

TÚLIO ALVES RODRIGUES

**EFEITO DO CONTROLE DA TOPOGRAFIA NA
EFICIÊNCIA DE CONTATOS LUBRIFICADOS:
AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2018

TÚLIO ALVES RODRIGUES

**EFEITO DO CONTROLE DA TOPOGRAFIA NA EFICIÊNCIA DE
CONTATOS LUBRIFICADOS: AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL**

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 Júnior

Coorientadora: Prof. Dra. Henara Lillian Costa Murray

Uberlândia – MG

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

R696e Rodrigues, Túlio Alves, 1993-
2018 Efeito do controle da topografia na eficiência de contatos lubrificados [recurso eletrônico] : avaliação experimental / Túlio Alves Rodrigues. - 2018.

Orientador: Washington Martins da Silva Júnior.

Coorientadora: Henara Lillian Costa Murray.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1218>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. 2. Tribologia. 3. Aço - Acabamento. 4. Lubrificação e lubrificantes. 5. Desgaste mecânico. I. Silva Júnior, Washington Martins da, 1977- (Orient.). II. Murray, Henara Lillian Costa (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621

Maria Salete de Freitas Pinheiro - CRB6/1262



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4282 - www.posgrad.mecanica.ufu.br - secposmec@mecanica.ufu.br



TERMO

ALUNO: Túlio Alves Rodrigues

MATRÍCULA: 11712EMC014

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Materiais e Processos de Fabricação **LINHA DE PESQUISA:** Tribologia e Materiais

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: NÍVEL MESTRADO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: “Efeito do Controle da Topografia na Eficiência de Contatos Lubrificados: Avaliação Experimental”

ORIENTADOR: Prof. Dr. Washington Martins da Silva Júnior **CO-ORIENTADORA:** Profa. Dra. Henara Lillian Costa Murray

A Dissertação foi **APROVADA** em reunião pública, realizada no Anfiteatro E do Bloco 50, Campus Santa Mônica, em 03 de setembro de 2018, às 08:30 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

Prof. Dr. Washington Martins da Silva Júnior (orientador) - UFU

Prof. Dr. Arthur Alves Fiocchi - UFU

Prof. Dr. Aldemir Aparecido Cavalini Júnior - UFU

Prof. Dr. Francisco José Profito - EPUSP

Uberlândia, 03 de setembro de 2018



Documento assinado eletronicamente por **Washington Martins da Silva Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 03/09/2018, às 12:25, 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 **Arthur Alves Fiocchi, Professor(a) do Magistério Superior**, em 03/09/2018, às 12:26, 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 **Aldemir Aparecido Cavalini Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 03/09/2018, às 12:28, 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 **Francisco José Profito, Usuário Externo**, em 03/09/2018, às 12:35, 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 **0683767** e o código CRC **DCB52B5D**.

*“Quando penso que cheguei ao meu limite
descubro que tenho forças para ir além”.*
Ayrton Senna (1960-1994)

ADRAGECIMENTOS

Primeiramente a Deus que me possibilitou conforto e amparo nos momentos de dificuldade;

À Universidade Federal de Uberlândia e ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela oportunidade e suporte para realização deste Curso;

Ao Prof. Dr. Washington Martins da Silva Junior pela ótima orientação, motivação e amizade, fundamentais para o sucesso deste trabalho;

À minha mãe Liliane e meu pai Rubens, pelos incentivos e apoio, ao longo de minha vida que foram fundamentais para a concretização desta etapa;

À Prof. Dra. Henara Lillian pela coorientação que foi fundamental para realização desse trabalho;

Ao Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste – LTAD por possibilitar a utilização do equipamento de interferometria a laser 3D, sem o qual esse trabalho não poderia ter sido realizado;

Aos meus colegas membros do Laboratório de Tribologia e Materiais - LTM, da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU, pela experiência, paciência e conhecimento compartilhados;

Aos órgãos de fomento CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo apoio, que possibilitaram a realização desse trabalho;

A todos que me apoiaram, mesmo que indiretamente na concretização desse sonho.

RODRIGUES, T. A. **EFEITO DO CONTROLE DA TOPOGRAFIA NA EFICIÊNCIA DE CONTATOS LUBRIFICADOS: AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL**. 2018. 92p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia

Resumo

Texturas superficiais são cada vez mais utilizadas para o aumento do desempenho de contatos lubrificados. O principal obstáculo para a aplicação dessa alteração topográfica industrialmente é a dificuldade em unir produtividade, baixo custo e flexibilidade quanto a padrões de texturas e geometria de superfícies a serem texturizadas. O objetivo desse trabalho é investigar experimentalmente o efeito do controle da topografia na eficiência de contatos lubrificados, utilizando o método de texturização eletroquímica sem mascaramento (MECT), que combina baixo custo e elevada velocidade de texturização. Uma vez estabelecidos os parâmetros para texturização do aço ABNT 1045 pelo método MECT, foram realizados ensaios tribológicos do tipo bloco sobre anel a fim de comparar a influência da texturização, comparando a eficiência da texturização total e parcial de amostras, a posição e orientação da textura com relação a superfícies sem alteração topográfica para dois regimes de lubrificação, limítrofe e misto. Nos ensaios tribológicos realizados no regime de lubrificação misto, a texturização superficial não trouxe benefícios com relação à superfície sem alteração, devido ao aumento da rugosidade proveniente do método de texturização MECT. No regime limítrofe, a texturização reduziu coeficiente de atrito, desgaste e temperatura do meio. Texturização parcial se mostrou mais eficiente que a total, com texturas posicionadas na região *outlet* com melhor desempenho, tanto com relação a coeficiente de atrito quanto a taxa de desgaste.

Palavras chave: *Desgaste por deslizamento lubrificado; Texturização superficial; Texturização parcial; Ensaio bloco-sobre-anel.*

RODRIGUES, T. A. **THE EFFECT OF TOPOGRAPHY CONTROL IN THE EFFICIENCY OF LUBRICATED CONTACTS: EXPERIMENTAL INVESTIGATION**. 2018. 92p. Master's Thesis. Federal University of Uberlândia. Uberlândia

Abstract

The use of surface texturing to improve performance of lubricated contacts is increasingly used. The major barrier to applying this topographical change industrially is the difficulty to combine productivity, low cost and flexibility in texturing different patterns and geometries of surfaces to be textured. The objective of this work is to investigate experimentally the effect of topography control on the efficiency of lubricated contacts, using Maskless Electrochemical Texturing Method (MECT), which is both a low cost and high speed texturing process. Once established the texturing parameters for the MECT method for ABNT 1045 steel, block-on-ring tests were carried out to compare the influence of topographic change, comparing the efficiency of full and partial surface texturing, position and orientation of the texture with respect to surfaces without topographical change for two lubrication regimes, boundary and mixed. Under mixed lubrication regime, surface texturing did not show benefit compared to the surface without change, due to the increased roughness resulting from MECT texturing method. In the boundary regime, texturing reduced the friction coefficient, wear and temperature of the fluid. Partial texturing proved to be more efficient than full texturing, with textures positioned in the outlet region with better performance, both in respect to coefficient of friction and wear rate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Ilustração do contato entre superfícies rugosas (POPOV, 2017).	3
Figura 2-2 Áreas de contato real e aparente. Adaptado de Zum Gahr (1987).	4
Figura 2-3 Exemplos de contatos conformes: (a) planos opostos deslizando; (b) mancal de deslizamento radial (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017a).	5
Figura 2-4 Exemplos de contatos não conformes: (a) dentes de engrenagens, (b) came e seguidor, (c) esfera em uma pista de mancal de rolamento (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017a).	5
Figura 2-5 Tipos de movimentos relativos de superfícies: (a) rolamento e (b) deslizamento (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017a).	6
Figura 2-6 Mecanismos microscópicos relacionados ao fenômeno do atrito para superfícies metálicas: (a) adesão, (b) deformação plástica e (c) presença de terceiro corpo na interface de contato. Adaptado de International (1992).	7
Figura 2-7 Regimes de lubrificação: (a) Hidrodinâmico; (b) Misto; (c) Limitrofe. Adaptado de Hamrock e Schmid (2004).	9
Figura 2-8 Ilustração de cadeias carbônicas e grupos polares adsorvidos da superfície, provendo uma camada molecular hidrofóbica de lubrificante responsável por reduzir o contato entre asperezas. Adaptado de Stachowiak e Batchelor (2013).	11
Figura 2-9 Curva de Stribeck ilustrando os diferentes tipos de lubrificação para contatos conformes e não conformes. Adaptado de (HAMROCK; SCHMID; JACOBSON, 2004; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017b).	13
Figura 2-10 Efeito da microcavidade agindo como reservatório de fluido lubrificante. Adaptado de (UEHARA et al., 2004).	15
Figura 2-11 Distribuição de pressão local em uma cavidade ao longo da direção de movimento do fluido (LU; KHONSARI, 2007).	16
Figura 2-12 Identificação da região de cavitação sobre uma micro cavidade obtida por simulação numérica (PROFITO, 2010).	17
Figura 2-13 – Orientação relativa do <i>chevron</i> em relação ao sentido de movimento. Seta em negrito indica a direção de movimento e as setas dentro da textura indicam a direção do escoamento do fluido, causado pela restrição lateral. Adaptado de (COSTA; HUTCHINGS, 2007).	17
Figura 2-14 Micrografias obtidas por MEV da superfície não texturizadas (a e ampliada a') e texturizada (b e um único <i>dimple</i> ampliado) (BORGHI et al., 2008).	19

Figura 2-15 Marcas de desgaste obtidas por MEV corpo (a,b) e contra corpo (a',b') (SUN et al., 2015).	20
Figura 2-16 – Desenho esquemático de um mancal texturizado (FOWELL et al., 2007).	21
Figura 2-17 Ablação a laser: (a) Pulsos longos que resultam em maior ZAC bem como zona refundida protuberante, (b) pulsos curtos que permitem menor ZAC e diminuição de zonas refundidas (DA SILVA, 2016).	22
Figura 2-18 Texturização por processo fotoquímico. Adaptado de (ZHANG; MENG, 2012).	23
Figura 2-19 Impressão de pontos individuais, utilizando impressora DMP-2800: (a) microscopia ótica após impressão, (b) microscopia ótica após ataque e remoção, (c) perfil em linha. Adaptado de (COSTA; HUTCHINGS, 2015).	24
Figura 2-20 Reações esquemáticas de reações eletroquímicas. Adaptado de (NPTEL, 2008).	25
Figura 2-21 Aparato experimental utilizado na MECT.	26
Figura 2-22 Processo de usinagem eletroquímica sem mascaramento (da SILVA, 2016).	26
Figura 2-23 – Exemplo de textura superficial do tipo <i>chevron</i> obtida pelo método MECT.	27
Figura 2-24 Geometrias comumente utilizadas em testes de deslizamento: (a) pino sobre disco; (b) bloco-sobre-anel com geometria conforme; (c) pino sobre plano alternado; (d) bloco-sobre-anel com geometria não conforme. Adaptado de (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017a).	28
Figura 3-1 – Esquema do ensaio bloco sobre anel, com corpo de prova não conforme. Adaptado de Narita (2012).	30
Figura 3-2 – Reta de calibração da célula de carga do tribômetro bloco sobre anel.	30
Figura 3-3 – Microestrutura dos corpos de prova atacadas por Nital 2 %, durante 30 segundos.	31
Figura 3-4 – Dimensões médias dos padrões em “V”. Cotas em micrometros (μm).	32
Figura 3-5 – Sequência de ensaios realizados com o objetivo de se encontrar os parâmetros adequados para texturização superficial de aço ABNT 1045.	34
Figura 3-6 – Micrografia da ferramenta utilizada para texturizar superficialmente corpos de prova para o ensaio bloco sobre anel.	35
Figura 3-7 – Propriedades do óleo hidráulico BP68 para diversas temperaturas.	36
Figura 3-8 – Coeficiente pressão-viscosidade em função da temperatura do fluido lubrificante.	36
Figura 3-9 – (a) Vista em perspectiva do suporte de amostras para o tribômetro bloco sobre anel; (b) foto do suporte fabricado.	37
Figura 3-10 – Sequência de ensaios bloco sobre anel.	39
Figura 4-1 – Resultados das perfilometrias 2D para tempos de ensaios de: (a) 10 s; (b) 20 s; (c) 30 s; (d) 60 s; (e) 90 s.	42

Figura 4-2 – (a) Relação entre largura e profundidade de texturas obtidas por MECT para tensão de 30 V e diversos tempos; (b) R_q de regiões texturizadas em função do tempo de texturização.....	43
Figura 4-3 – Micrografias óticas de amostras texturizadas: (a) parcialmente texturizadas; (b) totalmente texturizada.....	45
Figura 4-4 – Parâmetros de rugosidade da superfície texturizada, obtido na região entre os padrões de textura superficiais.....	46
Figura 4-5 – Coeficiente de atrito em função do tempo para diferentes padrões topográficos: (a) 216,92 N; (b) 314,99 N.	48
Figura 4-6 – Coeficiente de atrito em função do tempo no regime permanente para diferentes padrões topográficos: (a) 216,92 N; (b) 314,99 N.....	50
Figura 4-7 – Coeficientes médios de atrito de ensaios em regime permanente: (a) 216,92 N; (b) 314,99 N.....	51
Figura 4-8 – Temperaturas médias de ensaios em regime permanente: (a) 216,92 N; (b) 314,99 N.	54
Figura 4-9 – Marcas de desgaste com alteração da força normal, obtidas por interferometria 3D: (a) L 216,92 N; (b) L 314,99 N; (c) PTMSI 216,92 N; (d) TPMSI 314,99 N; (e)TPSO 216,92 N; (f)TPSO 314,99 N (g)TTMS 216,92 N; (h)TTMS 314,99 N.....	57
Figura 4-10 – Marcas de desgaste com alteração da força normal vistas de topo, obtidas por interferometria 3D: (a) L 216,92 N; (b) L 314,99 N; (c) PTMSI 216,92 N; (d) TPMSI 314,99 N; (e)TPSO 216,92 N; (f)TPSO 314,99 N (g)TTMS 216,92 N; (h)TTMS 314,99 N.	59
Figura 4-11 – Taxa de desgaste volumétrica para condições ensaiadas: (a) 216,92 N; (b) 314,99 N.	60
Figura 4-12 – Taxa de desgaste para diversos λ , onde as barras hachuradas mostram os ensaios realizados com força normal de 216,92 N e as barras sem preenchimento ensaios com 314,99 N, e a linha pontilhada é uma linha de tendência.....	61
Figura 4-13– Microscopia eletrônica de varredura, utilizando elétrons retroespalhados da marca de desgaste de uma amostra totalmente texturizadas com força normal de 314,99 N, com a seta vermelha indica o sentido de movimento do contracorpo: (a) ampliação de 56x; (b) ampliação de 1000x; (c) análise EDS para área 1; (d) análise EDS para área 2; (e) análise EDS para área 3.....	63
Figura 4-14 – Microscopia eletrônica de varredura da marca de desgaste do contracorpo em ensaio com força normal de 314,99 N, com a seta vermelha indica o sentido de movimento do contracorpo: (a) utilizando elétrons secundários; (b) utilizando elétrons retroespalhados; (c) análise EDS para área 1; (d) análise EDS para área 2; (e) análise EDS para área 3.	65

Figura 4-15 – Micrografia ótica das marcas de desgaste do ensaio com bloco não texturizado, ensaiado com força normal de 314,99 N: (a) corpo; (b) contracorpo.	66
Figura 4-16 – Microscopia ótica de marcas de desgaste de corpo totalmente texturizado, ensaiado com força normal de 314,99 N: (a) bloco texturizado; (b) contracorpo.	67
Figura 4-17– Microscopia ótica de marcas de desgaste de corpo totalmente texturizado, ensaiado com força normal de 216,92 N: (a) bloco texturizado; (b) contracorpo.	68
Figura 8-1 – Circuito para obtenção de sinais de corrente pulsada.	80
Figura 9-1 – Desenho plano com as cotas do suporte de amostras do tribômetro bloco sobre anel.	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 – Disposição das texturas superficiais em relação aos corpos de prova.	33
Tabela 4-1 – Coeficiente λ para cada condição ensaiada.	47

LISTA DE SÍMBOLOS

α = coeficiente pressão viscosidade

A = área de contato

BSE = elétrons retroespalhados

Cl⁻ = íon de cloro

cSt = centistokes

DFP = distância ferramenta peça

d = distância deslizada

e⁻ = elétron

E' = módulo de elasticidade reduzido

EDS = espectroscopia de energia dispersiva

Fe = ferro

Fe(OH)₂ = hidróxido de ferro

Fe⁺⁺ = íon de ferro

FeCl₂ = cloreto de ferro

G = parâmetro adimensional do material

GPa = giga Pascal

H⁺ = íon de hidrogênio

h₀ = espessura mínima de fluido lubrificante

H₂O = molécula de água

k = taxa de desgaste

L = superfície sem alteração topográfica

l = largura do contato

MECT = método de texturização eletroquímica sem mascaramento

MEV = microscópio eletrônico de varredura

η = viscosidade do fluido

Na⁺ = íon de sódio

NaCl = cloreto de sódio

NaOH = hidróxido de sódio

OH⁻ = hidroxila

R* = raio de contato

RPL = razão profundidade largura

rpm = rotações por minuto

S_q = rugosidade superficial média quadrática

S_{qB} = rugosidade superficial média quadrática do bloco

S_{qR} = rugosidade superficial média quadrática do anel

$TTMS$ = superfície totalmente texturizada com texturas orientadas no mesmo sentido de movimento do contracorpo

$TTSC$ = superfície totalmente texturizada com texturas orientadas no sentido contrário de movimento do contracorpo

$TPMSI$ = superfície parcialmente texturizada com texturas posicionadas na região *inlet* orientadas no mesmo sentido de movimento do contracorpo

$TPMSO$ = superfície parcialmente texturizada com texturas posicionadas na região *outlet* orientadas no mesmo sentido de movimento do contracorpo

$TPSCI$ = superfície parcialmente texturizada com texturas posicionadas na região *inlet* orientadas no sentido contrário de movimento do contracorpo

$TPSCO$ = superfície parcialmente texturizada com texturas posicionadas na região *outlet* orientadas no sentido contrário de movimento do contracorpo

U = parâmetro adimensional de velocidade

V = Volt

W = carga normal

w = parâmetro adimensional de carga

ZAC = zona afetada pelo calor

λ = relação entre rugosidade e espessura de filme lubrificante

μ = coeficiente de atrito

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	CONTATO ENTRE SUPERFÍCIES.....	3
2.2	ATRITO.....	5
2.2.1	<i>Adesão</i>	7
2.2.2	<i>Deformação</i>	8
2.2.3	<i>Presença de terceiro corpo</i>	8
2.3	REGIMES DE LUBRIFICAÇÃO.....	8
2.3.1	<i>Curva de Stribeck</i>	12
2.4	TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL.....	13
2.4.1	<i>Mecanismos responsáveis por melhorar o desempenho tribológico de superfícies texturizadas</i>	14
2.4.1.1	<i>Mecanismo de reservatório de lubrificante</i>	14
2.4.1.2	<i>Mecanismo de micro mancais hidrodinâmicos</i>	15
2.4.1.3	<i>Mecanismo de retenção de debris</i>	18
2.4.1.4	<i>Efeito de sucção de entrada (inlet suction)</i>	20
2.4.2	<i>Métodos de texturização superficial</i>	21
2.5	ENSAIOS DE ATRITO E DESGASTE.....	27
3	MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	29
3.1	EQUIPAMENTOS E ANÁLISES.....	29
3.1.1	<i>Equipamentos (tribômetro bloco sobre anel)</i>	29
3.2	MATERIAIS E PREPARAÇÃO SUPERFICIAL.....	31
3.3	ENSAIOS DE TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL.....	34
3.4	ENSAIOS TRIBOLÓGICOS BLOCO SOBRE ANEL.....	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1	PARÂMETROS DE TEXTURIZAÇÃO DO AÇO ABNT 1045.....	41
4.2	ENSAIOS TRIBOLÓGICOS BLOCO SOBRE ANEL.....	46
5	CONCLUSÕES	70

6	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	72
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
8	APÊNDICE I	80
9	APÊNDICE II	82

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A Tribologia é a ciência que estuda superfícies em contato com movimento relativo (JOST, 1990). Ela é uma ciência que aborda o estudo do atrito, desgaste, lubrificação e contato mecânico. Isso permite compreender a interação entre superfícies e propor soluções para problemas fundamentais (TALA-IGHIL; FILLON; MASPEYROT, 2011).

A utilização de superfícies texturizadas para melhorar o desempenho tribológico do contato não é um conceito novo. Por exemplo, algumas estruturas superficiais podem melhorar a adesão, permitindo que rãs de árvores caminhem com segurança sobre superfícies molhadas (BHUSHAN, 2009) ou até mesmo reduzir o arrasto hidrodinâmico de tubarões na água, favorecendo assim seu movimento (DEAN; BHUSHAN, 2010).

Em engenharia, a utilização de alterações topográficas visando a melhora do desempenho tribológico de superfícies é algo que já vem sendo amplamente estudado e utilizado. Os primeiros estudos nesse sentido se iniciaram com a utilização do processo de brunimento para motores de combustão interna com o objetivo de melhorar a lubrificação, reduzir atrito e desgaste (FORBES; TAYLOR, 1943; LEARY; JOVELLANOS, 1944; LIVENGOOD; WALLOUR, 1947).

Hamilton, Walowit e Allen (1966) descobriram que micro irregularidades superficiais eram capazes de criar pressões hidrodinâmicas e então aumentarem a capacidade sustentação de carga em selos mecânicos rotativos. Ao utilizarem rotores transparentes, eles observaram que na parte divergente das asperezas ocorria cavitação e então propuseram que a ocorrência desse fenômeno poderia explicar o ganho na capacidade de carga dos mesmos.

A texturização superficial começou a ganhar maior enfoque a partir de 1996, quando Etsion e seu grupo de pesquisa começaram a estudar o assunto, por meio de estudos teóricos e experimentais, buscando avaliar a influência das mesmas no desempenho tribológico de

superfícies (ETSION; BURSTEIN, 1996)(ETSION; BURSTEIN, 1996). Estudos recentes mostram que a aplicação de texturas em superfícies deslizantes pode efetivamente reduzir ou aliviar o atrito entre as mesmas e seu desgaste (FANG et al., 2015), devido a quatro principais mecanismos: mecanismo de reservatório de lubrificante (*oil reservoir effect*) (SAEIDI et al., 2016); mecanismo de micro mancais hidrodinâmicos (*micro-bearing effect*) (ETSION; HALPERIN, 2002); mecanismo de retenção de partículas abrasivas (*debris trap effect*) (VARENBERG; HALPERIN; ETSION, 2002) e efeito de sucção na entrada (*inlet suction*)(FOWELL et al., 2007; VLĂDESCU et al., 2016)

Apesar de a maioria dos componentes tribológicos ser projetada para operar em regimes lubrificadas, superfícies que se encontram em contato com movimentos relativo, impreterivelmente acabam se deteriorando, devido a partículas duras (*debris*) que adentram na interface das mesmas. Essas partículas podem ter origem externa ou serem provenientes do desgaste do par em contato (WILLIAMS; HYNICICA, 1992).

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar experimentalmente o efeito do controle da topografia em contatos não conformes lubrificadas de amostras de aço ABNT 1045. Com base nos parâmetros definidos em trabalhos anteriores (PARREIRA, 2011), buscou-se avaliar a influência do tempo de texturização eletroquímica na razão profundidade largura de marcas do tipo “V” (RONEN; ETSION; KLIGERMAN, 2001). Após definição dos parâmetros de texturização, foram realizados testes tribológicos do tipo bloco-sobre-anel para os regimes lubrificação limítrofe e misto.

Como objetivos específicos, esse trabalho visa adequar a bancada de texturização eletroquímica para controle da topografia, estabelecer metodologia utilizando tribômetro bloco-sobre-anel e avaliar o efeito da texturização no coeficiente de atrito e taxa de desgaste para os regimes de lubrificação mista e limítrofe. Também objetiva-se avaliar o efeito da posição da textura na superfície, como sua disposição em relação ao sentido de movimento do contra corpo.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONTATO ENTRE SUPERFÍCIES

A rugosidade de uma superfície tem grande influência em vários fenômenos físicos, como atrito, desgaste, adesão e contatos térmicos e elétricos (POPOV, 2017). Quando superfícies estão em contato, basicamente o mesmo se dá por meio da interação entre os picos de rugosidade presentes em ambas as faces envolvidas, conforme ilustrado na Figura 2-1.

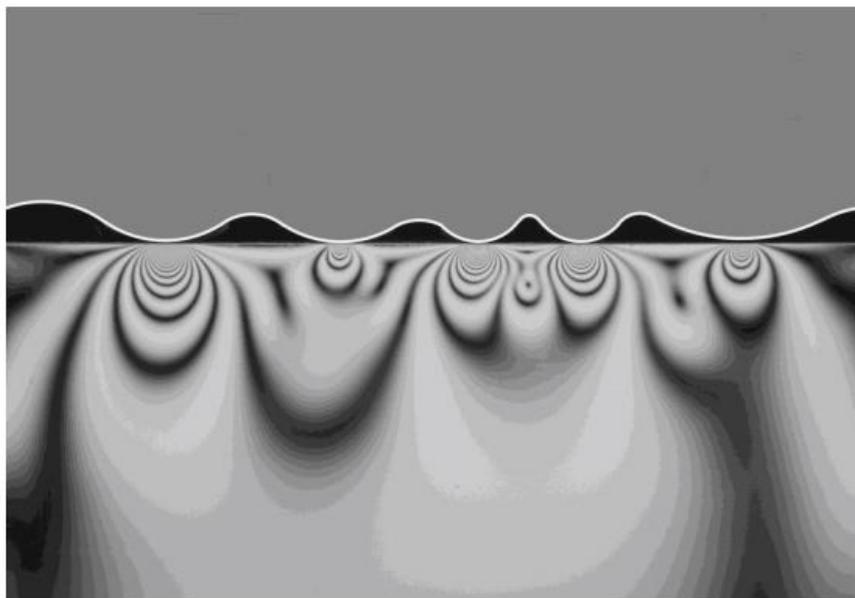


Figura 2-1 Ilustração do contato entre superfícies rugosas (POPOV, 2017).

Tendo isso em vista, segundo Zum Gahr (1987), a área real de contato corresponde à soma das áreas dos picos de rugosidade que participam efetivamente do contato e a área aparente é a região visível e percebida pelo observador, conforme ilustrado na Figura 2-2.

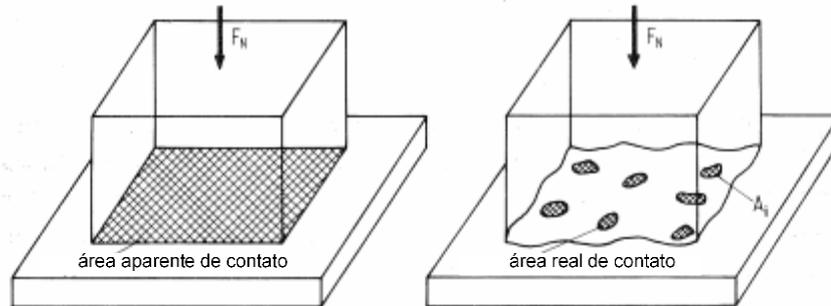


Figura 2-2 Áreas de contato real e aparente. Adaptado de Zum Gahr (1987).

O método mais simples de modelar superfícies rugosas é o modelo proposto por Greenwood e Williamson (1966) para contatos elásticos, que assume que os picos de rugosidade (asperezas) possuem o mesmo raio de curvatura e que a altura dos mesmos é estocasticamente distribuída em torno de um valor médio. Segundo da Silva (2016), como a área de contato e a separação entre superfícies dependem da carga aplicada de maneira semelhante, é possível prever a área de contato elástica por meio da carga, graças ao conceito de dureza elástica, semelhante ao que acontece aos contatos elásticos.

Hutchings e Shipway (2017) classificam o contato entre superfícies como conforme (Figura 2-3) e não conforme (Figura 2-4), fato esse responsável diretamente pela distribuição das cargas aplicadas no contato. Contatos conformes distribuem melhor e mais uniformemente as tensões, o que é benéfico para mancais lubrificados, pois conforme será abordado nas próximas seções, maiores distribuições das pressões levam a formação de filmes lubrificantes mais espessos. Já os contatos não conformes podem apresentar perfis de distribuição de tensão mais acentuados e concentrados próximos ao contato.

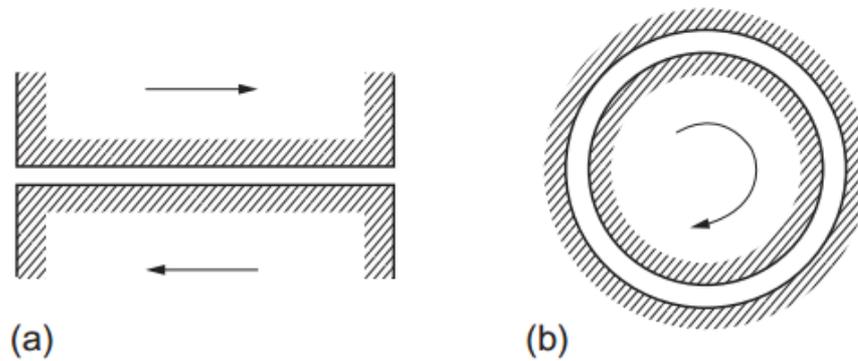


Figura 2-3 Exemplos de contatos conformes: (a) planos opostos deslizando; (b) mancal de deslizamento radial (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017a).

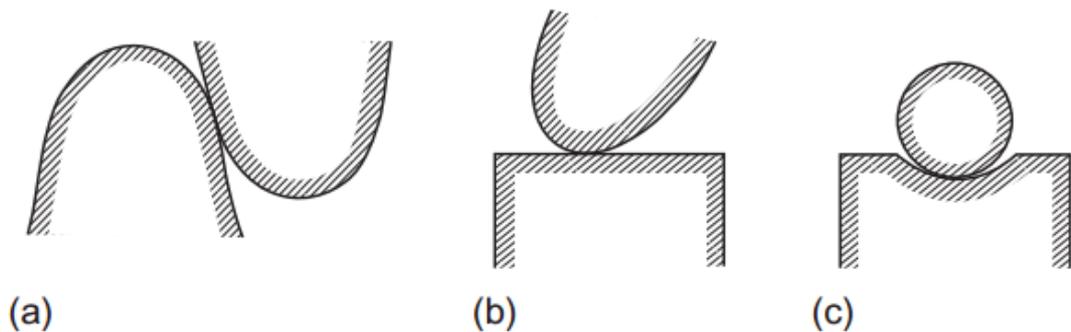


Figura 2-4 Exemplos de contatos não conformes: (a) dentes de engrenagens, (b) came e seguidor, (c) esfera em uma pista de mancal de rolamento (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017a).

Uehara et al. (2004) nos mostram que a texturização altera a distribuição de pressão no contato, já que menores áreas suportarão o carregamento, levando ao aumento da pressão de contato conforme se aumenta a densidade de texturas superficiais.

2.2 ATRITO

O conhecimento e discussão acerca do atrito é documentado em escritos dos antigos gregos, como Aristóteles e Temístio, com estudos datados por volta de 350-330 a.C. (BUDINSKI, 2013; SERWAY, 1987). “Atrito” é um termo que genericamente é utilizado para descrever e representar a dissipação de energia em situações que geralmente envolvem o contato entre corpos e substâncias (PROFITO, 2010). Segundo Hutchings e Shipway (2017), a resistência que um corpo encontra ao se mover em relação a outro é denominada força de

atrito. De acordo com o tipo de movimento, pode-se definir duas classes de movimento (Figura 2-5): rolamento e deslizamento, sendo deslizamento o foco desse trabalho.

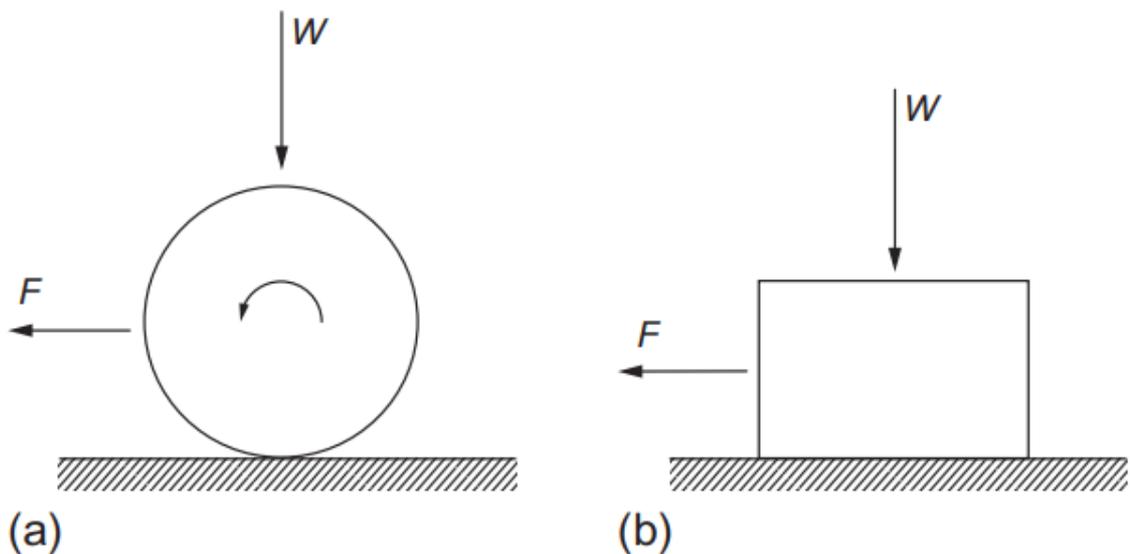


Figura 2-5 Tipos de movimentos relativos de superfícies: (a) rolamento e (b) deslizamento (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017a).

O atrito de deslizamento não lubrificado entre sólidos é governado tradicionalmente por três leis compiladas por Coulomb em 1875, baseadas em estudos e trabalhos prévios de Leonardo da Vinci e Amonton. Estas podem ser descritas como se segue (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017a):

- o coeficiente de atrito independe da área aparente de contato;
- o coeficiente de atrito independe da velocidade de deslizamento dos corpos em contato;
- a força de atrito é proporcional ao carregamento normal externo aplicado;

Vale frisar que essas “leis” são bem genéricas e apesar de serem aplicáveis a várias condições, pode-se dizer que há muitas situações em que elas podem ser quebradas. Basicamente, elas são válidas quando o sistema estudado e analisado, permanece constante, ou seja, está submetido às mesmas condições e características. Porém, é muito comum que em situações reais o sistema tribológico varie, em particular as superfícies em contato (composição, microestrutura, morfologia, etc.).

A magnitude do coeficiente de atrito está fortemente submetida às condições de operação dos sistemas analisados. O mesmo pode variar de valores da ordem de 10^{-3} em sistemas submetidos a carregamentos leves, como, a valores maiores que 10, quando, por

exemplo dois materiais idênticos com superfícies limpas deslizam entre si (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017a).

Para superfícies metálicas, o atrito pode ocorrer devido aos seguintes mecanismos microscópicos (INTERNATIONAL, 1992): adesão (Figura 2-6a), deformação plástica (Figura 2-6b) e presença de terceiro corpo na interface de contato (Figura 2-6c).

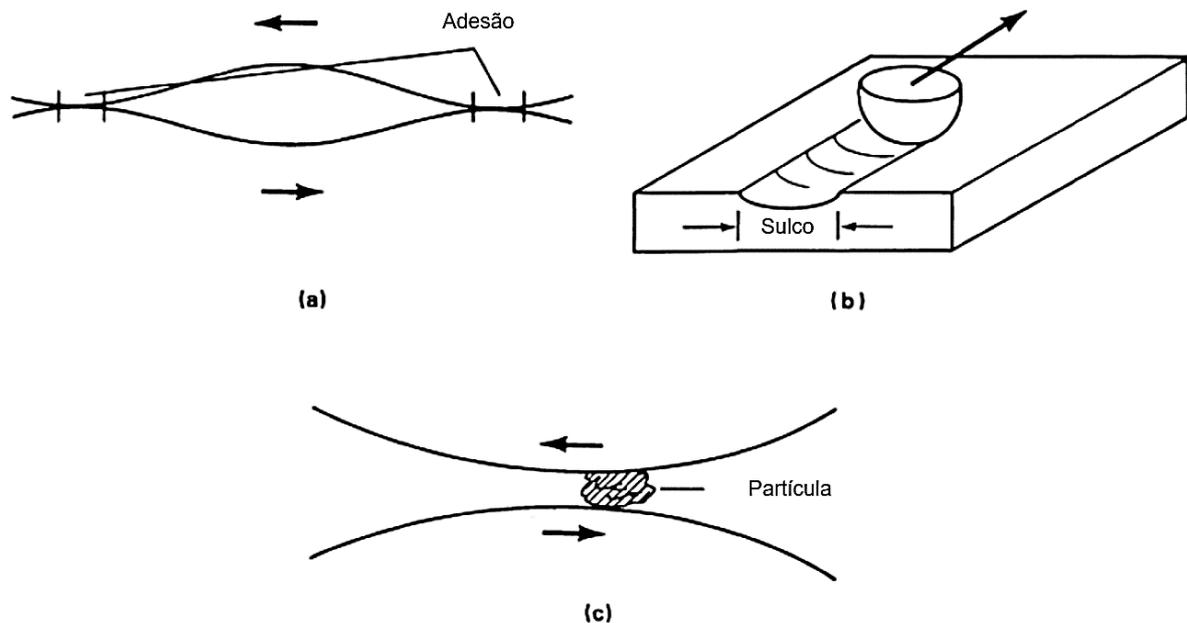


Figura 2-6 Mecanismos microscópicos relacionados ao fenômeno do atrito para superfícies metálicas: (a) adesão, (b) deformação plástica e (c) presença de terceiro corpo na interface de contato. Adaptado de International (1992).

2.2.1 Adesão

A adesão é um mecanismo que ocorre na interface de contato das asperezas que compõem a topografia, devido às forças interatômicas de atração geradas pelos átomos presentes nessa região, conforme ilustrado na Figura 2-6a (LANDMAN et al., 1990). As forças interfaciais causadas pela adesão são dominantes no fenômeno do atrito seco quando as superfícies estão limpas e livres de camadas de óxidos. Sob essas condições, as forças interatômicas de atração entre os átomos são capazes de promover a adesão no contato das asperezas, podendo essa força variar de acordo com a proximidade entre as superfícies, carregamento e acabamento superficial. Por serem inertes, os óxidos formados nas superfícies metálicas quando na presença de oxigênio dificultam a ocorrência desse fenômeno, o que em termos de aplicações de engenharia se torna uma vantagem, já que a maioria das aplicações estão em ambientes com oxigênio, tornando o estudo desse

mecanismo muito importante em aplicações de alto vácuo (PROFITO, 2010; WILLIAMS, 2005).

2.2.2 Deformação

As asperezas das superfícies quando em contato, podem sofrer deformações elásticas e plásticas, para acomodar a tensão aplicada sobre as mesmas, conforme proposto por Bowden e Tabor (1950). A deformação plástica pode ser vista como uma forma de dissipação de energia, sendo essa, resultado da interação de asperezas. Caso as superfícies envolvidas apresentem durezas diferentes, as asperezas provenientes da face com maior dureza serão capazes de formar sulcos visíveis (*plowing*) na superfície com menor dureza, de forma semelhante ao ilustrado na Figura 2-6b (WILLIAMS, 2005).

2.2.3 Presença de terceiro corpo

A presença de um terceiro corpo na interface de contato pode ser responsável por aumentar o coeficiente de atrito do sistema, já que haverá um aumento de deformações plásticas resultantes das interações destes corpos na interface de contato, conforme ilustrado na Figura 2-6c, podendo essas partículas serem provenientes do desgaste do próprio sistema (OKTAY; SUH, 1992; SUH, 1986). Sasada (1984) modela esse fenômeno de formação de debris devido à ruptura de asperezas. Com o aumento do deslizamento entre as superfícies, ocorre uma maior fragmentação de asperezas que se aderem ao fragmento original, levando ao crescimento desse aglomerado que eventualmente pode vir a se destacar. Uma possível explicação para isso é proposta por Kayaba e Kato (1979), que propõe que o fluxo plástico em uma aspereza é seguido pelo destacamento de uma partícula proveniente do desgaste. O cisalhamento plástico de sucessivas camadas ocorre juntamente com a propagação de trincas de cisalhamento, levando ao destacamento do material.

2.3 REGIMES DE LUBRIFICAÇÃO

Quando duas superfícies estão em contato, o carregamento externo aplicado sobre as mesmas é suportado pela interação de asperezas presentes no contato. Sob tais condições, as forças tangenciais requeridas para permitir o movimento relativo entre as superfícies se tornam muito alta, elevando os valores do coeficiente de atrito, desgaste e danos superficiais (PROFITO, 2010; STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013). Para reduzir as forças de atrito entre as superfícies, lubrificantes são utilizados. A função do lubrificante é introduzir entre as superfícies com movimento relativo, uma camada de material com tensão cisalhante menor

que a das superfícies envolvidas e em contato. Apesar de o filme lubrificante não conseguir evitar totalmente o contato entre asperezas de alguns sistemas lubrificadas, ele tem como função diminuir sua ocorrência e reduzir as forças de resistência entre as superfícies (PROFITO, 2010).

Para se definir as condições de lubrificação de um sistema, deve-se levar em consideração alguns parâmetros como carregamento, geometria do contato, velocidade de deslizamento, propriedades do fluido lubrificante e rugosidade das superfícies envolvidas. Para um contato conforme, pode-se segundo Hamrock e Schmid (2004), definir três regimes de lubrificação: hidrodinâmico, misto e limítrofe, conforme ilustrado na Figura 2-7. A seguir, esses três tipos serão apresentados e brevemente discutidos.

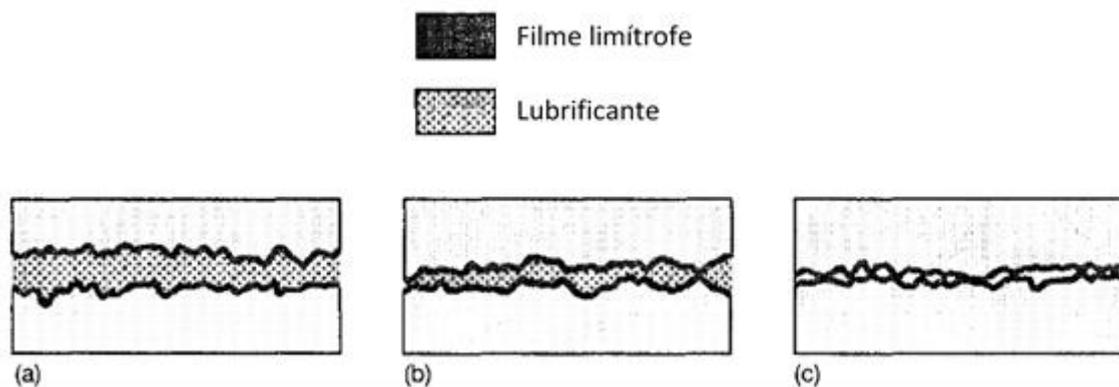


Figura 2-7 Regimes de lubrificação: (a) Hidrodinâmico; (b) Misto; (c) Limítrofe. Adaptado de Hamrock e Schmid (2004).

No regime de lubrificação hidrodinâmico (HL), as superfícies com movimento relativo são completamente separadas por uma camada relativamente fina de fluido lubrificante, onde o carregamento normal é suportado pela pressão hidrodinâmica do fluido, resultado das forças viscosas provenientes do movimento relativo ao qual o fluido é submetido. Esse regime ocorre geralmente em superfícies conformes (Figura 2-3), posicionadas bem próximas, com uma pequena separação entre elas (*gap*), sendo esse espaço preenchido com fluido lubrificante (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017a).

Geralmente, esse regime é almejado por projetos mecânicos, sendo considerado como forma ideal de lubrificação, devido aos seus baixos níveis de atrito e elevada resistência ao desgaste (PROFITO, 2010). Dentre os sistemas que operam nesse regime, destacam-se os mancais radiais (*journal bearings*) e de escora (*thrust bearings*), que devido às suas superfícies convergentes e ao movimento relativo associado à viscosidade do fluido geram

um perfil de pressão positivo responsável por separar as superfícies (HAMROCK; SCHMID, 2004).

O regime de lubrificação misto (ML) pode ser entendido como uma situação onde a espessura do filme lubrificante não consegue separar completamente as asperezas das superfícies em contato, de forma que parte do carregamento é suportado por um filme lubrificante e parte é suportado pelo contato entre as asperezas mais elevadas. O regime de lubrificação limítrofe (BL) ocorre quando o sistema é submetido a elevadas pressões de contato ou velocidades de deslizamento baixas, fazendo assim com que as forças hidrodinâmicas não sejam suficientes para manter um filme de fluido lubrificante contínuo entre as superfícies (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017a). Nesse regime, conforme ilustrado na Figura 2-7c, as superfícies não são mais separadas por um filme lubrificante e o carregamento é suportado pelas asperezas em contato e pelo filme tribológico molecular formado (ver Figura 2-8). Os valores característicos de coeficiente de atrito encontrados nesse regime são maiores do que os observados no hidrodinâmico e misto, porém menores do que observados em sistemas não lubrificadas. Nesse regime, o atrito é independente da viscosidade do fluido lubrificante, dependendo apenas das propriedades físico-químicas do filme molecular (PROFITO, 2010).

Na busca de melhorar os efeitos do filme tribológico, utiliza-se aditivos nos fluidos lubrificantes, tendo esses o objetivo de formação de sulfetos, cloretos ou fosfatos na interface da superfície. Esses elementos são responsáveis por proporcionar filmes mais estáveis e eficazes, protegendo as superfícies e evitando assim o contato puro entre asperezas em condições extremas de lubrificação (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013).

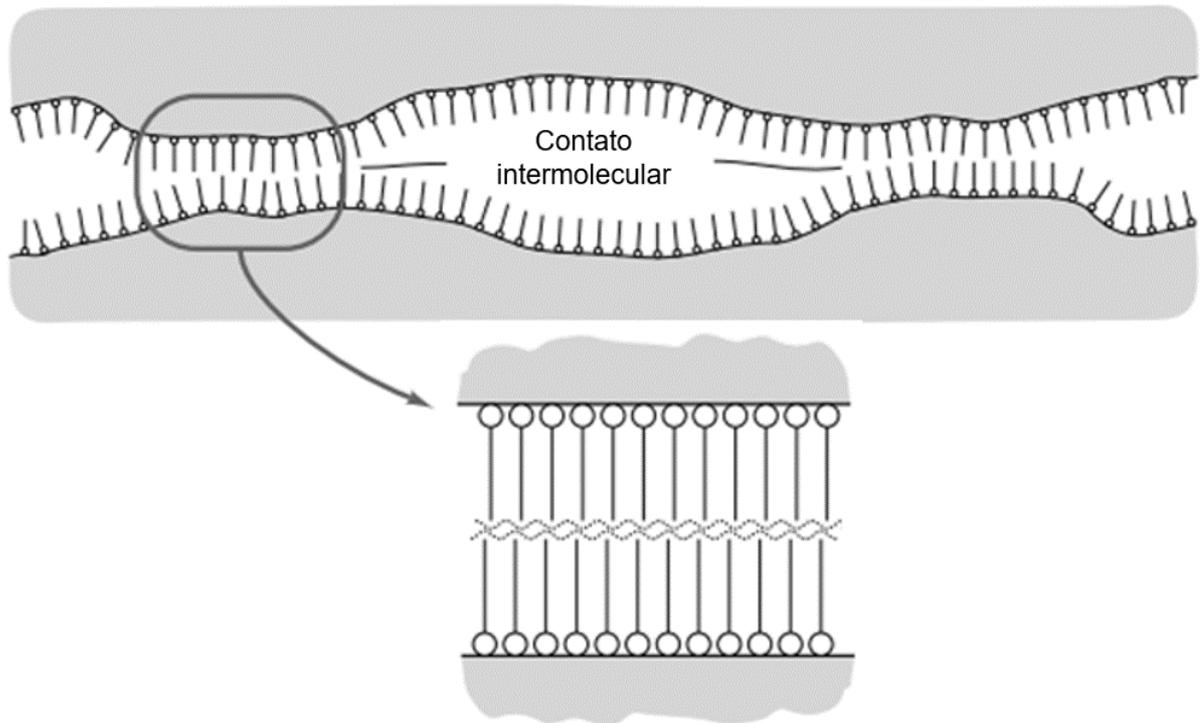


Figura 2-8 Ilustração de cadeias carbônicas e grupos polares adsorvidos da superfície, provendo uma camada molecular hidrofóbica de lubrificante responsável por reduzir o contato entre asperezas. Adaptado de Stachowiak e Batchelor (2013).

Para contatos não conformes (como ilustrado na Figura 2-4), também é possível obter-se um filme contínuo separando as superfícies, um regime misto, ou um regime limítrofe, dependendo das condições operacionais. Porém, no caso de contatos não-conformes utiliza-se o termo lubrificação elastohidrodinâmica (EHL), onde as deformações elásticas dos corpos em contato e as alterações de viscosidade do fluido, promovidas pelas elevadas pressões e altas taxas de cisalhamento desenvolvidas no contato, apresentam papel fundamental na compreensão do regime de lubrificação e dos fenômenos associados ao mesmo (HAMROCK; SCHMID; JACOBSON, 2004; STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013).

Porém, é possível também ter-se lubrificação EHL em contatos conformes desde que os corpos apresentem baixo módulo de elasticidade. Assim, diferencia-se EHL moderado (“soft EHL”) e severo (“hard EHL”). EHL moderado ocorre em corpos com módulo de elasticidade menor, resultando em menores pressões no contato, levando à não consideração da influência da mesma sobre a viscosidade do fluido, ou seja, apenas a deformação elástica no contato das superfícies precisa ser levada em conta. Em EHL duro, o aumento da viscosidade do fluido com a pressão e a deformação elástica das superfícies em contato

podem garantir um filme completo entre as superfícies mesmo para as altas pressões de contato envolvidas (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017a).

2.3.1 Curva de Stribeck

A curva de Stribeck é uma ilustração gráfica que busca auxiliar a compreensão dos regimes de lubrificação. Um exemplo genérico dessa curva para contatos conformes e não conformes pode ser observado na Figura 2-9, onde a ordenada do gráfico corresponde ao coeficiente de atrito em condições de regime permanente e a abscissa da relação adimensional $H = \eta U/W$ conhecida por número de Hersey, que relaciona a viscosidade do fluido η , com a velocidade U e carga W .

Um parâmetro bastante utilizado na separação dos regimes de lubrificação é o parâmetro λ obtido pela seguinte relação:

$$\lambda = \frac{h_{min}}{\sigma^*}, \quad (2.1)$$

onde h_{min} corresponde à espessura específica de filme lubrificante e σ^* é o valor combinado do desvio padrão das alturas das asperezas das duas superfícies (σ_1 e σ_2) em contato, obtido pela seguinte relação: $\sigma^* = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$.

Por meio desse parâmetro, podemos definir os três regimes de lubrificação para contatos conformes como já discutidos acima, da seguinte forma:

- $\lambda < 1$: valores nessa faixa estão associados a condições de baixas velocidades e carregamentos altos. Com essas características, os efeitos hidrodinâmicos são inibidos, caracterizando o regime de lubrificação limítrofe, com elevados valores de coeficiente de atrito e elevado desgaste;
- $1 < \lambda < 3$: com o aumento da velocidade e/ou redução da carga imposta, os efeitos hidrodinâmicos passam a ser relevantes e a separação entre as superfícies começa a ocorrer, reduzindo assim a ocorrência do contato entre asperezas, caracterizando assim o regime de lubrificação misto;
- $\lambda > 3$: nessa condição, os efeitos hidrodinâmicos são intensificados, ocasionando assim uma maior espessura do filme de fluido lubrificante, até que ocorra a total separação das superfícies. Nessa situação, os coeficientes de atrito encontrados são baixos e o nível de desgaste é bastante reduzido, devido à ausência do contato de asperezas, caracterizando assim o regime de lubrificação hidrodinâmico. Conforme o parâmetro λ se eleva, o coeficiente de

atrito tende a crescer, devido ao aumento da espessura de filme e consequente aumento da perda de energia devido a dissipação viscosa das camadas de fluido a serem cisalhadas.

Para contatos não conformes, os limites dos regimes de lubrificação ocorrem para valores de λ inferiores aos citados. Segundo Zhu e Wang (2012), o regime limítrofe ocorre para valores de λ inferiores a 0,01 e 0,05 e o regime hidrodinâmico ocorre para valores maiores que 0,6 e 1,0, com o regime misto no intervalo descrito entre esses valores.

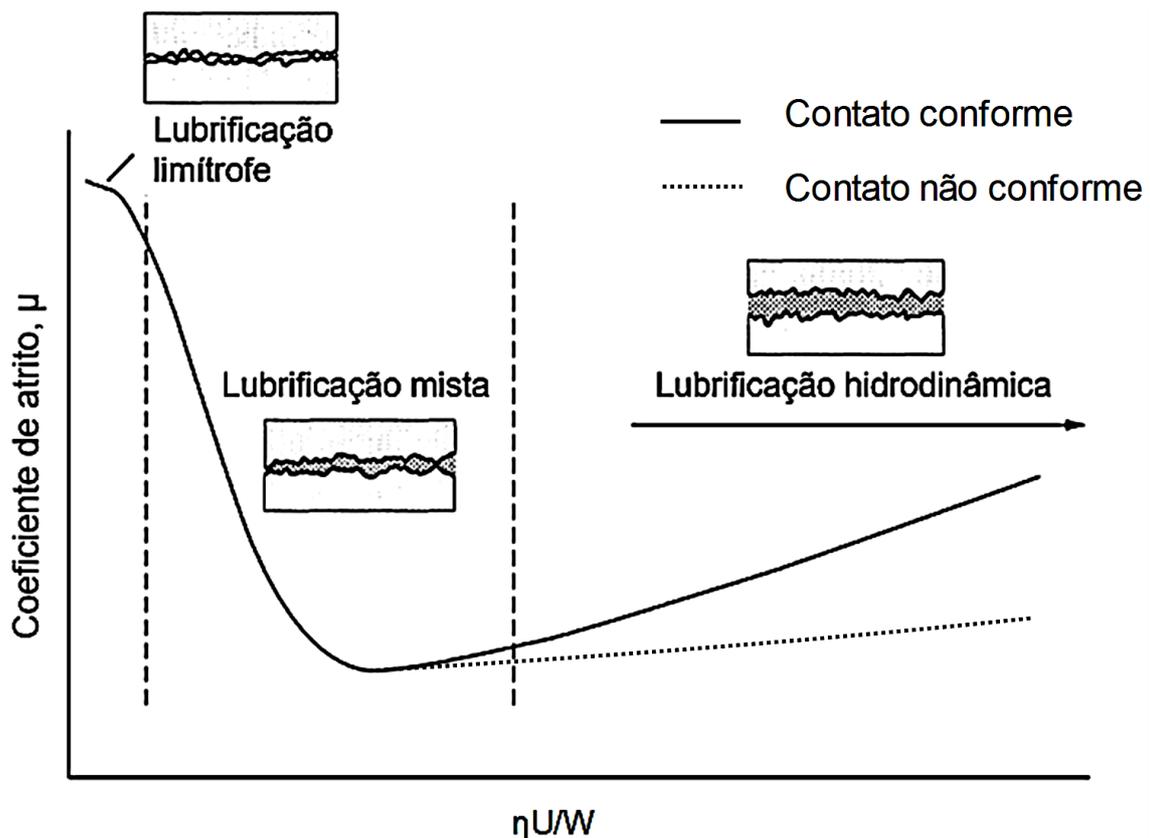


Figura 2-9 Curva de Stribeck ilustrando os diferentes tipos de lubrificação para contatos conformes e não conformes. Adaptado de (HAMROCK; SCHMID; JACOBSON, 2004; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017b).

2.4 TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL

A formação de micro cavidades regulares por meio da texturização superficial, com o objetivo de melhorar o desempenho tribológico de superfícies com movimento relativo, é bem reconhecida e discutida na literatura. Estudos recentes mostram que a aplicação de texturas

em superfícies deslizantes pode efetivamente reduzir ou aliviar o atrito e desgaste entre as mesmas (FANG et al., 2015).

Recentemente, a texturização superficial tem sido utilizada em uma grande variedade de aplicações como: camisas e anéis de cilindros de motores a combustão interna (RYK; KLIGERMAN; ETSION, 2002), selos mecânicos (YU; HE; CAI, 2002), mancais de escora (ETSION et al., 2004) e ferramentas de usinagem (KAWASEGI et al., 2009). Com o avanço das técnicas de texturização e avanços tecnológicos, novos estudos foram possíveis de serem realizados e pôde-se chegar a quatro principais mecanismos responsáveis por melhorar o desempenho tribológico de superfícies texturizadas: mecanismo de reservatório de lubrificante (*oil reservoir effect*) (SAEIDI et al., 2016); mecanismo de micro mancais hidrodinâmicos (*micro-bearing effect*) (ETSION; HALPERIN, 2002); mecanismo de retenção de debris (*debris trap effect*) (VARENBERG; HALPERIN; ETSION, 2002) e efeito de sucção na entrada (*inlet suction*) (FOWELL et al., 2007; VLĂDESCU et al., 2016), como será brevemente discutido a seguir.

2.4.1 Mecanismos responsáveis por melhorar o desempenho tribológico de superfícies texturizadas

2.4.1.1 Mecanismo de reservatório de lubrificante

Esse mecanismo consiste na retenção de fluido lubrificante no interior das micro cavidades, proporcionando proteção das superfícies em contato contra a ocorrência de sulcamento. Para se obter esse efeito, alguns autores tem sugerido que a razão entre a profundidade e o comprimento das micro cavidades deve ser da ordem de 0,1 a 0,18 (RONEN; ETSION; KLIGERMAN, 2001). Esse reservatório ajuda na formação de um filme lubrificante que é puxado para área de contato devido ao fluxo viscoso do fluido, conforme ilustrado na Figura 2-10 (UEHARA et al., 2004).

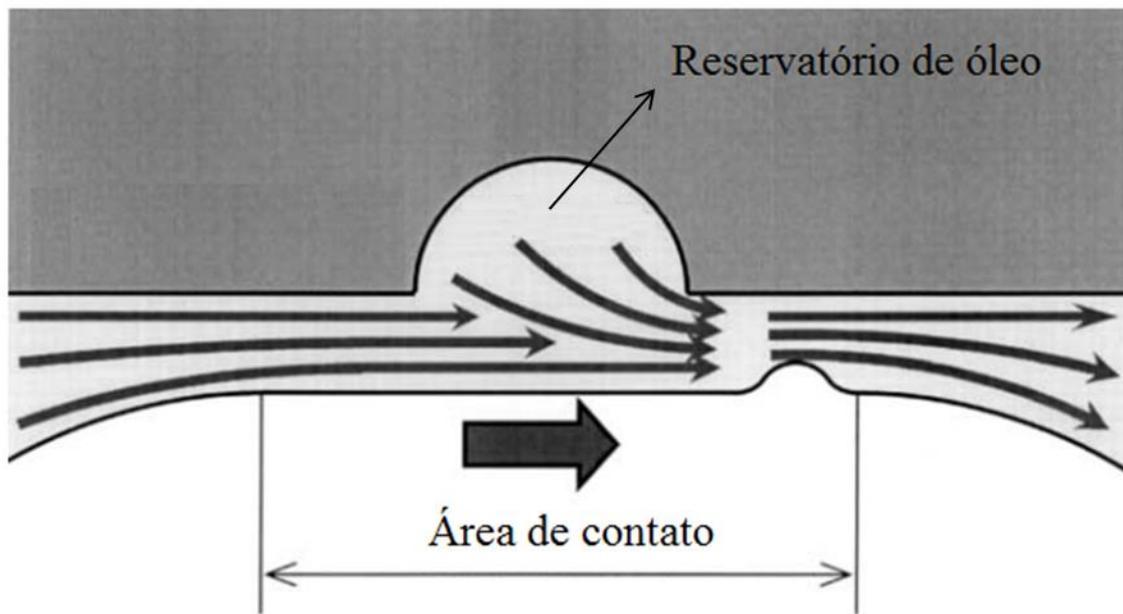


Figura 2-10 Efeito da microcavidade agindo como reservatório de fluido lubrificante. Adaptado de (UEHARA et al., 2004).

Segundo Uehara et al., (2004), apesar de poderem ter efeito benéfico agindo como reservatórios de fluido lubrificante, a microcavidade pode ter o efeito negativo de aumentar a pressão de contato devido à redução de área de contato. Em condições onde o filme lubrificante é fino, o efeito positivo supera o negativo, já que o contato entre asperezas é alto e o fluido lubrificante que estava na microcavidade reduz o cisalhamento entre as superfícies, podendo reduzir o coeficiente de atrito. Quando o filme é espesso, observa-se o oposto e não há redução do coeficiente de atrito, pois o efeito de redução de área prevalece.

2.4.1.2 Mecanismo de micro mancais hidrodinâmicos

Nesse mecanismo, as microtexturas funcionam como micromancais, gerando pressões hidrodinâmicas significativas nas regiões convergentes. As microcavidades proporcionam capacidade de sustentação de carga devido à assimetria dos campos de pressão gerados sobre as mesmas (PROFITO, 2010), conforme ilustrado na Figura 2-11, que exemplifica a distribuição de pressão em um bolso circular (microtextura em formato circular), onde U é a direção do movimento do fluido lubrificante, promovida pelo movimento relativo das superfícies.

De acordo com Lu e Khonsari (2007), a assimetria sobre as microcavidades é resultado da ocorrência de cavitações localizadas, onde sem a ocorrência da mesma, as pressões positivas e negativas se anulariam. Na Figura 2-12 é possível observar como é uma região de

cavitação (região mais escura) em uma microcavidade esférica obtida por simulação numérica.

Segundo os mesmos autores, a assimetria no campo de pressão, quando no regime de lubrificação hidrodinâmico, possibilita a ocorrência de pressões hidrodinâmicas maiores, responsável pela formação de filmes de lubrificantes mais espessos, resultando em menores tensões cisalhantes e coeficientes de atrito reduzidos.

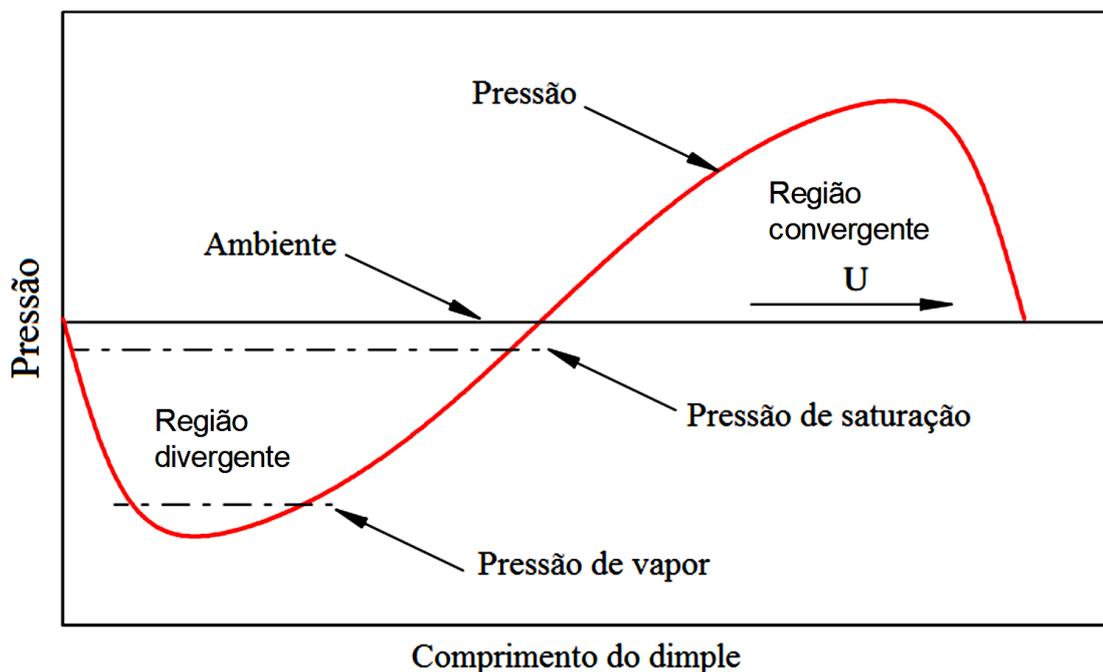


Figura 2-11 Distribuição de pressão local em uma cavidade ao longo da direção de movimento do fluido (LU; KHONSARI, 2007).

Outro fator que pode influenciar os efeitos de cavitação e geração de pressão hidrodinâmica é a superfície ser parcial ou totalmente texturizada. Tala-Ighil e Fillon (2015) mostraram que texturização total não consegue gerar capacidade de carregamento hidrodinâmico pelos efeitos de cavitação. Para mancais rotativos, com região convergente e divergente, a texturização parcial tem efeitos benéficos, aumentando a região de cavitação devido a diminuição da área de filme completo, quando posicionada em regiões com ângulo maior que 180° .

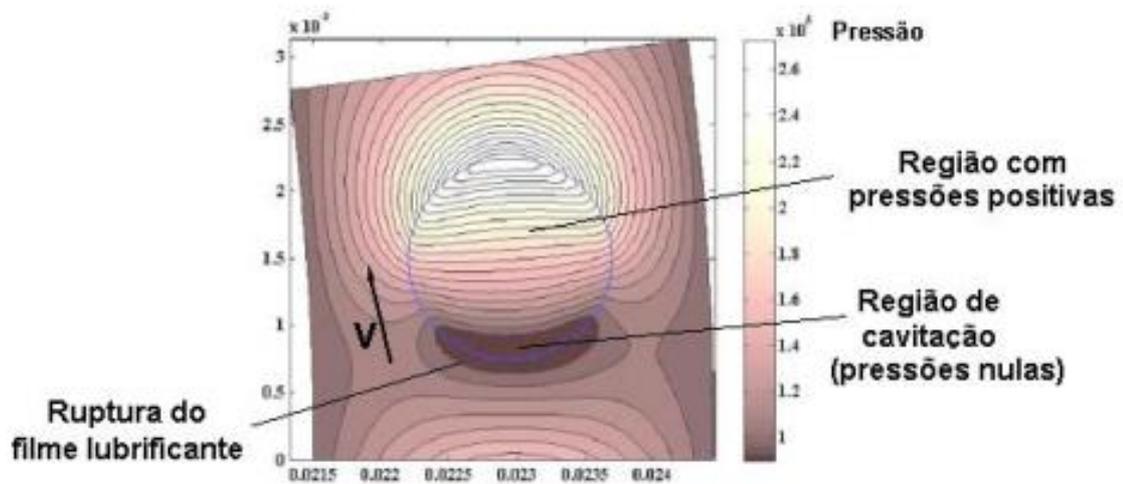


Figura 2-12 Identificação da região de cavitação sobre uma micro cavidade obtida por simulação numérica (PROFITO, 2010).

A orientação da textura em relação ao sentido de movimento pode influenciar o campo de pressão hidrodinâmico gerado pelas texturas, graças à restrição lateral do fluxo de fluido lubrificante, conforme ilustrado na Figura 2-13. Essa restrição influencia o desempenho e a eficiência da superfície texturizada, conforme mostrado por Costa e Hutchings (2007).

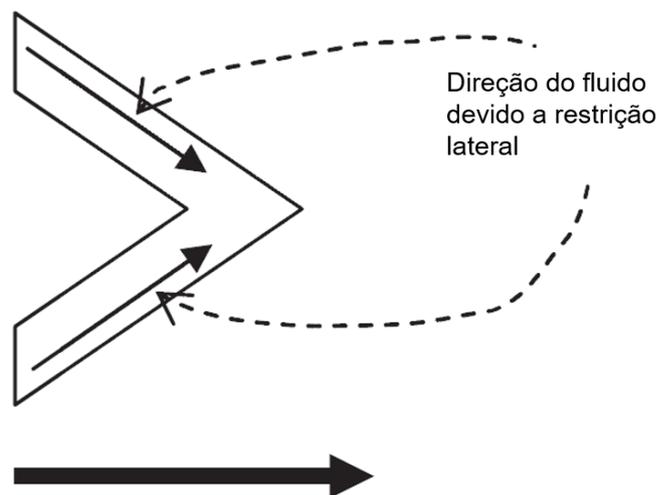


Figura 2-13 – Orientação relativa do *chevron* em relação ao sentido de movimento. Seta em negrito indica a direção de movimento e as setas dentro da textura indicam a direção do escoamento do fluido, causado pela restrição lateral. Adaptado de (COSTA; HUTCHINGS, 2007).

2.4.1.3 Mecanismo de retenção de debris

Segundo Profito (2010), esse mecanismo consiste na armazenagem de partículas com potencial abrasivo presentes entre as superfícies lubrificadas, proporcionando assim melhora na resistência ao desgaste abrasivo do meio. Recentemente na literatura esse aspecto tem sido amplamente estudado devido aos ótimos resultados encontrados, conforme exemplificado abaixo.

Borghetti et al., (2008) analisaram os efeitos da texturização superficial em aços nitretados para aplicações em motores de alto desempenho. Nesse estudo, foram analisados os comportamentos de superfícies com e sem textura nos três regimes de lubrificação (limítrofe, misto e hidrodinâmico). Nesse trabalho, as texturas utilizadas foram no formato circular esférico, denominadas *dimples*, produzidas por meio do processo a laser. Ao se analisar os resultados, pode-se perceber claramente a presença de debris no interior das texturas (Figura 2-14b) resultando em menores coeficientes de atrito e desgaste, quando comparadas às superfícies sem texturas onde, além de apresentarem valores maiores dos mesmos, pôde-se perceber a presença de debris na interface das superfícies de contato (Figura 2-14a e a') e diferenças nas marcas de desgaste provenientes dos ensaios.

Sun et al., (2015) analisaram o comportamento tribológico de seis tipos de microtexturas, variando diâmetro e densidade de área em uma liga de titânio a 500 °C. O formato escolhido de textura para o estudo foi *dimple*, obtidos por laser. Observou-se que a textura aumentou a quantidade de oxigênio adsorvido na superfície da amostra, promovendo uma maior formação de tribocamadas, quando comparadas às amostras não texturizadas, o que resultou em melhora na resistência ao desgaste da liga. Concluiu-se por meio do estudo que *dimples* com menores diâmetros e maiores densidades de área permitiram maiores ganhos tribológicos às amostras conforme ilustrado na Figura 2-15.

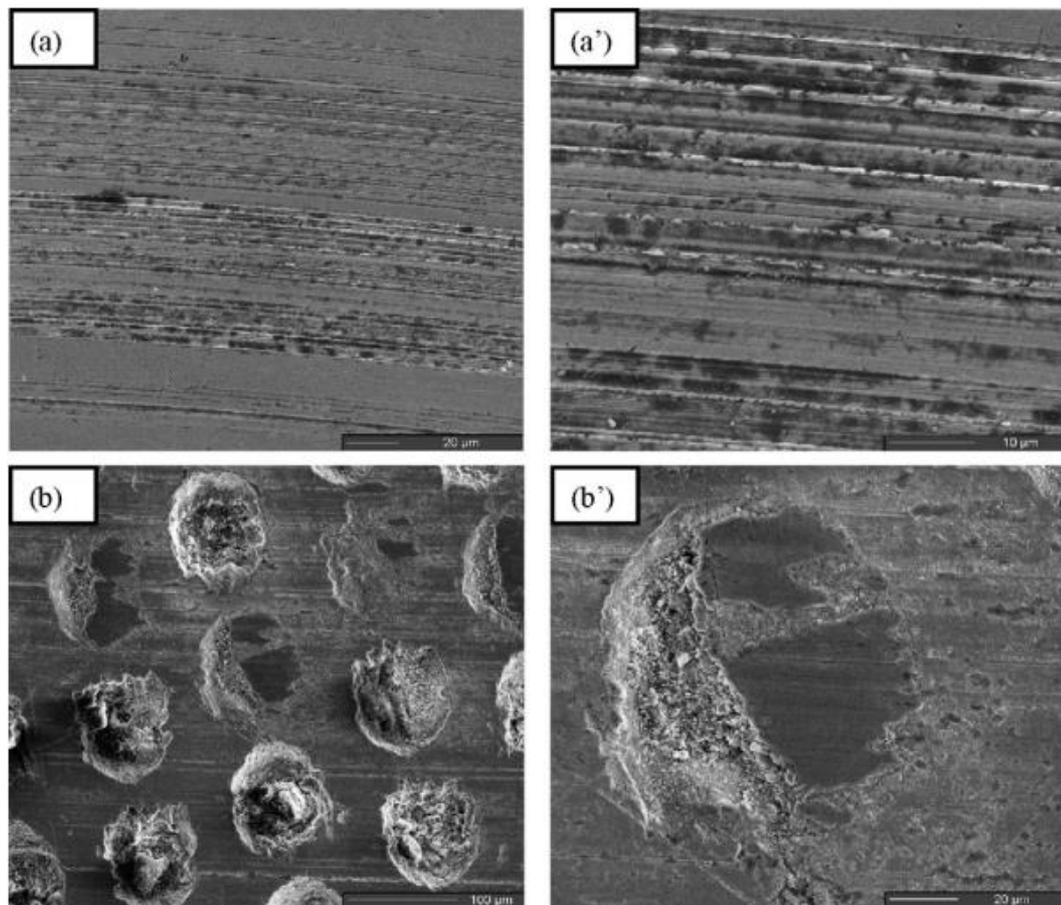


Figura 2-14 Micrografias obtidas por MEV da superfície não texturizadas (a e ampliada a') e texturizada (b e um único *dimple* ampliado) (BORGHI et al., 2008).

Rosenkranz et al., (2015) realizaram um estudo experimental sobre texturas em formatos de cruz denominados *cross-like* para diferentes comprimentos de onda estruturais em aço inox 304 no regime de lubrificação misto, avaliando a influência de microtexturas na vida do fluido lubrificante. Pôde-se perceber que graças às texturas, as partículas abrasivas foram retiradas da área de contato, reduzindo o desgaste abrasivo e prolongando a vida do fluido lubrificante consideravelmente, já que as mesmas estavam armazenadas nas texturas.

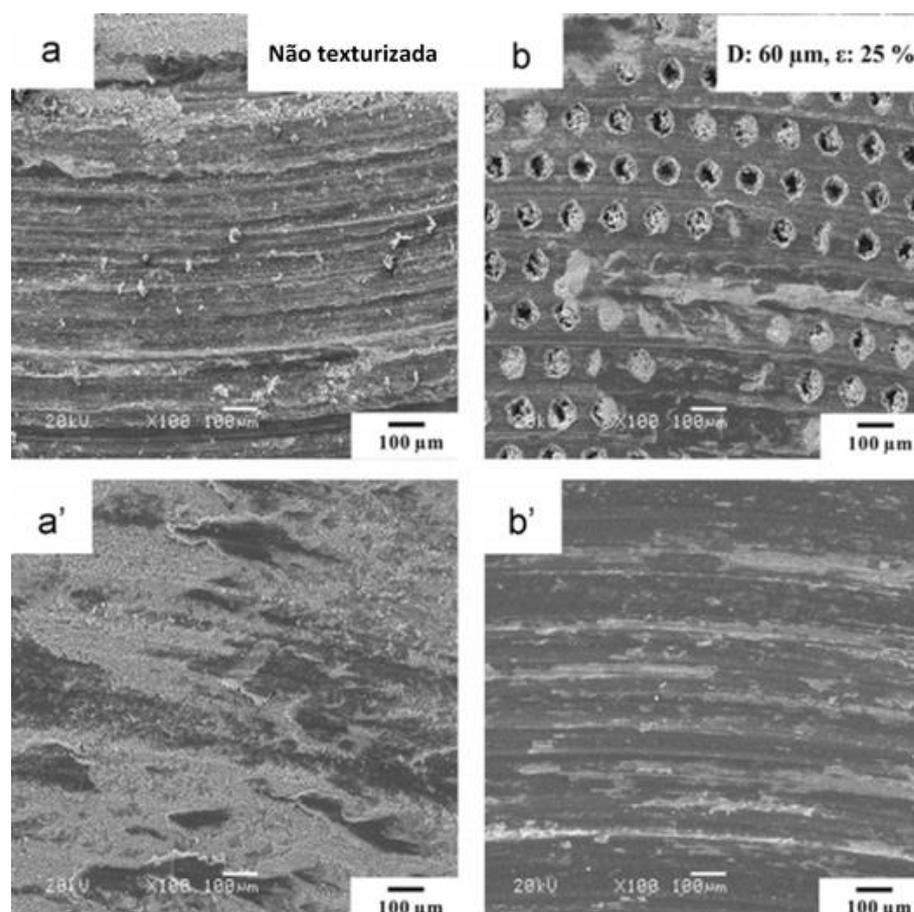


Figura 2-15 Marcas de desgaste obtidas por MEV corpo (a,b) e contra corpo (a',b') (SUN et al., 2015).

2.4.1.4 Efeito de sucção de entrada (*inlet suction*)

Segundo Fowell et al., (2007), o efeito de sucção na entrada pode ser explicado esquematicamente por meio da Figura 2-16. Nela, pode-se ver que a superfície inferior do mancal se movimenta com velocidade uniforme u_1 , sendo as superfícies separadas por um filme lubrificante de viscosidade η , com distância de separação h_0 . Segundo os autores, a superfície de entrada do mancal, denominada *inle*” geralmente está submetida a pressões externas elevadas. Quando o lubrificante adentra na região da textura, pode ocorrer uma significativa redução de pressão, levando inclusive à ocorrência de cavitação. Esse decréscimo de pressão é responsável pelo mecanismo de sucção, que faz com que o lubrificante entre na região de contato, conforme pode ser visto na Figura 2-12.

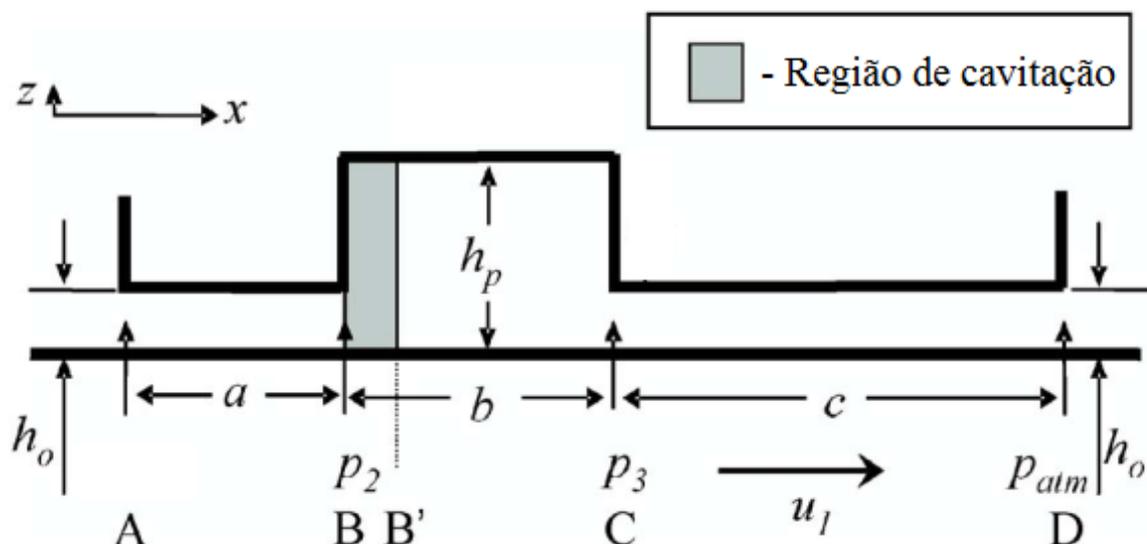


Figura 2-16 – Desenho esquemático de um mancal texturizado (FOWELL et al., 2007).

2.4.2 Métodos de texturização superficial

Segundo Costa e Hutchings (2015), pode-se dividir os métodos de texturização em quatro grupos, que se diferenciam conforme a natureza física da modificação superficial proposta por cada um, conforme visto abaixo:

- adição de material: o padrão de texturas é criado por meio da adição de material à superfície desejada, criando pequenas áreas em relevo;
- remoção de material: os padrões são formados por meio da remoção de material da superfície, criando pequenas depressões;
- movimentação de material: a alteração da estrutura superficial é atribuída à deformação plástica e redistribuição de material de algumas partes da superfície;
- auto formação: em uma superfície, há regiões com diferentes resistências ao desgaste, sendo que a formação de texturas ocorra através do desgaste das mesmas, onde o material mais resistente é deixado como protuberâncias acima do material circundante.

Dentre os processos que envolvem remoção de material, o qual será o enfoque desse trabalho, pode-se subdividir em três principais grupos: os que envolvem alta temperatura (laser, eletro-erosão, feixe de íons), ataque químico (métodos com e sem mascaramento) e processos mecânicos (usinagem e erosão). Dentre os processos que envolvem remoção de material, tem-se o processo a laser como principal destaque, se encaixando dentro dos

processos que envolvem altas temperaturas. Segundo Etsion (2005), esse processo é um dos mais promissores devido a sua alta velocidade, o que permite tempos curtos de processamento, ser limpo em relação ao meio ambiente, proporcionar ótimo controle de acabamento e forma, além de poder ser aplicado para vários tipos de materiais, o que o torna extremamente versátil. Segundo Kovalchenko et al., (2005) nesse processo ocorre a ablação do material, devido as altas quantidades de energia envolvidas no processo.

Segundo da Silva (2016), apesar das vantagens, esse processo apresenta como desvantagem uma zona protuberante ao redor dos padrões superficiais inseridos, oriundos da refusão do material que pode ocorrer concomitantemente à ablação, conforme ilustrado na Figura 2-17a. Essa região apresenta dureza elevada devido as altas taxas de resfriamento e podem agir como abrasivo aumentando o desgaste no sistema. Para contornar esse aspecto, pode-se partir de duas alternativas: polimento e utilização de laser pulsados da ordem de femtosegundos (fs) (ver Figura 2-17b). O laser pulsado concentra mais energia por pulso, diminuindo a zona afetada pelo calor (ZAC) e consequentemente a zona refundida.

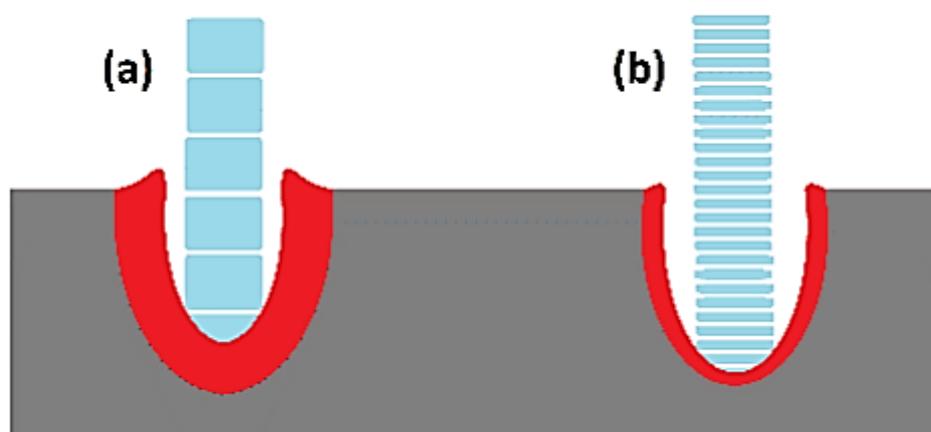


Figura 2-17 Ablação a laser: (a) Pulsos longos que resultam em maior ZAC bem como zona refundida protuberante, (b) pulsos curtos que permitem menor ZAC e diminuição de zonas refundidas (DA SILVA, 2016).

Dentre os processos que envolvem ataque químico, tem-se dois principais grupos, os que envolvem mascaramento e os que dispensam essa etapa. Segundo Costa e Hutchings (2015), a etapa de mascaramento é necessária em processos que exigem reações químicas em áreas seletivas, consistindo na criação de uma etapa protetora não reativa sobre a peça, responsável por deixar exposta apenas as regiões onde se quer que ocorram as reações (DA SILVA, 2016). Considerando os processos que envolvem essa etapa, pode-se destacar os seguintes métodos:

- texturização fotoquímica: Zhang e Meng (2012) esse é um dos processos de manufatura não convencionais mais antigos. Ele é uma combinação do processo de imagem foto resistiva (fotolitografia) e ataque químico. O processo basicamente consiste em mascarar a superfície a ser texturizada seguindo de posterior ataque químico, conforme ilustrado no esquema mostrado na Figura 2-18. O processo consiste nos seguintes passos: limpeza da amostra, aplicação de um filme foto sensível em um local com iluminação amarela, já que o filme não reage para esse comprimento de onda e aquecimento brando até que haja cura do filme. Coloca-se uma máscara com furos com o objetivo de bloquear seletivamente a passagem da luz ultravioleta (UV), a qual a mostra será submetida em seguida, com o objetivo de revelar o filme fotossensível, resultando em um padrão idêntico ao observado na máscara com furos. Em seguida, a amostra é submetida ao ataque químico responsável por remover material da região desprotegida pelo filme. Ao fim do processo, o filme é então totalmente removido pela ação de solventes (COSTA; HUTCHINGS, 2015; DA SILVA, 2016; ZHANG; MENG, 2012);

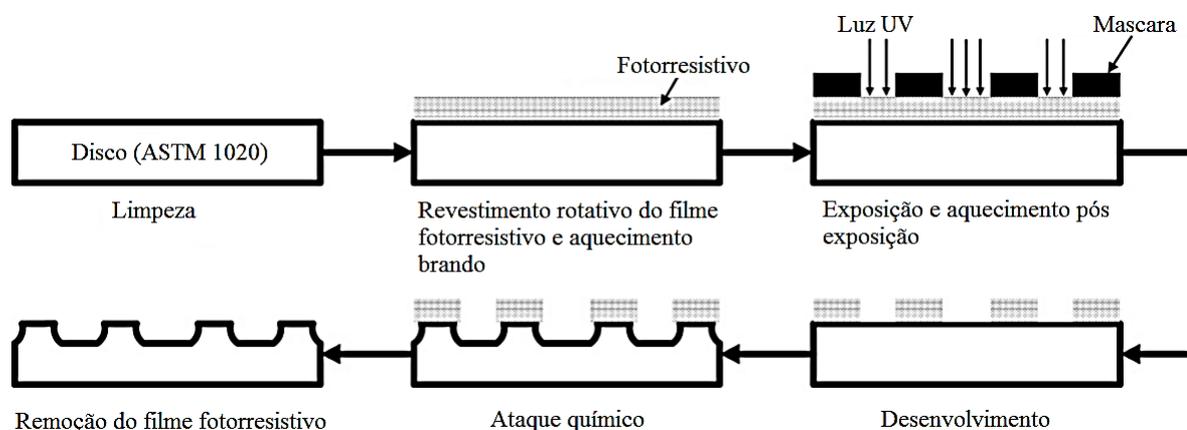


Figura 2-18 Texturização por processo fotoquímico. Adaptado de (ZHANG; MENG, 2012).

- mascaramento por impressão a jato de tinta: nesse método os padrões são impressos na superfície a ser texturizada por meio de uma impressora a jato de tinta, como o próprio nome diz, onde a tinta atuará como protetora e barreira para o subsequente ataque químico (COSTA; HUTCHINGS, 2015). Deve-se ficar atento às condições superficiais da amostra a ser texturizada, com relação a limpeza e acabamento superficial, pois esses podem influenciar o ângulo de molhamento da mesma, resultando em possíveis distorções no filme impresso. Na Figura 2-19 tem-se um exemplo da aplicação desse método.

Dentro dos processos de ataque químico sem máscara, temos o processo de texturização superficial sem mascaramento que consiste na microusinagem eletroquímica. Segundo Bhattacharyya e Munda (2003), a usinagem eletroquímica tem atraído atenção da indústria ao longo da última década devido às suas inúmeras vantagens como: não desgaste de ferramenta, livre de tensões residuais, sem deformações plásticas, sem formação de rebarbas, resulta em superfícies com baixa rugosidade e aplicável a superfícies complexas, desde que essas sejam condutoras elétricas. Esse processo tem por base o fenômeno de dissolução anódica, onde o material que possui menor potencial de redução (com menor tendência a adquirir elétrons) fará o papel de ânodo da reação.

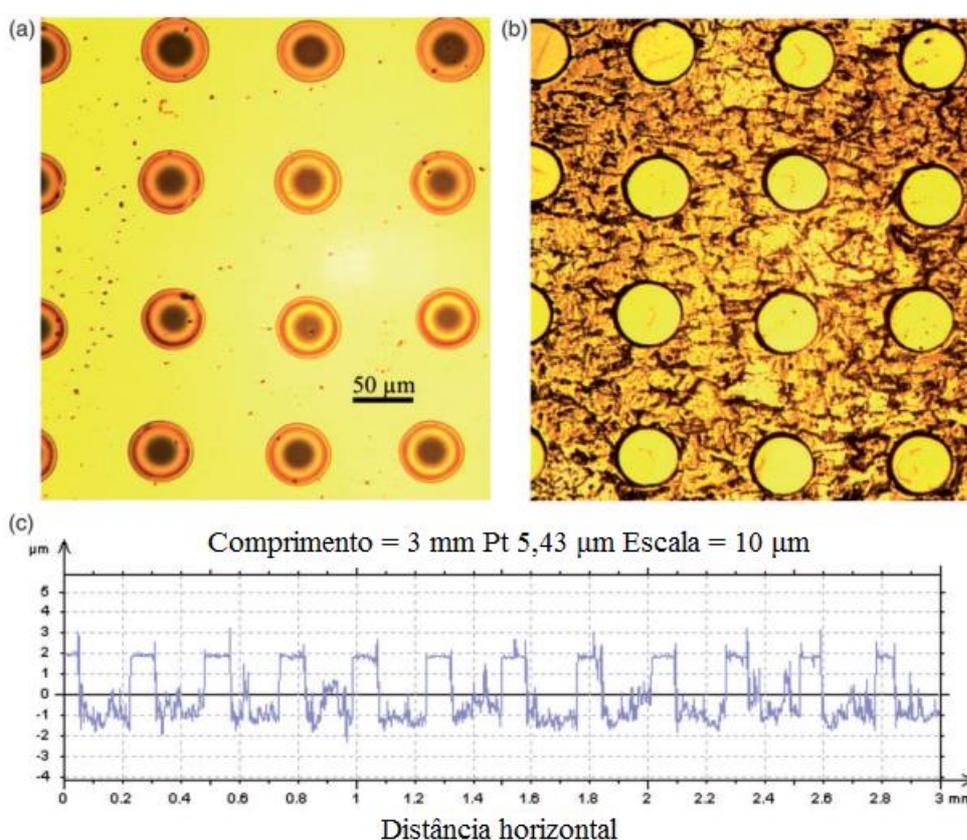


Figura 2-19 Impressão de pontos individuais, utilizando impressora DMP-2800: (a) microscopia ótica após impressão, (b) microscopia ótica após ataque e remoção, (c) perfil em linha. Adaptado de (COSTA; HUTCHINGS, 2015).

Segundo NPTEL (2008), pode-se utilizar a usinagem de uma amostra de ferro puro (Fe^{++}) para exemplificar o processo. Quando a mesma se encontra em uma solução eletrolítica de cloreto de sódio (NaCl), submetida a aplicação de um diferencial de potencial, ocorre a dissociação da água (H_2O) e do sal. Devido a diferença de potencial da amostra (ânodo) e ferramenta (cátodo), os íons positivos se movem em direção a ferramenta e os negativos em

direção à amostra. Conforme íons de hidrogênio (H^+) levam elétrons em direção a ferramenta, ocorre a formação de hidrogênio gasoso (H_2), enquanto no ânodo ocorre a dissolução dos átomos de ferro (Fe) em (Fe^{++}). Essa dissolução ocorre devido à desestabilização das ligações metálicas devido à perda de elétrons. Os íons de sódio (Na^+) se combinarão com a hidroxila (OH^-), formando hidróxido de sódio ($NaOH$) e os íons de ferro se combinam tanto com os íons de cloro (Cl^-) quanto com a hidroxila, formando cloreto de ferro ($FeCl_2$) e hidróxido de ferro II ($Fe(OH)_2$), que pode se precipitar em forma de “lama”. Na Figura 2-20 tem-se a ilustração desse processo.

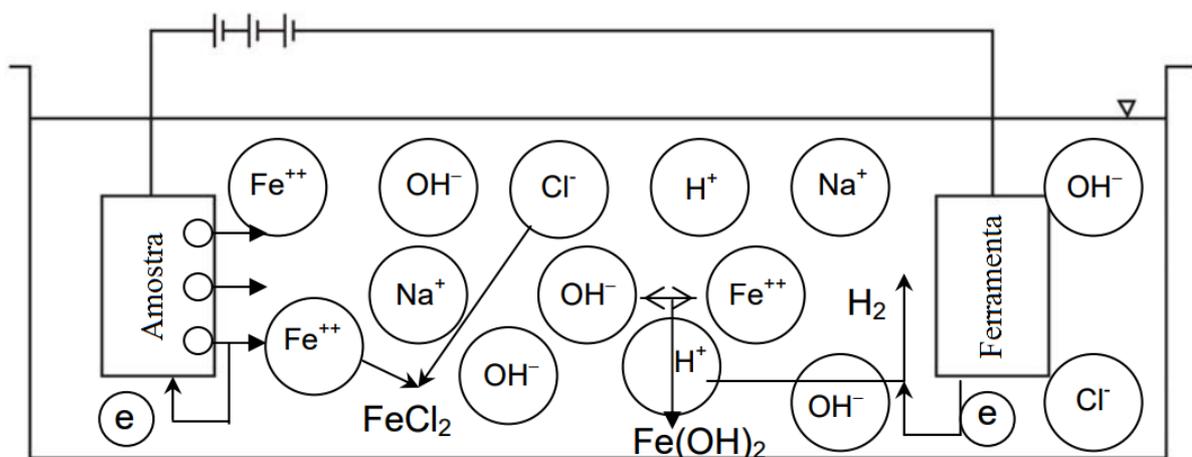


Figura 2-20 Reações esquemáticas de reações eletroquímicas. Adaptado de (NPTEL, 2008).

Tendo esse processo em vista, Costa e Hutchings (2009) propuseram o processo de texturização superficial sem mascaramento (MECT). A seguir na Figura 2-21, pode-se ver o aparato básico para utilização do método, que opera da seguinte forma segundo da Silva (2016): (1) fonte de voltagem contínua fornece a corrente para possibilitar a polarização anódica, sendo o pólo negativo conectado à ferramenta (7) e o positivo à amostra (3) a ser texturizada. O eletrólito (2) é bombeado por uma tubulação (6) por meio da utilização de uma bomba peristáltica (5), levando assim o eletrólito a entrar em contato com a amostra (3) através dos furos presentes na ferramenta (ver Figura 2-22), que escoam posteriormente graças à distância entre a ferramenta e a amostra (8). Utiliza-se um circuito eletrônico (4) com o objetivo de pulsar a corrente, possibilitando assim a limpeza dos produtos provenientes da dissolução anódica nos períodos não eletrizados dos pulsos.

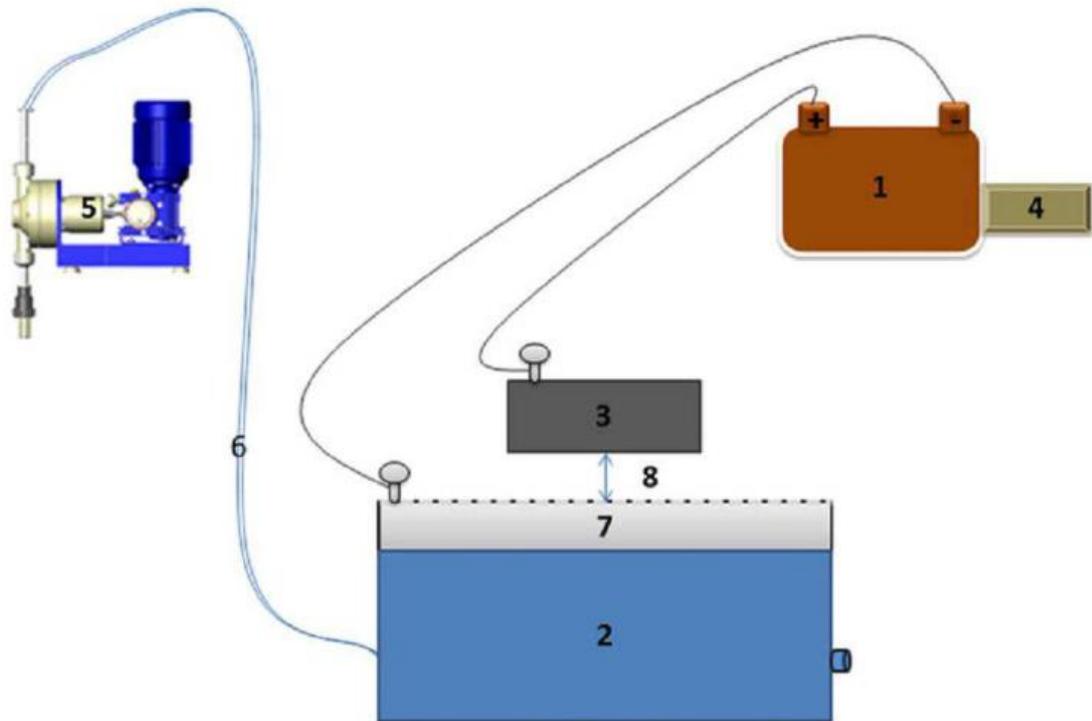


Figura 2-21 Aparato experimental utilizado na MECT.

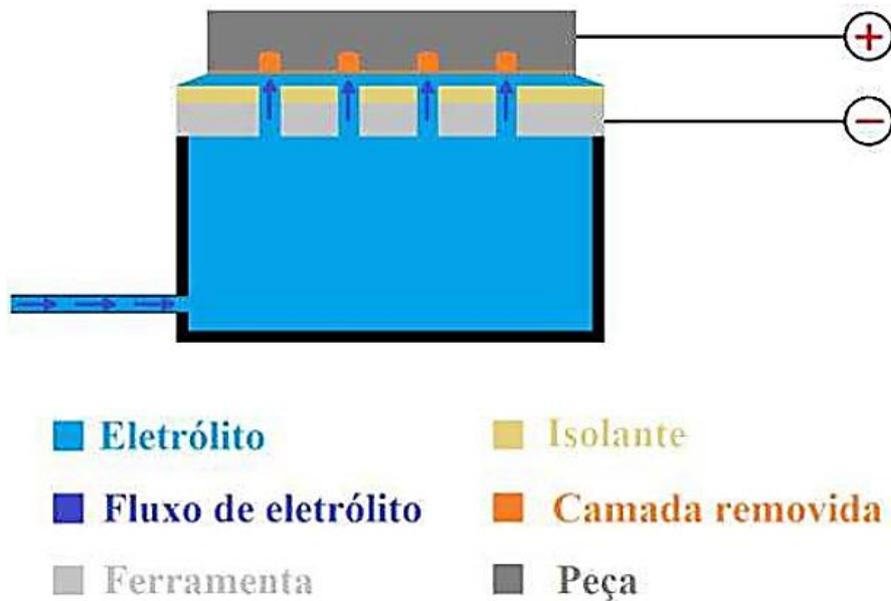


Figura 2-22 Processo de usinagem eletroquímica sem mascaramento (da SILVA, 2016).

Por meio desse método, é possível texturizar diversos formatos de texturas determinísticas, de acordo com o padrão impresso na ferramenta de usinagem. Na Figura 2-23 é ilustrado um exemplo de uma textura em formato de “V” obtida por esse processo.

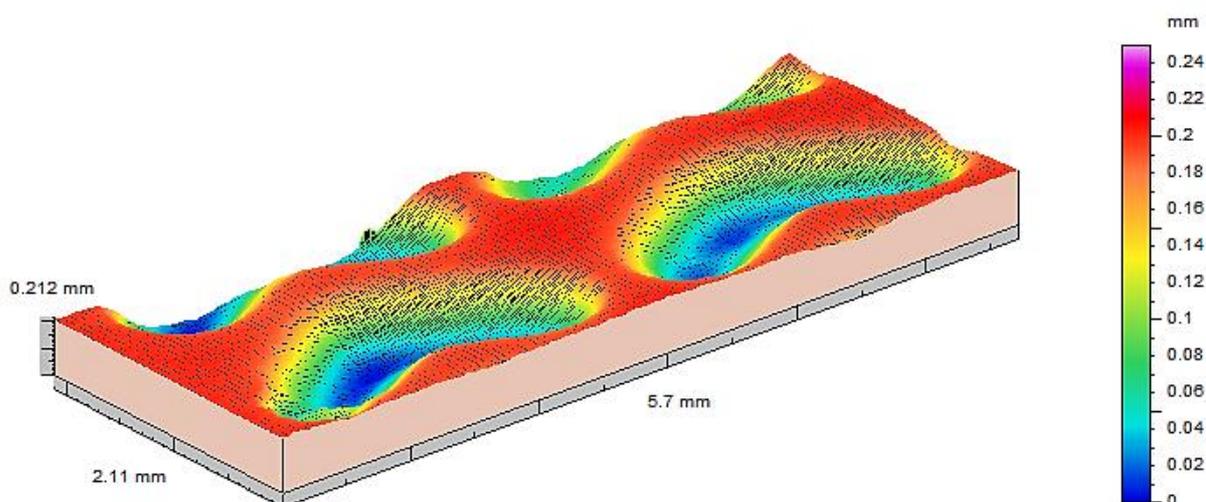


Figura 2-23 – Exemplo de textura superficial do tipo *chevron* obtida pelo método MECT.

2.5 ENSAIOS DE ATRITO E DESGASTE

A tribologia apresenta como principal função tentar representar os mecanismos de atrito e desgaste de um determinado sistema tribológico, por meio da utilização de tribômetros, que são instrumentos responsáveis por mensurar coeficiente de atrito, força de atrito e volume desgastado entre duas superfícies em contato com movimento relativo. Os tribômetros podem ser apresentados em diversas configurações e formatos, buscando melhor adequação ao ensaio e condições estudadas. Segundo Hutchings e Shipway (2017), algumas geometrias para testes de deslizamento são: pino sobre disco (Figura 2-24a), bloco sobre anel (Figura 2-24b e Figura 2-24d) variando a geometria do contato entre conforme (b) e não conforme (d) e pino sobre plano alternado (Figura 2-24c).

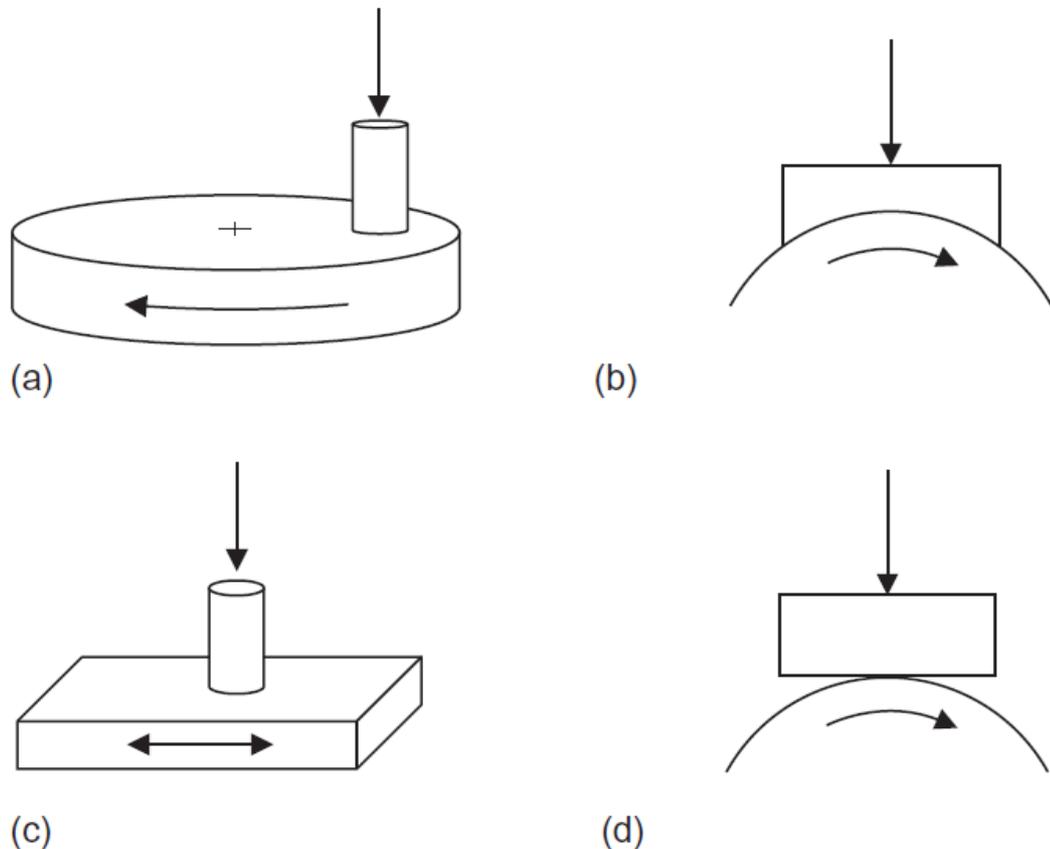


Figura 2-24 Geometrias comumente utilizadas em testes de deslizamento: (a) pino sobre disco; (b) bloco-sobre-anel com geometria conforme; (c) pino sobre plano alternado; (d) bloco-sobre-anel com geometria não conforme. Adaptado de (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017a).

Para ensaios de desgaste de superfícies texturizadas, percebe-se que podem ser utilizados diversos tipos de ensaio como: pino sobre disco (BORGHI et al., 2008; SUN et al., 2015), esfera sobre disco (QIN; XIONG; LI, 2015; ROSENKRANZ et al., 2015) e bloco sobre anel (HERNÁNDEZ BATTEZ et al., 2008; KOSZELA et al., 2010; ZAVOS; NIKOLAKOPOULOS, 2015).

A literatura (LU; KHONSARI, 2005, 2007) mostra que mancais radiais texturizados podem ser reproduzidos experimentalmente usando a configuração bloco-sobre-anel, principalmente pela possibilidade de se utilizar amostras conformes, simulando mais fielmente o comportamento de mancais.

Com isso, o objetivo desse trabalho é avaliar o efeito do controle da topografia na eficiência de contatos lubrificados por meio do ensaio bloco-sobre-anel com amostras não conformes, utilizando texturas em formato “V”. Espera-se observar os efeitos benéficos da texturização superficial, reduzindo o coeficiente de atrito e taxas de desgaste para os regimes de lubrificação analisados.

CAPÍTULO II

MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 EQUIPAMENTOS E ANÁLISES

3.1.1 Equipamentos (tribômetro bloco sobre anel)

Para o presente trabalho, utilizou-se o tribômetro *Falex® Block on Ring test machine Model 6100B*, para avaliar a influência da disposição e orientação de texturas superficiais no atrito e desgaste de materiais para mancais de deslizamento lubrificado. Para o teste em questão, foi utilizado um corpo de prova não conforme, imerso em fluido lubrificante, como ilustrado na Figura 3-1.

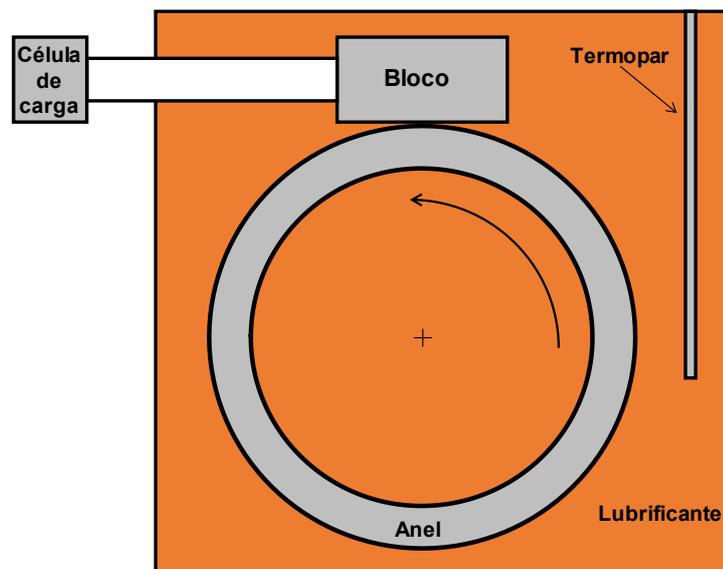


Figura 3-1 – Esquema do ensaio bloco sobre anel, com corpo de prova não conforme. Adaptado de Narita (2012).

A calibração da célula de carga foi realizada por meio de um sistema de polias e cargas conhecidas, impostas ao equipamento. A célula de carga é da Interface® modelo SM-100. Essa calibração foi realizada em um ambiente com temperatura e umidade relativa controlada em 23 °C e 50 % respectivamente. A calibração do mesmo foi feita com massas de 0,50 a 3,00 kg, sendo acrescidas de 0,10 kg a cada vez como apresentado na Figura 3-2. A reta de calibração apresentada foi utilizada em um programa de aquisição e registro da força de atrito. Conforme o esperado, a célula de carga apresenta comportamento linear para a faixa de trabalho com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,988.

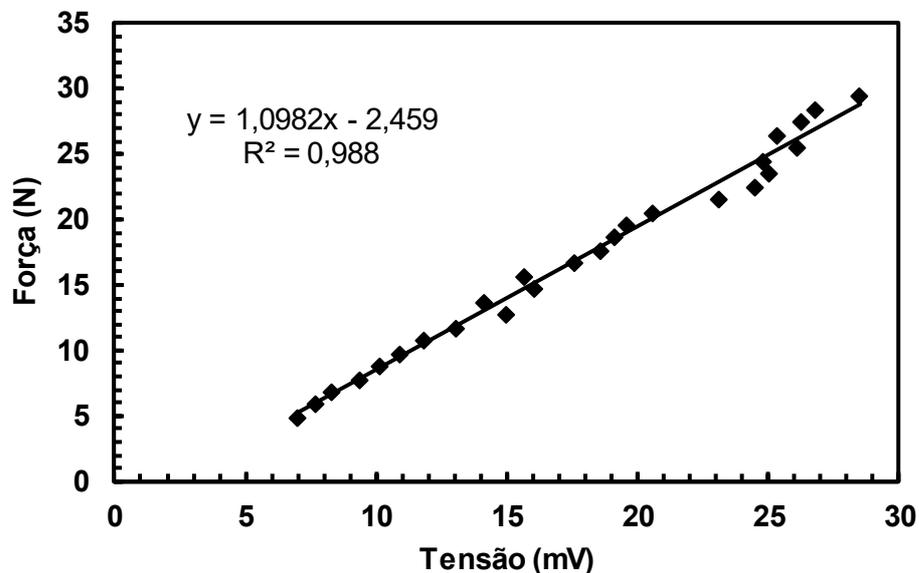


Figura 3-2 – Reta de calibração da célula de carga do tribômetro bloco sobre anel.

Para análise dos resultados foram utilizadas as técnicas: avaliação topográfica 2D e 3D, microscopia ótica e eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por dispersão de energia de raios X (EDS). Para a avaliação topográfica, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Interferômetro *Taylor Hobson Talysurf CLI 2000*®, com taxa de medição de 2 mm/s, usando modo de medição contínua, com espaçamento de 2,5x12,5 µm;
- Perfilômetro *Taylor Hobson Talysurf Intra2*®, com velocidade de medição do equipamento de 0,5 mm/s de forma contínua, *cut off* de 0,8 e filtro Gaussiano.

Para a análise dos dados gerados pelos dois equipamentos, utilizou-se o programa Mountains Map Universal®, versão 3.0.11.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada nos equipamentos da marca *CARL ZEISS* modelos *EVO MA 10*. As imagens de elétrons secundários foram obtidas com tensão de 20 kV e corrente de 100 pA. Nas imagens de elétrons retroespalhados foi utilizada uma potência de feixe de 20 kV e corrente de 2000 pA.

A espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foi realizada no equipamento da marca *OXFORD* modelo 51-ADD0048. A potência do feixe utilizada foi de 20 kV.

3.2 MATERIAIS E PREPARAÇÃO SUPERFICIAL

Neste estudo foi utilizado para confecção dos corpos de prova, aço ABNT 1045 cuja microestrutura está apresentada na Figura 3-3, com módulo de elasticidade de 210 GPa, dureza de $1,714 \pm 0,035$ GPa coeficiente de Poisson 0,3 (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013).

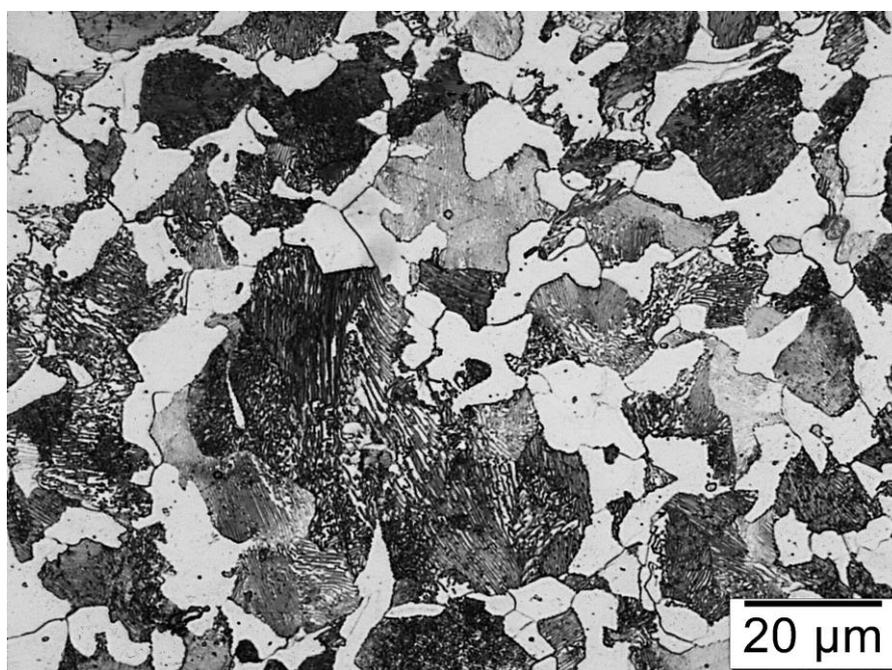


Figura 3-3 – Microestrutura dos corpos de prova atacadas por Nital 2 %, durante 30 segundos.

As amostras foram usinadas em forma de blocos com as dimensões seguindo a norma ASTM D271 94 (2014), tendo 6,35 mm de largura, 15,76 mm de comprimento e 10 mm de altura.

As amostras foram divididas em 3 grupos:

1- Amostras lixadas e polidas até o acabamento final correspondente a $Sq=0,105\pm 0,036 \mu\text{m}$;

2- Além do polimento as amostras foram submetidas ao processo de texturização pela técnica MECT, conforme será abordado com mais detalhes na Seção 3.3. Os padrões de textura consistiam de arranjos de bolsos em forma de V (*chevrans*), com dimensões e distribuição confeccionadas com base no trabalho de Morris et al., (2015) e ilustradas Figura 3-4. Nos ensaios a orientação da textura foi variada em relação ao sentido de movimento do contracorpo. Quando o alinhamento da textura coincidiu com o movimento do contracorpo, os ensaios foram denominados como “mesmo sentido”. A condição de alinhamento oposto, foi denominado de “sentido contrário”.

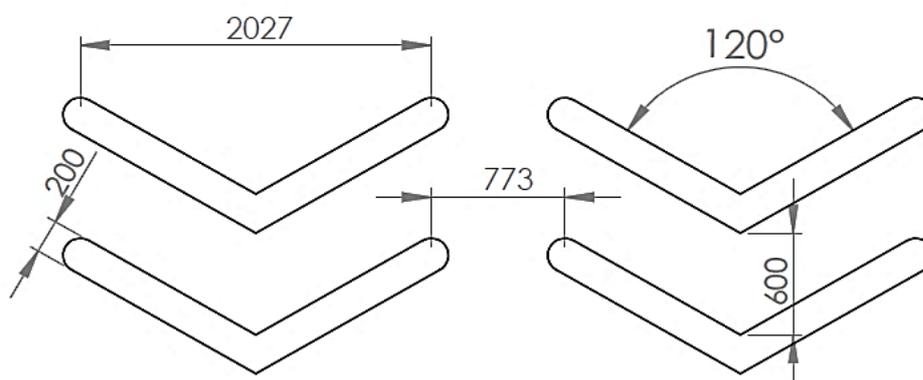


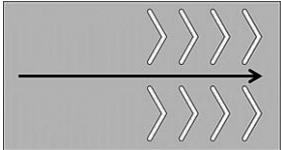
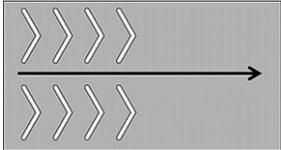
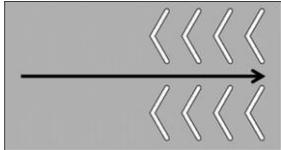
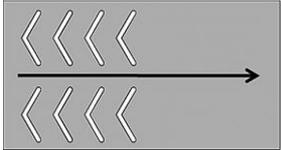
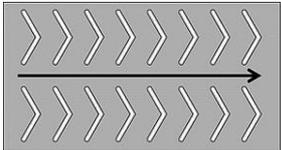
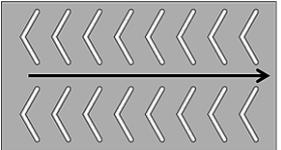
Figura 3-4 – Dimensões médias dos padrões em “V”. Cotas em micrometros (μm).

3- Nesse grupo além da orientação foi variada a posição da textura em relação à posição do contracorpo. A região do bloco que entra em contato primeiro com o contracorpo, ou seja, entrada foi denominada *inlet* e a superfície de saída, ou seja, a superfície imediatamente após o contato com o contracorpo foi chamada de *outlet*. Ilustrando essas configurações, segue a

Tabela 3-1, onde as setas pretas representam o sentido de movimento do contra corpo.

Como contracorpos, foram utilizados anéis padrões fornecidos pela Falex® de aço SAE 4620, com dureza variando entre 753 e 775 HV. Todos os anéis foram lixados até uma granulometria de 1200 *mesh*. As rugosidades dos anéis utilizados foram obtidas por meio de interferometria a laser de perfis distribuídos ao longo da superfície do anel, com parâmetro Rq médio de $0,421 \pm 0,010 \mu\text{m}$.

Tabela 3-1 – Disposição das texturas superficiais em relação aos corpos de prova.

	Lisa – L
	Parcialmente texturizada mesmo sentido <i>outlet</i> – TPMSO
	Parcialmente texturizada mesmo sentido <i>inlet</i> – TPMSI
	Parcialmente texturizada sentido contrário <i>outlet</i> – TPSCO
	Parcialmente texturizada sentido contrário <i>inlet</i> – TPSCI
	Totalmente texturizada mesmo sentido – TTMS
	Totalmente texturizada sentido contrário – TTSC

3.3 ENSAIOS DE TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL

Os parâmetros de texturização inicialmente adotados foram definidos pela literatura (MORRIS et al., 2015; PARREIRA, 2011). Com base nesses dados, foram realizados ensaios com a finalidade de avaliar o desempenho do equipamento de texturização. Esse equipamento recebeu atualizações em relação a trabalhos anteriores Parreira (2011).

Conforme observado por Parreira (2011) e da Silva (2016), optou-se por utilizar uma distância ferramenta peça (DFP) de 100 μm , obtida através da utilização de uma fita polimérica com a espessura citada, já que tal distância apresentou melhor qualidade nas texturas fabricadas. Esses trabalhos mostram que a tensão de 30 V foi a mais indicada para o processo de texturização superficial do aço carbono ABNT 1020. Tomando essa informação como base, buscou-se avaliar a influência do tempo de usinagem sobre a qualidade das texturas, conforme ilustrado na Figura 3-5. Esse procedimento foi repetido três vezes para cada condição, e a topografia foi avaliada utilizando a técnica de perfilometria 2D. Nesse caso o objetivo foi avaliar a influência do tempo de texturização na profundidade e largura das marcas de textura.

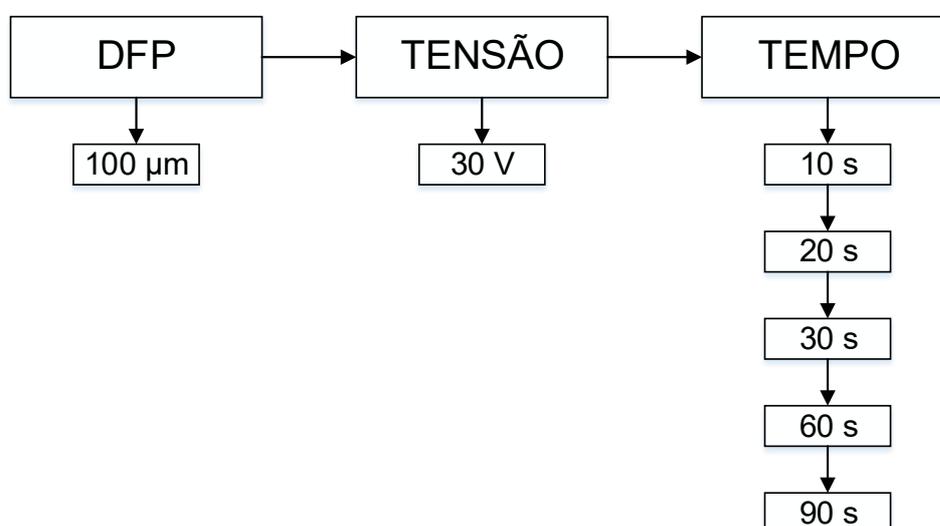


Figura 3-5 – Sequência de ensaios realizados com o objetivo de se encontrar os parâmetros adequados para texturização superficial de aço ABNT 1045.

O aparato experimental utilizado para confecção das texturas foi o mesmo utilizado por Parreira (2011), com exceção do circuito eletrônico, que foi alterado buscando melhorar o desempenho e qualidade das texturas confeccionadas. A modulação da largura de pulso era feita de forma não integrada no circuito anterior, que poderia gerar ruído no mesmo. Optou-

se por utilizar um circuito integrado, que desempenharia a mesma função, porém garantindo melhor qualidade e menos ruído, além de evitar que tenha atenuação, promovendo o funcionamento adequado da chave. As alterações foram apresentadas no APÊNDICE I.

As ferramentas utilizadas para texturizar os corpos de prova foram as mesmas utilizadas por da Silva (2016), de aço inoxidável AISI 304 austenítico, com 10 mm de largura, 10 mm de altura e 0,3 mm de espessura. As ferramentas também passaram por um processo de pintura eletrostática em uma de suas faces, responsável por criar uma camada protetora não reativa sobre a ferramenta. Na Figura 3-6 temos a micrografia da ferramenta utilizada para texturizar superficialmente os corpos de prova.

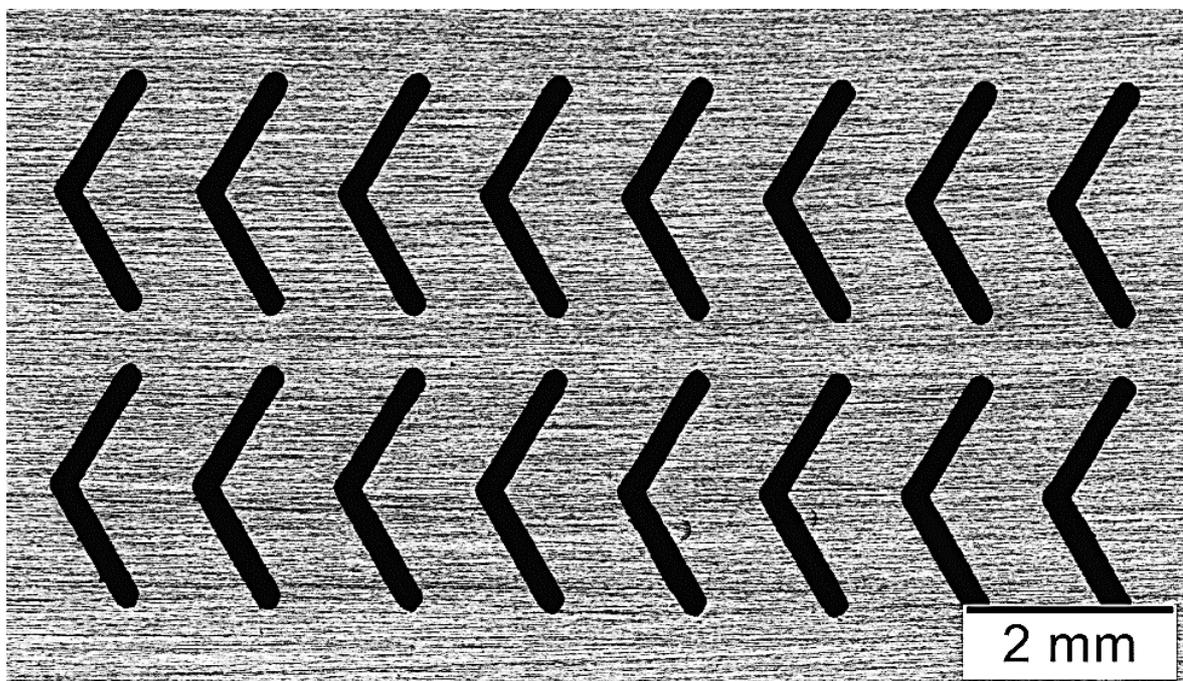


Figura 3-6 – Micrografia da ferramenta utilizada para texturizar superficialmente corpos de prova para o ensaio bloco sobre anel.

3.4 ENSAIOS TRIBOLÓGICOS BLOCO SOBRE ANEL

Para os ensaios tribológicos lubrificadas, foi utilizado o óleo hidráulico BP 68, utilizado em unidades geradoras de energia, cujas propriedades reológicas foram avaliadas utilizando um viscosímetro da marca *ANTON-PAAR* modelo SVM-3000. Para esse óleo, a viscosidade (η) variou de 185,03 cSt a 20 °C até 9,86 cSt a 100 °C, conforme ilustrado na Figura 3-7.

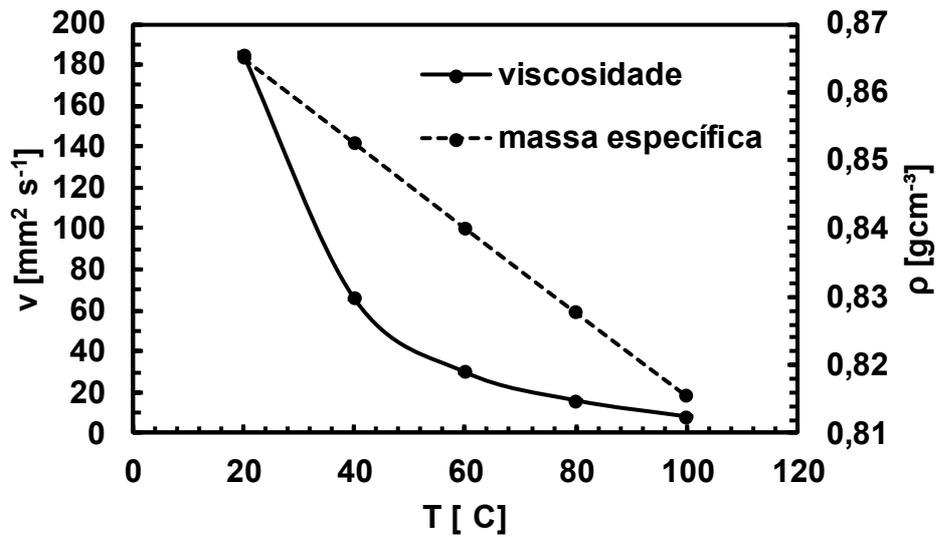


Figura 3-7 – Propriedades do óleo hidráulico BP68 para diversas temperaturas.

Além das propriedades citadas acima, foi necessário avaliar o coeficiente pressão-viscosidade (α), obtido pela Eq. (3.1) (CAMERON, 1971). Esse coeficiente varia com a viscosidade do fluido, ou seja, em função da temperatura, como apresentado na Figura 3-8.

$$\alpha = (0,6 + 0,965 \log \eta_0) \times 10^{-8} \quad (3.1)$$

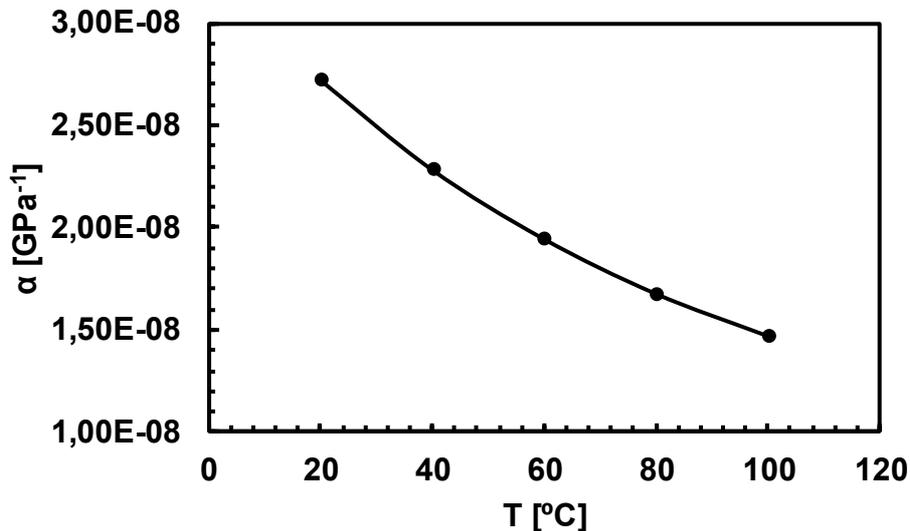


Figura 3-8 – Coeficiente pressão-viscosidade em função da temperatura do fluido lubrificante.

Também foi necessário projetar um suporte para os blocos, conforme ilustrado na Figura 3-9a (desenho 3D) e Figura 3-9b (foto do suporte fabricado). O mesmo foi fabricado com aço SAE 4140, devido a sua resistência mecânica e resistência a fratura. O projeto detalhado dessa peça é apresentado no APÊNDICE II.

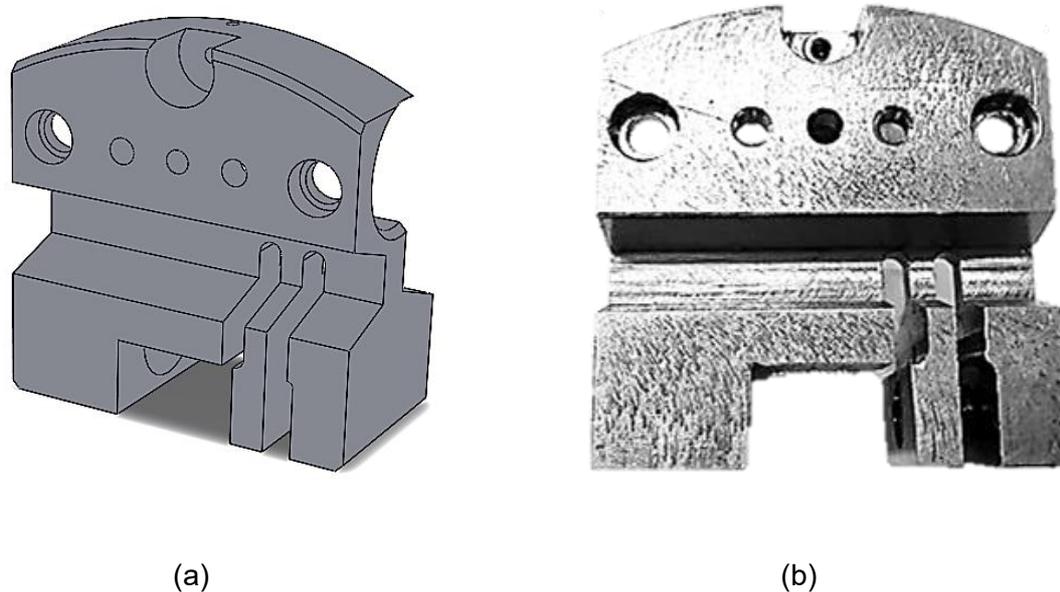


Figura 3-9 – (a) Vista em perspectiva do suporte de amostras para o tribômetro bloco sobre anel; (b) foto do suporte fabricado.

A fim de estabelecer o planejamento dos experimentos, foi necessária a definição de alguns parâmetros fundamentais do ensaio bloco sobre anel, tais como: a força normal, tempo de ensaio, velocidades de rotação do anel. Nesse caso, a velocidade de rotação e a carga determinam a espessura do filme lubrificante, permitindo o controle da lubrificação de acordo com os regimes limítrofe e misto. A velocidade de rotação foi fixada em 1 500 rpm e a força normal variou em dois níveis 216,92 e 314,99 N permitindo o estabelecimento dos regimes de lubrificação citados. Os ensaios tiveram a duração de 3 600 segundos para garantir a estabilização das condições ensaiadas e observando também a estabilização térmica do sistema. O critério utilizado para a definição do regime permanente foi a variação da temperatura do sistema menor que 2 %.

Após cada ensaio, a câmara hermética foi limpa com álcool etílico absoluto, a uma rotação de 800 rpm por 10 minutos, garantindo que resultados não fossem mascarados por resíduos de óleo e particulados formados em ensaios anteriores.

A pressão média de contato inicial foi calculada utilizando a equação de contato de Hertz para um sistema linha-plano (WILLIAMS, 2005).

$$P_m = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{E'W}{R'l\pi}} \quad (3.2)$$

onde E' é o módulo de elasticidade reduzido entre os dois materiais em contato (vide Eq. (3.3)), R' é o raio de contato (m), l é a largura do contato (m) e W é a carga (N). Estimou-se uma pressão média de contato de 0,288 e 0,348 GPa para as condições 216,92 e 314,99 N, respectivamente.

$$\frac{2}{E'} = \frac{(1 - \nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1 - \nu_2^2)}{E_2} \quad (3.3)$$

A espessura inicial h_0 do filme lubrificante foi calculada utilizando a equação de Dowson-Higginson (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013) conforme mostrado na Eq. (3.4).

$$\frac{h_0}{R'} = 2,65\bar{U}^{0.7}\bar{G}^{0.54}\bar{W}^{-0.13} \quad (3.4)$$

onde \bar{G} , \bar{U} e \bar{W} são respectivamente, os parâmetros adimensionais do material, velocidade e carga, conforme visto nas Eqs. (3.5), (3.6) e (3.7) a seguir.

$$\bar{G} = \alpha E' \quad (3.5)$$

$$\bar{U} = \frac{V\eta_o}{E'R'} \quad (3.6)$$

$$\bar{W} = \frac{W}{E'R'L} \quad (3.7)$$

Das equações mostradas a cima, temos:

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

V é a velocidade do anel em relação ao bloco ($m \cdot s^{-1}$);

η_o é a viscosidade dinâmica do fluido lubrificante ($Pa \cdot s$);

W é a carga a qual o conjunto está sujeito (N).

Para 216,92 N e 314,99 N, calculou-se a espessura inicial de filme lubrificante, para cada uma das configurações ensaiadas. Por meio desses valores obtidos e dos valores de rugosidade da amostra e do anel (S_q) em cada condição testada, pôde-se calcular o parâmetro (λ) para cada condição, variando de 0,321 a 1,538, sendo este parâmetro obtido

pela Eq. (3.8), onde S_q^* é a rugosidade equivalente entre o bloco (S_{qB}) e do anel (S_{qR}), obtida pela Eq. (3.9) (GREENWOOD; JOHNSON; MATSUBARA, 1984). Com a evolução do ensaio, é esperado que o processo de desgaste altere a geometria do contato, fazendo com que o esse fique mais conforme. Esse tema será discutido no capítulo de resultados.

$$\lambda = \frac{h_0}{S_q^*} \quad (3.8)$$

$$S_q^* = \sqrt{S_{qB}^2 + S_{qR}^2} \quad (3.9)$$

Utilizando os dados obtidos ao longo dos ensaios, curvas do coeficiente de atrito em função do tempo foram traçadas com o objetivo de se analisar a influência da presença de texturas superficiais nos regimes de lubrificação. Após o fim de cada ensaio, as amostras foram limpas com acetona P.A. e a topografia foi registrada utilizando a técnica de interferometria a laser. O volume de material desgastado foi calculado utilizando o software MontainsMap®.

A Figura 3-10 apresenta o fluxograma que ilustra as variáveis analisadas nesse estudo.

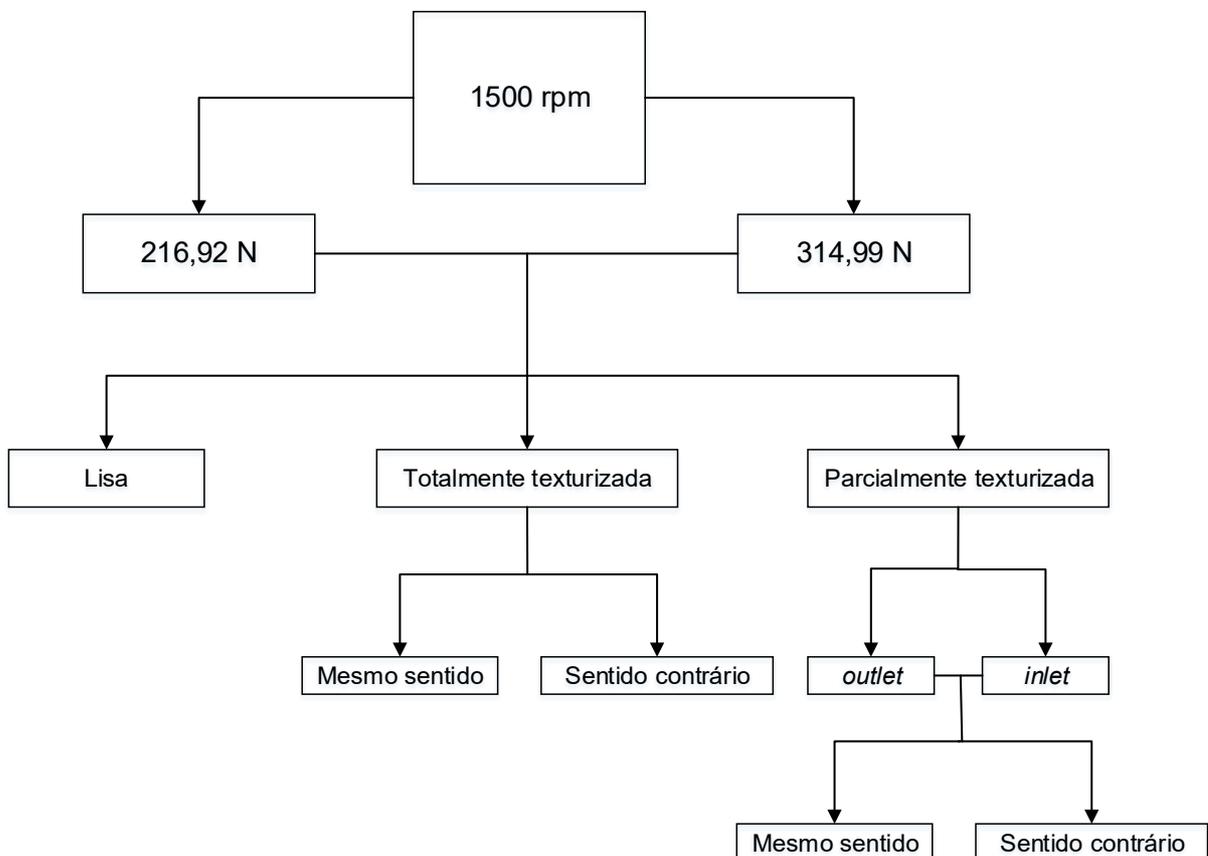


Figura 3-10 – Sequência de ensaios bloco sobre anel.

A partir da velocidade de 1 500 rpm, foram analisadas duas cargas com três padrões topográficos distintos. Tais condições tribológicas foram representadas por 42 ensaios diferentes. Todos os resultados que serão exibidos e analisados passaram por uma análise de variância ANOVA com 95% de confiança. Para cada condição, foram realizadas pelo menos 3 repetições, indicando boa reprodutibilidade.

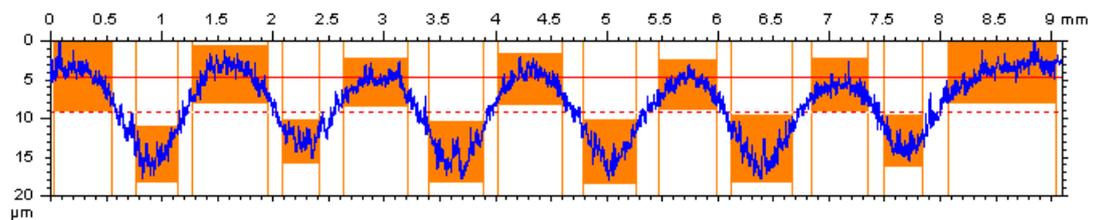
CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

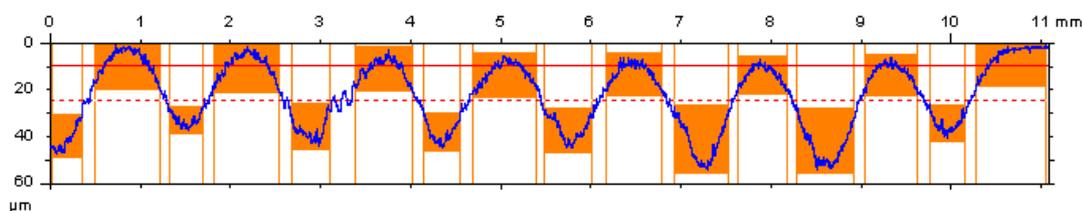
Este capítulo apresenta os resultados e as discussões dos diferentes ensaios executados a fim de entender o efeito do controle da topografia na eficiência tribológica em contatos lubrificados texturizados. Será apresentada a análise da influência da força normal, orientação e posicionamento das texturas superficiais no desempenho dos mesmos.

4.1 PARÂMETROS DE TEXTURIZAÇÃO DO AÇO ABNT 1045

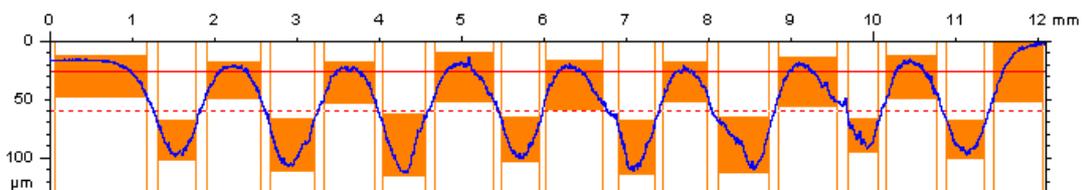
Utilizando distância entre a ferramenta e a peça de 100 μm e tensão de 30 V (PARREIRA, 2011), buscou-se avaliar a influência do tempo de texturização na largura e profundidade das texturas confeccionadas. Foram testados 10 s, 20 s, 30 s, 60 s e 90 segundos conforme esquematizado na Figura 3-5. Os perfis topográficos 2D obtidos nas superfícies produzidas nessas condições são apresentados na Figura 4-1.



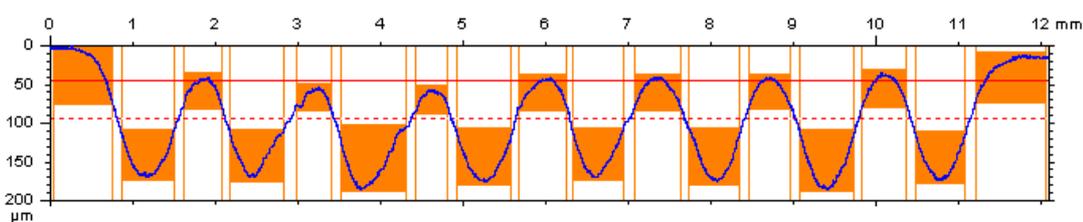
(a)



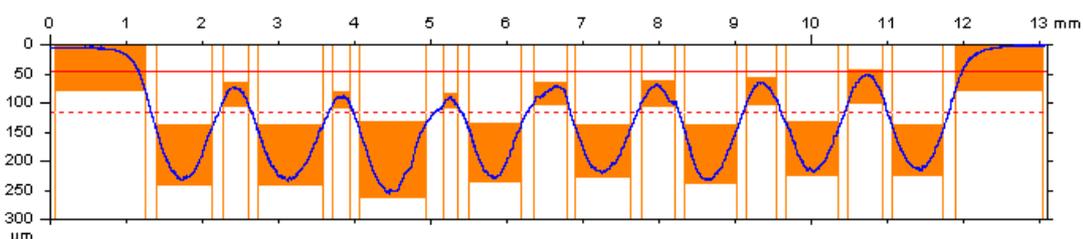
(b)



(c)



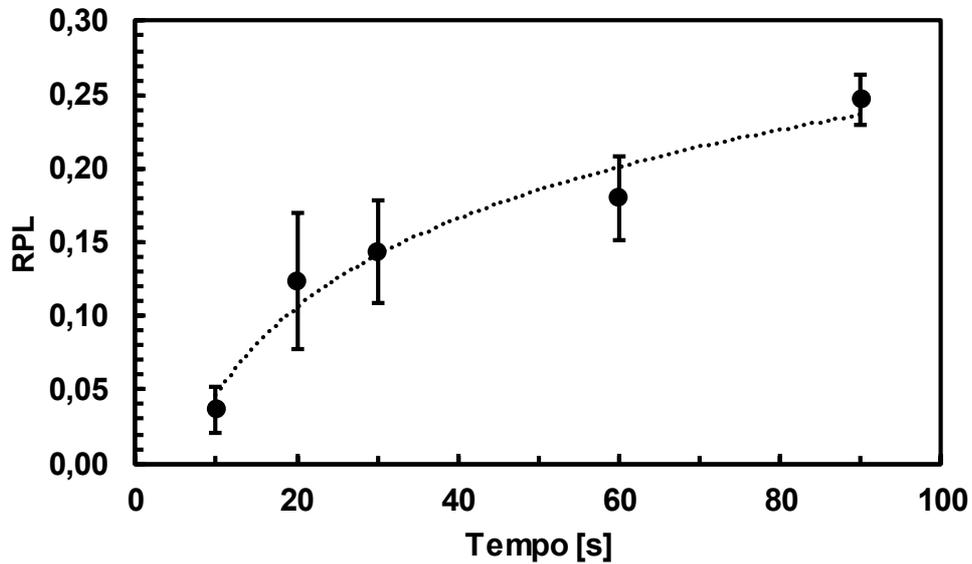
(d)



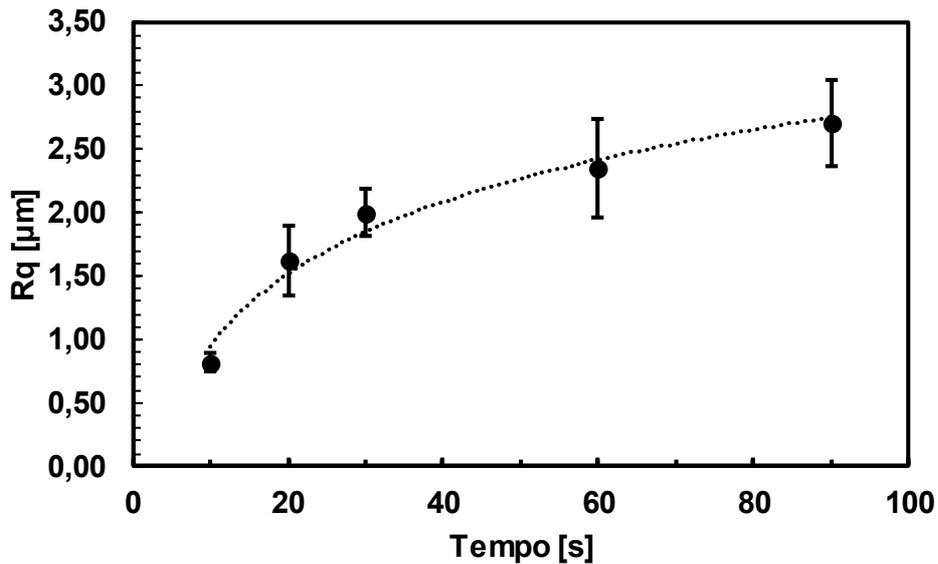
(e)

Figura 4-1 – Resultados das perfilometrias 2D para tempos de ensaios de: (a) 10 s; (b) 20 s; (c) 30 s; (d) 60 s; (e) 90 s.

Observa-se que para baixos tempos de texturização, ocorrem baixas profundidades das marcas de texturas e alta rugosidade (Figura 4-1a). A medida que o tempo cresce, é possível perceber aumento nas profundidades das texturas e melhor qualidade nas mesmas (Figura 4-1b e Figura 4-1c). Para tempos de texturização longos, as texturas tendem a ficar muito profundas e os picos das mesmas ficam cerca de 50 μm e 100 μm rebaixados em relação à superfície não texturizada, conforme ilustrado nas Figura 4-1d e Figura 4-1e. A Figura 4-2a ilustra a evolução da razão profundidade-largura RPL em função do tempo de ensaio, e a Figura 4-2b por sua vez exibe a variação do parâmetro R_q em função do tempo.



(a)



(b)

Figura 4-2 – (a) Relação entre largura e profundidade de texturas obtidas por MECT para tensão de 30 V e diversos tempos; (b) R_q de regiões texturizadas em função do tempo de texturização.

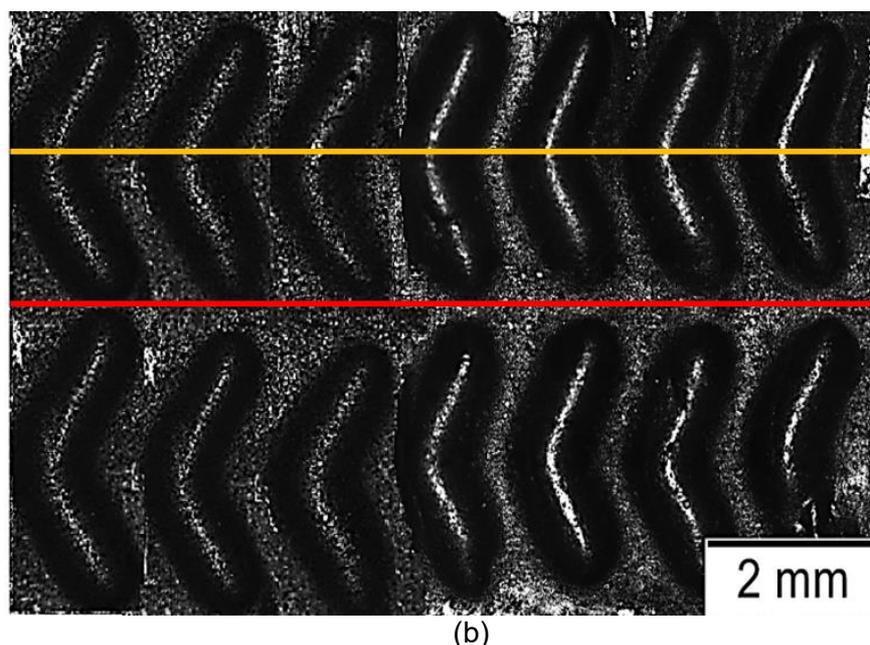
Ainda analisando a Figura 4-2a, é possível perceber uma tendência ao aumento da razão média da profundidade e largura (RPL) com o aumento do tempo de ensaio, o que é de se esperar, tendo em vista o maior tempo para as reações anódicas ocorrerem, corroborando com o que pode ser observado na Figura 4-2b, onde o aumento do tempo resultou no aumento da rugosidade, ilustrado pelo parâmetro R_q , calculando considerando as marcas de textura.

Para se alcançar condições de lubrificação adequadas, deve-se trabalhar com valores de RPL entre 0,10 e 0,18, (RONEN; ETSION; KLIGERMAN, 2001). Conforme mostrado na Figura 4-2a, os tempos de 20 e 30 segundos se encontram dentro dessa faixa indicada. Optou-se por escolher o tempo de 30 segundos já que o mesmo apresentou menor desvio em relação à média (erro relativo), tanto para RPL quanto rugosidade, em concordância com os resultados apresentados por Parreira (2011).

Na Figura 4-3 são mostradas as micrografias óticas de dois blocos, com a superfície parcialmente texturizadas na Figura 4-3a e a totalmente texturizadas em Figura 4-3b, onde a linha amarela indica a região onde foram feitas as perfilometrias 2D e a linha vermelha a região analisada nas interferometrias 3D. A confecção das amostras parcialmente texturizadas utilizou a mesma ferramenta da Figura 3-6, porém metade dos padrões “V” foram protegidos, resultando na superfície mostrada na Figura 4-3a. Nota-se que para a amostra parcialmente texturizadas, a região cinza a esquerda na foto é a superfície polida na etapa que precede a texturização superficial. As amostras totalmente e parcialmente texturizadas apresentaram acabamento final de $S_q=0,446\pm0,386\ \mu\text{m}$ e $S_q=0,870\pm0,0849\ \mu\text{m}$ respectivamente.



(a)



(b)
 Figura 4-3 – Micrografias óticas de amostras texturizadas: (a) parcialmente texturizadas; (b) totalmente texturizada.

Na Figura 4-4 são mostrados os parâmetros de rugosidade R_k , R_{pk} e R_{vk} , que representam a quantidade que suportara o carregamento, superfície que se desgastará durante a carga inicial e a superfície que absorverá maior parte do lubrificante respectivamente. É possível observar que as superfícies sem alteração topográfica apresentam os três parâmetros iguais e a presença de texturas superficiais aumenta e alteram o padrão dos parâmetros mostrados na imagem. Conforme pode ser observado, a superfície totalmente texturizada apresenta os maiores valores dos parâmetros de rugosidade citados. Fisicamente isso significa que a texturização aumenta a região responsável por suportar o carregamento imposto ao sistema, aumentando a região responsável por absorver lubrificante e conseqüentemente aumentando a superfície que se desgastará durante a carga inicial, tendo em vista que o processo de texturização aumenta a rugosidade das amostras texturizadas em relação as superfícies sem alterações topográficas. Com relação a superfície parcialmente texturizada, é possível perceber que o desvio padrão dos parâmetros é muito acentuado. Esse comportamento pode ser justificado pela grande diferença em termos de topografia da superfície, que apresenta metade de sua área polida e a outra metade texturizada. Outra informação que pode ser observada na imagem é a alteração dos parâmetros de rugosidade. Ao texturizar a superfície, os parâmetros deixam de apresentar tendência estatística de serem iguais, mostrando que o parâmetro R_k se torna o maior, seguido pelo parâmetro R_{vk} e R_{pk} .

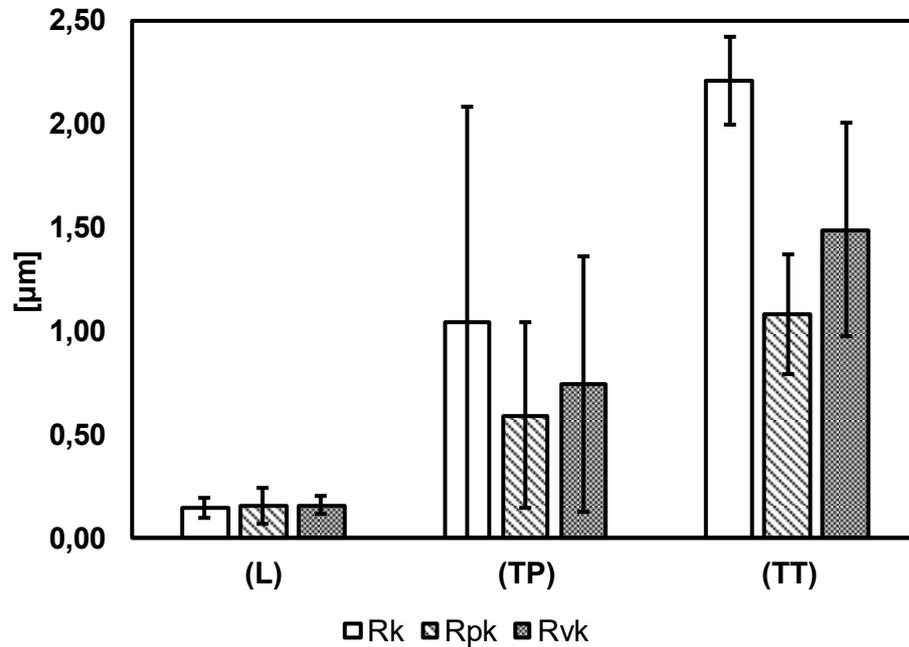


Figura 4-4 – Parâmetros de rugosidade da superfície texturizada, obtido na região entre os padrões de textura superficiais.

4.2 ENSAIOS TRIBOLÓGICOS BLOCO SOBRE ANEL

Foram escolhidas duas condições básicas de estudo, contemplando dois regimes de lubrificação, misto e limítrofe, conforme citado na Tabela 4-1, onde as superfícies sem alteração foram consideradas como referência topográfica. De acordo com a Equação (3.8), as amostras não texturizadas apresentaram na condição mista parâmetro $\lambda = 1,538$ e a limítrofe $\lambda = 0,321$.

Tabela 4-1 – Coeficiente λ para cada condição ensaiada.

	$\bar{\mu}$	\bar{T} [°C]	h_{min} [μm]	λ	S_q [μm]
<i>L</i> _{216 N}	0,053 ± 0,013	56,667 ± 5,508	0,667	1,538	0,105 ± 0,036
<i>L</i> _{314 N}	0,191 ± 0,039	81,333 ± 7,234	0,315	0,321	0,105 ± 0,036
<i>TTMS</i> _{216 N}	0,065 ± 0,010	52,333 ± 1,154	0,786	0,813	0,870 ± 0,085
<i>TTMS</i> _{314 N}	0,173 ± 0,013	75,000 ± 4,359	0,381	0,394	0,870 ± 0,085
<i>TTSC</i> _{216 N}	0,068 ± 0,011	55,000 ± 3,605	0,714	0,728	0,870 ± 0,085
<i>TTSC</i> _{314 N}	0,181 ± 0,018	74,333 ± 8,505	0,388	0,397	0,870 ± 0,085
<i>TPMSI</i> _{216 N}	0,056 ± 0,011	58,667 ± 2,082	0,611	0,996	0,446 ± 0,386
<i>TPMSI</i> _{314 N}	0,167 ± 0,015	74,500 ± 3,536	0,387	0,630	0,446 ± 0,386
<i>TPSCI</i> _{216 N}	0,089 ± 0,004	55,000 ± 6,558	0,714	1,163	0,446 ± 0,386
<i>TPSCI</i> _{314 N}	0,204 ± 0,019	77,000 ± 2,646	0,358	0,584	0,446 ± 0,386
<i>TPMSO</i> _{216 N}	0,039 ± 0,017	58,000 ± 5,000	0,630	1,027	0,446 ± 0,386
<i>TPMSO</i> _{314 N}	0,147 ± 0,018	82,000 ± 4,359	0,312	0,508	0,446 ± 0,386
<i>TPSCO</i> _{216 N}	0,073 ± 0,010	56,333 ± 5,774	0,677	1,103	0,446 ± 0,386
<i>TPSCO</i> _{314 N}	0,187 ± 0,019	80,500 ± 3,536	0,319	0,521	0,446 ± 0,386

A Figura 4-5 ilustra os valores do coeficiente de atrito mensurado para os testes com 216,92 N (a) e 314,99 N (b).

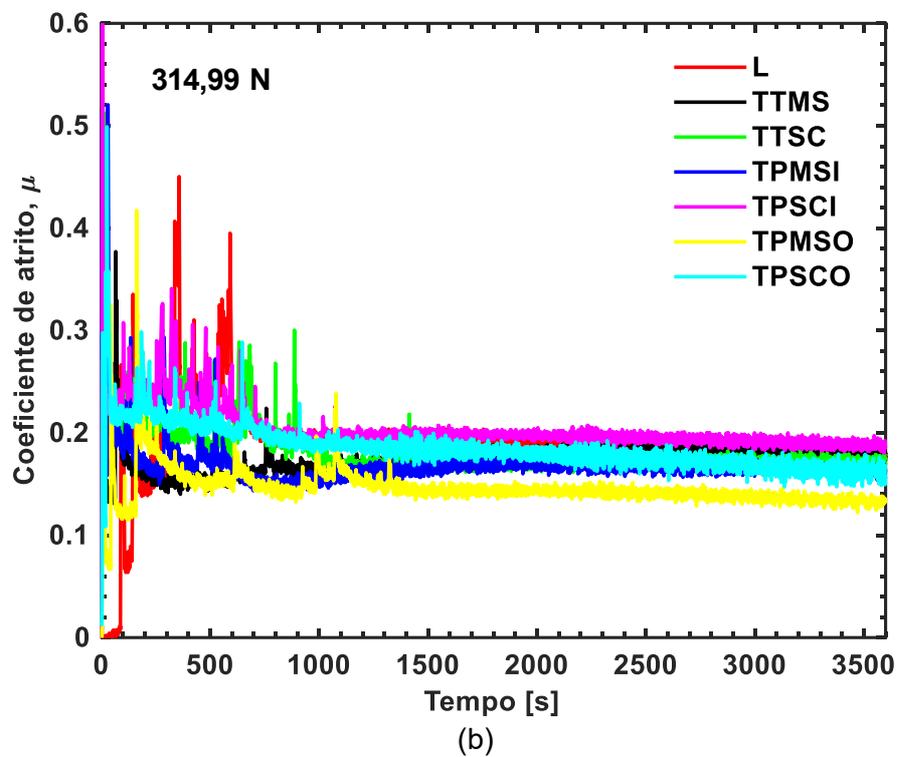
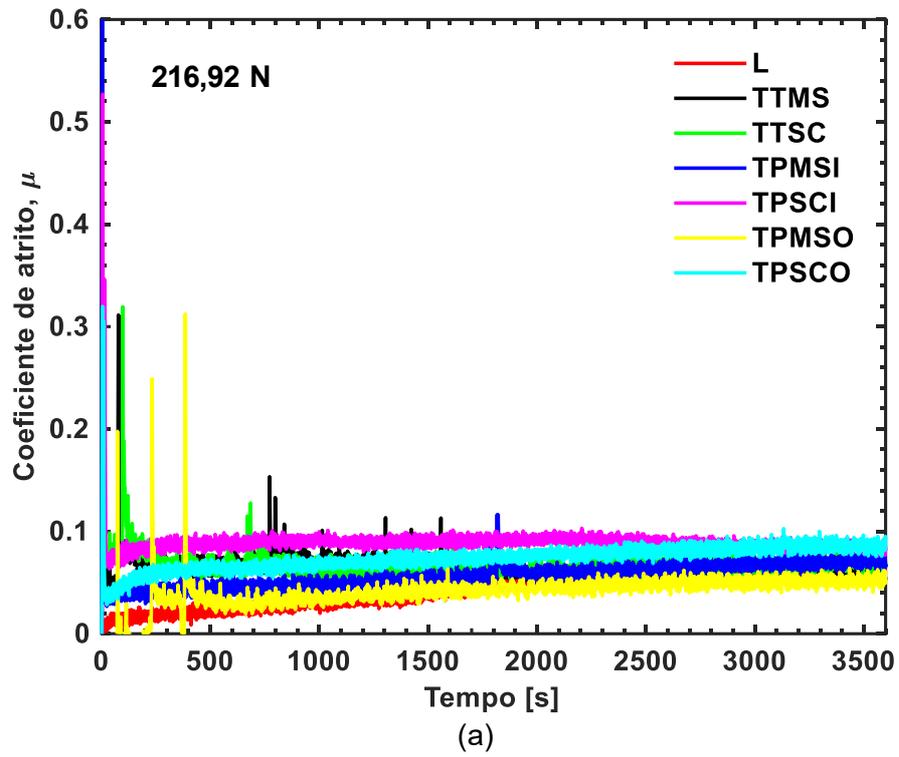


Figura 4-5 – Coeficiente de atrito em função do tempo para diferentes padrões topográficos: (a) 216,92 N; (b) 314,99 N.

A evolução do coeficiente de atrito com o tempo mostrou um comportamento característico apresentado na literatura para testes tribológico do tipo bloco sobre anel (TOHYAMA et al., 2009; LU et al., 2015), onde há picos iniciais seguidos de abrupta redução no atrito. Esse período inicial é conhecido pelo termo *running-in*, que descreve os momentos iniciais do contato tribológico, onde o filme lubrificante não é suficientemente espesso para evitar o contato entre as asperezas, resultando em elevadas forças de atrito e altas taxas de desgaste (NOGUEIRA et al., 2002). O período de *running-in* foi mais longo e acentuado para as condições ensaiadas com força normal de 314,99 N. Esse fato se deve às condições mais severas adotadas, que aliadas à presença de menores velocidades de deslizamento para os momentos iniciais do deslizamento, resultam em menores espessuras de filme lubrificante (SPIKES, 1997). O aumento da força normal acentuou a redução da espessura de filme lubrificante, intensificando as chances da ocorrência do contato de asperezas. A lubrificação limítrofe nas condições iniciais de testes lubrificadas é bem explicada por (RAPOPORT et al., 2007). Nesse caso, optou-se por analisar o desempenho de cada condição topográfica após a período de *running-in* e estabilização térmica do sistema, tentando minimizar a influência de vibrações e ruídos devido as condições severas encontradas no início de cada ensaio, e influência da temperatura sob o regime de lubrificação, já que essa está diretamente relacionada com a espessura de filme lubrificante. Foi escolhido o tempo de 1 500 segundos como período transiente, onde as variações no coeficiente de atrito e temperatura foram acentuadas. Após esse período transiente, pode-se notar melhor comportamento do coeficiente de atrito, com menos oscilações (Figura 4-6) e a variação da temperatura foi inferior a 2 %. Após a estabilização do sistema, as curvas apresentaram comportamento homogêneo e com baixa amplitude de variação, quando comparados aos primeiros 1 500 segundos de ensaio, como apresentado na Figura 4-5.

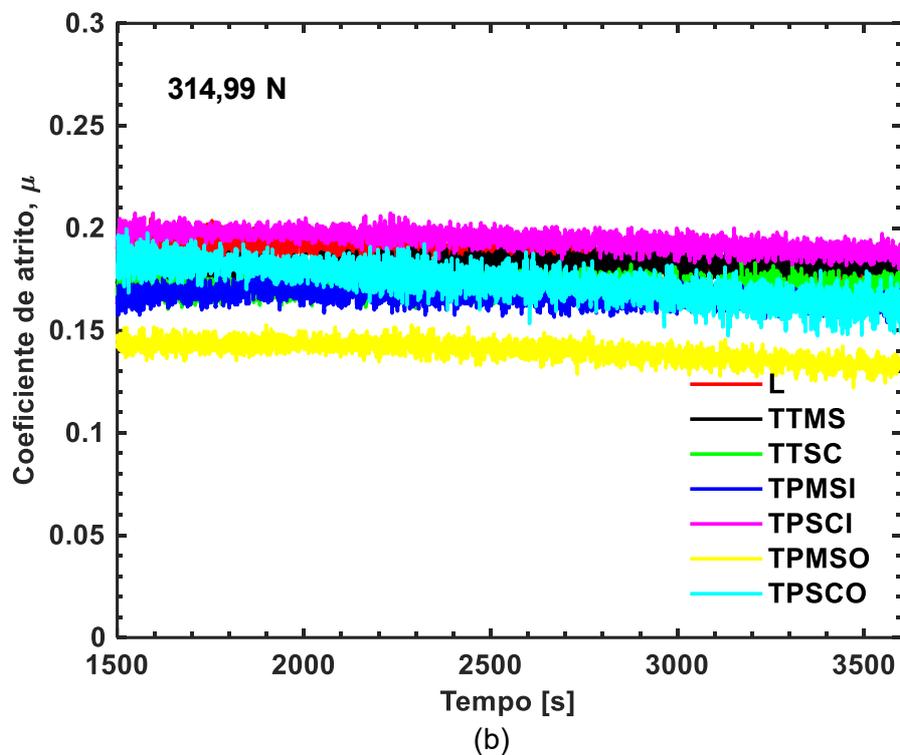
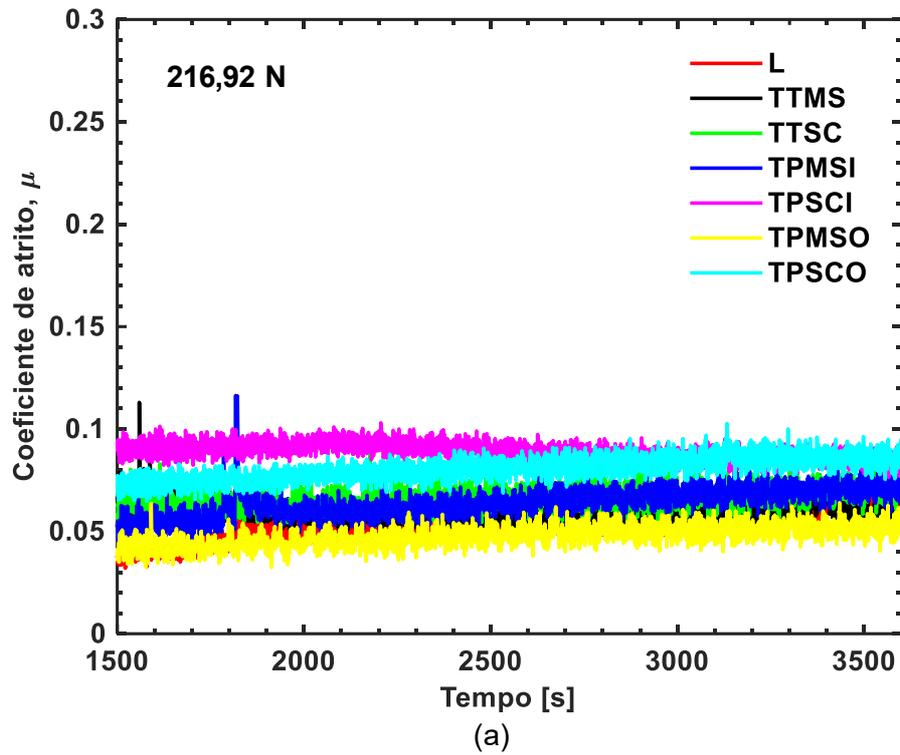
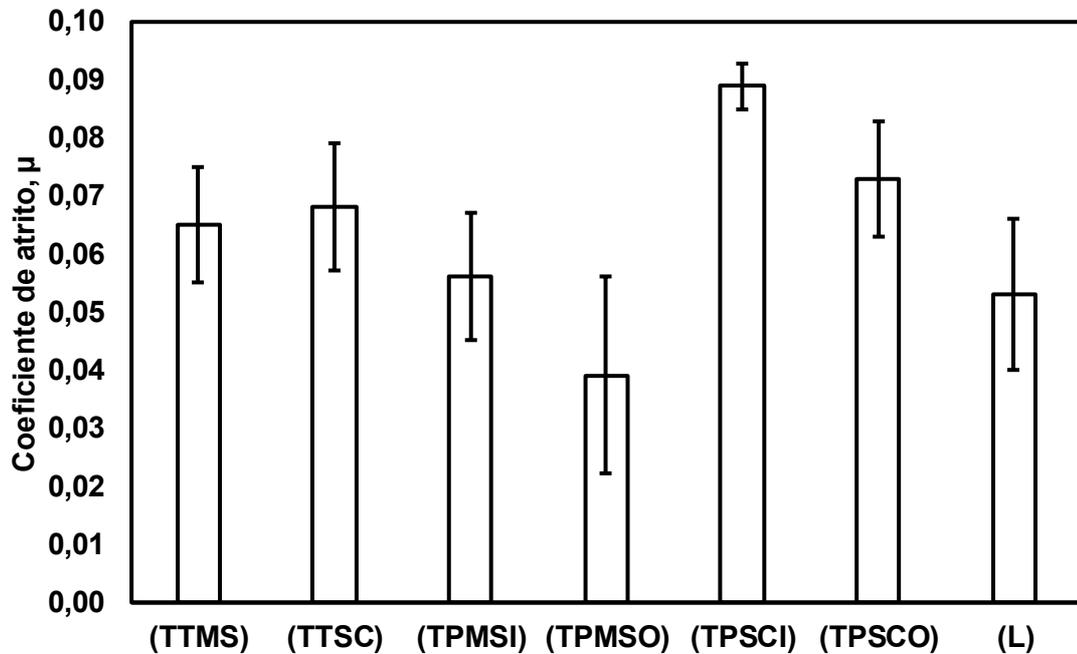
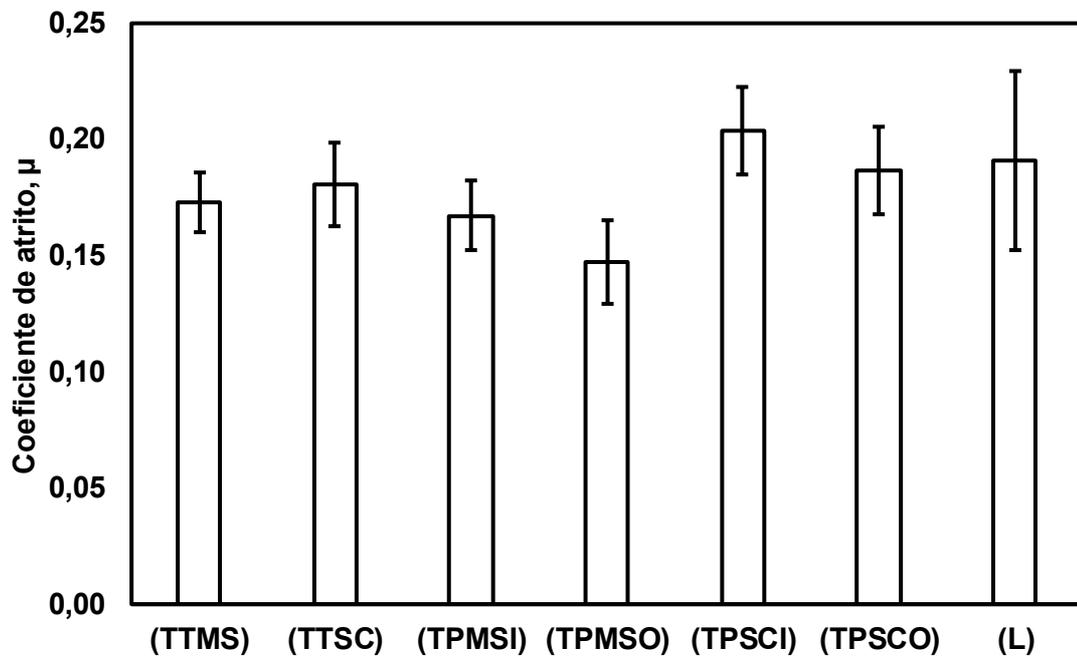


Figura 4-6 – Coeficiente de atrito em função do tempo no regime permanente para diferentes padrões topográficos: (a) 216,92 N; (b) 314,99 N

A Figura 4-6 mostra que para as duas condições de força normal ensaiadas apresentam valores próximos, justificando a análise de variância ANOVA para avaliar se as condições ensaiadas são significativamente diferentes para uma confiabilidade de 95 %.



(a)



(b)

Figura 4-7 – Coeficientes médios de atrito de ensaios em regime permanente: (a) 216,92 N; (b) 314,99 N.

A orientação das texturas em relação ao sentido de movimento do contracorpo apresenta ter influência no coeficiente de atrito, conforme ilustrado na Figura 4-6 e Figura 4-7. Percebe-se que para ambos os carregamentos ensaiados, os melhores desempenhos foram obtidos para as amostras texturizadas superficialmente com orientação de textura denominada mesmo sentido, onde o alinhamento da textura em padrão *Chevron* coincide com o sentido de movimento do contracorpo (veja

Tabela 3-1). Para força normal de 216,92 N, o alinhamento da textura reduziu 4,62 % no coeficiente de atrito e para a condição com 314,99 N, a diferença foi de 4,42 % quando comparado com a superfície lisa. A possível explicação para isso é a restrição lateral do escoamento do fluido lubrificante e incremento da capacidade de carga da superfície lubrificada (COSTA; HUTCHINGS, 2007).

Ainda na Figura 4-7 observa-se que para condição mais severa de carregamento, com força normal de 314,99 N (b), a presença de texturas superficiais diminuiu a variação no coeficiente de atrito, diminuindo a dispersão dos valores em relação à média. Esse comportamento pode ser justificado pela acomodação do sistema e possível redução de vibração do mesmo (SUDEEP; PANDEY; TANDON, 2013), ajudando o mesmo a se estabilizar e melhorando a qualidade dos sinais obtidos nos ensaios.

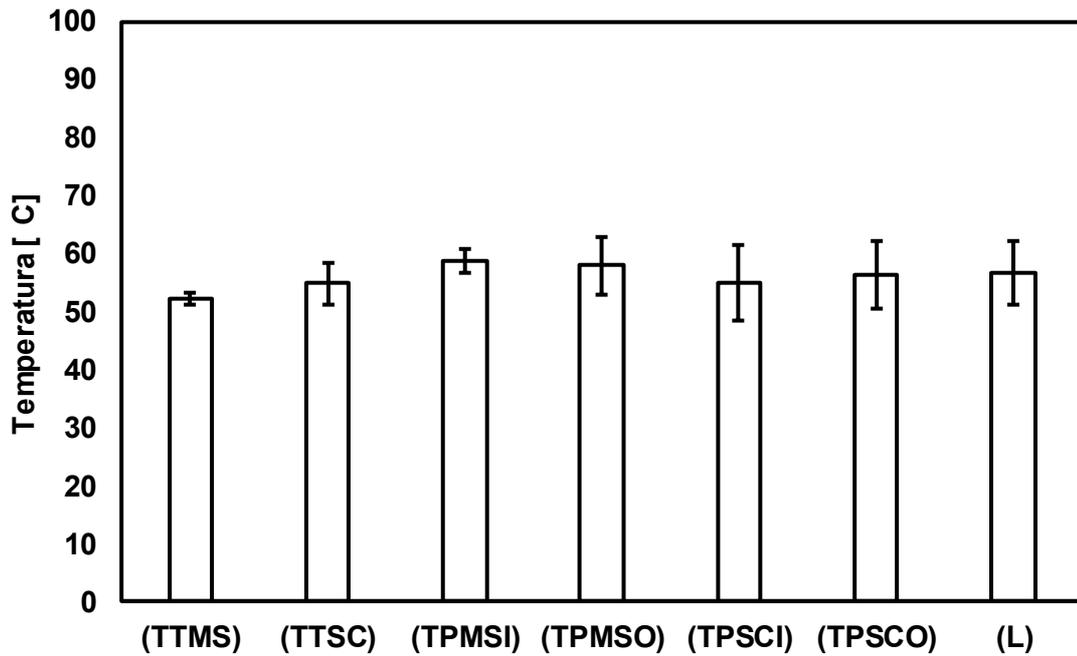
Conforme pode ser observado nas Figura 4-6a e Figura 4-7, a superfície sem alteração topográfica apresentou menor coeficiente de atrito no início dos ensaios, não apresentando diferenças estatisticamente significativas dentro do regime permanente, quando comparada as superfícies texturizadas. Trabalhos anteriores mostram que texturas superficiais podem apresentar reduções no coeficiente de atrito em condições de lubrificação mista (BRAUN et al., 2014; da SILVA; COSTA, 2017; MORRIS et al., 2015). Esse comportamento não foi observado nas condições ensaiadas. Para tentar explicar esse resultado, deve-se analisar primeiro as informações da Tabela 4-1. Conforme pode ser visto na mesma, a alteração da topografia das amostras alterou as rugosidades das mesmas, o que fez com que houvesse alteração do regime de lubrificação ao qual as amostras texturizadas estavam sujeitas. Para todas as condições ensaiadas, com exceção da condição TPMSO_{216N}, o regime de lubrificação deixou de ser misto, se tornando limitrofe, o que justifica os maiores valores de coeficiente de atrito. Pode-se perceber que dentre as amostras que possuíam texturas, a condição TPMSO_{216N} foi a que possuiu menor coeficiente de atrito, já que a texturização parcial se mostra mais eficiente do que a total (RYK et al., 2005). Outra informação que pode ser retirada do gráfico apresentado na Figura 4-6a é a tendência de todas as condições convergirem para um mesmo coeficiente de atrito. Uma possível explicação para esse

comportamento pode ser atribuída à alteração da geometria do contato, decorrente do processo de desgaste, conforme será abordado mais à frente.

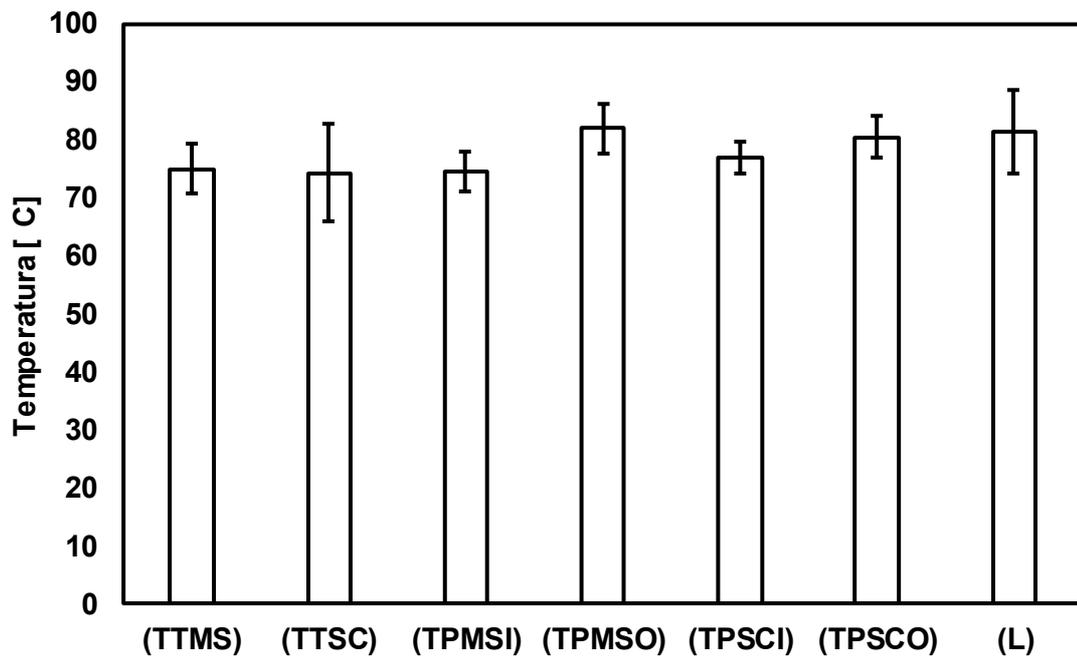
A Figura 4-6b corresponde as condições mais severas de lubrificação. Nesse caso observa-se que a presença de texturas superficiais reduziu o coeficiente de atrito quando comparado com a superfície sem textura. Para justificar esse comportamento, deve-se observar novamente da Tabela 4-1 para analisarmos os ensaios realizados. Observa-se que por se tratar de uma situação mais severa, o aumento da força normal alterou o regime de lubrificação de trabalho, alcançando condição limítrofe em todos os casos. Conforme os dados apresentados, é possível afirmar que a presença de texturas superficiais para esse regime de lubrificação pode ser benéfica, levando a redução no coeficiente de atrito (VLADESCU et al., 2015). Ao contrário do observado para condição com 216,92 N de força normal aplicada, percebe-se que tanto o parâmetro λ quanto a espessura de filme lubrificante aumentaram para todas condições, com exceção da TPMSO_{314N}, que apresentou redução da espessura de filme lubrificante. O aumento do parâmetro λ , significa fisicamente o aumento da espessura de filme lubrificante (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017b; SPIKES, 1997), que leva a diminuição do contato efetivo entre asperezas e consequente redução no coeficiente de atrito. O aumento da espessura de filme lubrificante pode ser explicado pela redução da temperatura média mensurada nos casos ensaiados (Figura 4-8b), possivelmente devido dissipação de energia e redução de temperatura na área de contato por conta da redução dos mecanismos de atrito (DENG et al., 2013; SUDEEP; PANDEY; TANDON, 2013; WU et al., 2012), conforme será abordado posteriormente.

Também é possível analisar por meio da Figura 4-6 em conjunto com as informações dispostas na Tabela 4-1, a influência da posição das texturas superficiais em relação ao sentido de movimento do contracorpo. Para ambas as condições de força normal imposta, é possível perceber que a texturização de toda a superfície não apresenta o melhor desempenho em termos de lubrificação. Para um carregamento de 216,92 N, a texturização parcial na região *inlet* apresentou aumento de 5,66 % no coeficiente de atrito, enquanto o posicionamento na região *outlet* apresentou redução de 26,41 %, quando comparadas a superfícies totalmente texturizadas. Para condição com 314,99 N, houve redução em ambos os casos, com redução de 12,56 % e 23,03 % para texturização parcial na região *inlet* e *outlet* respectivamente. Uma possível explicação para isso é que ao texturizar a região *outlet*, permite-se melhor suprimento de fluido para região de cavitação, gerando pequena redução da máxima pressão no filme lubrificante. Essa diminuição leva a expansão da região de filme de fluido lubrificante completo, melhorando o campo de distribuição de pressão, elevando a espessura da camada formada pelo mesmo (TALA-IGHIL; FILLON; MASPEYROT, 2011).

A Figura 4-8, apresenta a influência da força normal na temperatura média do fluido que participa do processo de desgaste durante o ensaio.



(a)



(b)

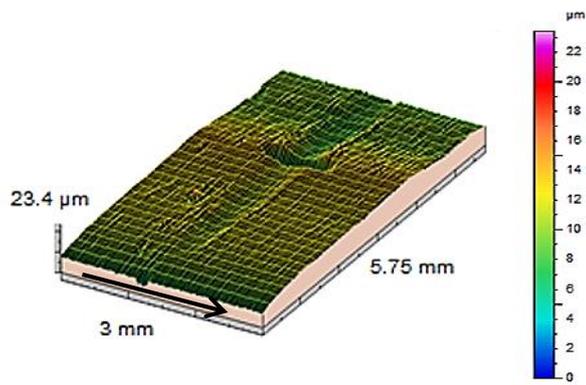
Figura 4-8 – Temperaturas médias de ensaios em regime permanente: (a) 216,92 N; (b) 314,99 N.

Para as amostras não texturizadas, aumentar a força normal resultou em um aumento de 43,54 % na temperatura média de regime. Nos ensaios realizados com 216,92 N (Figura 4-8a), superfície totalmente texturizada no padrão *chevrons* alinhados com o sentido de movimento do contracorpo, apresentam menores temperaturas. Esse comportamento pode ser explicado devido a atuação mais efetiva das texturas, que foram menos desgastadas e puderam atuar durante o ensaio melhorando a efetividade da lubrificação e consequentemente reduzindo a temperatura do contato (SUDEEP; PANDEY; TANDON, 2013), já que as texturas podem atuar como reservatório de lubrificante (HIRAOKA; SASAKI, 1997; LI et al., 2010).

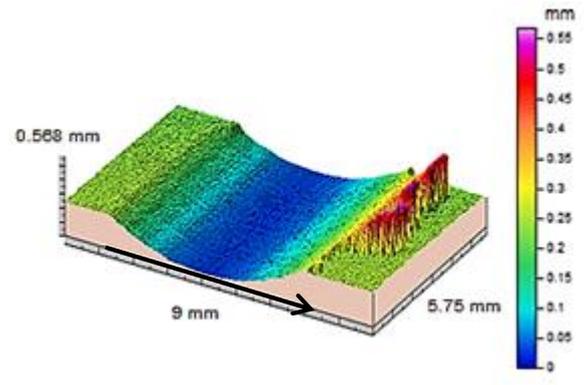
Com relação à orientação das texturas, observa-se que a orientação no sentido contrário resultou em maiores temperaturas médias. Esse fato foi associado à menor restrição lateral do escoamento do fluido lubrificante, aumentando o coeficiente de atrito em decorrência do maior nível de contato entre asperezas e, consequentemente, mais deformações plásticas e maior geração de energia térmica no sistema. Para os ensaios realizados com 314,99 N (Figura 4-8b), o alinhamento dos *chevrons* mostrou uma temperatura média menor de 0,15 %, quando comparados aos posicionados em sentido contrário. Apesar disso, eles apresentaram menor desvio padrão, mostrando que a condição de *chevrons* alinhada atinge o regime térmico de forma mais homogênea, com menos alterações ao longo dos ensaios.

Nas condições de textura parcial, observa-se que quando posicionadas na região *inlet*, a dissipação de energia térmica no sistema foi maior. Esse fato foi associado a uma maior espessura de filme lubrificante no contato (Tabela 4-1), já que menores temperaturas implicam em maiores viscosidades do fluido lubrificante, porém o coeficiente de atrito não foi sensível a esse fato. Uma possível explicação para isso está relacionada aos baixos coeficientes de atrito, que conforme será mostrado, implicou em menores taxas de desgaste, podendo fornecer fluido lubrificante ao contato, favorecendo o cisalhamento entre corpo e contracorpo, diminuindo o coeficiente de atrito.

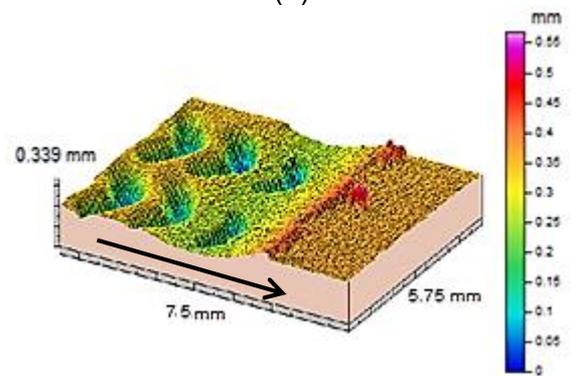
À medida que o desgaste progride entre as superfícies, tem-se uma mudança de geometria do contato entre o corpo e contracorpo, partindo de um contato inicial em linha para um contato mais conforme, como também observado da Silva e Costa (2017) e explicado por Rapoport et al., (2007). Essa alteração pode ser exemplificada na Figura 4-9, onde a alteração da força normal acentua a alteração da geometria do contato, aumentando o desgaste e a remoção de material e consequentemente aumentando sua conformidade, aproximando-a da geometria do contracorpo.



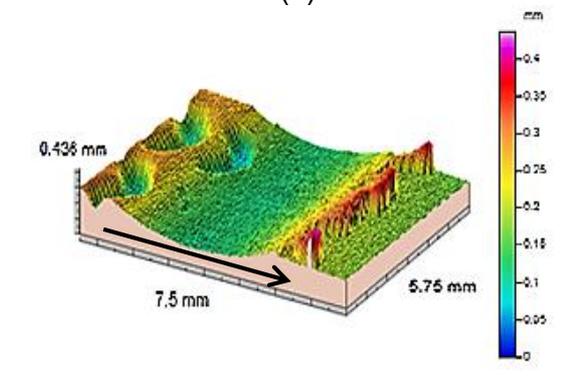
(a)



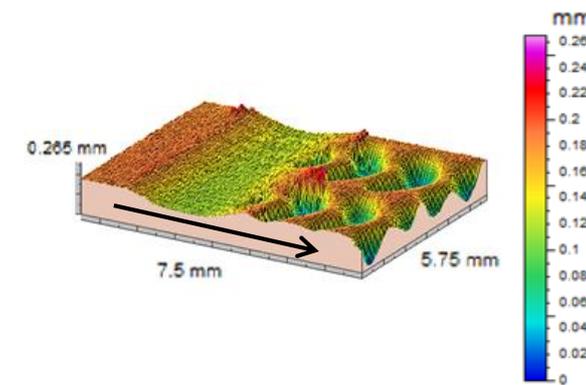
(b)



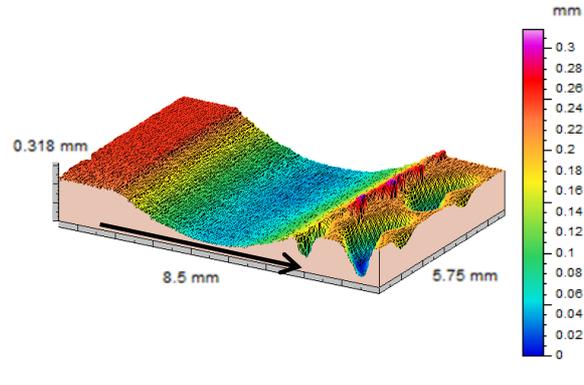
(c)



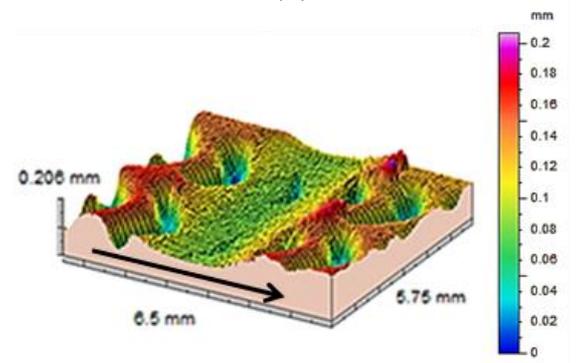
(d)



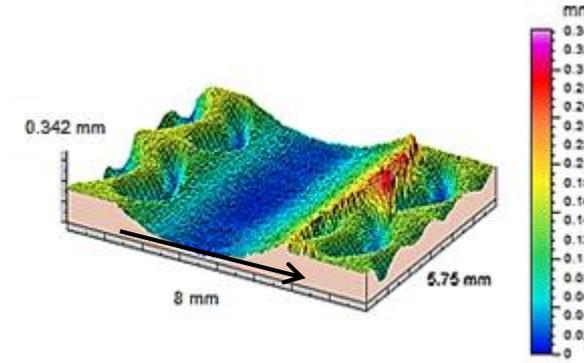
(e)



(f)



(g)

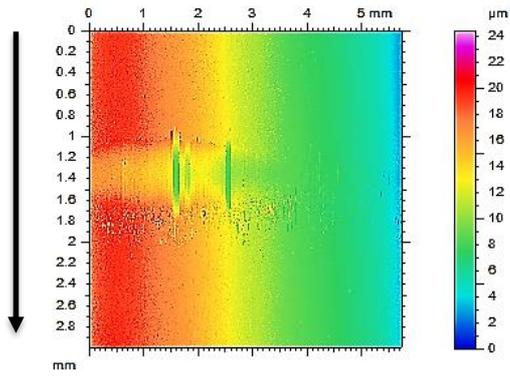


(h)

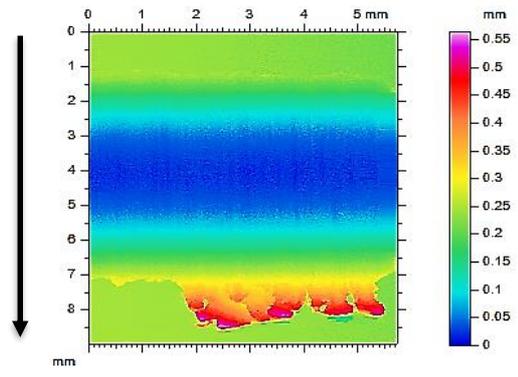
Figura 4-9 – Marcas de desgaste com alteração da força normal, obtidas por interferometria 3D: (a) L 216,92 N; (b) L 314,99 N; (c) PTMSI 216,92 N; (d) TPMSI 314,99 N; (e)TPSO 216,92 N; (f)TPSO 314,99 N (g)TTMS 216,92 N; (h)TTMS 314,99 N.

Utilizando o software MontainsMap[®], o raio de curvatura médio das marcas de desgaste foi mensurado utilizando 10 medições igualmente espaçadas em cada bloco. Para a condição com 216,92 N o raio de curvatura foi de 25,665 mm e para 314,99 N 18,748 mm, diminuindo 26,95%, sendo que o contracorpo possui raio de 17,500 mm. A alteração da geometria do contato reduz a pressão de contato substancialmente, quando comparado a contatos não conformes (JOHNSON, 1985). O aumento da marca de desgaste aumenta a conformidade e diminui a pressão de contato, aumentando a espessura do filme lubrificante, o que reduz significativamente o contato entre asperezas e conseqüentemente o atrito para o deslizamento posterior (DA SILVA; COSTA, 2017). Para a condição de 314,99 N de força normal aplicada, uma leve tendência em redução do coeficiente de atrito próximo ao fim do ensaio provavelmente deve-se à maior conformidade entre o bloco texturizado e o anel, conforme ilustrado na Figura 4-9. No caso de ensaios com 216,92 N, foi observado o comportamento contrário, ou seja, o atrito aumentou levemente no final do ensaio, já que o raio de convergência da marca de desgaste não havia convergido para o raio do contracorpo.

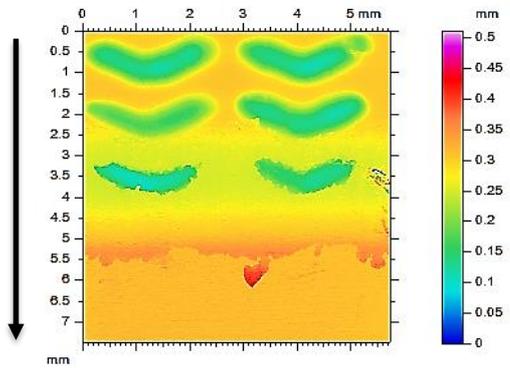
Ainda analisando a Figura 4-9, é possível perceber que as texturas desapareceram totalmente das regiões mais profundas das marcas de desgaste, porém ainda estavam presentes nas bordas das mesmas (Figura 4-9d e Figura 4-9h) para uma força normal de 314,99 N. Para as amostras texturizadas e ensaiadas com 216,92 N, é possível perceber que ao contrário da condição mais crítica, as texturas estão presentes nas regiões mais profundas das marcas de desgaste (Figura 4-9c e Figura 4-9g). A condição com texturização parcial apresenta texturas mais bem formadas e profundas no vale das marcas de desgaste (vide Figura 4-10c e Figura 4-10d) o que condiz com os menores valores de coeficiente de atrito encontrados na Figura 4-5a para amostras texturizadas. A presença das mesmas indica que pode haver melhora no campo de pressão e conseqüente aumento da espessura de filme lubrificante (TALA-IGHIL; FILLON; MASPEYROT, 2011).



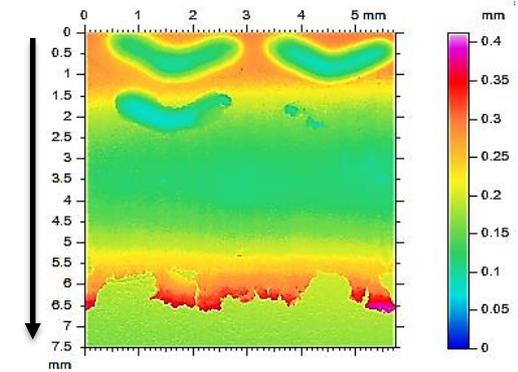
(a)



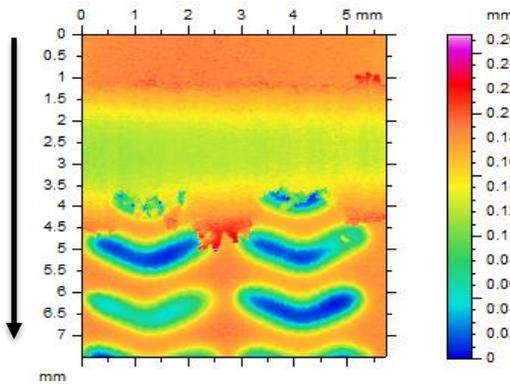
(b)



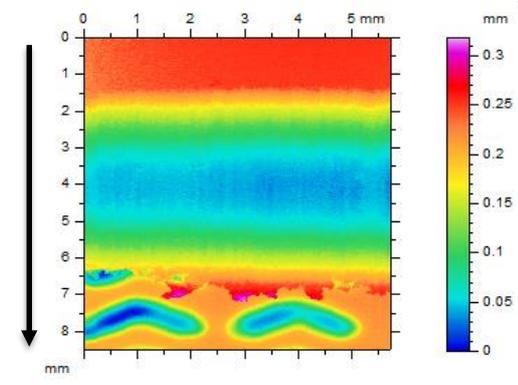
(c)



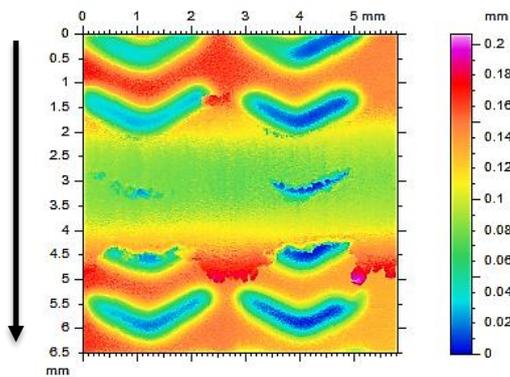
(d)



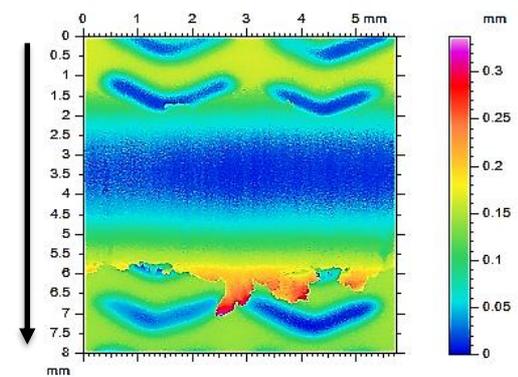
(e)



(f)



(g)



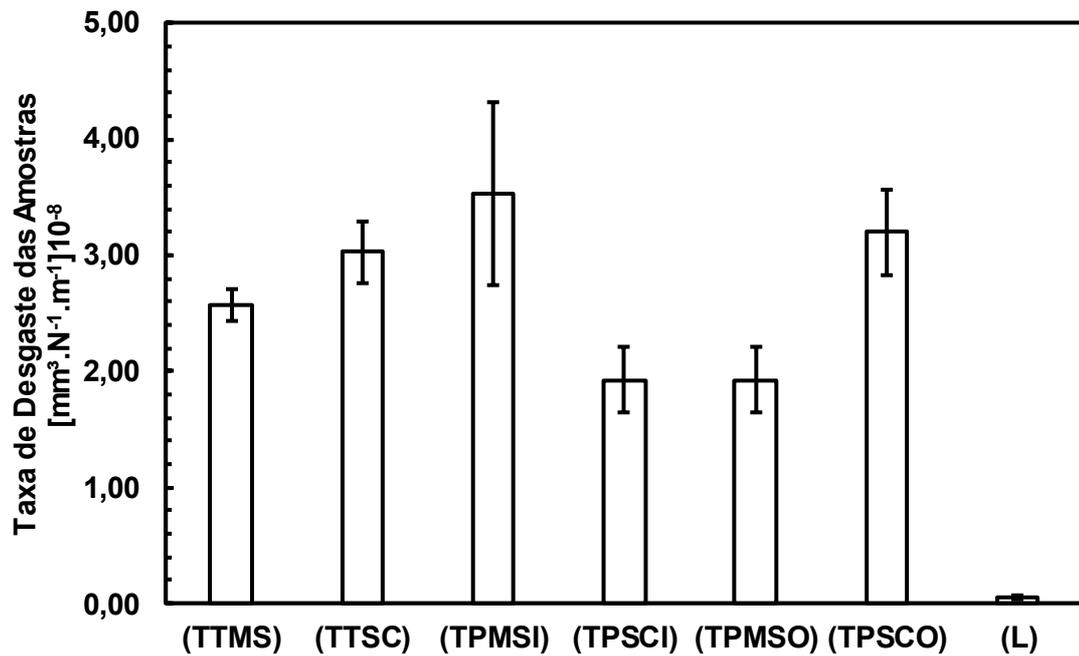
(h)

Figura 4-10 – Marcas de desgaste com alteração da força normal vistas de topo, obtidas por interferometria 3D: (a) L 216,92 N; (b) L 314,99 N; (c) PTMSI 216,92 N; (d) TPMSI 314,99 N; (e)TPSO 216,92 N; (f)TPSO 314,99 N (g)TTMS 216,92 N; (h)TTMS 314,99 N.

A análise das interferometrias 3D das marcas de desgaste permite o cálculo do volume desgastado em cada condição. Nesse caso a taxa de desgaste (k) foi calculada usando a equação de Archard (ARCHARD, 1953), representada na Eq. (4.1), onde V é a perda volumétrica em mm^3 , W é a força normal em N, e d é a distância deslizada.

$$k = \frac{V}{Wd} \quad (4.1)$$

As taxas de desgaste são apresentadas na Figura 4-11 para ensaios realizados com 216,92 N (a) e 314,99 N (b).



(a)

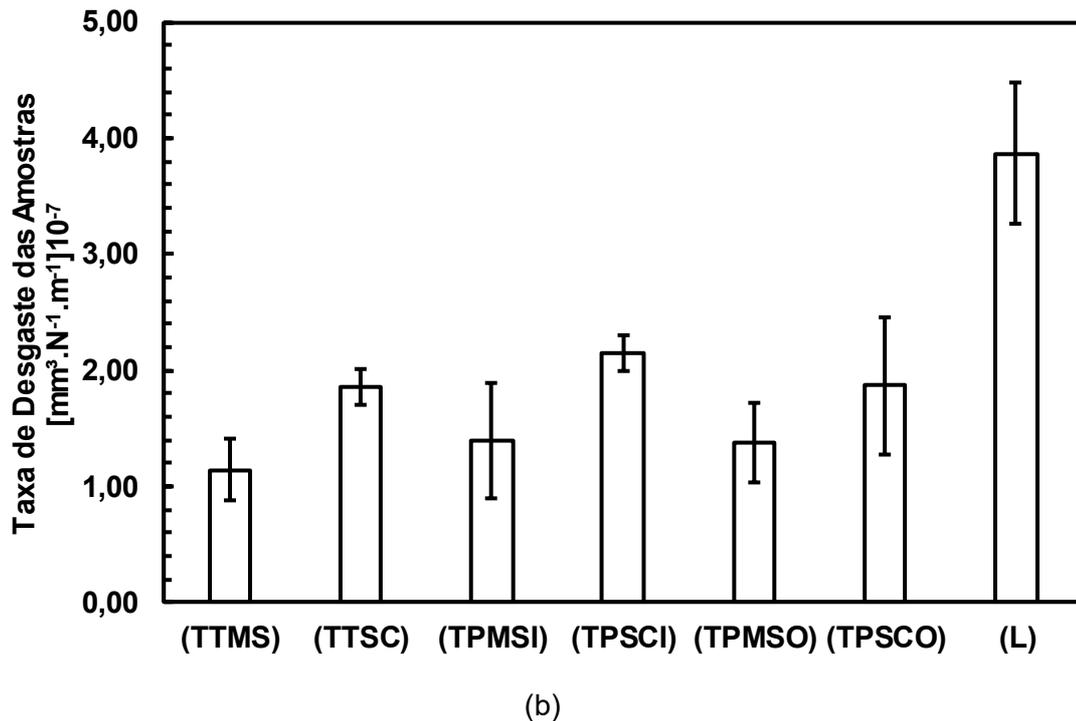


Figura 4-11 – Taxa de desgaste volumétrica para condições ensaiadas: (a) 216,92 N; (b) 314,99 N.

O aumento da força normal elevou em uma ordem de grandeza a taxa de desgaste para as condições ensaiadas. Esse fato se deve a menor espessura do filme lubrificante que permite maior contato entre asperezas e conseqüente maior taxa de desgaste. Por meio do gráfico exibido na Figura 4-11a, é possível confirmar a influência da alteração do regime de lubrificação na taxa de desgaste. De maneira semelhante ao ocorrido para o coeficiente de atrito, a texturização superficial aumentou a taxa de desgaste em 5 254,2% quando comparadas as condições TTMS_{216N} e L_{216N}. Esse aumento na taxa de desgaste das amostras quando comparadas a superfícies lisas se deve ao aumento da rugosidade, que possivelmente levou a alteração do regime de lubrificação, passando de misto para limítrofe, aumentando assim o contato entre asperezas, levando a maior remoção de material. Ainda nessa imagem, observa-se a influência da orientação das texturas nas taxas de desgaste. Para as condições com superfície totalmente texturizada, obteve-se menores taxas de desgaste com *chevrons* alinhados, reduzindo 15,18 % na taxa de desgaste. Também foi observado que o posicionamento das texturas influenciou na taxa de desgaste. Texturas posicionadas na região *outlet* resultaram em uma redução de 39,69 % na taxa de desgaste em relação às texturas posicionadas na região *inlet*.

Na Figura 4-11b, são mostradas as taxas de desgaste para as condições ensaiadas com 314,99 N. Por se tratar de uma condição mais severa, estando no regime de lubrificação limítrofe, pôde-se perceber claramente os benefícios da utilização de texturização superficial

com relação às taxas de desgaste. De forma semelhante à observada na Figura 4-11a, é possível perceber a influência da orientação dos chevrons em relação ao sentido de movimento do contracorpo, resultando em uma redução de 38,71 % em relação à condição onde os *chevrons* estão em sentido contrário ao do movimento do contracorpo. Com relação às condições de texturização superficial parcial, não se pode afirmar estatisticamente que haja diferença entre suas taxas de desgaste, visto o desvio padrão de cada uma. O que se pode afirmar é que, em relação às amostras sem textura, houve redução de 64,34 % na taxa de desgaste para a condição de texturização superficial parcial, com texturas alinhadas e posicionadas na região *outlet*.

As taxas de desgaste são apresentadas para diversos λ na Figura 4-12, onde as barras hachuradas mostram os ensaios realizados com força normal de 314,99 N e as barras sem preenchimento ensaios com 216,92 N.

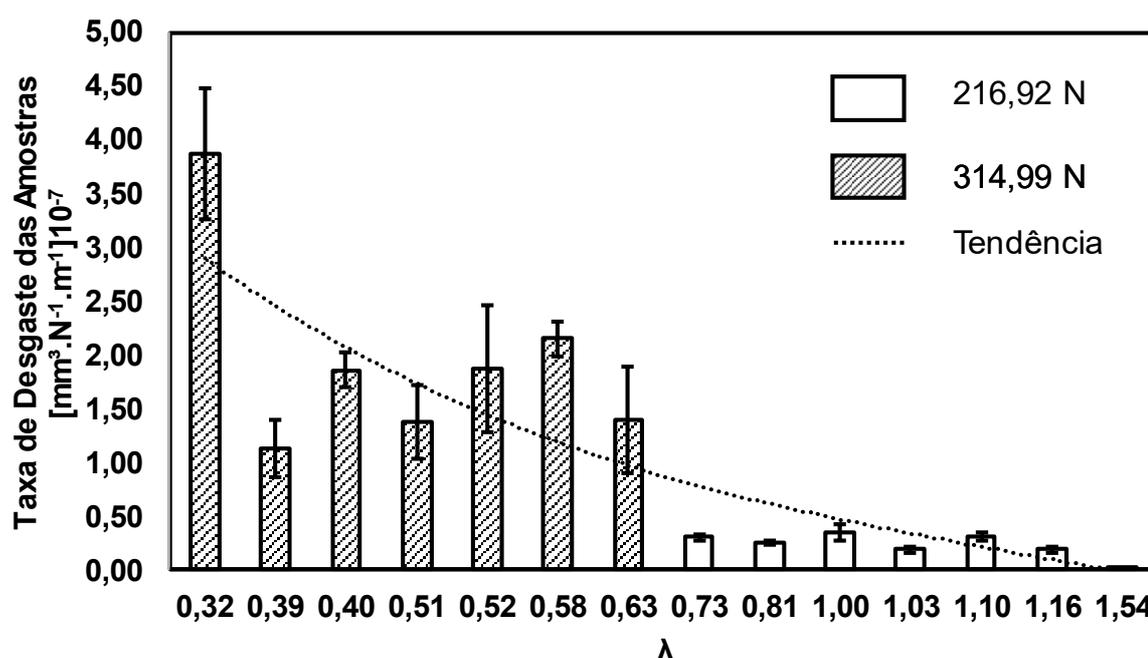


Figura 4-12 – Taxa de desgaste para diversos λ , onde as barras hachuradas mostram os ensaios realizados com força normal de 314,99 N e as barras sem preenchimento ensaios com 216,92 N, e a linha pontilhada é uma linha de tendência.

Observa-se que apesar das mudanças topográficas, o aumento do parâmetro λ levou a redução da taxa de desgaste, conforme ilustrado pela linha de tendência. Esse comportamento é justificado pelo aumento do filme de fluido lubrificante que se forma entre as superfícies conforme já comentado. Também é possível perceber que o aumento da força

normal reduz o parâmetro λ , já que o crescimento da mesma tende a aumentar a severidade do contato, corroborando com as análises já feitas, que mostraram o aumento da temperatura, que levou a redução da viscosidade do fluido e conseqüente diminuição da espessura da camada de fluido lubrificante.

De forma geral, percebe-se que da mesma forma que mostrado experimentalmente por Ryk et al., (2005), a texturização parcial possibilita trabalhar com menores coeficientes de atrito e taxas de desgaste, quando comparadas a superfícies totalmente texturizadas, pois fornece um mecanismo de acumulação de pressão hidrostática, reduzindo as perdas por atrito (ETSION; HALPERIN, 2002; KLIGERMAN; ETSION; SHINKARENKO, 2005).

Ainda analisando a Figura 4-5b, podemos justificar a redução do coeficiente de atrito de superfícies texturizadas, devido possivelmente a ocorrência de dois principais fenômenos: reservatório de lubrificante (HIRAOKA; SASAKI, 1997; LI et al., 2010) e retenção de partículas abrasivas (SUH; SAKA, 1987 SUH; MOSLEH; HOWARD, 1994). Para ilustrar o segundo mecanismo, a Figura 4-13 apresenta análises por MEV e EDS de uma amostra com superfície totalmente texturizadas, ensaiada com força normal de 314,99 N. A seta vermelha na Figura 4-13a indica o sentido de movimento do contracorpo (Figura 4-14) no ensaio e o quadrado da mesma cor, mostra a área ampliada exibida na Figura 4-13b. Observa-se nessa figura possíveis marcas de desgaste abrasivo, paralelas ao sentido de movimento do contracorpo, o que pode indicar a presença de partículas abrasivas provenientes do desgaste das amostras, conforme será abordado posteriormente. Também foi observado a presença de uma textura dentro da marca de desgaste, o que levou a realização de uma análise mais detalhada da mesma, conforme ilustrado na Figura 4-13b. Nessa figura, além de ser possível observar melhor as marcas de desgaste com a presença de marcas de delaminação, pode-se observar também a existência de partículas aderidas dentro das marcas de textura. Para investigar as mesmas, foi realizada uma análise de EDS nas áreas delimitadas pelos quadrados brancos e numeradas de 1 a 3, ilustradas nas Figura 4-13c, Figura 4-13d e Figura 4-13e respectivamente. Pode-se perceber que nas áreas 1 e 3 apresentam em seus espectros baixa presença de oxigênio, ao contrário da área 2, o que pode indicar que as partículas em questão sejam partículas oxidadas provenientes do desgaste entre o corpo e contracorpo.

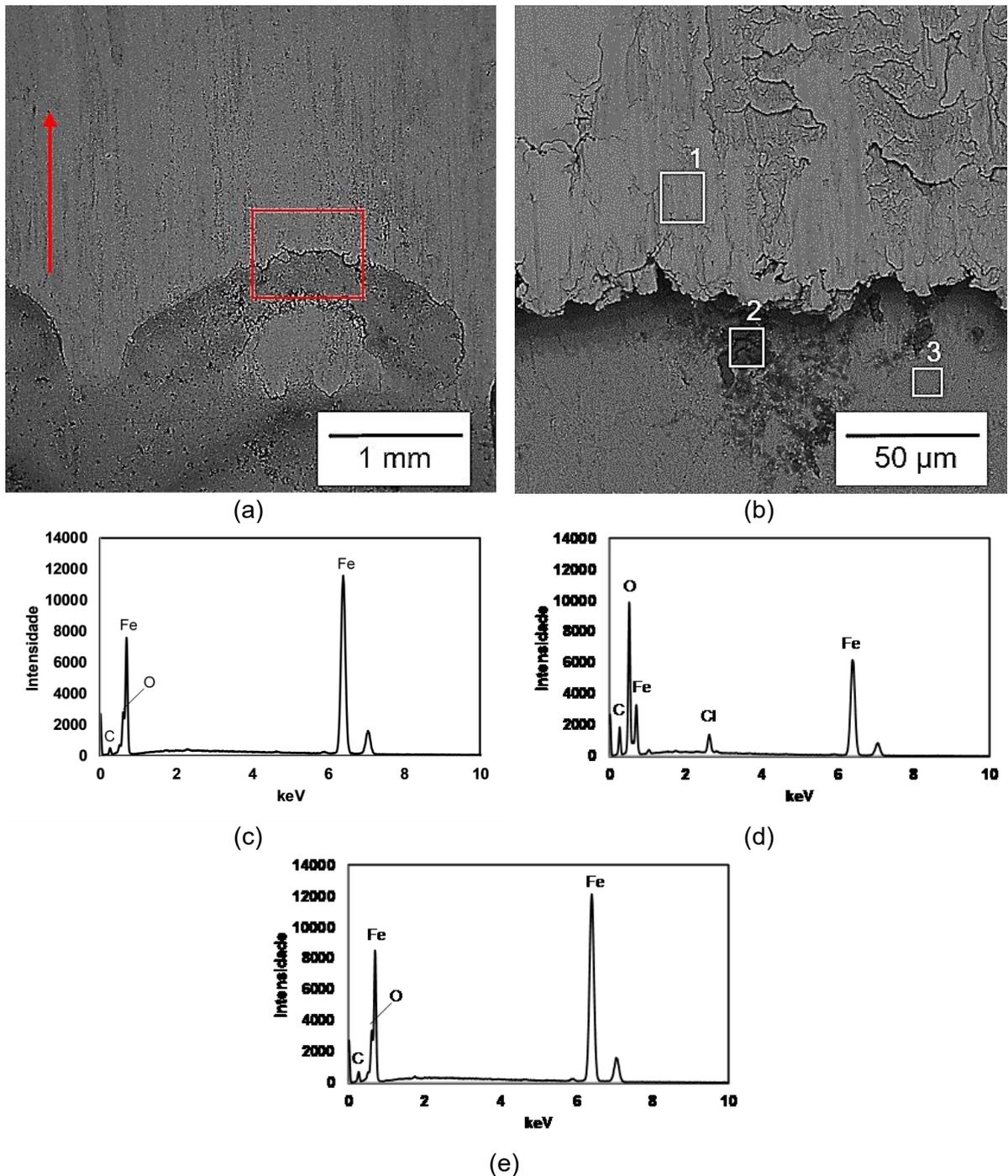


Figura 4-13– Microscopia eletrônica de varredura, utilizando elétrons retroespalhados da marca de desgaste de uma amostra totalmente texturizadas com força normal de 314,99 N, com a seta vermelha indica o sentido de movimento do contracorpo: (a) marca de desgaste; (b) ampliação da região em vermelho delimitada na marca de desgaste; (c) análise EDS para área 1; (d) análise EDS para área 2; (e) análise EDS para área 3.

Analisando a Figura 4-14, temos imagens de MEV com SE (a) e BSE (b) do contracorpo que deslizou contra a amostra mostrada na Figura 4-13, onde a seta vermelha

novamente indica o sentido de movimento do mesmo. Pode-se perceber na Figura 4-14a presença de riscos conforme já visto e comentado na Figura 4-13, o que corrobora com a hipótese de que é possível identificar marcas de desgaste abrasivo, que será discutido a seguir. Na Figura 4-14b foram realizadas análises de EDS nas áreas demarcadas e numeradas de 1 a 3, com seus respectivos espectros mostrados nas Figura 4-14c, Figura 4-14d e Figura 4-14e respectivamente. Conforme mostrado nos espectros, não há quantidades significativas de oxigênio nas áreas 1 e 3, com exceção da área 2, onde é possível perceber pequena quantidade do mesmo, indicando a presença de uma provável tribocamada.

Buscando analisar os mecanismos de desgaste dos ensaios, foram feitas micrografias óticas das marcas de desgastes dos pares corpo e contracorpo para cada uma das condições, buscando correlacioná-las e explicar os principais mecanismos de desgaste atuantes. Começando pela Figura 4-15a, é possível identificar riscos paralelos à trilha de desgaste, evidenciando o mecanismo de desgaste abrasivo, que ocorreu possivelmente graças à presença de particulados provenientes do desgaste no par ensaiado, além de evidências de intensa deformação plástica. Conforme o ensaio ocorre, o material desgastado é removido e fica imerso no fluido lubrificante, podendo retornar ao contato e acentuar o desgaste do par durante os ensaios. Ao analisar-se o contracorpo (Figura 4-15b), é possível identificar marcas de delaminação semelhantes às encontradas na literatura (ROSENKRANZ et al., 2015; WANG et al., 2010) apontadas por setas vermelhas e marcas de desgaste abrasivo, coerentes com o regime de lubrificação limítrofe. Nesse regime de lubrificação o grande contato entre asperezas, corrobora com o coeficiente de atrito e taxas de desgaste já apresentadas.

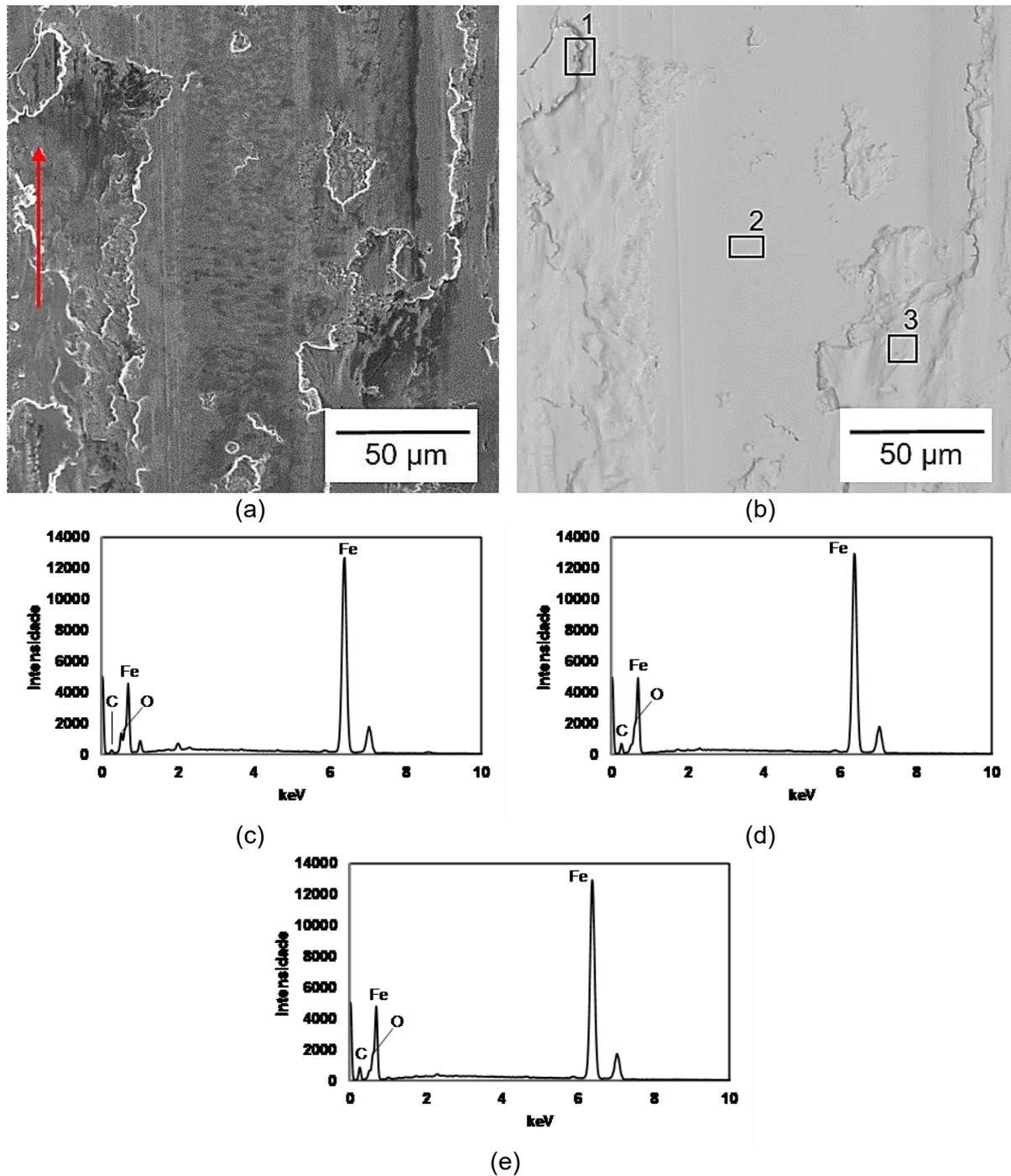
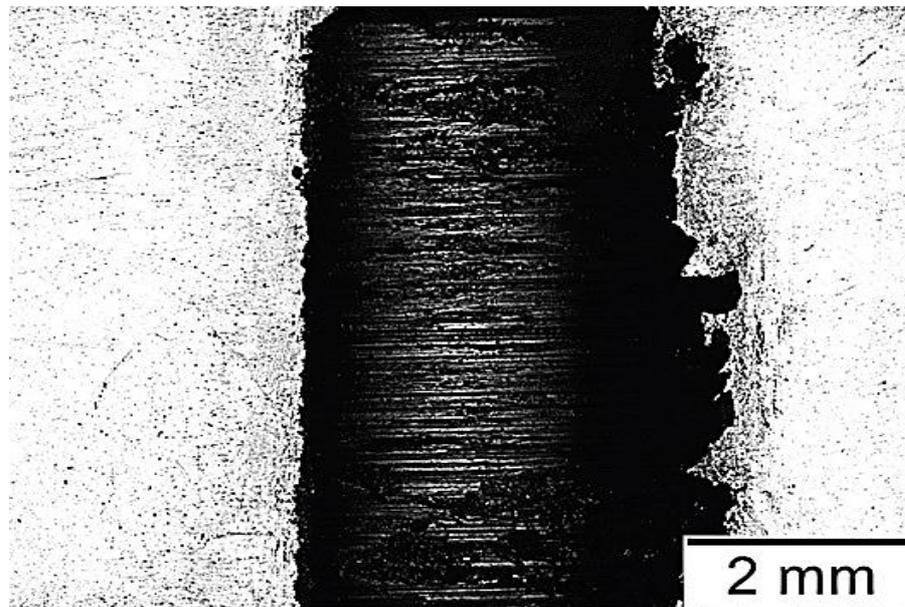
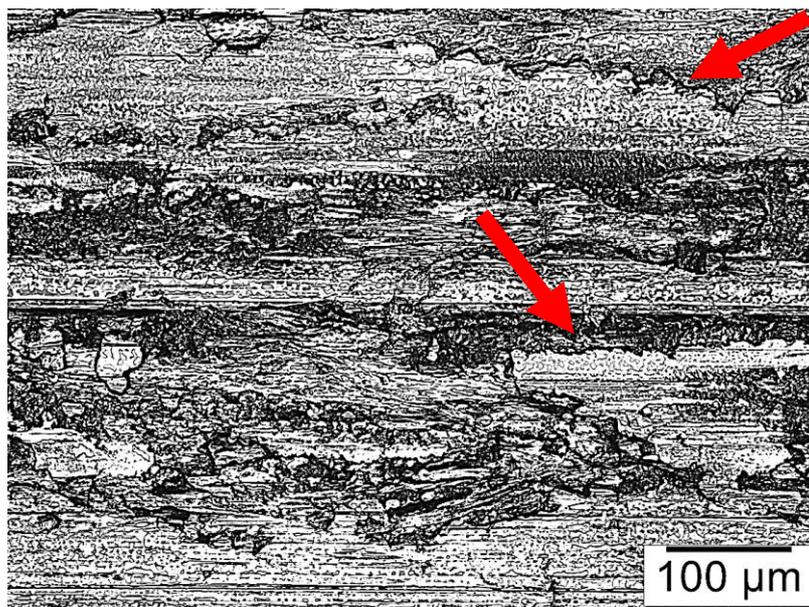


Figura 4-14 – Microscopia eletrônica de varredura da marca de desgaste do contracampo em ensaio com força normal de 314,99 N, com a seta vermelha indica o sentido de movimento do contracampo: (a) utilizando elétrons secundários; (b) utilizando elétrons retroespalhados; (c) análise EDS para área 1; (d) análise EDS para área 2; (e) análise EDS para área 3.



(a)

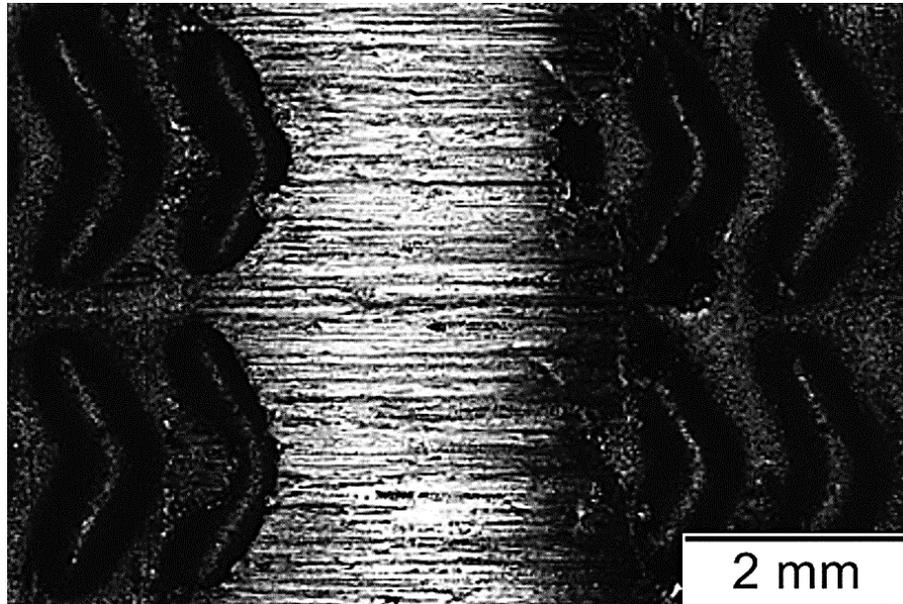


(b)

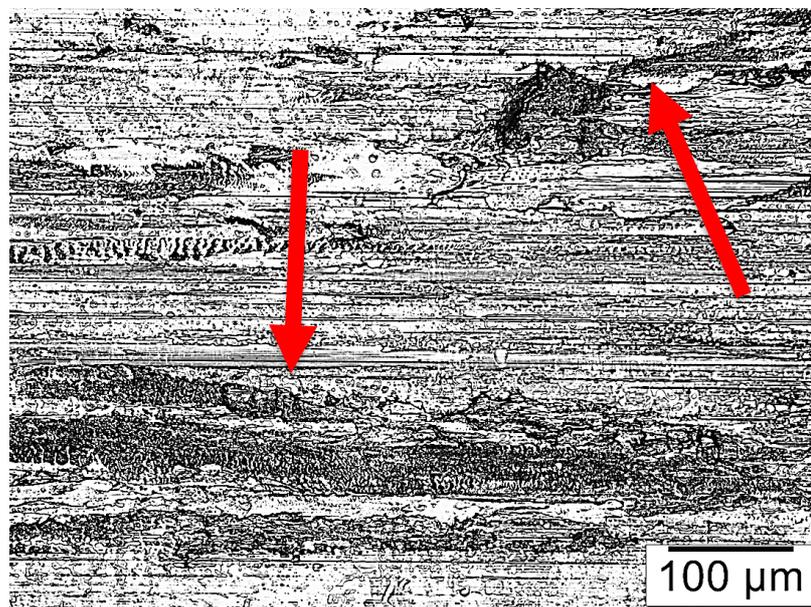
Figura 4-15 – Micrografia ótica das marcas de desgaste do ensaio com bloco não texturizado, ensaiado com força normal de 314,99 N: (a) corpo; (b) contracampo.

Com a texturização superficial, é possível perceber nas Figura 4-16a e Figura 4-17a, que mesmo com redução da força normal aplicada, ocorre a prevalência de marcas de desgaste abrasivo, com riscos bem formados e paralelos a direção de deslizamento do contracampo. A redução da força normal reduziu o desgaste, graças à presença de texturas na marca de desgaste, conforme previamente comentado no texto. Além dessa evidência, é possível observar nas Figura 4-16b e Figura 4-17b que a redução da força normal diminuiu

as marcas de delaminação, prevalecendo as marcas de desgaste abrasivo, com marcas de deformação plástica mais brandas.

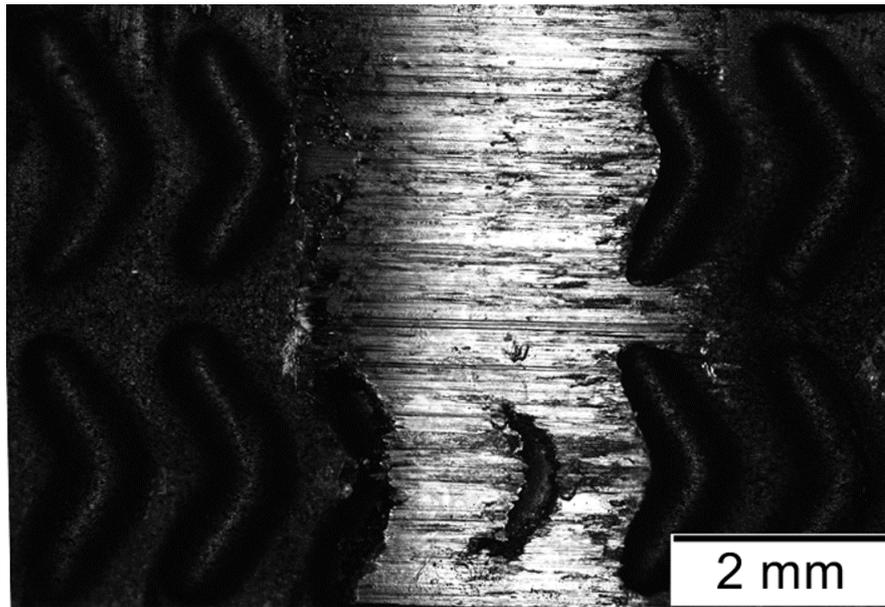


(a)

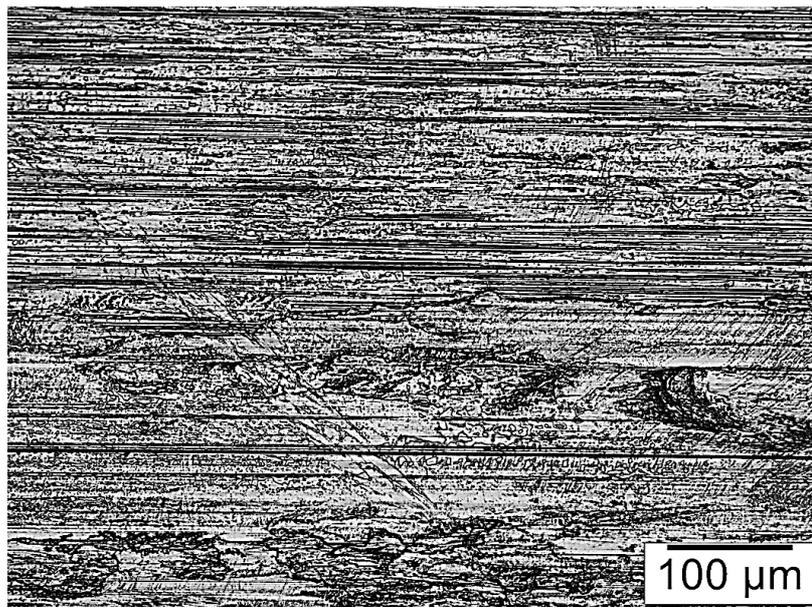


(b)

Figura 4-16 – Microscopia ótica de marcas de desgaste de corpo totalmente texturizado, ensaiado com força normal de 314,99 N: (a) bloco texturizado; (b) contracorpo.



(a)



(b)

Figura 4-17– Microscopia ótica de marcas de desgaste de corpo totalmente texturizado, ensaiado com força normal de 216,92 N: (a) bloco texturizado; (b) contracorpo.

Conforme discutido nessa seção, é possível perceber que o processo de texturização nesse estudo não permitiu observar a melhoria de desempenho para todas as condições ensaiadas com força normal de 214,92 N, apresentando em algumas condições redução no coeficiente de atrito médio das condições parcialmente texturizadas. Isso ocorreu devido ao aumento de rugosidade proveniente do processo de confecção dos padrões de textura. Para a condição mais severa ensaiada com 314,99 N, percebeu-se melhora em relação à superfície

sem alteração superficial, havendo redução no coeficiente de atrito e taxa de desgaste. Também pôde-se perceber que a texturização superficial completa é menos eficiente que a parcial e que a orientação das texturas em relação ao sentido de movimento do contracorpo influencia diretamente o comportamento tribológico do par analisado.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

De forma geral, com base nos resultados discutidos nesse trabalho, é possível concluir que essa metodologia de ensaios pode ser considerada uma boa aproximação para o estudo de mancais rotativos que trabalham em diferentes regimes de lubrificação. Apesar de os ensaios terem sido realizados com corpos de prova não conformes, à medida em que o ensaio se desenvolve há alteração na geometria do contato, comprovado pelos raios de convergência das marcas de desgaste.

Também é possível perceber que a metodologia abordada foi sensível às alterações topográficas impostas pela texturização superficial, obtendo-se resultados coerentes com os encontrados na literatura.

De forma específica, este trabalho abordou a influência do tempo de texturização utilizando o método de texturização sem mascaramento (MECT), em relação a profundidade e largura das texturas, além da qualidade superficial das mesmas.

Com relação a texturização superficial, concluiu-se que:

- Para aço ABNT 1045, tempos de 20 e 30 segundos possibilitam confeccionar texturas com razão profundidade largura dentro da faixa sugerida pela literatura, entre 0,1 e 0,18, para se obter condições de lubrificação adequadas, sendo escolhido o tempo de 30 segundos com uma razão de 0,144 (Vide Figura 4-2);
- Tempos de texturização maiores ou iguais a 60 segundos rebaixam a superfície entre texturas em relação a região não texturizada. Esse comportamento é indesejado para aplicações tribológicas, tornando irregular a região de contato entre o corpo texturizado e sem textura.

Outro ponto abordado nesse trabalho foi por meio de ensaios bloco sobre anel, o efeito do controle da topografia na eficiência de contatos lubrificados, variando a força normal, posicionamento da textura e orientação com relação ao sentido de movimento do contracorpo.

Com relação aos ensaios bloco sobre anel, concluiu-se que:

- O aumento da força normal de 216,92 N para 314,99 N aumentou o coeficiente de atrito, temperatura média do meio e taxa de desgaste para todas condições topográficas ensaiadas;
- Para força normal de 216,92 N, a texturização superficial aumenta tanto o coeficiente de atrito quando a taxa de desgaste, com exceção da condição parcialmente texturizada com texturas alinhadas e posicionadas na região outlet, devido ao aumento da rugosidade superficial, que leva as superfícies texturizadas para o regime de lubrificação limítrofe;
- Para força normal de 314,99 N, a texturização superficial reduziu o coeficiente de atrito e taxa de desgaste. Apesar do aumento de rugosidade devido ao processo de texturização, as superfícies com alteração topográfica possibilitaram melhor dissipação térmica, reduzindo a temperatura e conseqüentemente aumentando a espessura de filme lubrificante;
- A orientação das texturas em formato “V” influenciou o desempenho das superfícies texturizadas. Os padrões alinhados com o sentido de movimento do contracorpo apresentaram redução no coeficiente de atrito e taxa de desgaste;
- Com relação à texturização parcial, para as duas condições de força normal ensaiadas, pôde-se perceber redução no coeficiente de atrito quando comparado à superfície totalmente texturizada, mostrando não ser benéfico texturizar toda a superfície. Também foi possível perceber que texturas posicionadas na região *outlet* mostraram melhor desempenho, com menores coeficientes de atrito e taxas de desgaste.

CAPÍTULO VI

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se como trabalhos futuros:

- Investigar a influência da densidade e RPL das texturas superficiais;
- Avaliar o desempenho de texturas superficiais no regime de lubrificação hidrodinâmico;
- Investigar a eficácia de superfícies que combinem texturização superficial e revestimentos antidesgaste, como por exemplo Diamond Like Carbon (DLC) na redução de do atrito e desgaste;
- Investigar a influência do método de confecção de texturas superficiais no desempenho de contatos lubrificados;
- Aplicação da técnica de texturização para *journal bearings*;
- Estudar outros padrões geométricos de texturas superficiais.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARCHARD, J. F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces. **Journal of Applied Physics**, v. 24, n. 8, p. 981–988, ago. 1953.
- BHATTACHARYYA, B.; MUNDA, J. Experimental investigation into electrochemical micromachining (EMM) process. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 140, n. 1–3 SPEC., p. 287–291, 2003.
- BHUSHAN, B. Biomimetics: lessons from nature-an overview. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 367, n. 1893, p. 1445–1486, 28 abr. 2009.
- BORGHI, A. et al. Tribological effects of surface texturing on nitriding steel for high-performance engine applications. **Wear**, v. 265, n. 7–8, p. 1046–1051, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.02.011>
- BOWDEN, F. P.; TABOR, D. **The Friction and Lubrication of Solids**. [s.l.] Oxford, 1950.
- BRAUN, D. et al. Efficiency of laser surface texturing in the reduction of friction under mixed lubrication. **Tribology International**, v. 77, p. 142–147, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.04.012>
- BUDINSKI, K. G. **Friction, Wear, and Erosion Atlas**. [s.l.] CRC Press, 2013. <https://doi.org/10.1201/b15984>
- CAMERON, A. **Basic Lubrication Theory**. [s.l.] Longman, 1971.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2007.01.014>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.09.004>
- COSTA, H. L.; HUTCHINGS, I. M. Some innovative surface texturing techniques for

- tribological purposes. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology**, v. 229, n. 4, p. 429–448, 2015. <https://doi.org/10.1177/1350650114539936>
- DA SILVA, L. R. **Texturização superficial de cilindros automotivos**. [s.l.] Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, 2016.
- 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>
- DEAN, B.; BHUSHAN, B. Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 368, n. 1929, p. 4775–4806, 28 out. 2010.
- DENG, J. et al. Performance of femtosecond laser-textured cutting tools deposited with WS₂ solid lubricant coatings. **Surface and Coatings Technology**, v. 222, p. 135–143, maio 2013. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.02.015>
- ETSION, I. et al. Experimental Investigation of Laser Surface Textured Parallel Thrust Bearings. **Tribology Letters**, v. 17, n. 2, p. 295–300, ago. 2004.
- ETSION, I. State of the Art in Laser Surface Texturing. **Journal of Tribology**, v. 127, n. 1, p. 248, 2005. <https://doi.org/10.1115/1.1828070>
- 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>
- FANG, Y. et al. Surface composition-lubrication design of Al₂O₃/Mo laminated composites-Part I: Influence of laser surface texturing on the tribological behavior at 25 and 800°C. **Wear**, v. 334–335, p. 23–34, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.04.010>
- FORBES, J. E.; TAYLOR, E. S. **A method for studying piston friction**. [s.l.] MASSACHUSETTS INST OF TECH CAMBRIDGE SLOAN LABS FOR AUTOMOTIVE AND AIRCRAFT ENGINES, 1943.
- FOWELL, M. et al. Entrainment and Inlet Suction: Two Mechanisms of Hydrodynamic Lubrication in Textured Bearings. **Journal of Tribology**, v. 129, n. 2, p. 336, 2007. <https://doi.org/10.1115/1.2540089>
- GREENWOOD, J. A.; JOHNSON, K. L.; MATSUBARA, E. A surface roughness parameter in Hertz contact. **Wear**, v. 100, n. 1–3, p. 47–57, dez. 1984. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(84\)90005-X](https://doi.org/10.1016/0043-1648(84)90005-X)
- GREENWOOD, J. A.; WILLIAMSON, J. B. P. Contact of Nominally Flat Surfaces.

- Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 295, n. 1442, p. 300–319, 6 dez. 1966. <https://doi.org/10.1098/rspa.1966.0242>
- HAMILTON, D. B.; WALOWIT, J. A.; ALLEN, C. M. A Theory of Lubrication by Micro-irregularities. **Journal of Basic engineering**, v. 88, n. 1, p. 177–185, 1966. <https://doi.org/10.1115/1.3645799>
- HAMROCK, B. J.; SCHMID, S. R. **Fundamental of Fluid Film Lubrication Second Edition**. [s.l.: s.n.].
- HAMROCK, B. J.; SCHMID, S. R.; JACOBSON, B. O. Fundamentals of Fluid Film Lubrication - Second Edition. 2004. <https://doi.org/10.1201/9780203021187>
- HERNÁNDEZ BATTEZ, A. et al. CuO, ZrO₂ and ZnO nanoparticles as antiwear additive in oil lubricants. **Wear**, v. 265, n. 3–4, p. 422–428, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.11.013>
- HIRAOKA, N.; SASAKI, A. Effect of discontinuous hard under-coating on the life of solid film lubricant under extreme contact pressure. **Tribology International**, v. 30, n. 6, p. 429–434, jun. 1997. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(97\)00006-6](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(97)00006-6)
- HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. [s.l.] Elsevier, 2017.
- INTERNATIONAL, A. **ASM Handbook: Volume 18: Friction, Lubrication, and Wear Technology**. [s.l.: s.n.].
- JOHNSON, K. L. **Contact Mechanics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139171731>
- JOST, H. P. Tribology — Origin and future. **Wear**, v. 136, n. 1, p. 1–17, fev. 1990. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(90\)90068-L](https://doi.org/10.1016/0043-1648(90)90068-L)
- KAWASEGI, N. et al. Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior. **Precision Engineering**, v. 33, n. 3, p. 248–254, jul. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2008.07.005>
- KAYABA, T.; KATO, K. The analysis of adhesive wear mechanism by successive observations of the wear process in SEM. **Proc. Int. Conf. on Wear of Materials**, p. 45–56, 1979.
- KLIGERMAN, Y.; ETSION, I.; SHINKARENKO, A. Improving Tribological Performance of Piston Rings by Partial Surface Texturing. **Journal of Tribology**, v. 127, n. 3, p. 632–638, 13 jun. 2005. <https://doi.org/10.1115/1.1866171>
- KOSZELA, W. et al. The effect of surface texturing on seizure resistance of a steel-bronze assembly. **Tribology International**, v. 43, n. 10, p. 1933–1942, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.04.016>
- KOVALCHENKO, A. et al. The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact. **Tribology International**, v. 38, n. 3, p. 219–225, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2004.08.004>

- LANDMAN, U. et al. Atomistic Mechanisms and Dynamics of Adhesion, Nanoindentation, and Fracture. **Science**, v. 248, n. 4954, p. 454–461, 27 abr. 1990. <https://doi.org/10.1126/science.248.4954.454>
- LEARY, W. A.; JOVELLANOS, J. U. **A study of piston and ring friction**. [s.l.] National Advisory Committee for Aeronautics, 1944.
- LI, J. et al. Effect of surface laser texture on friction properties of nickel-based composite. **Tribology International**, v. 43, n. 5–6, p. 1193–1199, maio 2010. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.12.044>
- LIVENGOOD, J. C.; WALLOUR, C. A study of piston-ring friction. 1947.
- LU, X.; KHONSARI, M. M. On the Lift-off Speed in Journal Bearings. **Tribology Letters**, v. 20, n. 3–4, p. 299–305, dez. 2005. <https://doi.org/10.1007/s11249-005-9124-y>
- 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. 169–176, 25 jun. 2007. <https://doi.org/10.1007/s11249-007-9217-x>
- LU, Z. C. et al. Improving wear performance of dual-scale Al–Sn alloys by adding nano-Si@Sn: Effects of Sn nanophase lubrication and nano-Si polishing. **Wear**, v. 338–339, p. 258–267, set. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.06.017>
- MORRIS, N. et al. Combined numerical and experimental investigation of the microhydrodynamics of chevron-based textured patterns influencing conjunctural friction of sliding contacts. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology**, v. 229, n. 4, p. 316–335, 2015. <https://doi.org/10.1177/1350650114559996>
- NARITA, K. Tribological Properties of Metal V-Belt Type CVT Lubricant. **Advances in Tribology**, v. 2012, p. 1–8, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/476028>
- NOGUEIRA, I. et al. An experimental model for mixed friction during running-in. **Wear**, v. 253, n. 5–6, p. 541–549, set. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00065-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00065-0)
- NPTEL. Electro Chemical Machining. In: **Non conventional Machining**. Module 8 ed. [s.l.: s.n.].
- OKTAY, S. T.; SUH, N. P. Wear Debris Formation and Agglomeration. **Journal of Tribology**, v. 114, n. 2, p. 379, 1992. <https://doi.org/10.1115/1.2920897>
- PARREIRA, J. G. **Texturização Superficial Eletroquímica Sem Mascaramento Com Finalidades Tribológicas**. [s.l.] Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, 2011.
- POPOV, V. L. **Contact Mechanics and Friction**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53081-8>
- PROFITO, F. J. **Modelagem Unidimensional Do Regime Misto De Lubrificação Aplicada**

a Superfícies Texturizadas. [s.l.] Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 2010.

QIN, Y.; XIONG, D.; LI, J. Tribological properties of laser surface textured and plasma electrolytic oxidation duplex-treated Ti6Al4V alloy deposited with MoS₂ film. **Surface and Coatings Technology**, v. 269, n. 1, p. 266–272, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.12.003>

RAPOPORT, L. et al. On the Efficacy of IF–WS₂ Nanoparticles as Solid Lubricant: The Effect of the Loading Scheme. **Tribology Letters**, v. 28, n. 1, p. 81–87, 21 ago. 2007.

RONEN, A.; ETSION, I.; KLIGERMAN, Y. Friction-Reducing Surface-Texturing in Reciprocating Automotive Components. **Tribology Transaction**, v. 44, p. 359–366, 2001. <https://doi.org/10.1080/10402000108982468>

ROSENKRANZ, A. et al. Oil film lifetime and wear particle analysis of laser-patterned stainless steel surfaces. **Wear**, v. 334–335, p. 1–12, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.04.006>

RYK, G. et al. Experimental Investigation of Partial Laser Surface Texturing for Piston-Ring Friction Reduction. **Tribology Transactions**, v. 48, n. 4, p. 583–588, out. 2005. <https://doi.org/10.1080/05698190500313544>

SAEIDI, F. et al. Effect of surface texturing on cast iron reciprocating against steel under starved lubrication conditions: A parametric study. **Wear**, v. 348–349, p. 17–26, fev. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.10.020>

SASADA, T. Wear research in Japan: Trends and future directions. **Wear**, v. 100, n. 1–3, p. 561–577, dez. 1984. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(84\)90033-4](https://doi.org/10.1016/0043-1648(84)90033-4)

SERWAY, R. A. **Physics for scientists & engineers.** [s.l.] Saunders College Publishing, 1987.

SPIKES, H. A. Mixed lubrication — an overview. **Lubrication Science**, v. 9, n. 3, p. 221–253, maio 1997. <https://doi.org/10.1002/ls.3010090302>

STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology.** [s.l.] Elsevier Science, 2013.

SUDEEP, U.; PANDEY, R. K.; TANDON, N. Effects of surface texturing on friction and vibration behaviors of sliding lubricated concentrated point contacts under linear reciprocating motion. **Tribology International**, v. 62, p. 198–207, jun. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.02.023>

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

SUH, N. P.; MOSLEH, M.; HOWARD, P. S. Control of friction. **Wear**, v. 175, n. 1–2, p. 151–158, jun. 1994. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(94\)90178-3](https://doi.org/10.1016/0043-1648(94)90178-3)

SUH, N. P.; SAKA, N. Surface Engineering. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 36, n. 1, p. 403–408, 1987.

- SUN, Q. et al. Dry sliding wear behavior of TC11 alloy at 500 °C: Influence of laser surface texturing. **Tribology International**, v. 92, p. 136–145, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.06.003>
- TALA-IGHIL, N.; FILLON, M. A numerical investigation of both thermal and texturing surface effects on the journal bearings static characteristics. **Tribology International**, v. 90, p. 228–239, out. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.02.032>
- TALA-IGHIL, N.; FILLON, M.; MASPEYROT, P. Effect of textured area on the performances of a hydrodynamic journal bearing. **Tribology International**, v. 44, n. 3, p. 211–219, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.10.003>
- TOHYAMA, M. et al. Friction reducing effect of multiply adsorptive organic polymer. **Tribology International**, v. 42, n. 6, p. 926–933, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.12.012>
- UEHARA, Y. et al. Tribological properties of dimpled silicon nitride under oil lubrication. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 24, n. 2, p. 369–373, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(03\)00220-6](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(03)00220-6)
- VARENBERG, M.; HALPERIN, G.; ETSION, I. Different aspects of the role of wear debris in fretting wear. **Wear**, v. 252, n. 11–12, p. 902–910, jul. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00044-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00044-3)
- VLADESCU, S. C. et al. The effects of surface texture in reciprocating contacts - An experimental study. **Tribology International**, v. 82, n. PA, p. 28–42, 2015.
- VLĂDESCU, S. C. et al. Combined friction and wear reduction in a reciprocating contact through laser surface texturing. **Wear**, v. 358–359, p. 51–61, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.035>
- WANG, S. Q. et al. Transition of elevated-temperature wear mechanisms and the oxidative delamination wear in hot-working die steels. **Tribology International**, v. 43, n. 3, p. 577–584, mar. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.09.006>
- WILLIAMS, J. **Engineering Tribology**. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511805905>
- WILLIAMS, J. A.; HYNICICA, A. M. Mechanisms of abrasive wear in lubricated contacts. **Wear**, v. 152, n. 1, p. 57–74, jan. 1992. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(92\)90204-L](https://doi.org/10.1016/0043-1648(92)90204-L)
- WU, Z. et al. Tribological behavior of textured cemented carbide filled with solid lubricants in dry sliding with titanium alloys. **Wear**, v. 292–293, p. 135–143, jul. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.05.021>
- YU, X. .; HE, S.; CAI, R. . Frictional characteristics of mechanical seals with a laser-textured seal face. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 129, n. 1–3, p. 463–466, out. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00611-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00611-8)
- ZAVOS, A.; NIKOLAKOPOULOS, P. G. Tribological characterization of smooth and artificially

textured coated surfaces using block-on-ring tests. **FME Transactions**, v. 43, n. 3, p. 191–197, 2015.

ZHANG, J.; MENG, Y. Direct observation of cavitation phenomenon and hydrodynamic lubrication analysis of textured surfaces. **Tribology Letters**, v. 46, n. 2, p. 147–158, 2012.
<https://doi.org/10.1007/s11249-012-9935-6>

ZHU, D.; WANG, Q. J. On the λ ratio range of mixed lubrication. **Journal of Engineering Tribology**, v. 1996, 2012.

ZUM GAHR, K.-H. Microstructure and Wear of Materials. **Tribology Series**, v. 10, n. Ccc, p. 1–560, 1987.

APÊNDICE I

Conforme citado no texto, temos na Figura 8-1 o circuito eletrônico desenvolvido para este trabalho, seguido da descrição dos componentes eletrônicos do mesmo.

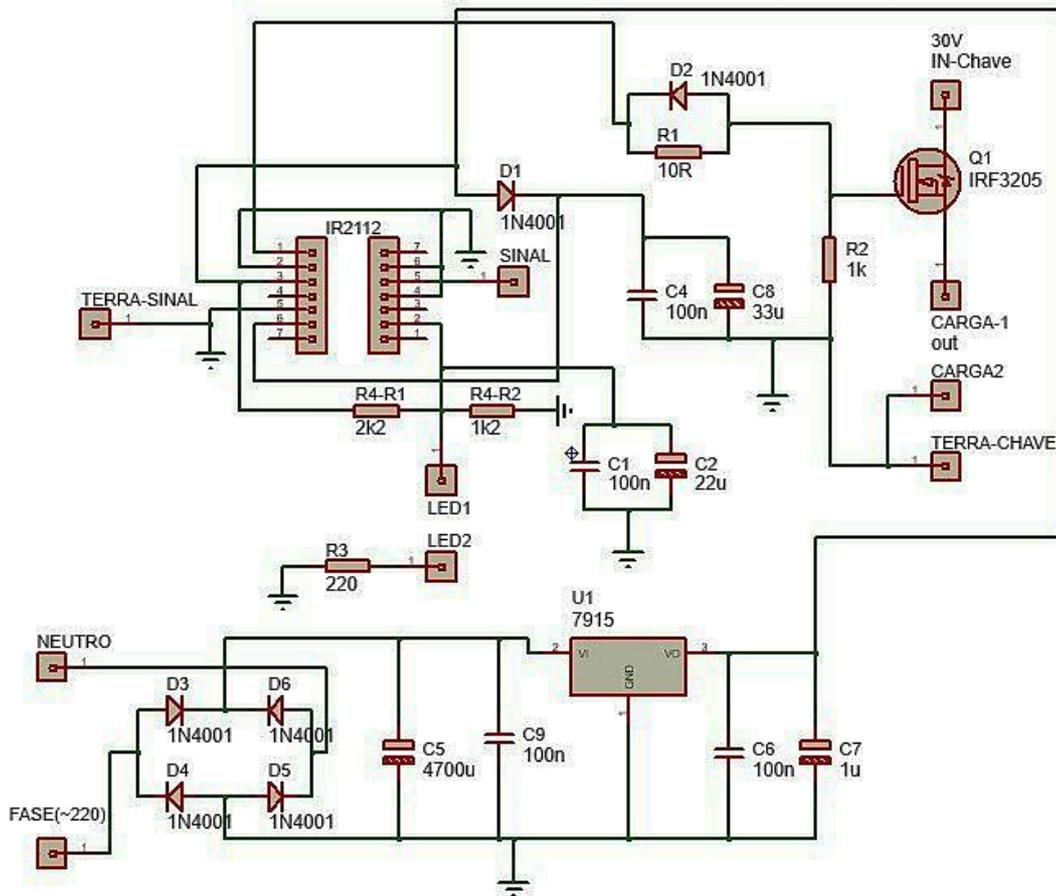


Figura 8-1 – Circuito para obtenção de sinais de corrente pulsada.

Descrição dos componentes do circuito eletrônico:

- C1: capacitor cerâmico 100 nF/50 V;
- C2: capacitor eletrolítico 22 uF×100 V;
- C4: capacitor cerâmico 100 nF/50 V;
- C5: capacitor eletrolítico 4700 uF×25 V;
- C6: capacitor cerâmico 100 nF/50 V;
- C7: capacitor cerâmico 1 uF/250 V;

- C8: capacitor eletrolítico 33 uF×100 V;
- C9: capacitor cerâmico 100 nF/50 V;
- D1: diodos retificador de silício 1N4001, cujo encapsulamento é DO-41. Ele possui tensão máxima em circuito retificador de meia onda com carga capacitiva $V_{ef}=25$ V e tensão inversa de pico máxima de $V_{RRM}=50$ V;
- D2: diodos retificador de silício 1N4001, cujo encapsulamento é DO-41. Ele possui tensão máxima em circuito retificador de meia onda com carga capacitiva $V_{ef}=25$ V e tensão inversa de pico máxima de $V_{RRM}=50$ V;
- D3/D6 e D4/D5: temos uma associação de diodos retificadores de silício 1N4001, cujo encapsulamento é DO-41. Eles possuem tensão máxima em circuito retificador de meia onda com carga capacitiva $V_{ef}=25$ V e tensão inversa de pico máxima de $V_{RRM}=50$ V;
- IRF3205: transistor IRF3205 com corrente de drenagem $I_D=110$ V;
- IR2112: circuito integrado (MOSFET) com $V_{OFFSET}=600$ V max e tensão de saída $V_{OUT}=10-20$ V;
- R1: resistor de 10 Ohms , onde na versão com 5% de tolerância, apresenta o código de cores: marrom, preto, preto e dourado;
- R2: resistor de 1000 Ohms, onde na versão com 5% de tolerância, apresenta o código de cores: marrom, preto, vermelho e dourado;
- R3: resistor de 220 Ohms , onde na versão com 5% de tolerância, apresenta o código de cores: vermelho, vermelho, marrom e dourado;
- R4-R1: resistor 1200 Ohms, onde na versão com 5% de tolerância, apresenta o código de cores: marrom, vermelho, vermelho e dourado;
- R4-R2: resistor 2200 Ohms, onde na versão com 5% de tolerância, apresenta o código de cores: vermelho, vermelho, vermelho e dourado;
- U1 7915: regulador de tensão 7915, que fornece tensão de saída de 15 V.

APÊNDICE II

Conforme citado no texto, temos na Figura 9-1 o desenho plano com as cotas do suporte de amostras projetado para o tribômetro bloco-sobre-anel, fabricado em aço SAE 4140.

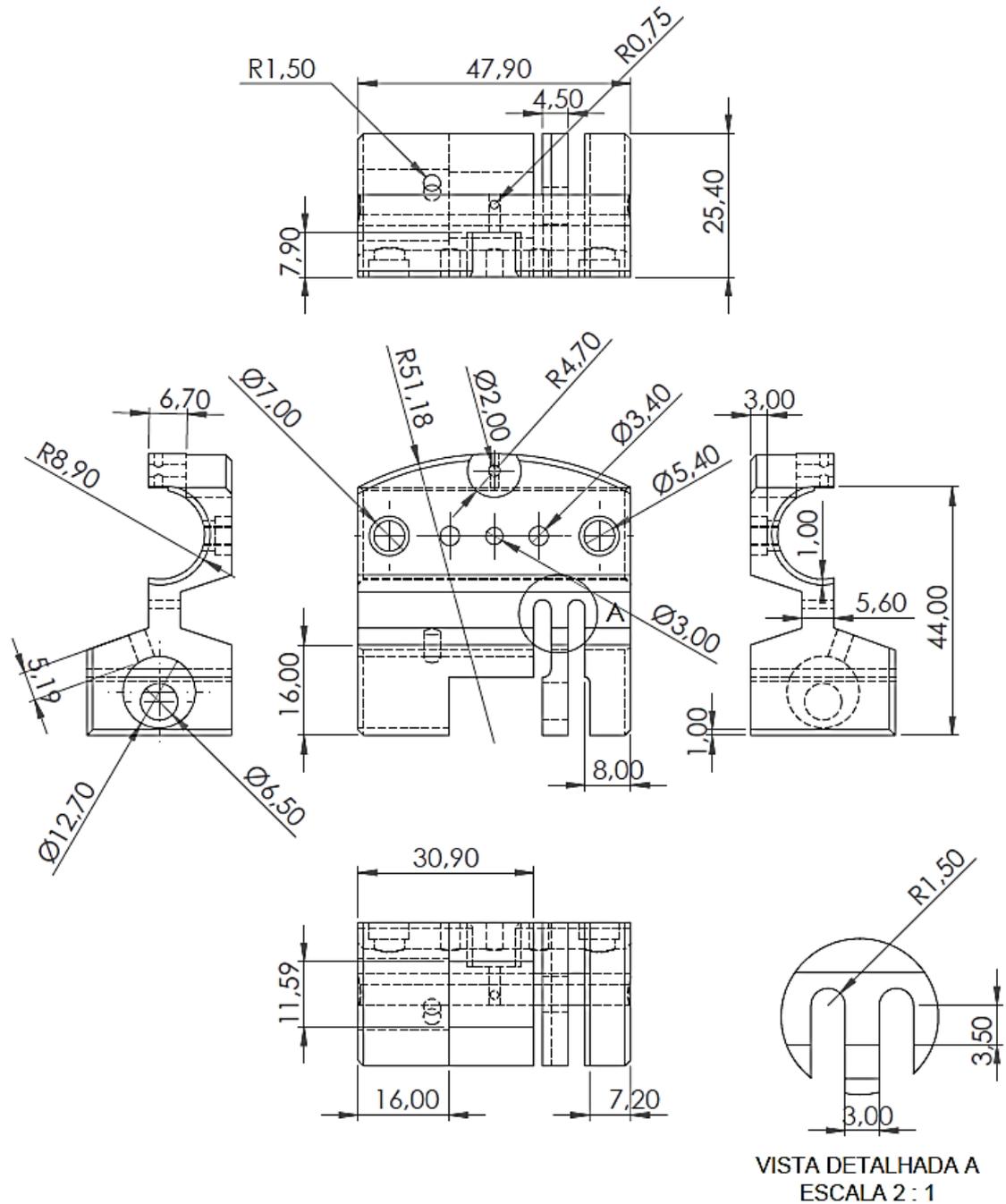


Figura 9-1 – Desenho plano com as cotas do suporte de amostras do tribômetro bloco sobre anel.