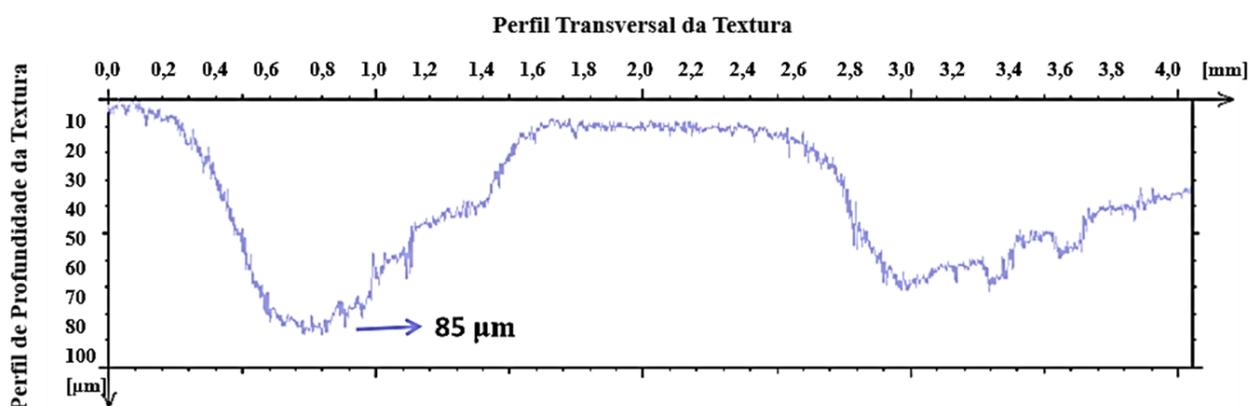
4.1 Análise Morfológica das Texturas Fabricadas

De acordo com o procedimento experimental detalhado no tópico 3.2.2, as amostras de aço AISI 4045 foram submetidas ao processo de usinagem eletroquímica com e sem mascaramento. As geometrias, inspiradas nos estudos de SEGU (2015), foram constituídas por círculos e elipses. Através da medição pelo perfilômetro Taylor Robson e análise pelo software Mountains Map Universal® (versão 3.0.1), os valores de profundidade e largura das texturas em função da geometria simples ou composta, tempo de exposição ao eletrólito e de textura foi realizada por usinagem eletroquímica com mascaramento (TMEMM) ou sem (MECT), em um sistema com corrente pulsada em tensão constante de 30 V.

Analisando a Figura 4.1, observa-se os perfis médios das texturas realizadas pelo método sem mascaramento e com proteção do cátodo para o tempo de 30 segundos, mensurados pelo perfilômetro de contato.



(a)



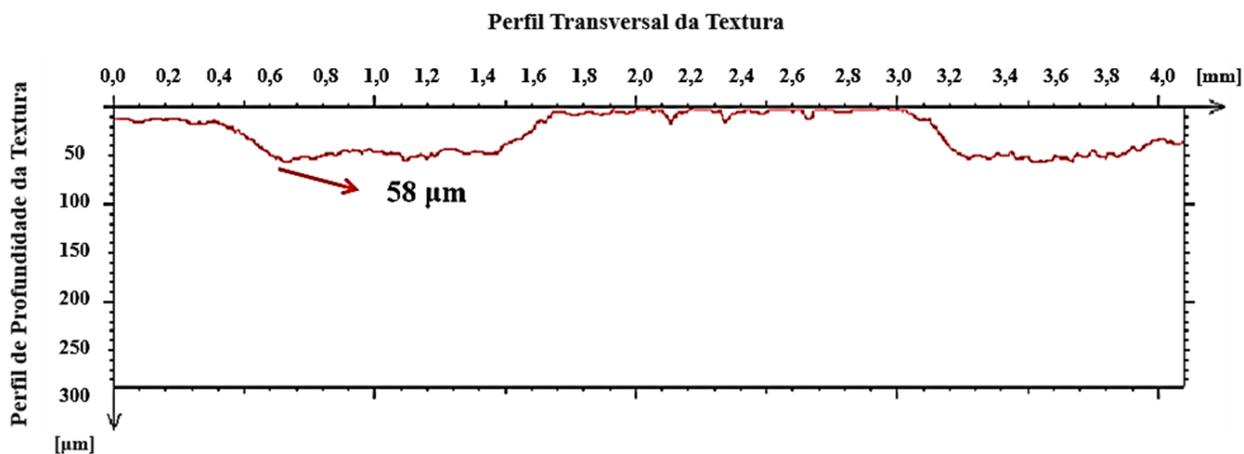
(b)

Figura 4.1 – Perfil de profundidade da textura simples formada em 30 segundos por processo (a) sem e (b) com mascaramento. Os valores indicam a máxima altura.

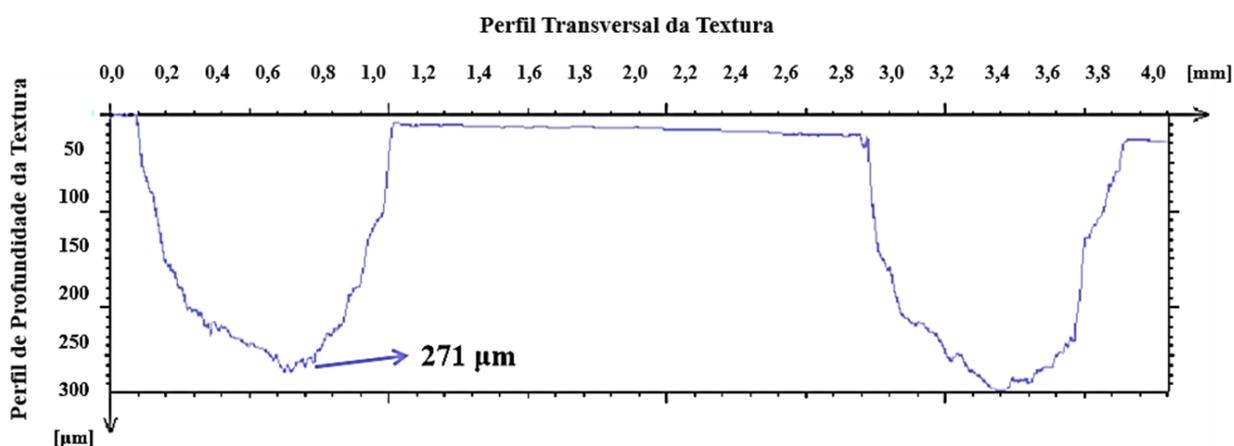
Pela imagem acima, constata-se que para a amostra submetida ao processo MECT, a largura média do bolso foi de 1,6 μm e profundidade máxima de 95 μm. Neste gráfico nota-se também que não houve homogeneidade de forma entre as duas seções desta amostra.

Semelhante ao caso anterior, as texturas fabricadas pelo processo de usinagem eletroquímica com mascaramento, não permitiram certa padronização em tamanho e forma dos dois perfis na mesma seção. De modo geral, ambas as metodologias atingiram condições semelhantes de profundidade e largura para um mesmo tempo de exposição.

A Figura 4.2 mostra os perfis médios das texturas com geometria simples, realizadas pelo método sem mascaramento e com proteção do cátodo para o tempo de 45 segundos, mensurados pelo perfilômetro de contato.



(a)



(b)

Figura 4.2 – Perfil de profundidade da textura simples formada em 45 segundos por processo (a) sem e (b) com mascaramento. Os valores indicam a máxima altura.

Em relação a repetibilidade dos perfis em termos de forma e largura médios, ambas as metodologias, conforme visto pela Figura 4.2, tiveram maior padronização que no tempo de 30 segundos de ensaio.

Diferente do caso anterior, houve uma discrepância de até 79%, em que o caso TMEMM obteve uma largura próxima de 1,0 mm e bolsos com formas mais estáveis e profundidade máxima de 271 μm. Enquanto o MECT obteve uma largura maior e profundidade de quase cinco vezes menor.

A Figura 4.3 apresenta os perfis médios das texturas com geometria simples, realizadas pelo método sem mascaramento e com proteção do cátodo para o tempo de 60 segundos, mensurados pelo perfilômetro de contato.

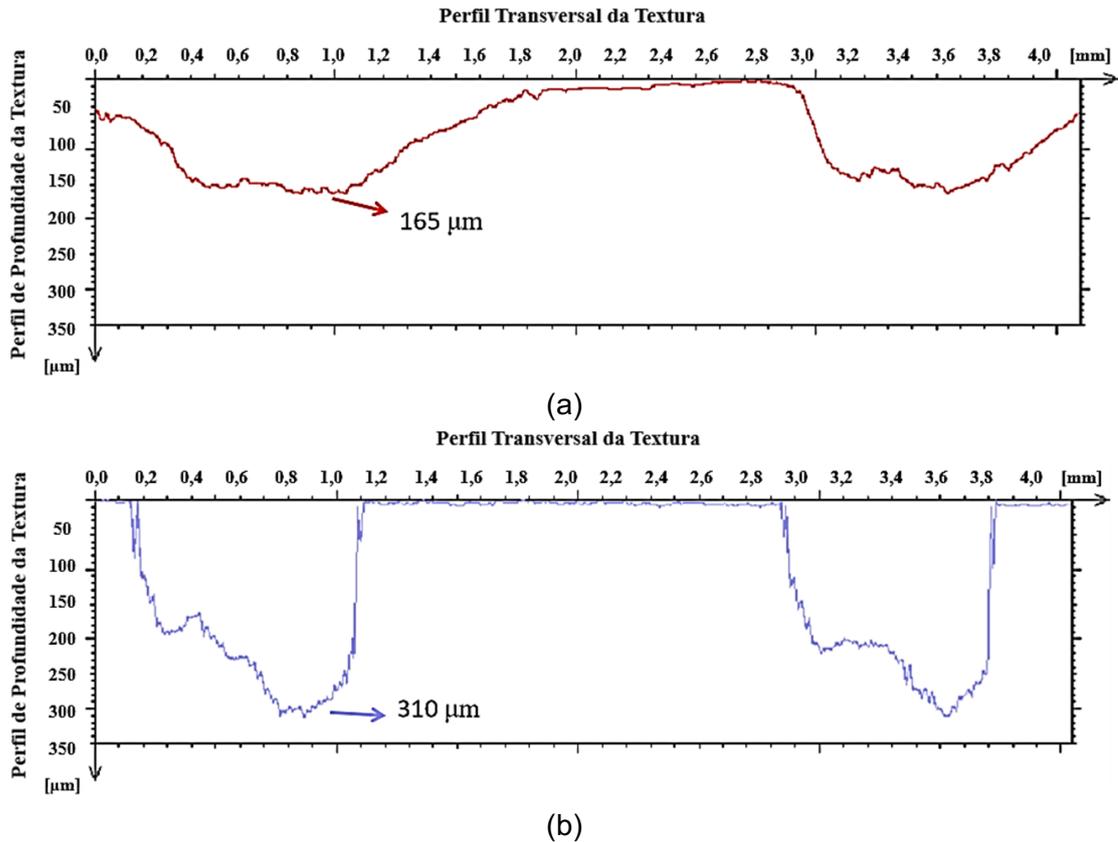


Figura 4.3 – Perfil de profundidade da textura simples formada em 60 segundos por processo (a) sem e (b) com mascaramento. Os valores indicam a máxima altura.

Para o caso acima com tempo de 60 segundos com texturas simples, o caso MECT aumentou sua largura para 1,8 mm e profundidade máxima de 165 μm . Contudo o perfil TMEMM se mostrou mais estável e com uma profundidade de quase duas vezes maior que o caso anterior.

A Figura 4.4 faz uma síntese dos resultados médios de profundidade das amostras com texturas simples para os três tempos estudados.

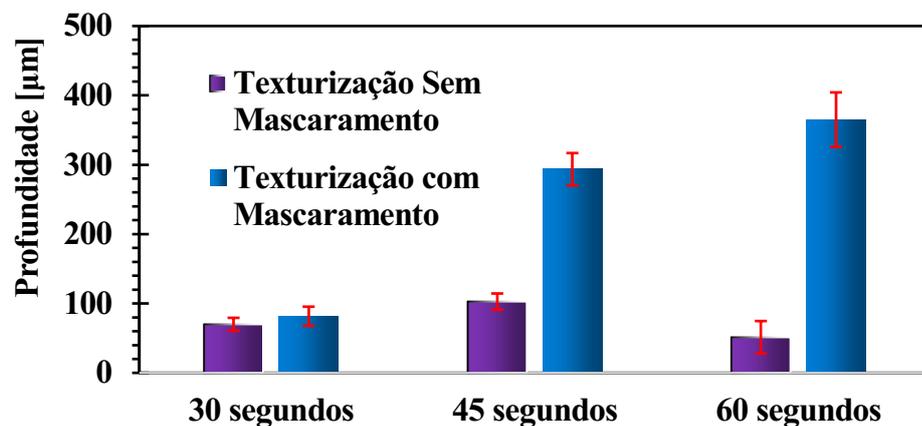
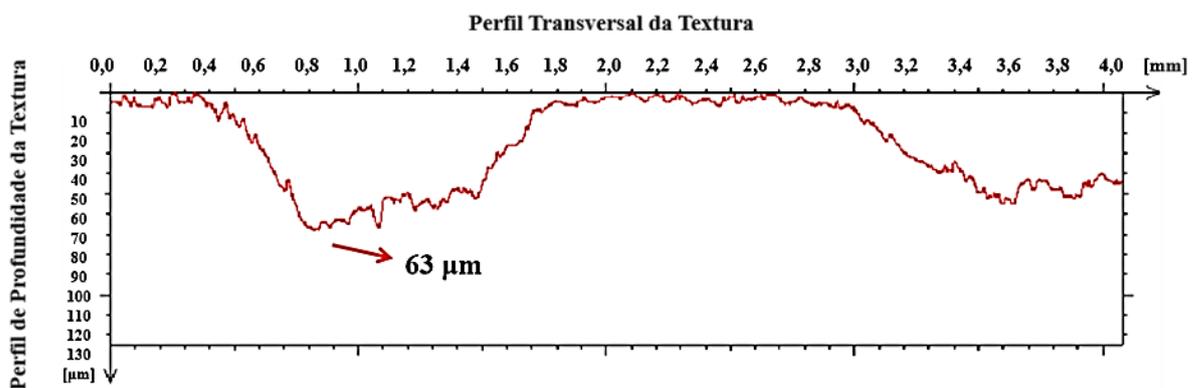


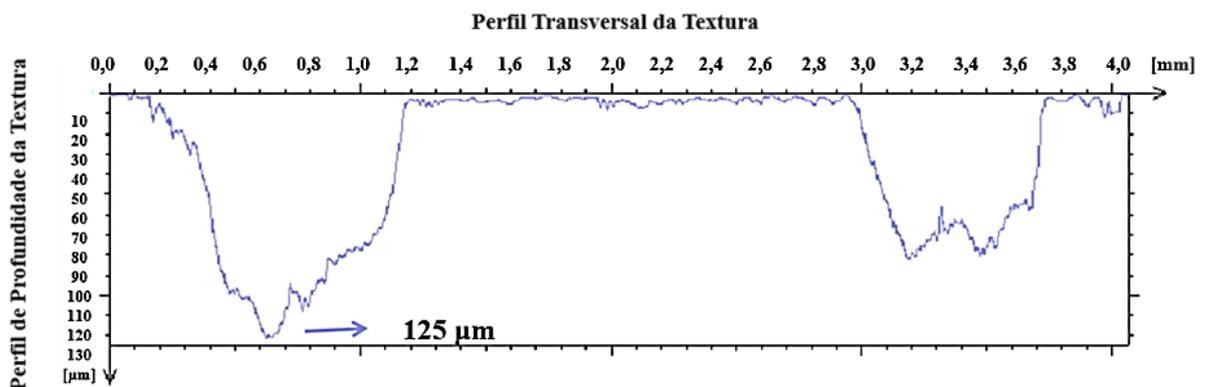
Figura 4.4 – Medidas das profundidades das texturas com geometria simples.

Na Figura 4.4, observa-se que independentemente dos tempos de ensaio, o processo com mascaramento se mostrou mais eficiente, permitindo maior profundidade usinada em função do tempo. Este resultado se mostra consoante a Lei de Faraday Equação (2.3) e com os resultados apresentados por Parreira (2015) e Rodrigues (2017) nos quais a quantidade de material removida é diretamente proporcional ao tempo de contato do eletrólito submetido em um campo eletromagnético adequado. Nesse caso, a reação de corrosão se deu com maior estabilidade, fazendo com que a solução salina fosse mais eficiente na área descoberta da máscara.

Para geometria composta de texturas, também foram realizadas perfilometria de contato, e na Figura 4.5 é possível analisar os perfis médios das texturas com geometria composta, realizadas pelo método sem mascaramento e com proteção do cátodo para o tempo de 30 segundos.



(a)



(b)

Figura 4.5 – Perfil de textura composta formada em 30 segundos por processo (a) sem e (b) com mascaramento. Os valores indicam a máxima altura

Pela imagem acima, nota-se que nenhum dos perfis se mostrou estável em sua geometria. O caso MECT obteve uma largura média de 1,2 mm, como no primeiro perfil da Figura 4.5b, mas obteve uma profundidade 50% menor que o caso com mascaramento.

A Figura 4.6 mostra os perfis das texturas com geometria composta, realizadas pelo método sem mascaramento e com proteção do cátodo para o tempo de 45 segundos.

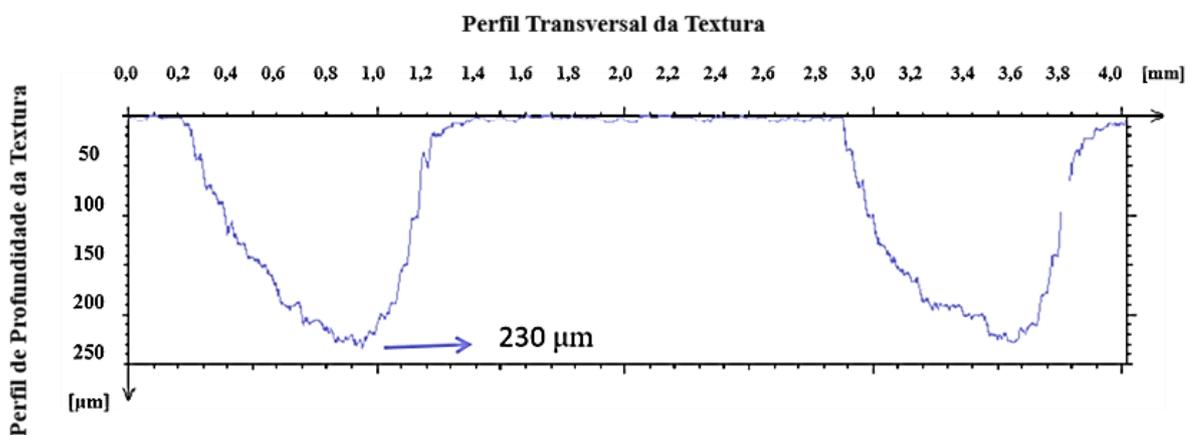
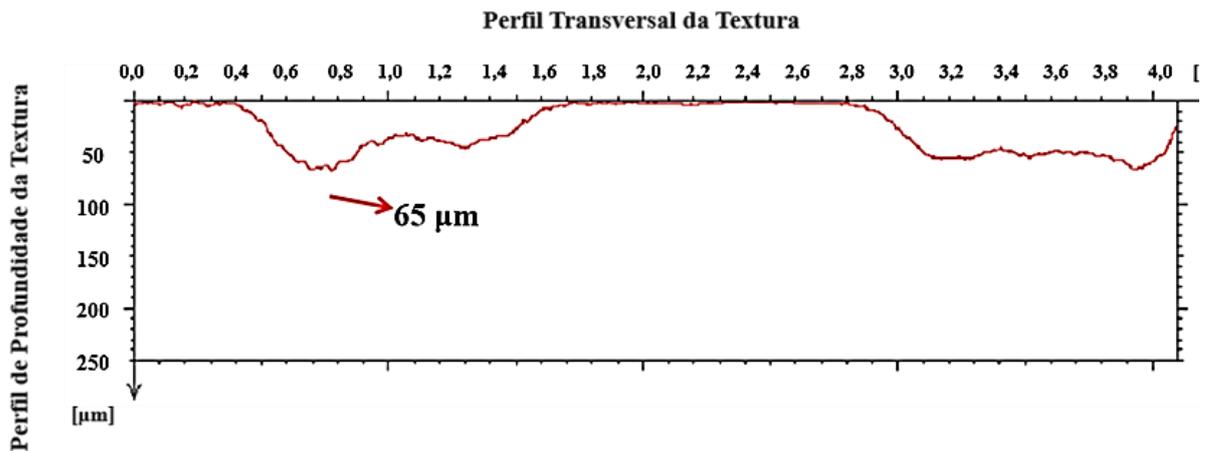
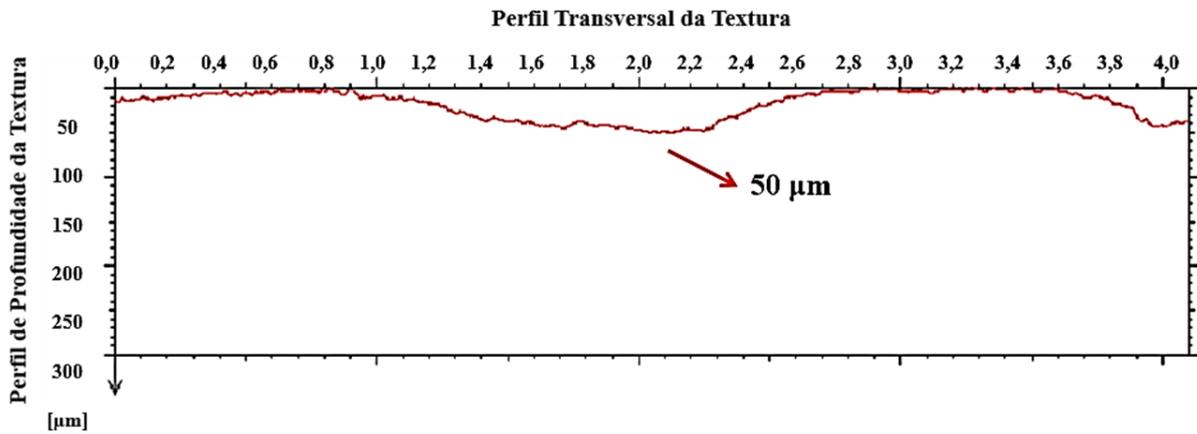


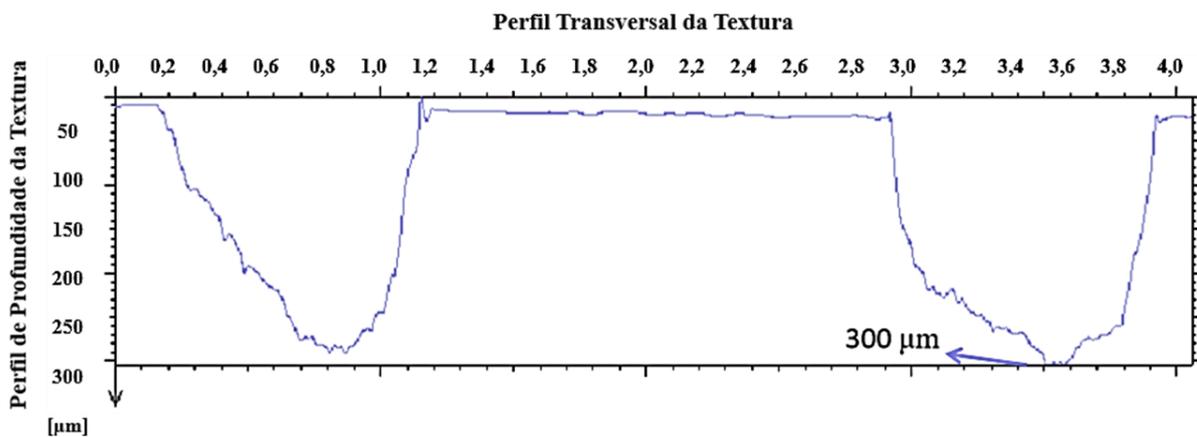
Figura 4.6 – Perfil de textura composta formada em 45 segundos por processo (a) sem e (b) com mascaramento. Os valores indicam a máxima altura.

Diferente do caso anterior, o caso MECT não teve sua profundidade média alterada com o aumento de tempo de 15 segundos. Mesmo existindo valores semelhantes nos eixos y, as amostras texturizadas com mascaramento TMEMM, tiveram bolsos com formas mais estáveis e profundidade máxima de 230 μm .

Observa-se na Figura 4.7, os perfis médios das texturas com geometria composta, realizadas pelo método sem mascaramento e com proteção do cátodo para o tempo de 60 segundos.



(a)



(b)

Figura 4.7 – Perfil de textura composta formada em 60 segundos por processo sem (a) e com mascaramento (b). Os valores indicam a máxima altura.

Para o caso acima, com tempo de 60 segundos com texturas simples, o MECT gerou um perfil raso, com profundidade máxima de 50 μm . O perfil TMEMM se mostrou mais estável e com uma profundidade de quase seis vezes maior que o caso anterior.

A Figura 4.8, sintetiza os resultados médios de profundidade das amostras com texturas composta para os três tempos estudados.

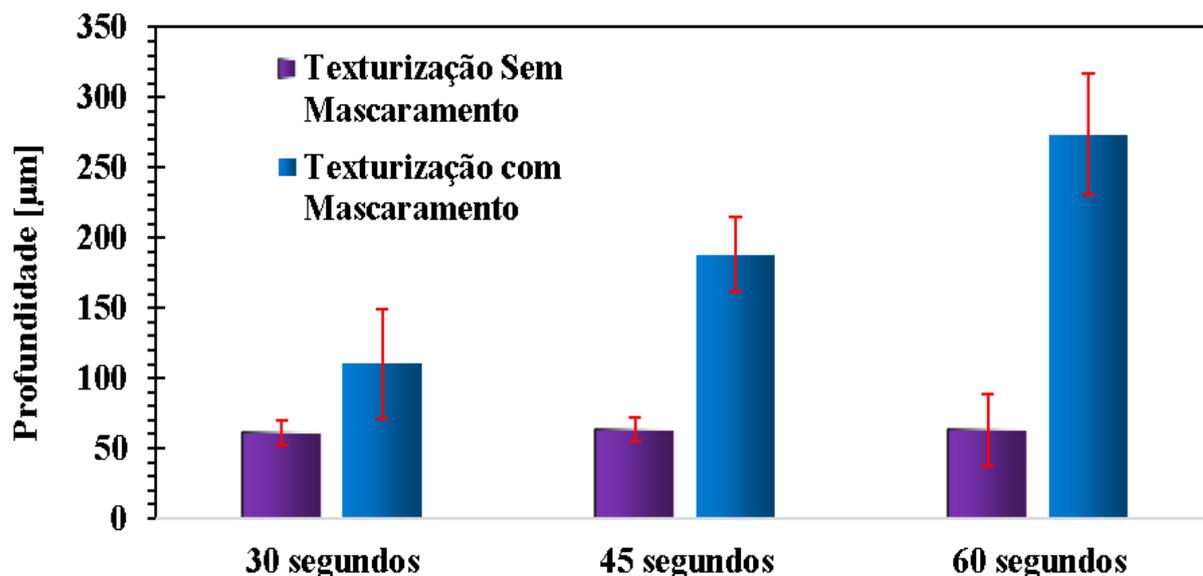


Figura 4.8 – Medidas das profundidades das texturas com geometria composta.

De acordo com a Figura 4.8, de modo semelhante ao caso da geometria simples, o processo com mascaramento se mostrou mais estável, em conformidade com o modelo eletromagnético de Faraday (Tópico 2.4, Equação (2.3)) e houve uma maior remoção de material em função do tempo de fluxo eletrônico entre o par eletroquímico.

Com relação ao método MECT, apesar da complexidade de parâmetros envolvidos no processo de corrosão forçada utilizado (presença superficial de óxidos, contaminantes entre os eletrólitos, corrente e tensão elétricas não constantes), a diferença entre a rugosidade do par eletroquímico e da máscara com a ferramenta e a influência do adesivo interferiram no processo de forma significativa. O isolamento do cátodo (MECT) não proporcionou um potencial de oxidação constante no ânodo e uma maior usinagem com maior exposição do eletrólito. Esse fato pode ser entendido pela interação da máscara com a ferramenta, que não proporcionou um espaçamento adequado para o processo MECT, tanto para geometria simples quanto para a composta, principalmente, nos tempos maiores (45 e 60 segundos).

Para os casos estudados neste trabalho o valor médio de Λ_1 foi de $1,25 \times 10^{-3}$. Conforme a Figura 2.27, os valores entre 0,10 e 0,18 tem o maior potencial para menores valores de força de atrito para amostras texturizadas.

Buscando seguir o critério de Ronen (2001), foram avaliadas as razões RPL para os casos estudados, isto é, texturização com geometrias simples (Figura 4.9) e compostas (Figura 4.10) e se seus valores possuem potencial para os ensaios tribológicos, conforme a metodologia da literatura.

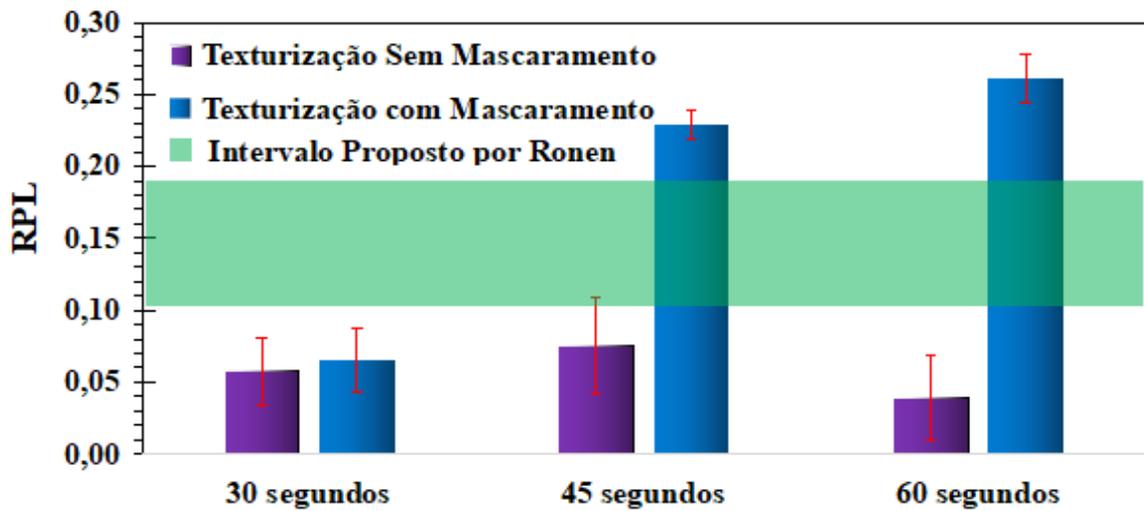


Figura 4.9 – Medidas da relação profundidade/largura das texturas com geometria simples.

Dentro do intervalo de RPL, as amostras de geometria simples não atingiram os valores sugeridos pela literatura, em nenhum dos tempos ensaiados. Os resultados extrapolaram a faixa para o caso das texturas fabricadas com mascaramento da amostra, para tempos superiores a 45 segundos, o que motivou a realização de ensaios entre 30 (cujos valores de RPL foram 0,05 em média) e 45 segundos, mais especificamente em 40 segundos. Para o caso MECT, ao contrário do esperado, em que quanto maior o tempo de exposição maior deveria ser o RPL, não houve variação deste com o acréscimo de 15 segundos dos tempos de 30 e 45.

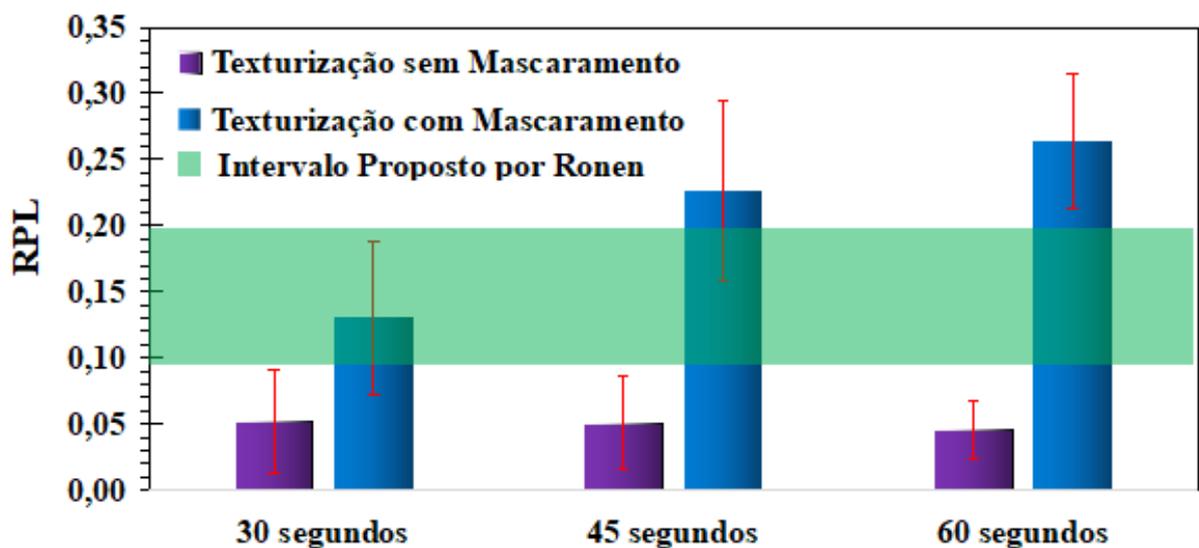


Figura 4.10 – Medidas da relação profundidade/largura das texturas com geometria compostas.

Semelhante aos resultados das texturas simples, os valores de RPL das amostras usinadas por MECT não mostraram conformidade com a Lei de Faraday, ou seja, não foi observada a corrosão dos bolsos em função do tempo. Para tempos de 30 e 45 segundos nas amostras texturizadas com mascaramento, contudo, os resultados se mostraram adequados aos valores de RPL com maior potencial tribológico segundo Ronen (2001). Para padronizar o tempo de texturização para ambas as geometrias, foi fixado tempo de 40 segundos.

A síntese com todos os valores de RPL dos ensaios deste projeto, foram catalogados na Tabela 4.1 em função dos parâmetros de geometria, tempo, tipo de texturização e razão Profundidade – Largura dos bolsos formados.

Tabela 4.1 – RPL das amostras ensaiadas nos tempos de 30, 45 e 60 segundos.

Geometria	Tempo	Tipo de Texturização Eletroquímica	RPL
Simples	30 segundos	MECT	0,0573 ± 0,0240
		TMEMM	0,0652 ± 0,0296
	45 segundos	MECT	0,0754 ± 0,0334
		TMEMM	0,2289 ± 0,0105
	60 segundos	MECT	0,0396 ± 0,0296
		TMEMM	0,2613 ± 0,0167
Composta	30 segundos	MECT	0,0521 ± 0,0389
		TMEMM	0,1305 ± 0,0580
	45 segundos	MECT	0,0504 ± 0,0351
		TMEMM	0,2261 ± 0,0677
	60 segundos	MECT	0,0465 ± 0,0219
		TMEMM	0,2641 ± 0,0507

Analisando os resultados obtidos acima, é possível concluir que nenhuma das amostras texturizadas pelo método MECT se mostrou adequada para ensaios lubrificados. Para texturas mais adequadas, sugere-se máscaras com acabamento de maior resolução, maior adesão desta com o cátodo e maior controle do espaçamento entre peça e ferramenta, cujos fatores podem não ter se tornado estáveis durante os testes, durante o processo MECT.

Deste modo, com o intuito de melhorar a eficiência tribológica dos mancais estudados, foi fixado o parâmetro ótimo de tempo de texturização em 40 segundos com amostras mascaradas em seu ânodo, estes resultados se encontram na Figura 4.11.

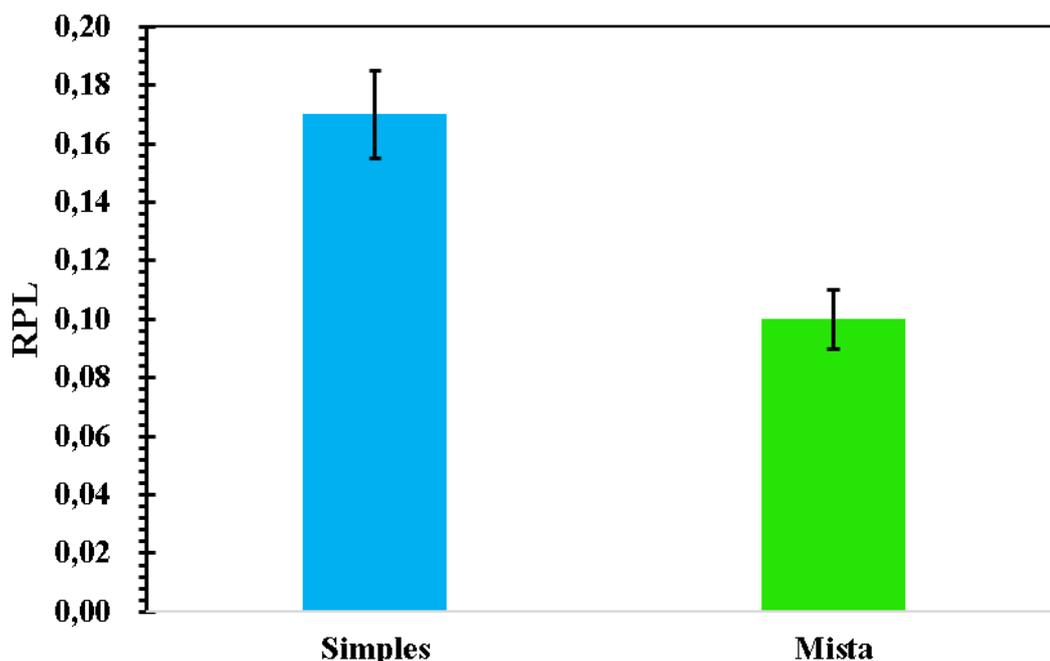


Figura 4.11 – Medidas da relação profundidade/largura das texturas em tempo de 40 segundos formadas pelo processo de texturização com mascaramento.

De acordo com o gráfico, as amostras formadas usando o tempo de 40 segundos se mostraram adequadas para ensaios de lubrificação. Os autores consideram que os resultados (Tabela 4.2) estão em conformidade com os resultados apresentados para amostras texturizadas. Somente as amostras texturizadas com mascaramento foram utilizadas para os ensaios tribológicos bloco sobre anel, cujos resultados serão descritos no tópico a seguir.

Tabela 4.2 – Valores de RPL para o tempo de 40 segundos.

Tipo de Texturização	Geometria	RPL
Eletróquímica	Simples	0,17 ± 0,03
	Composta	0,10 ± 0,02

Conforme a Tabela 4.2, é possível inferir que as amostras com textura simples e compostas (Figura 4.12) atingiram valores satisfatórios de RPL. Deste modo, este foi o tempo de texturização escolhido para realização dos testes lubrificados, de modo a atingir os melhores valores de atrito e desgaste.

Através da interferometria com luz vermelha foi possível medir os perfis para a geometria simples (Figura 4.12) e composta (Figura 4.13) para o tempo selecionado de 40 segundos.

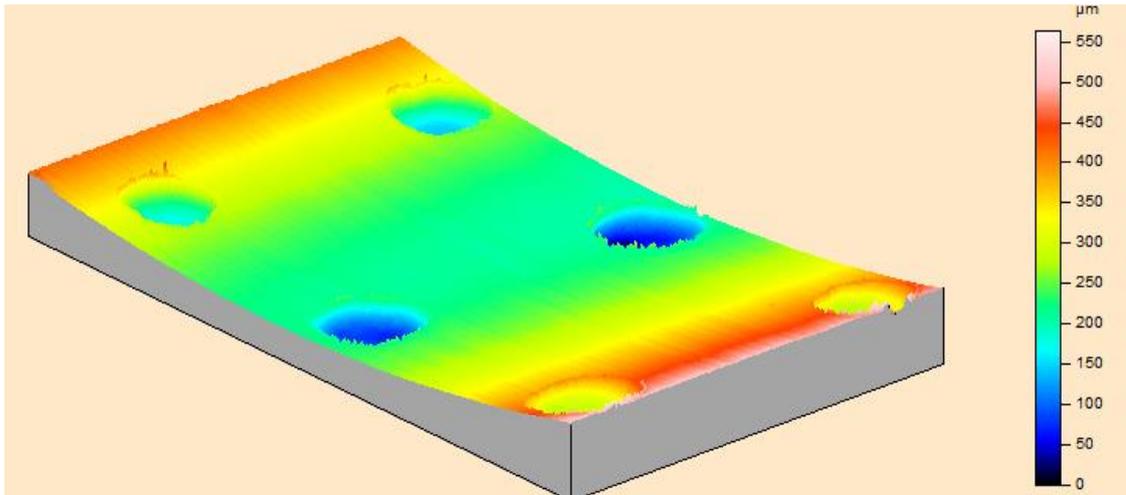


Figura 4.12 – Interferometria do perfil de Textura Simples selecionado.

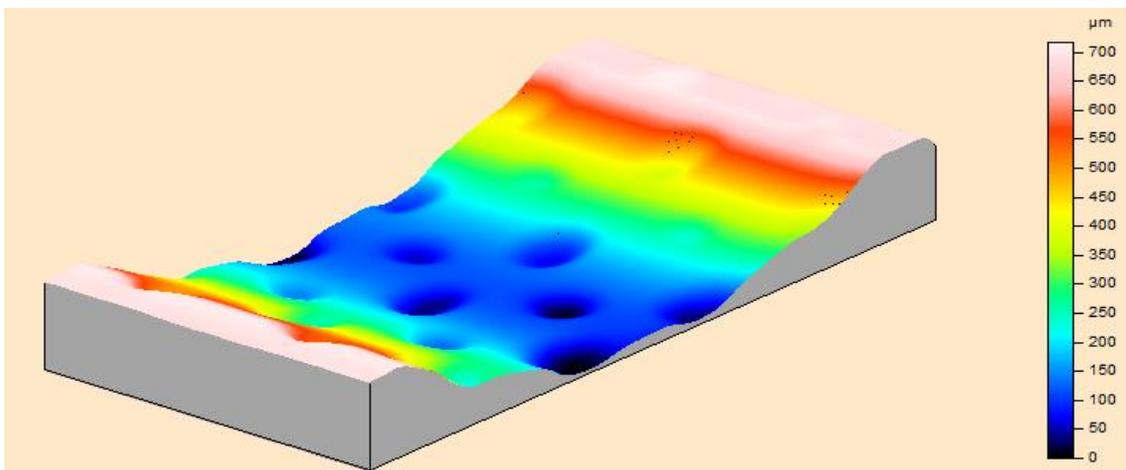


Figura 4.13 – Interferometria do perfil de Textura composta selecionado.

Além dos perfis de profundidade, foram mensurados os parâmetros de rugosidade quadrática média (R_q), curtose (R_{sk}), assimetria (R_{ku}) e fator de apoio (T_p). Também foram registrados os valores de profundidade reduzida dos vales (R_{vk}), parâmetro da curva de Abbot Firestone (Normalizado pela DIN ISO 13565 1 e 2) que indica a quantidade de superfície que absorverá a maior parte de lubrificante. Seus valores se encontram na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Valores de Parâmetros Topográficos das amostras utilizadas nos ensaios.

Parâmetro	R_q	R_{sk}	R_{ku}	R_{vk}	T_p
Sem Texturas	$1,08 \pm 0,14$	$-0,79 \pm 0,37$	$8,75 \pm 1,25$	$14,09 \pm 2,03$	$35,27 \pm 4,17$
Texturas Simples	$1,14 \pm 0,38$	$-1,15 \pm 0,34$	$4,29 \pm 1,16$	$53,81 \pm 12,02$	$54,05 \pm 2,57$
Texturas Composta	$0,92 \pm 0,26$	$-0,09 \pm 0,13$	$2,05 \pm 0,51$	$36,67 \pm 7,84$	$40,37 \pm 5,25$

Uma forma de analisar a qualidade do acabamento para rugosidades semelhantes, se faz pelo espaço morfológico (Figura 4.14). Este permite comparar processos de fabricação, como os que visam menor acabamento, e assim menor quantidade de picos proeminentes potenciais abrasivos, como a retificação e o brunimento.

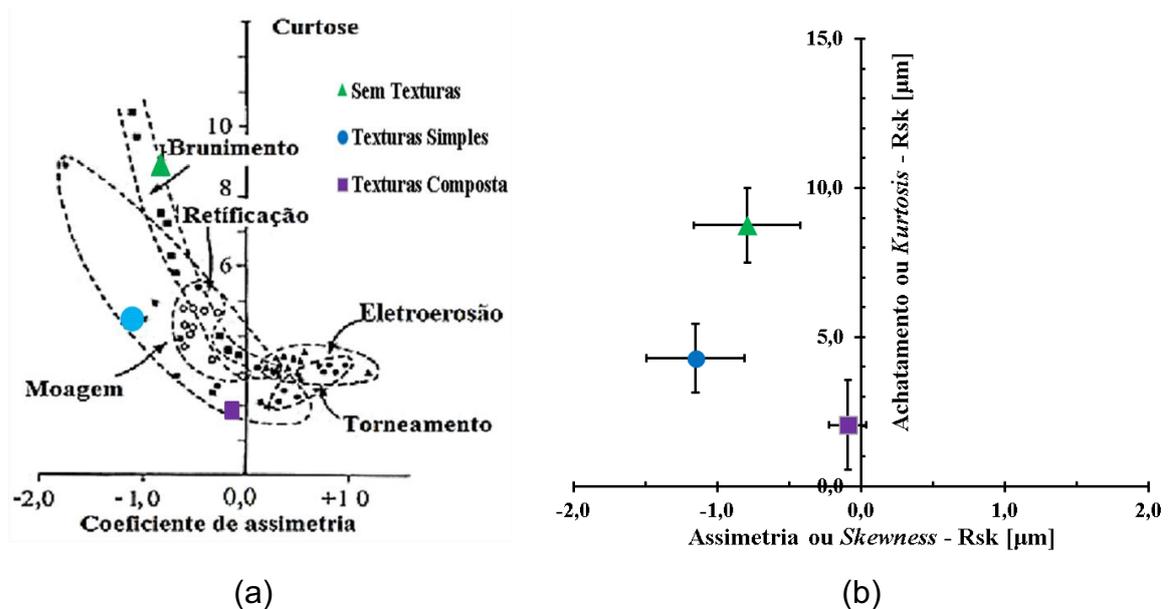


Figura 4.14 – Espaço morfológico Rsk x Rku de: (a) processos de fabricação (Adaptado de Horváth, 2014) e (b) das amostras ensaiadas

O espaço morfológico das amostras estudadas também foi construído, conforme Figura 4.14. A partir dele, quando se compara seus valores com os processos de fabricação, pode-se dizer que as amostras sem texturas se encontram na faixa dos sistemas de moagem, enquanto as texturas simples possuem acabamento semelhante ao brunimento.

Apesar de todas as amostras estarem na mesma faixa de rugosidade, as amostras com texturas simples tiveram valores mais negativos de Rsk que os demais, indicando menor presença de picos mais proeminentes que os demais. As amostras com texturas compostas tiveram valores de Rku mais próximos de um perfil Gaussiano ($Rku = 3$), mostrando um perfil mais bem distribuído, permitindo uma maior distribuição da carga por aspereza.

Além dos parâmetros de Assimetria e Curtose, para uma melhor análise do desempenho das superfícies e sua interação com o lubrificante e da superfície oposta carregada foram avaliados os parâmetros da curva de Abbot-Firestone, mais especificamente, a profundidade reduzida de vales e a razão portante, ou parâmetro T_p , conforme Figura 4.15.

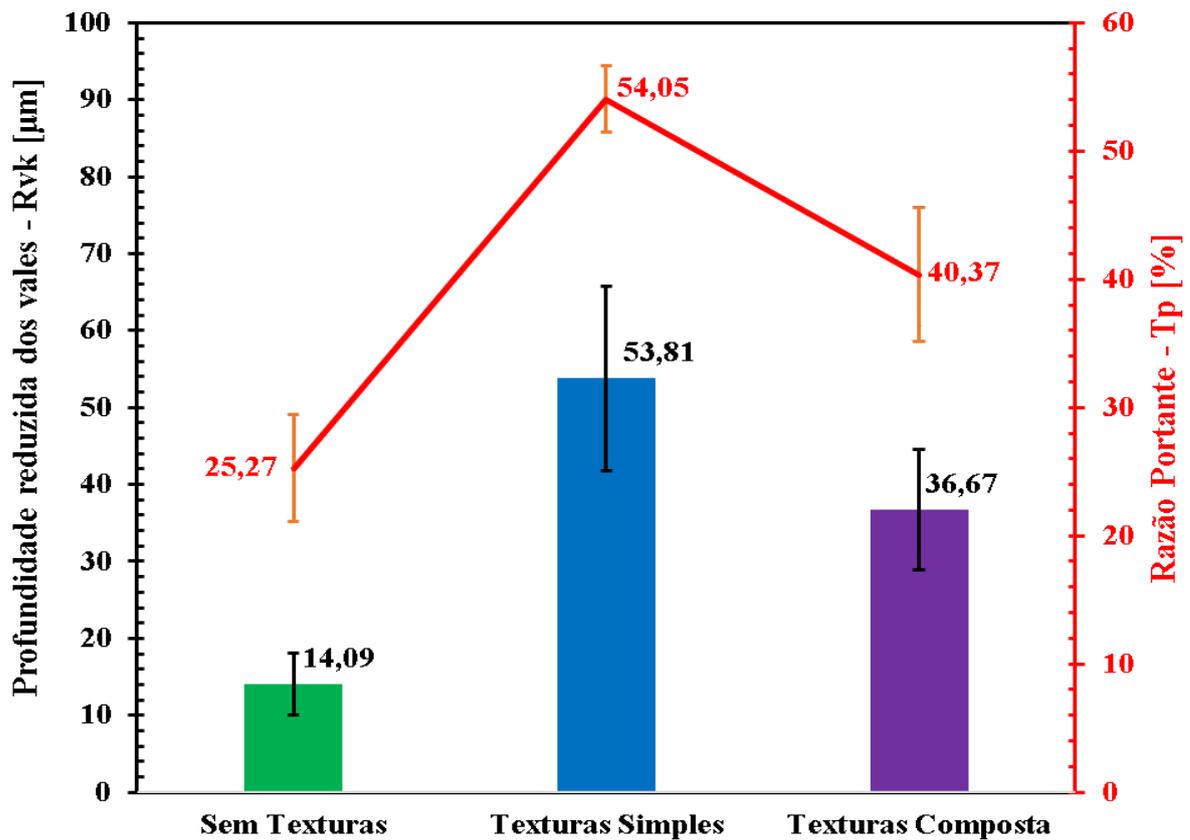


Figura 4.15 – Curva de valores Rvk e Tp das amostras estudadas.

A análise da Figura 4.15 mostra que as amostras com texturas simples, que obtiveram maiores regiões para acúmulo de lubrificante e uma maior quantidade de área útil a suportar o carregamento (Razão Portante Tp) relativo após a remoção das asperezas mais proeminentes no período inicial de trabalho. Neste existe uma remoção dos picos mais agudos, esta condição também é conhecida como amaciamento ou em inglês *Running in*. As amostras com texturas composta obtiveram resultados melhores que as amostras sem alteração topográfica, com valores de Rvk 62% maiores e Tp 37% superior as condições sem texturas.

4.2 Análise do Desempenho Tribológico de Amostras Texturizadas com Geometrias Simples, Compostas e sem Texturas

Nesta seção foram analisados os desempenhos tribológicos, no que tange aos valores de atrito para sistemas lubrificadas em questão.

Conforme explicado no tópico 2.3, o parâmetro λ permite estimar o regime de lubrificação que se encontra o contato, e assim construir curvas de tendências semelhantes a

Curva de Stribeck (Figura 4.16). Este foi calculado pela Equação (2.3), descrita na Seção 2.3, e seus valores estão descritos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Fator λ calculado para os sistemas estudados.

Parâmetro	Ausência de Texturas	Texturas Simples	Texturas compostas
Regime Limítrofe	0,56 ± 0,10	0,61 ± 0,23	0,92 ± 0,11
Regime Misto	2,07 ± 0,16	2,22 ± 0,07	2,13 ± 0,11
Regime Hidrodinâmico	3,60 ± 0,11	3,70 ± 0,08	3,62 ± 0,14

Os resultados apresentados na Tabela 4.4 mostram que a carga de 2004, 18 N combinado com as rotações do anel de 20, 40 e 100 rpm corresponderam aos respectivos regimes de lubrificação: Limítrofe ($\lambda < 1$), Misto ($1 > \lambda > 3$) e hidrodinâmico ($\lambda > 3$) (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017a). Dessa forma, foram definidos os parâmetros de velocidade e carga dos ensaios com o objetivo de avaliar o desempenho das texturas variando o regime de lubrificação.

O mesmo procedimento matemático para cálculo do Lambda permite a obtenção da espessura mínima de filme lubrificante para as três condições estudadas, seus valores estão na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Espessura de Filme Lubrificante das amostras em micrometros.

Parâmetro	Ausência de Texturas	Texturas Simples	Texturas compostas
Regime Limítrofe	1,57 ± 0,10	0,93 ± 0,23	0,97 ± 0,11
Regime Misto	2,13 ± 0,13	1,73 ± 0,07	1,41 ± 0,21
Regime Hidrodinâmico	4,56 ± 0,11	4,31 ± 0,08	4,10 ± 0,14

Através dos resultados apresentados na Tabela 4.5 pode-se dizer que independente da topografia, o aumento da velocidade de rotação, e assim a mudança de regime de lubrificação, gera uma maior espessura de filme entre o par tribológico anel e bloco. Destacam-se os valores dos perfis sem textura, que apresentaram os maiores valores em relação aos demais. Para a aplicação de mancais em questão, o uso de texturas com geometria composta e simples não geraram ganho significativo em separar as asperezas como no primeiro caso.

O Coeficiente de Atrito (μ) de cada condição foi calculado utilizando o sensor de força normal (célula de carga) acoplado ao tribômetro bloco sobre anel (Figura 3.15). Esses resultados foram apresentados pela curva de Stribeck (Figura 4.16), que relaciona μ e a razão entre a espessura mínima de filme (h_{\min}) e da média quadrática (σ) dos valores de rugosidade (R_q) dos sistemas estudados.

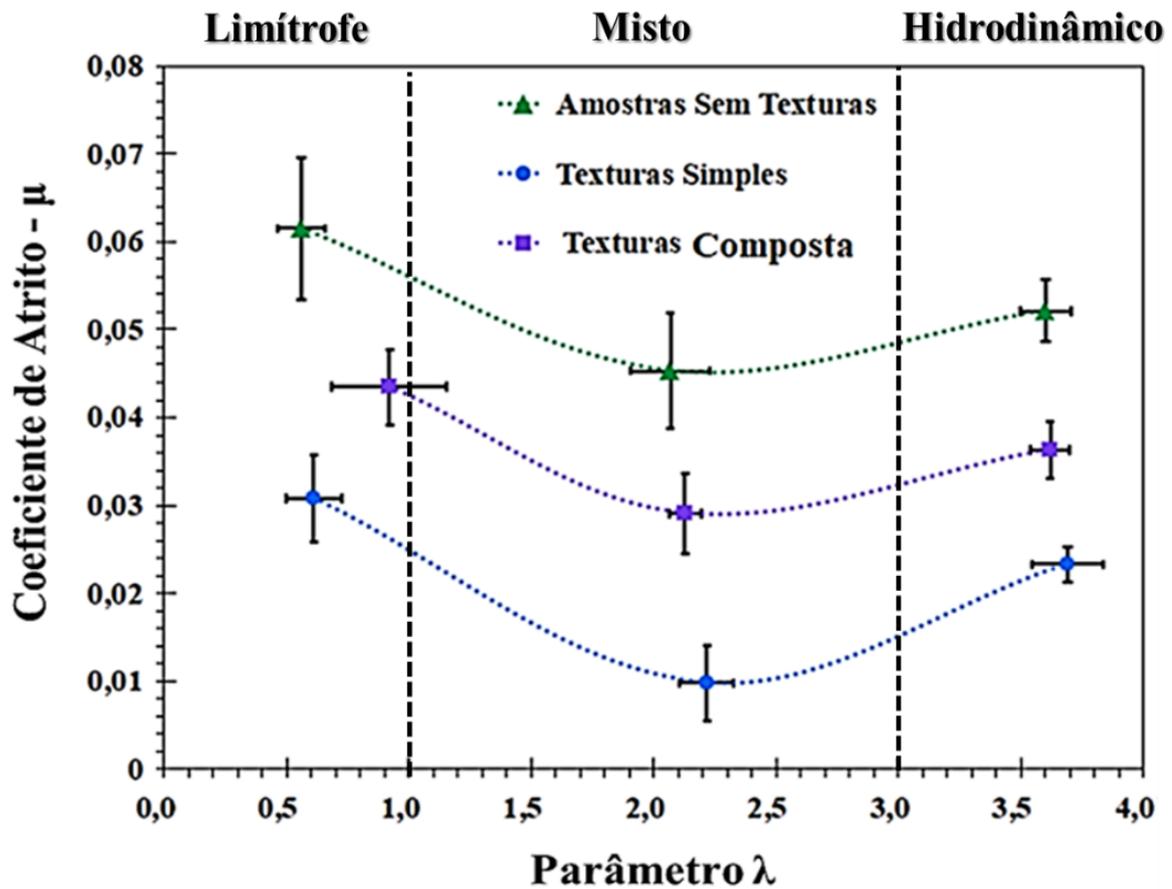


Figura 4.16 – Curva de Stribeck dos Ensaios realizados.

A partir desta curva se torna evidente os regimes de lubrificação e seus valores de atrito para cada condição topográfica. Nota-se que os menores valores de atrito foram para a condição mista de lubrificação, em especial para as amostras com texturas simples. Também o caso composto apresentou atrito mais baixo que as espécies sem alteração topográfica, mas não atingiu os valores da ordem de 10^{-3} em atrito como nos ensaios realizados por Segu e Hwang (2015).

Estão descritos os valores de atrito para cada condição de topografia e lubrificação estudados, na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Coeficientes de Atrito referentes aos sistemas tribológicos estudados.

Parâmetro	Ausência de Texturas	Texturas Simples	Texturas compostas
Regime Limítrofe	0,06 ± 0,01	0,03 ± 0,01	0,04 ± 0,01
Regime Misto	0,04 ± 0,01	0,01 ± 0,01	0,03 ± 0,01
Regime Hidrodinâmico	0,05 ± 0,01	0,03 ± 0,01	0,04 ± 0,01

A partir dos valores descritos acima será realizada uma análise comparativa em função do regime de lubrificação para cada condição topográfica. A análise referente aos mecanismos de desgaste será apresentada no tópico 4.3.

O Regime de lubrificação Limítrofe é caracterizado pela atuação de um filme parcial de lubrificante que leva a maiores níveis de contato das asperezas presentes nas superfícies em contato, e, conseqüentemente, a maiores níveis de dissipação de energia (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Ainda que esse contato ocorra através de monocamadas de aditivos, os maiores valores de coeficiente de atrito se encontram nesse regime de lubrificação, independente da topografia utilizada.

4.2.1 Regime de Lubrificação Limítrofe

Nos casos estudados, a condição de ensaio com texturas simples obteve os menores valores de coeficiente de atrito (0,308), sendo 52% menor que a condição não-texturizadas e 31% inferior que a topografia com texturas de geometria compostas (Figura 4.16).

Conforme estudos propostos por Dias (2021), a utilização de aditivos como ZDDP alinhados ao uso de texturas possuem grande potencial para resultados ainda menores de coeficiente de atrito. Estudos futuros podem avaliar a composição ideal e tipo de aditivos para as geometrias estudadas neste trabalho.

4.2.2 Regime de Lubrificação Misto

Os menores valores de coeficiente de atrito foram encontrados na condição de lubrificação Mista, independente da topografia utilizada. Esse regime se caracteriza pela transição entre os regimes limítrofe e hidrodinâmico, no qual o efeito da topografia e das propriedades do fluido afetam o comportamento do contato lubrificado e da espessura do filme lubrificante. Nesse caso o filme lubrificante formado é completo os valores de coeficiente de atrito são relativamente baixos, como mostrado na curva de Stribeck (Figura 4.16).

Assim como nos ensaios realizados na condição Limitrofe, o sistema com amostras texturizadas somente por bolsos circulares apresentou valores de coeficiente de atrito inferiores aos outros regimes de lubrificação. Nesse caso o desempenho é comparável a sistemas de que apresentam valores de coeficiente de atrito na ordem de $8,8 \cdot 10^{-3}$. Este é aproximadamente 74% menor que o sistema com amostras texturizadas compostas e até 83% menor que o sistema com acabamento não-texturizado

Para o regime em questão, devido a presença de contato mecânico entre asperezas, o uso de aditivos se mostra útil para redução de atrito e desgaste conforme estudos de SPIKES (2004). Aliando as geometrias em questão no regime misto, valores ainda menores de atrito podem ser atingidos conforme parametrização adequada, sendo um tópico para estudos futuros.

4.2.3 *Regime de Lubrificação Hidrodinâmico*

Descrito na seção 2.3, essa condição é mais dependente dos parâmetros de fluidodinâmica, gerando valores de atrito de acordo com a velocidade de rotação e temperatura. Nesse caso, a temperatura apresenta forte influência na resistência ao movimento do contato totalmente separado por fluidos, isto é, a viscosidade.

Em condições hidrodinâmicas, houve uma redução de 36% do coeficiente de atrito em comparação com a condição com amostras texturizadas de geometria simples. Em comparação com a condição com amostras não texturizadas, a redução foi de 9%.

Como esse regime é governado pelas equações de Reynolds, a mudança de lubrificantes com maior viscosidade aliados a velocidades e cargas proporcionais, podem permitir ao sistema valores menores de atrito para superfícies texturizadas em questão.

4.3 **Mecanismos de Desgaste**

Nesta seção foram analisadas imagens de MEV para cada condição nos modos elétrons secundários (fornecem informações sobre a topografia do material) e o de espectroscopia por energia dispersiva (EDS) que permitem analisar a composição química do ponto da superfície selecionado.

A Figura 4.17 mostra imagens de amostras submetidas às condições semelhantes em regime limítrofe de lubrificação.

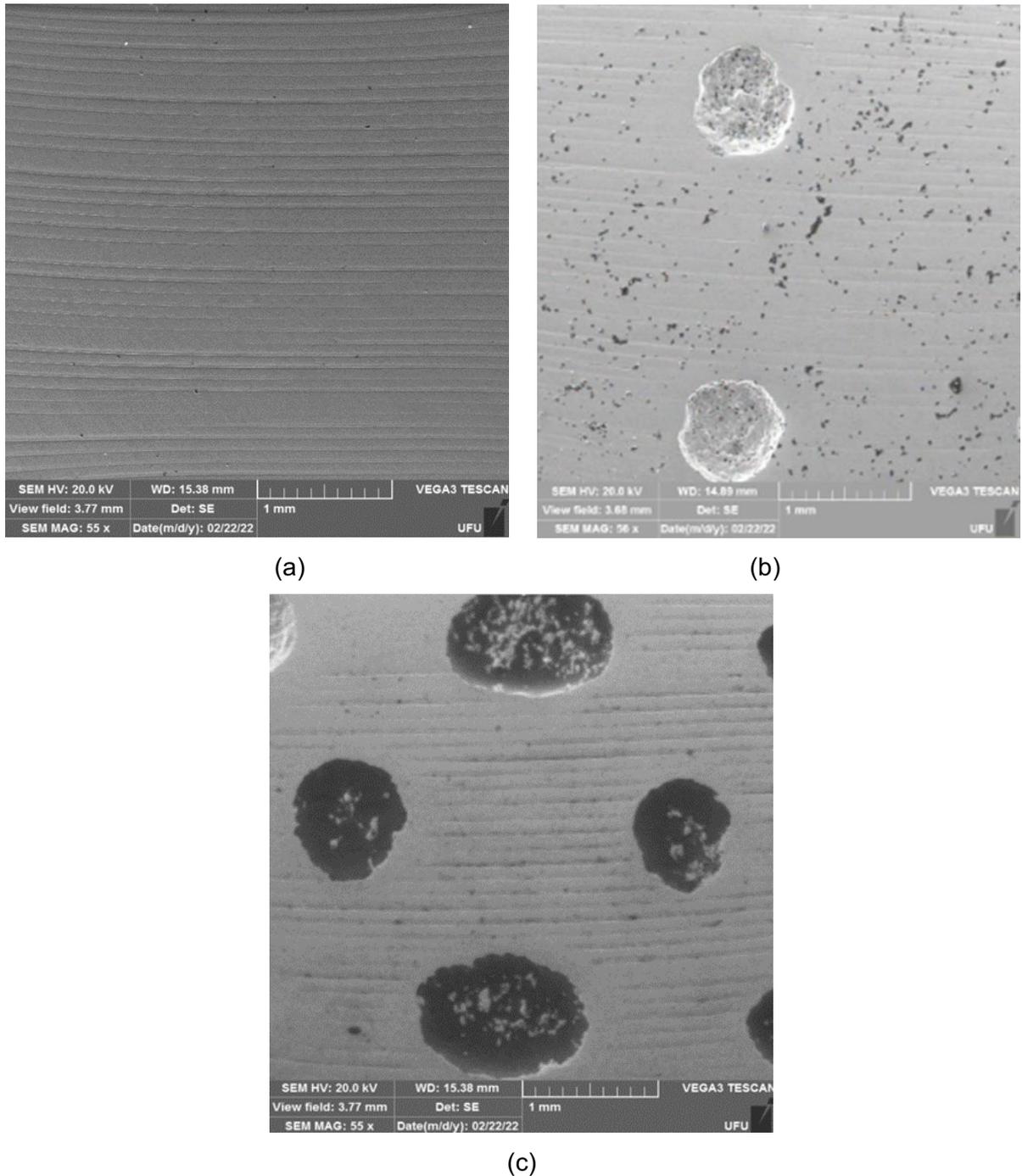


Figura 4.17 – Morfologia de amostras (a) não texturizadas, (b) com textura simples e (c) compostas, ensaiadas em regime limítrofe.

A imagem 4.17a apresenta significativas marcas de abrasão e ausência de óxidos (manchas) como ocorre na Figura 4.17b). Neste caso, além da menor presença de riscos, grande número de óxidos se encontra em sua superfície, conforme evidenciado pela Figura 4.19. Semelhante ao primeiro caso, a superfície da amostra com textura mista (Figura 4.17c), apresenta riscos sem pontos de óxidos.

Comparadas em mesma escala, as imagens podem ser analisadas do seguinte modo: as maiores marcas de abrasão (Figura 4.17a) e fratura (Figura 4.18), corroboram com os maiores valores de atrito observados pelas amostras não texturizadas em regime limítrofe. Neste cenário de maior dissipação de energia, mais formações de junções, adesão e arrancamento de material devem ter sido formados para essas amostras. Pela Figura 4.18, nota-se o arrancamento de parte do material com composição semelhante a área não fraturada, além de trincas originadas por fadiga superficial.

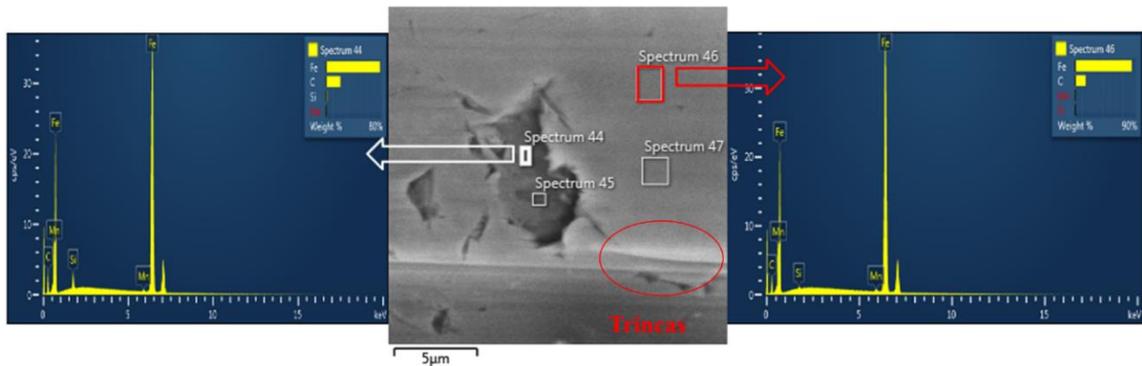


Figura 4.18 – Superfícies de amostra não texturizadas ensaiadas em regime limítrofe, com suas imagens de MEV e espectros de EDS.

As amostras com texturas simples (Figura 4.19b) foram as que apresentaram, dentro do regime analisado, a maior quantidade de óxidos em sua superfície, permitindo pontos de menor adesão devido a menor afinidade gerado pelo par cerâmico (óxido) – metal (aço 1045). Nota-se a presença de particulado no interior dos bolsos reduzindo a presença de partículas duras no contato. Ambas as explicações, corroboram com os menores valores de atrito observados para esta condição de topografia e lubrificação. A Figura 4.19 traz as imagens e espectros EDS das amostras com texturas simples.

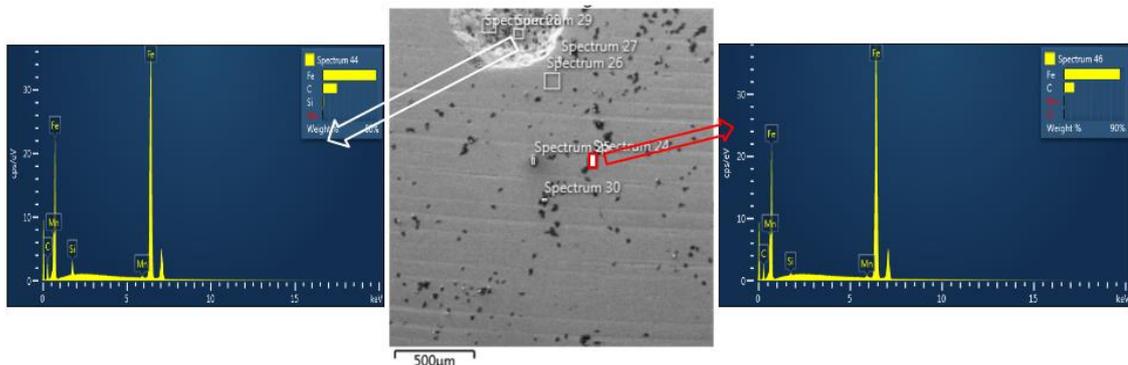


Figura 4.19 – Amostra com texturas simples em regime com suas imagens de MEV e espectros de EDS.

As superfícies texturadas com geometria compostas (Figura 4.20) possuem significativa quantidade de partículas no interior de seus padrões topográficos, mesmo assim foi observado desgaste abrasivo. Presença de particulado pode ser vista no interior dos bolsos a partir da Figura 4.20.

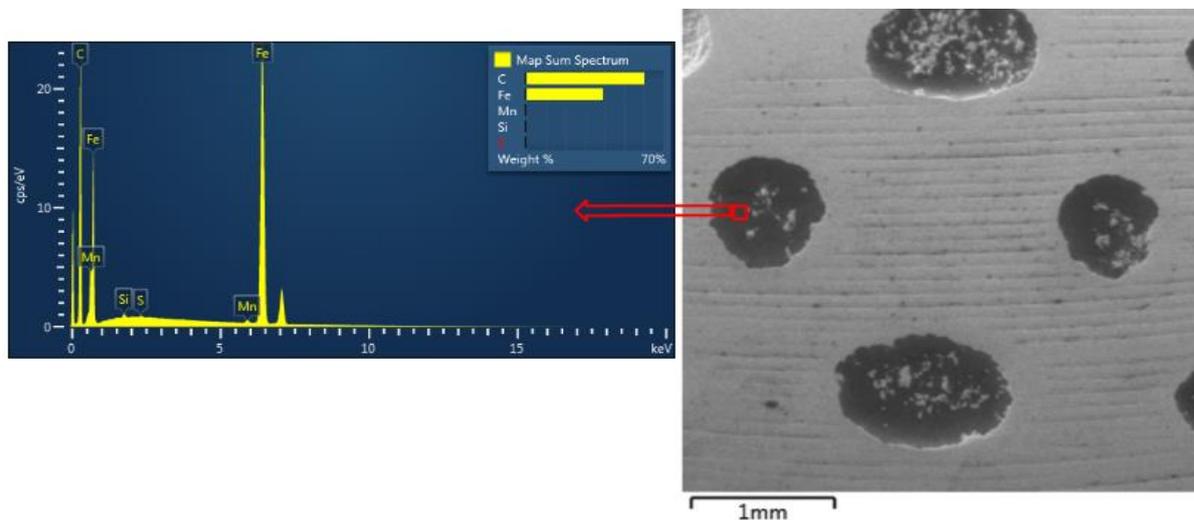
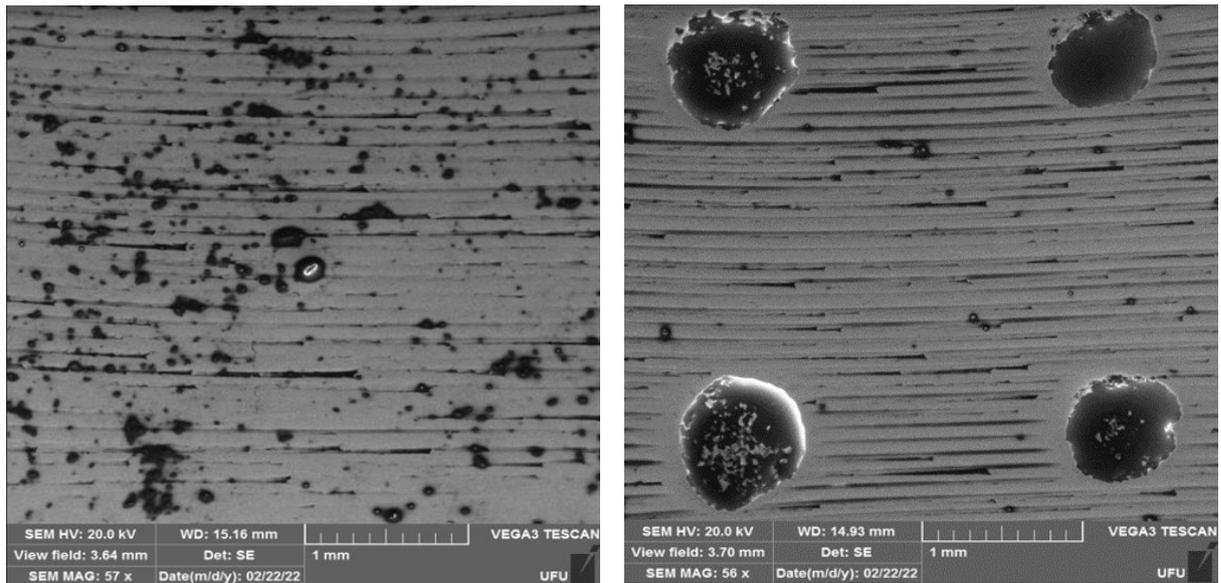


Figura 4.20 – Amostra com texturas compostas em regime limítrofe, com suas imagens de MEV e espectros de EDS.

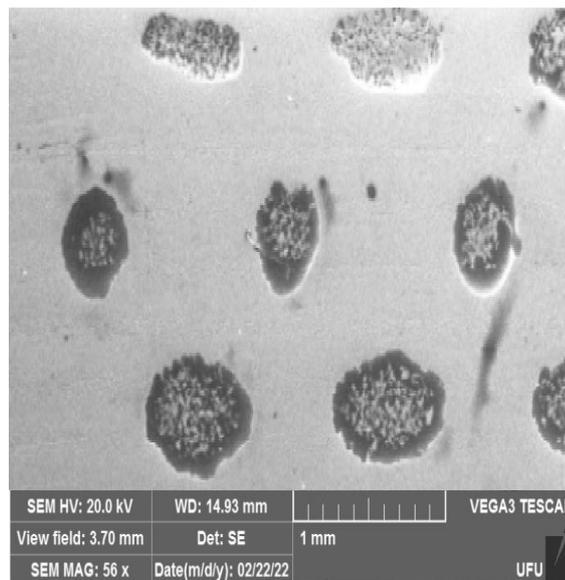
As marcas de abrasão juntamente com a quantidade de particulado, corroboram com a ideia de coeficientes de atrito maiores que a condição de geometria simples. As amostras texturizadas não possuíam marcas de trincas de fadiga como no caso descrito na figura 4.18. A partir disto, pelos casos estudados em regime limítrofe, pode-se afirmar que superfícies texturizadas possuem potencial de maior resistência para tensões cíclicas e pouca presença de filme lubrificante. Estes resultados podem ter somatizados aos efeitos dos aditivos presentes no óleo utilizado, esta análise não foi realizada nesta dissertação, mas todos os testes se utilizaram do mesmo reservatório, tornando as condições de ensaio semelhantes.

As amostras submetidas ao regime misto, tiveram muitas marcas de abrasão com exceção do caso com textura composta, conforme pode ser analisado pela Figura 4.21.



(a)

(b)



(c)

Figura 4.21 – Morfologia de amostras (a) não texturizadas, (b) com textura simples e (c) compostas, ensaiadas em regime misto.

O caso não texturizado, Figuras 4.21a e 4.22, possui a maior quantidade de tribofilme evidenciado pela imagem abaixo que indica maior espectro de Ferro em relação aos demais. Pelas marcas de abrasão, porém, este filme pode ter se desprendido da superfície gerando riscos significativos e atrito em maior quantidade que os demais.

Tem-se pela Figura 4.22, imagens por MEV e seu espectro de EDS, para uma amostra sem texturas em regime misto.

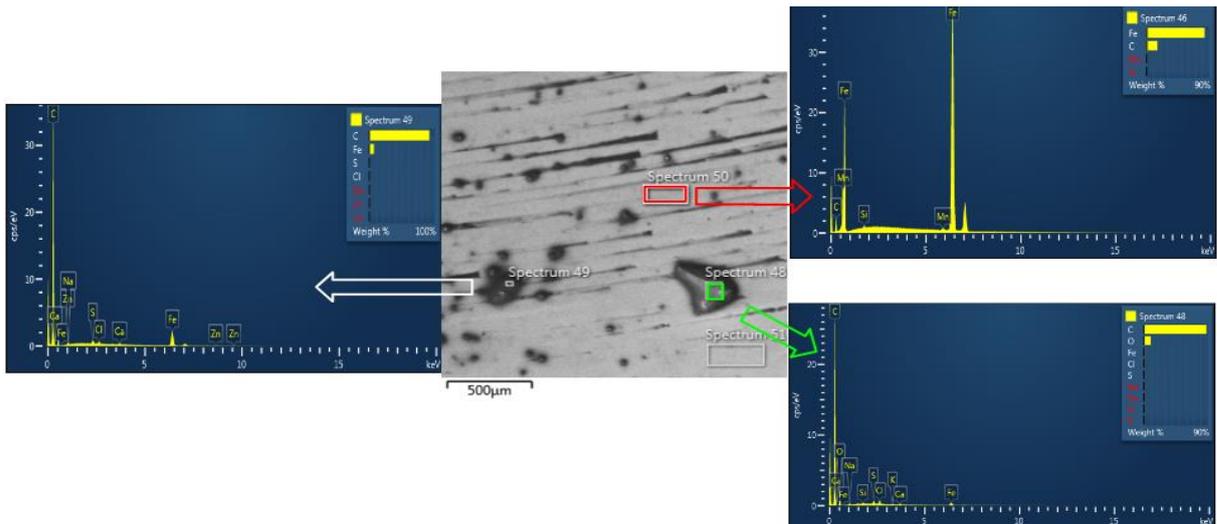


Figura 4.22 – Amostra não texturizadas ensaiadas em regime misto, com suas imagens de MEV e espectros de EDS

Conforme análise das Figuras 4.21b e 4.23, no caso texturizado somente por bolsos semiesféricos, aconteceu comportamento semelhante ao anterior, onde possivelmente, o particulado óxido gerou desgaste abrasivo. Pela imagem acima, a presença do carbono, apesar de poder ser quantitativa analisada, demonstra que houve presença de carbonetos (manchas escuras) que influenciaram no desempenho tribológico destas amostras. Conforme os resultados de atrito evidenciam, esse material espalhado, pode ter servido como um elemento intermediário de menor tensão cisalhante, facilitando o deslizamento entre as asperezas em contato, uma vez que o filme não é completo nesse regime (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017), gerando menores valores de atrito.

Tem-se pela Figura 4.23, imagens por MEV e seu espectro de EDS, para uma amostra com texturas simples em regime misto.

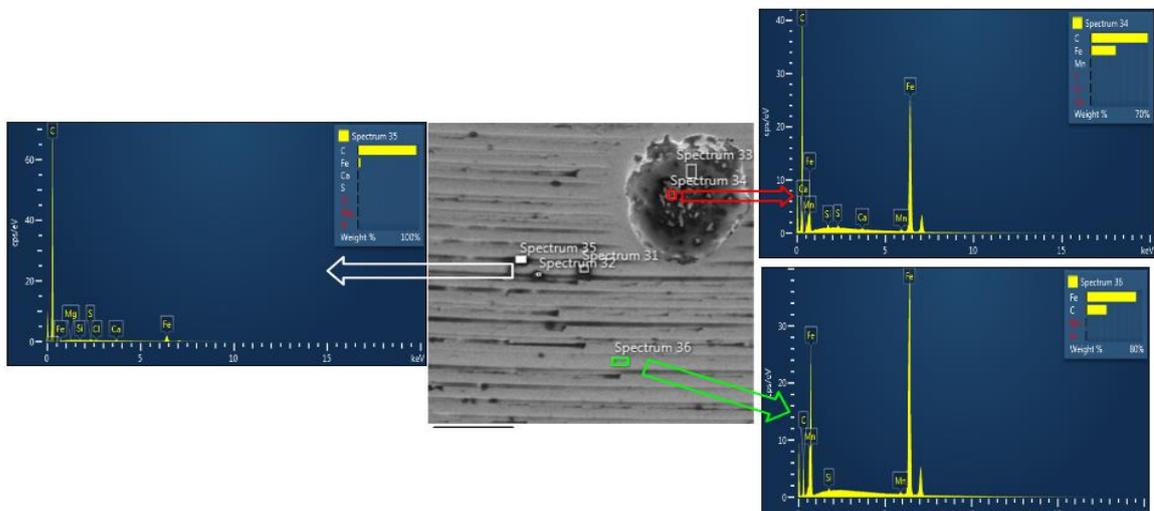


Figura 4.23 – Amostra com texturas simples obtidas em ensaios com regime misto, com suas imagens de MEV e espectros de EDS

Os gráficos acima evidenciam a presença de abrasão, assim como Figura 4.22 b, mas tem-se outra informação importante a presença de partículas de carbono, possivelmente encruadas e causadoras do desgaste por partículas duras evidenciado. Estas estão no interior dos bolsos, permitindo que o mecanismo de aprisionamento de debris (seção 2.3) tenha sido efetivo reduzindo o atrito no contato. Além disso, uma substância de coloração preta, também foi observada. Este tribofilme possivelmente foi formado da composição do carbono, que diferente do caso anterior, pode ter atuado como um facilitador do deslizamento das superfícies, evitando adesão, fratura e gerando os menores valores de atrito.

As texturas compostas (Figura 4.21c) porém, não geraram marcas significativas de abrasão pois, conforme Figura 4.24, boa parte dos debris foram retirados do contato e armazenados nos bolsos elípticos e circulares das amostras em questão. A ausência tribofilme, porém, não permitiu menores valores de atrito em condição mista de lubrificação.

Tem-se pela Figura 4.24, imagens por MEV e seu espectro de EDS, para uma amostra com texturas simples em regime misto, descritos no parágrafo anterior.

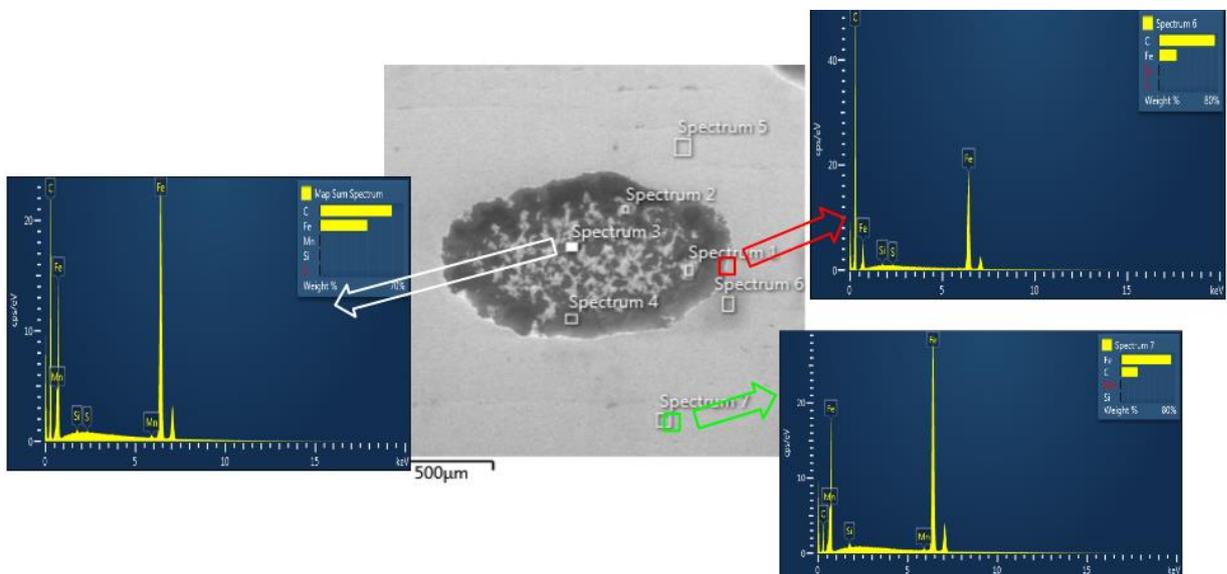
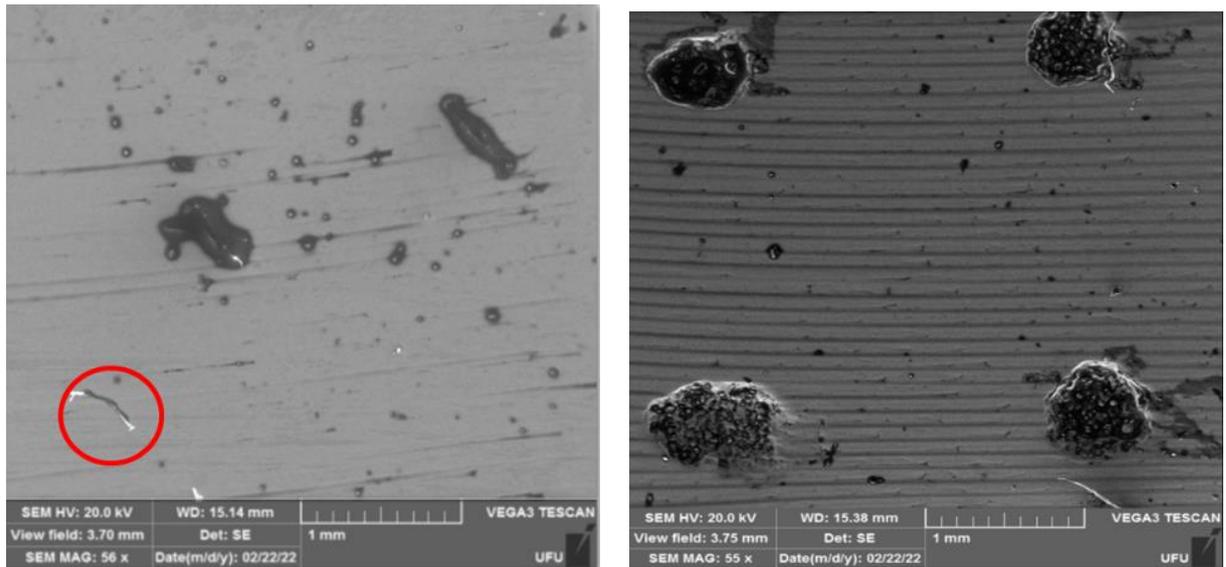


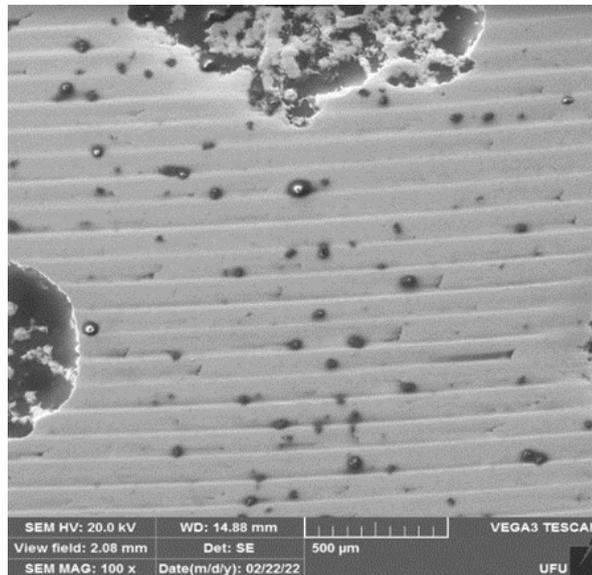
Figura 4.24 – Amostra com texturas compostas em regime misto, com suas imagens de MEV e espectros de EDS

A Figura 4.25 apresenta a análise da superfície obtida nos ensaios com formação de filme lubrificante completo, regime hidrodinâmico.



(a)

(b)



(c)

Figura 4.25 – Morfologia de amostras não texturizadas (a) não texturizadas, (b) com textura simples e (c) compostas, ensaiadas em regime hidrodinâmico.

A Figura 4.25 apresenta presença de óxidos (manchas) diferente de todos os outros casos. Para as amostras com texturas simples houve presença de riscos em sua superfície, conforme evidenciado pela Figura 4.25 b. Por fim, a superfície da amostra com textura mista (Figura 4.25 c), apresenta riscos, óxidos e particulado no interior dos bolsos.

Amostras não texturizadas apesar dos maiores valores de atrito, não obtiveram marcas abrasivas como as demais. Filmes de carbonetos (Figura 4.26) conferiram relativa resistência mecânica ao contato gerando resistência ao desgaste. Os mesmos, contudo, podem ser responsáveis pela maior dissipação de energia devido a sua origem cerâmica.

Tem-se pela Figura 4.26, imagens por MEV e seu espectro de EDS, para uma amostra sem texturas em regime hidrodinâmico.

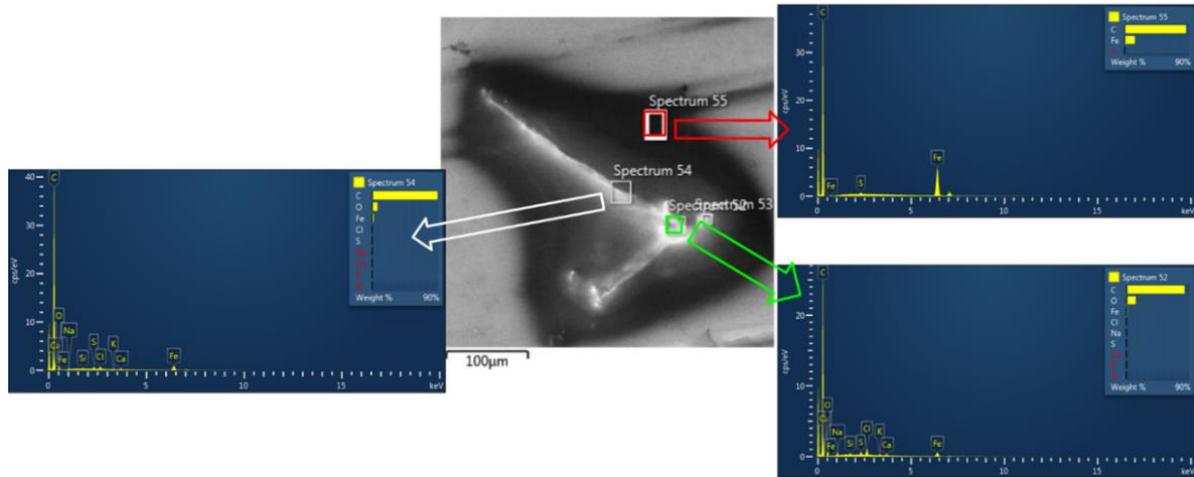


Figura 4.26 – Amostra não texturizada em regime hidrodinâmico, com suas imagens de MEV e espectros de EDS.

As texturas simples no caso hidrodinâmico geraram um contato com significativo número de debris. Estes apesar de serem contidos em parte pelos bolsos (Figura 4.27), se saturaram, aumentando a concentração de tensão no contato gerando oxidação próxima da textura e abrasão no contato como um todo.

A Figura 4.27 apresenta informações para uma amostra de textura simples em regime hidrodinâmico.

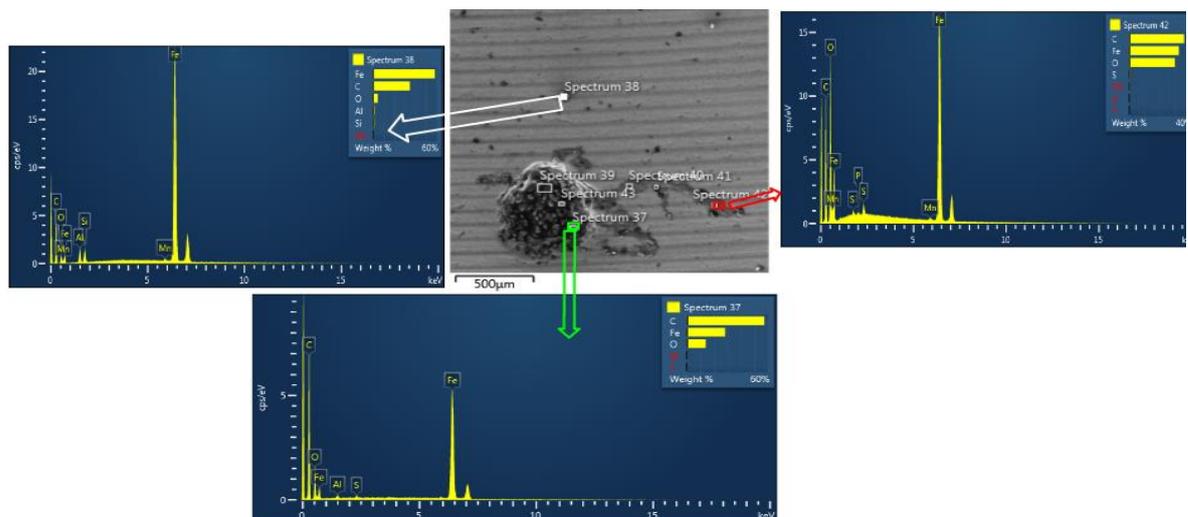


Figura 4.27 – Amostra com texturas simples em regime hidrodinâmico, com suas imagens de MEV e espectros de EDS.

Semelhante ao caso anterior, a presença de texturas aumentou a tensão no contato gerando aumento de temperatura e formação de óxidos. A presença de óxidos pode ter afetado o sistema no sentido de reduzir o atrito, mas levando ao aumento do número de marcas de abrasão.

A Figura 4.28 apresenta as informações para uma amostra de textura compostas em regime hidrodinâmico, descritos no parágrafo anterior. Nela tem-se grande presença de partículas de carbono no interior dos bolsos.

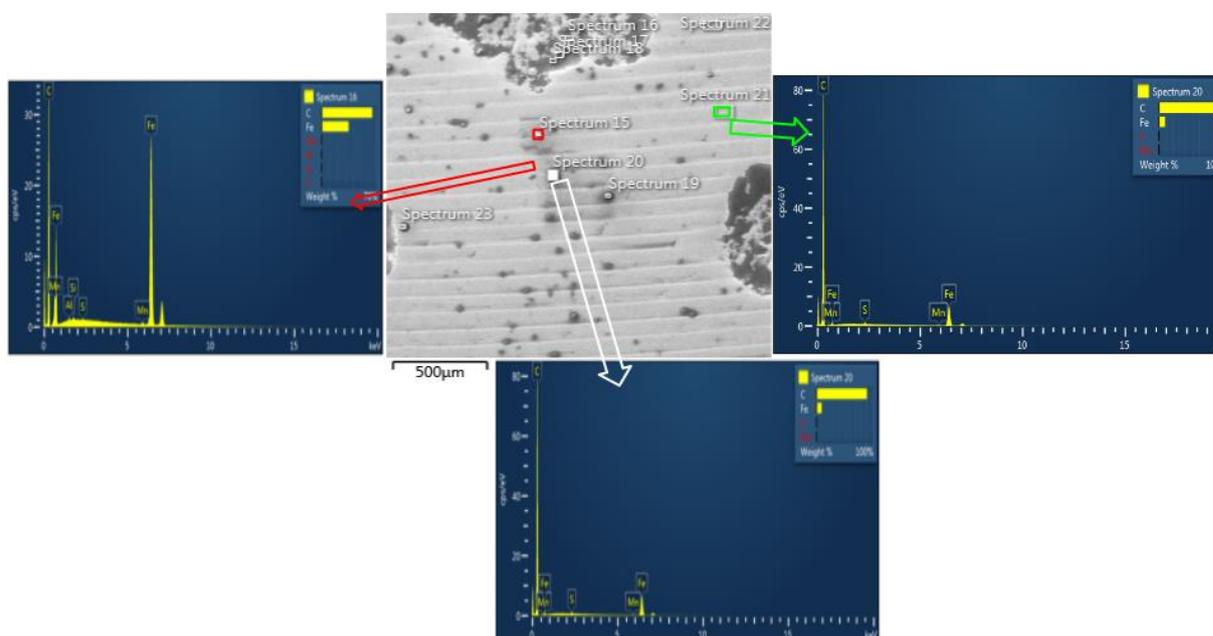


Figura 4.28 – Amostra com texturas compostas em regime hidrodinâmico, com suas imagens de MEV e espectros de EDS.

Este trabalho evidenciou a influência das texturas em amostras submetidas a ensaios bloco sobre anel. Os mecanismos de desgaste foram semelhantes aos observados por McCloskey (1995) e Taşgın (2021) em falhas de mancais para aplicação em usinas hidrelétricas. Corroborando com estudos anteriores, nas amostras ensaiadas foram encontradas marcas de abrasão, possivelmente oriundas dos lubrificantes contaminados e fadiga de contato, devido a carregamento cíclico em alguns pontos da superfície.

De acordo com cada regime de lubrificação, as amostras com texturas simples foram mais resistentes ao primeiro mecanismo de falha no regime limítrofe e as amostras com textura compostas no regime misto. Comparando o caso limítrofe, em que a amostra não texturizada apresentou trincas, fenômeno não observado para as amostras texturizadas submetidas em condições semelhantes.

CAPÍTULO V

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados e análises apresentadas são formuladas as seguintes conclusões:

- A metodologia utilizada se mostrou eficiente, visto que possibilitou a confecção de amostras cilíndricas com texturas simples e compostas pelo método de usinagem eletroquímica. Nesse caso, foi avaliado o desempenho em termos de atrito em ensaios bloco sobre anel, gerando superfícies desgastadas semelhantes ao comportamento de mancais lubrificados encontrados em aplicações de hidrelétricas;
- A utilização de uma ferramenta conformada em sistema aberto com fluxo paralelo de eletrólitos não gerou texturas superficiais. Isto ocorreu pela fuga de eletrólito do contato, impossibilitando sua ação no ânodo, isto é, na amostra cilíndrica;
- Superfícies texturizadas com geometria compostas reduziram o atrito de mancais em até 83%, quando comparados a mancais não texturizados;
- A metodologia MECT, conforme operacionalizada nesse trabalho, não permitiu a confecção de amostras com valores de razão profundidade largura inferiores a 0,8. Os autores inferem que esse fato ocorreu devido a qualidade dimensional da ferramenta polimérica e do espaçamento entre o par eletroquímico irregular que esta fornecia durante os ensaios;
- Foi possível analisar os resultados de coeficiente de atrito para os diferentes regimes de lubrificação usando a curva de Stribeck: λ x coeficiente de atrito (μ);
- Foi observado o menor coeficiente de atrito em amostras texturizadas em comparação com amostras não texturizadas para todos os regimes de lubrificação estudados;

- Para o regime de lubrificação limítrofe, o valor do coeficiente de atrito foi 52% menor nas amostras com texturas simples e até 31% inferior para o caso com geometria composta em comparação com amostras sem texturas;
- No regime de lubrificação misto foi observado os menores valores de coeficiente de atrito independente da condição topográfica. Superfícies com padrões simples obtiveram coeficientes de atrito 83% menores que o caso não texturizado. Para texturas compostas estes valores foram reduzidos em até 74% quando comparados com a mesma condição topográfica sem padrões superficiais;
- Para a condição de lubrificação hidrodinâmica, as amostras com textura simples apresentaram valores de coeficiente de atrito 36 % menores em comparação com as amostras sem texturas. As amostras com textura composta apresentaram valores de coeficiente de atrito 9% menores quando comparados com as amostras não texturizadas. Esse resultado é particularmente importante para possíveis aplicações em mancais de turbinas de hidrelétricas que operam no regime hidrodinâmico.
- As análises via MEV evidenciaram a ocorrência de mecanismos de abrasão em todos os regimes de lubrificação estudados. Esse comportamento não se mostrou predominante para os casos de textura com geometria compostas em regime misto e de texturas simples para regime limítrofe;

O presente trabalho conclui que a utilização de geometrias de textura composta, contendo elipses e círculos, pode gerar redução de atrito e marcas de abrasão em mancais lubrificados de usinas hidrelétricas, semelhante ao comportamento tribológico apresentado em modelo experimental tratado nesta dissertação. É importante salientar que a redução de atrito foi mais relevante em condições de operação que levaram ao regime de lubrificação misto.

CAPÍTULO VI

6 TRABALHOS FUTUROS

A partir dos estudos realizados nessa dissertação, sugere-se os seguintes temas para trabalhos futuros:

- Avaliação do desempenho dinâmico de mancais. Uma vez que as texturas estudadas podem reduzir o atrito, estas podem aumentar o amortecimento viscoso do sistema mecânico em que o mancal estaria acoplado;
- Estudo do desempenho tribológico de mancais texturizados por metodologia laser, MECT e fotoquímica. Novos métodos foram desenvolvidos como os utilizados por Hsu e coautores (2021), Ferri (2021) e Deng (2019), respectivamente evidenciaram os potenciais desses métodos, podendo ser adaptados a geometrias concavas como este trabalho pesquisou para o caso eletroquímico com mascaramento;
- Avaliação do lubrificante: tipo, quantidade de particulado e aditivos. Para este tópico em questão, análise da molhabilidade e da presença de particulados antes e depois dos ensaios podem revelar mais informações sobre o comportamento do lubrificante com as superfícies texturizadas em questão, e sua eficiência na redução do desgaste;
- Estudo de tribocorrosão revestidos com DLC de mancais texturizados. Promissores estudos como os casos de Ghosh (2020) e Ye (2016) mostram que as texturas auxiliam na redução da presença de partícula no contato ao mesmo tempo que aumentam a ativação de DLC no contato atuando tanto na redução do desgaste como na corrosão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABSOLAR. **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 01 ago. 2021

AHMED, A. *et al.* An overview of geometrical parameters of surface texturing for piston/cylinder assembly and mechanical seals. **Meccanica**, v. 51, n. 1, p. 9-23, 2016. ISSN 0025-6455.

ARSLAN, A., MASJUKI, H. H., KALAM, M. A., VARMAN, M., MUFTI, R. A., MOSAROF, M. H., QUAZI, M. Surface Texture Manufacturing Techniques and Tribological Effect of Surface Texturing on Cutting Tool Performance: A Review. **Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences**, v. 41, n. 6, p. 447–481, 2016.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D2714-94(2003). **Standard Test Method for Calibration and Operation of the Falex Block-On-Ring Friction and Wear Testing Machine**, 2014.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. Jr.; DEWOLF, J. T.; MAZUREK, D. F. **Mecânica dos Materiais**. 9. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2011.

BHUSHAN, BHARAT. **Modern tribology handbook**: Principles of tribology, v. 1, 2000.

BRAIN KART. **Study Material, Lecturing Notes, Assignment, Reference, Wiki description explanation, brief detail**. 11th Physics, Unit 3: Laws of Motion: Methods to Reduce Friction. Disponível em: <https://www.brainkart.com/article/Methods-to-Reduce-Friction_34523/>. Acesso em: jun. 2022.

BRISCOE, W. H. Aqueous boundary lubrication: Molecular mechanisms, design strategy, and terra incognita, **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, v. 27 p. 1-8, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2016.09.002>

BUDINAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley**. 10. ed. Porto Alegre: McGraw Hill, 2016.

CHEN, X; QU, N.; LI, H. XU, Z. Electrochemical micromachining of micro-dimple arrays using a polydimethylsiloxane (PDMS) mask. **Journal of Materials Processing Technology**, 2016.

COLES, J. M.; CHANG, D. P.; ZAUSCHER, S. Molecular mechanisms of aqueous boundary lubrication by mucinous glycoproteins. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* v. 15, p. 406–416, 2010.

COSTA, H. L., HUTCHINGS, I. M. Development of a maskless electrochemical texturing method, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 8, p. 3869–3878, 2009.

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. ISSN 0301-679X.

COSTA, H. L.; HUTCHINGS, I. M. Some innovative surface texturing techniques for tribological purposes. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: **Journal of Engineering Tribology**, v. 229, n. 4, p. 429–448, 2014. <https://doi.org/10.1177/1350650114539936>

CZICHOS, H. Overview of Tribology. In: CZICHOS, H.; HABIG, K. H. (eds) **Tribologie-Handbuch**. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-658-29484-7_1

DAMAS, E. M., RODRIGUES, T. A.; SILVA JUNIOR, W. M., The Role of Friction Coefficient of Gray Cast Iron Measured in Dry And Lubricated Contacts, **Proceedings of the 25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering**, Uberlândia, Brazil, 2019.

DA SILVA, Leonardo Rosa Ribeiro. **Texturização superficial de cilindros automotivos**. 2016. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016. <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2016.259>

DA SILVA, L. R. R.; COSTA, H. L. Tribological behavior of gray cast iron textured by maskless electrochemical texturing. **Wear**, v. 376–377, p. 1601–1610, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.028>

DAIDOMETAL. Bearings for Hydroelectric Power Generation. Disponível em: <<https://www.daidometal.com/cn/hydropower/>>. Acesso em: jul. 2022.

DE SILVA, A. K. M.; ALTENA H. S. J.; MCGEOUGH J. A. Precision ECM by Process Characteristic Modelling, **CIRP Annals**, v. 49, n. 1, p. 151-155, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62917-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62917-5).

DIAS, L. C. **Efeito da Texturização Superficial na Formação de Tribofilmes de Dialquilditiofosfatos de Zinco (Zddp) no Sistema Pistão-Cilindro**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2021.

DUARTE, M. *et al.* Increasing Lubricant Film Lifetime by Grooving Periodical Patterns Using Laser Interference Metallurgy. **Advanced Engineering Materials**, v. 10, n. 6, p. 554-558, 2008. ISSN 1438-1656.

DUNN, J. **The Chariot in Egyptian Warfare**. In: Tour Egypt. 2011. Disponível em: <<http://www.touregypt.net/featurestories/chariots.htm>>. Acesso em: maio. 2022.

DUTRA, Rina Mariane Alves. **Controle e validação de um microtribômetro instrumentado para observar a evolução da marca de desgaste via microscopia óptica**. 2017. 85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2030>>. Acesso em: 04 jun. 21.

ETSION, I.; BURSTEIN, L. A model for mechanical seals with regular microsurface structure. **Tribology Transactions**, v. 39, n. 3, p. 677–683, 1996. <https://doi.org/10.1080/10402009608983582>

ETSION, I.; HALPERIN, G. A Laser Surface Textured Hydrostatic Mechanical Seal. **Tribology Transactions**, v. 45, n. 3, p. 430–434, jan. 2002. <https://doi.org/10.1080/10402000208982570>

FERRI, G.; DIAS, L. C.; COSTA, H. Improvements in Maskless Electrochemical Surface Texturing for Cylindrical Components. **25th International Congress of Mechanical Engineering ABCM**: 10 p. 2019.

FERRI, Gabriel Guilherme Bacca. **Texturização superficial eletroquímica sem mascaramento de componentes cilíndricos**. 2019. 85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Rio Grande, Rio Grande, 2019.

FORD, C. **Just how the hell were the Egyptian Pyramids actually built?** In: CONTIKI. 2017. Disponível em: <<https://www.contiki.com/six-two/how-were-the-egyptian-pyramidsbuilt/#:~:text=Once%20the%20stones%20were%20dragged,a%20combination%20of%20the%20two>>. Acesso em: jun. 2022.

FOWELL, M. *et al.* Entrainment and inlet suction: two mechanisms of hydrodynamic lubrication in textured bearings. 2007. ISSN 0742-4787.

GACHOT, C. *et al.* A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement. **Wear**, v. 372, p. 21-41, 2017. ISSN 0043-1648.

GACHOT, C.; GRÜTZMACHER, P.; ROSENKRANZ, A. Laser Surface Texturing of TiAl Multilayer Films – Effects of Microstructure and Topography on Friction and Wear. **Lubricants**. v. 6, 2018. <https://doi.org/10.3390/lubricants6020036>.

GAYATRI; *et al.* Nanolubricants Dispersed with Graphene and its Derivatives: An Assessment and Review of the Tribological Performance. **Nanoscale**. v. 11, 2019. <https://doi.org/10.1039/C8NR08240E>.

GGBEARIGS. **Os componentes críticos das centrais hidrelétricas, tais como turbinas e comportas, dependem dos mancais para funcionarem corretamente. A partir**

das interações da GGB com vários proprietários de usinas, sabemos que manter as operações com poucas interrupções, reduzir os custos operacionais e evitar a contaminação do meio ambiente são prioridades máximas da indústria. Disponível em: <<https://www.ggbearings.com/pt/tribou/internet-mancais/importancia-dos-mancais-para-desafios-da-industria-hidreletrica>>. 2019. Acesso em: jul. 2022.

GHOSH, S. *et al.* Tribological investigation of diamond-like carbon coated micro-dimpled surface under bovine serum and osteoarthritis oriented synovial fluid, **Science and Technology of Advanced Materials**, v. 16, n. 3, 2015. <https://doi.org/10.1088/1468-6996/16/3/035002>

GLAVATSKIH, S. B.; MCCARTHY, D. M. C. Hydrodynamic bearings with improved performance and reliability – Part II: Influence of pad surface texturing, **Research Report**, Luleå Univ. of Tech., 2003:02.

GROPPER, D; WANG, L.; HARVEY, T. J.; Hydrodynamic lubrication of textured surfaces: A review of modeling techniques and key findings, **Tribology International**, v. 94, p. 509-529, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.10.009>

GRÜTZMACHER, P. G.; PROFITO, F. J.; ROSENKRANZ, A. Multi-Scale Surface Texturing in Tribology – Current Knowledge and Future Perspectives. **Lubricants**, v. 7, n. 11, p. 95, 2019. <https://doi.org/10.3390/lubricants7110095>

HAMDI, A. Effect of cutting variables on bearing area curve parameters (BAC-P) during hard turning process. *Archive of Mechanical Engineering*. 67. 73-95, 2020. <https://doi.org/10.24425/ame.2020.131684>.

HENRY, Y.; BOUYER, J.; FILLON, M. An experimental analysis of the hydrodynamic contribution of textured thrust bearings during steady state operation - Comparison with the untextured parallel surface configuration. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology**, v. 229. n. 4, p. 362-375, 2015. <https://doi.org/10.1177/1350650114537484>.

HOLMBERG, K.; ANDERSSON, P.; ERDEMIR, A. Global energy consumption due to friction in passenger cars. **Tribology international**, v. 47, p. 221-234, 2012. ISSN 0301-679X.

HSU, C.J. *et al.* Does laser surface texturing really have a negative impact on the fatigue lifetime of mechanical components? **Friction**, v. 9, p. 1766–1775, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40544-021-0508-2>

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. 2 ed. Butterworth-Heinemann, 2017. ISBN 0081009518.

KHUL, André. **Mancais**. Tecnólogo em Mecatrônica Elementos de Máquinas. 2016.

KOVALCHENKO, A.; AJAYI, O.; ERDEMIR, A.; FENSKE, G. Friction and wear behavior of laser textured surface under lubricated initial point contact. **Wear**, v. 271, p. 1719-1725, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010>.

KU, P. Interdisciplinary approach to the lubrication of concentrated contacts. **NASA Special Publication**, v. 237, 1970.

LIN, N.; LI, D.; ZOU, J.; XIE, R.; WANG, Z.; TANG, B. Surface Texture-Based Surface Treatments on Ti6Al4V Titanium Alloys for Tribological and Biological Applications: A Mini Review. **Materials**, v. 11, p. 4878, 2018.

LU, X.; KHONSARI, M. M. An Experimental Investigation of Dimple Effect on the Stribeck Curve of Journal Bearings. **Tribology Letters**, v. 27, n. 2, p. 169, 2007. ISSN 1573-2711.

LUO, J.; LIU, M.; MA, L. Origin of friction and the new frictionless technology – Superlubricity: Advancements and future outlook. **Nano Energy**, v. 86, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106092>.

MCCARTHY, Donald. Lubrication of Sliding Bearings for Hydropower Applications., 2005.

MCCLOSKEY, T. H. **Troubleshooting Bearing and Lube Oil System Problems**. Texas A&M University. Turbomachinery Laboratories. 1995. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/1969.1/163475>>.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas**: Uma abordagem integrada. 2 ed. São Paulo: Artmed, 2000.

OLYMPUS. Soluções em microscopia Medição da rugosidade de superfícies. Disponível em: < [https://www.olympus-ims.com/pt/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/#!/cms\[focus\]=017](https://www.olympus-ims.com/pt/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/#!/cms[focus]=017)>.

PARREIRA, J. G.; GALLO, C. A.; COSTA, H. L. New advances on maskless electrochemical texturing (MECT) for tribological purposes. **Surface and Coatings Technology**, v. 212, n. 0, p. 1-13, 2012. ISSN 0257-8972.

PARREIRA, Jakeline Guimarães. **Texturização Superficial Eletroquímica Sem Mascaramento Com Finalidades Tribológicas**. 2011. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

PETTERSSON, U.; JACOBSON, S. Influence of surface texture on boundary lubricated sliding contacts. **Tribology international**, v. 36, n. 11, p. 857-864, 2003. ISSN 0301-679X.

PILKEY, W. D.; PILKEY, D. F. **Peterson's Stress Concentration Factors**; 2ª ed. Nova York: John Wiley & Sons, 1997.

PROFITO, Francisco José. **Modelagem unidimensional do regime misto de lubrificação aplicada a superfícies texturizadas**. 2010. 192 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

RIJEZA. **Mecanismos de desgaste em hidrelétricas: por que é tão importante identificá-los?** Disponível em <<https://rijeza.com.br/blog/mecanismos-de-desgaste-em-hidreletricas-por-que-e-tao-importante-identifica-los/>>. Acesso em: ago. 2022.

RONEN, A.; ETSION, I.; KLIGERMAN, Y. Friction-Reducing Surface-Texturing in Reciprocating Automotive Components. **Tribology Transactions**, v. 44, n. 3, p. 359-366, 2001. ISSN 1040-2004.

RODRIGUES, T. A., COSTA. H. L. DA SILVA, W. M. Sliding wear behavior of electrochemically textured surfaces under different lubrication regimes: Effects of curvature radius, **Wear**, v. 477, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203817>.

RODRIGUES, T.; ARENCIBIA, R.; COSTA, H.; DA SILVA JUNIOR, W. Roughness analysis of electrochemically textured surfaces: effects on friction and wear of lubricated contacts. **Surface Topography: Metrology and Properties**. v. 8. <https://doi.org/10.1088/2051-672X/ab96da>.

RODRIGUES, T. A.; TONIELLO, I. Z. O; VITTORINO, A. A. O. F; SILVA JUNIOR, W. M. Topographic Characterization and Tribological Analysis Of Partial And Total Textured Surfaces. **Proceedings of the 25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering**, Uberlândia, Brazil, 2019.

RODRIGUES, T. A. **Efeito do Controle da Topografia na Eficiência de Contatos Lubrificados: Avaliação Experimental**. 92p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

RODRIGUES, T. A., COSTA, H. L. DA SILVA, W. M. Sliding wear behavior of electrochemically textured surfaces under different lubrication regimes: Effects of curvature radius, **Wear**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203817>

ROSENKRANZ, A., HEIB T., GACHOT, F., MÜCKLICH, F. Oil film lifetime and wear particle analysis of laser-patterned stainless steel surfaces. **Wear**, v. 334, p. 1-12, 2015. ISSN 0043-1648.

SAEIDI, F.; MEYLAN, B.; HOFFMANN, P.; WASMER, K. Effect of surface texturing on cast iron reciprocating against steel under starved lubrication conditions: A parametric study. **Wear**, v. 348-349, n. Supplement C, p. 17-26, 2016. ISSN 0043-1648.

SANTOS, Germano Ferreira; DOS SANTOS, Marcelo Braga. Proposta de um Sensor de Medição de Espessura de Filme de Óleo Lubrificante em Ensaios de Mancais. **IX Encontro Interno e XIII Seminário de Iniciação Científica PIBIC-UFU, CNPq & FAPEMIG**, Universidade Federal de Uberlândia, 2009.

SANTOS, Miqueias. **A hidrelétrica domina a geração de energia no Brasil até 2030**. Disponível em: <<https://www.udop.com.br/noticia/2021/09/09/a-hidreletrica-domina-a-geracao-de-energia-no-brasil-ate-2030.html#:~:text=A%20energia%20hidrel%C3%A9trica%20responde%20pela,63%2C4%25%20em%202020/>>>. Acesso em: jun. 2022.

SANTOS JÚNIOR, Marco Aurélio de Freitas. **Influência do controle de temperatura em ensaios de deslizamento lubrificado de superfícies conformes**. 2021. 48 f. Trabalho

de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

SEGU, D.; HWANG, P. Friction control by multi-shape textured surface under pin-on-disc test. **Tribology International**, v. 91, p. 111-117, 2015. <http://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.06.028>.

SCHÖNENBERGER S. R. *et al.*, Microscale Pattern Transfer Without Photolithography of Substrates. **Electrochimica Acta**, v. 51, p. 809-819, 2005.

SHREEHAH, T.; AL-QAWABAH, S. Ball burnishing tool with corrective mechanism of tool position, **International Journal of Surface Science and Engineering (IJSURFSE)**, v. 3, n. 4, 2009.

SHUANGQING QIAN, D. Z.; NINGSONG Q.; HANSONG, L.; DONGSHENG Y. Generating micro-dimples array on the hard chrome-coated surface by modified through mask electrochemical micromachining. **Int J Adv Manuf Technol**, v. 47, p. 1121-1127, 2010.

SONG, J.; HUANG, W.; LIU, J.; HUANG, L.; LU, Y., Electrochemical machining of superhydrophobic surfaces on mold steel substrates, **Surface and Coatings Technology**, v. 344, p. 499–506, 2018.

SPIKES, H. The history and mechanisms of ZDDP. **Tribology letters**, v. 17, n. 3, p. 469-489, 2004. ISSN 1023-8883

STOLARSKI, T. A. MSc, PhD, DSc, DIC, CEng, MIMechE, in *Tribology in Machine Design*, 1990.

STRAIOTO, Fabiana Gouveia. Análise da alteração topográfica de superfície do esmalte dentário humano vestibular e lingual sob influência da idade. 2006. 94 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Saúde) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006

TELECURSO 2000 PROFISSIONALIZANTE. **Mecânica Elementos de Máquina I**. São Paulo, 1997.

TANG, W. *et al.* The effect of surface texturing on reducing the friction and wear of steel under lubricated sliding contact. **Applied surface science**, v. 273, p. 199- 204, 2013. ISSN 0169-4332.

TAŞGIN, Y.; KAHRAMAN, G. Crack failure in hydrodynamically lubricated bearings: A case study hydraulic turbine. **Engineering Failure Analysis**, v. 121, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105123>.

UDDIN, M. S; LIU, Y. W. Design and optimization of a new geometric texture shape for the enhancement of hydrodynamic lubrication performance of parallel slider surfaces, **Biosurface and Biotribology**, v. 2, n. 2, p. 59-69, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.bsbt.2016.05.002>.

VAKIS, A.; POLYCARPOU, A. Head-disk interface nanotribology for Tbit/inch² recording densities: Near-contact and contact recording. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 43, 2010. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/22/225301>.

VITTORINO, A. A. O. F.; MONTEIRO JUNIOR, P. L.; DAMAS, E. M. RODRIGUES, T. A.; DA SILVA, W. M. Usinagem Eletroquímica Aplicada à Texturização de Superfícies de Sistemas Tribológicos. *In*: XXIII Colóquio de Usinagem, 2019, Uberlândia. **Anais do XXIII Colóquio de Usinagem**, 2019.

VLADESCU, S.; OLVER, A.; PEGG, I.; REDDYHOFF, T. Combined friction and wear reduction in a reciprocating contact through laser surface texturing. **Wear**, v. 358–359. p. 51-61. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016>.

YUWEI, Y.; WANG, C.; WANG, Y. Micro/Nanotexture Design for Improving Tribological Properties of Cr/GLC Films in Seawater, **Tribology Transactions**, v. 60, n.1, p. 95-105, <https://doi.org/10.1080/10402004.2016.1147629>

ZAVOS, A.; NIKOLAKOPOULOS, P. Tribological Characterization of Smooth and Artificially Textured Coated Surfaces Using Block-on-Ring Tests. **FME Transactions**, v. 43, p. 191-197, 2015.

ZHANG, H.; HUA, M.; DONG, G.; ZHANG, D.; CHEN, W.; DONG, G. Optimization of texture shape based on Genetic Algorithm under unidirectional sliding. **Tribology International**, v. 115, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.05.017>.

ZHAO, Q.; WANG, Z. Manipulation of Tribological Properties of Metals by Ultrashort Pulsed Laser Micro-/Nanostructuring. **Advances in Tribology**, IntechOpen, 2016. <https://doi.org/10.5772/64764>

ZOU, H.; YAN, S.; SHEN, T.; WANG, H.; LI, Y.; CHEN, J.; MENG, Y.; SHICHAO, M.; ZHANG, Z.; SUI, T.; LIN, B. Efficiency of surface texturing in the reducing of wear for tests starting with initial point contact, **Wear**, v. 482–483, 2021.