

LEONARDO ROSA RIBEIRO DA SILVA

**TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL DE CILINDROS
AUTOMOTIVOS**



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

2016

LEONARDO ROSA RIBEIRO DA SILVA

TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL DE CILINDROS AUTOMOTIVOS

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientadora: Henara Lillian Costa

Uberlândia – MG

2016

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

S586t
2016

Silva, Leonardo Rosa Ribeiro da, 1991-
Texturização superficial de cilindros automotivos / Leonardo Rosa Ribeiro da
Silva. - 2016.
80 f. : il.

Orientadora: Henara Lillian Costa.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Motores de combustão interna -
Teses. 3. Lubrificação e lubrificantes - Teses. 4. Motores - Teses. I. Costa,
Henara Lillian. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais João (em memória) e Solange, bem como a minha irmã Ludmila pelo apoio que tornou possível a realização deste sonho.

A Universidade Federal de Uberlândia, bem como ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este mestrado.

A CAPES, CNPq e a FAPEMIG pelo apoio financeiro.

A minha orientadora Henara pela orientação na condução deste trabalho.

Aos técnicos Ângela, Quirino e Profeta pela ajuda em diversas etapas da elaboração deste trabalho, além de todo o conhecimento que pude adquirir conversando com os mesmos.

Aos colegas do LTM visto que todos, sem exceção, me passaram algum conhecimento importante na elaboração deste trabalho.

As ICs Nanci, Júlia e Erika, pela ajuda durante meu mestrado.

Aos meus amigos do LPM, LTCM e agregados, que me “agregaram” em seus grupos e através da sua amizade tornaram minha estadia muito mais agradável.

A todos os professores da UFU com quem tive aulas, pelos conhecimentos que me foram passados.

E por fim a todos os amigos que fiz nesta cidade, que mesmo não citados pessoalmente sabem que estão sendo lembrados visto que, ao longo destes dois anos, tento sempre que posso demonstrar o quanto sou grato pela amizade dos mesmos.

Não nos é permitido saber se lograremos êxito ou não.

Não há desonra em falhar.

Só existe uma vergonha definitiva.

A covardia de não ter tentado.

Surfista Prateado

DA SILVA, L. R. R. **TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL DE CILINDROS AUTOMOTIVOS**. 2016. 80p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.

Resumo

A texturização superficial é uma importante ferramenta a ser utilizada na diminuição do atrito em contatos lubrificados, sendo sua eficácia atestada tanto em simulações como experimentalmente. Uma grande barreira para a utilização em escala industrial da texturização superficial é a dificuldade de se encontrar métodos de inserção destes padrões superficiais que combinem rapidez de implementação e baixo custo, tornando assim a técnica mais competitiva. O objetivo deste trabalho é investigar a viabilidade de se inserir texturas superficiais na superfície interna de cilindros automotivos de ferro fundido cinzento, utilizando método de texturização superficial sem mascaramento (*MECT*), o qual combina baixo custo e elevada velocidade de texturização. Uma vez estabelecidos os parâmetros de texturização do método *MECT* para o ferro fundido cinzento, foram conduzidos ensaios anel-bloco a fim de comparar os ganhos na redução do atrito e do desgaste de amostras texturizadas quando comparadas a amostras polidas mecanicamente e eletroquimicamente. O *MECT* se mostrou um método viável, rápido e de baixo custo para texturização de camisas de cilindros automotivos. Nos ensaios anel-bloco as amostras texturizadas superficialmente apresentaram menores coeficiente de atrito e volume desgastado em relação as amostras polidas mecanicamente e eletroquimicamente.

DA SILVA, L. R. R. **TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL DE CILINDROS AUTOMOTIVOS**. 2016. 80p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.

Abstract

Surface texturing is an important tool to be used for reduction of the friction force in lubricated contacts, being its effectiveness evidenced in simulations and experimentally. A major barrier to use surface texturing in an industrial scale is the difficulty of finding application methods of these surface patterns that combine both high speed and low cost, thus making the surface texturing a more competitive technique. The objective of this work is to investigate the potentiality of inserting surface textures on the inner surface of an automotive cylinder liner made of grey cast iron, using Maskless Electrochemical Texturing Method (MECT), which is a both low cost and high-speed texturing process. Once established the texturing parameters for the method MECT for the grey cast iron, were made Block-on-Ring tests to compare the improvement in reducing friction force and wear of the textured samples in comparison with samples mechanically and electrochemically polished. The method MECT proved to be a viable method for texturing of automotive cylinder liners, being both fast and low cost. In the Block-on-Ring tests, the texturized samples showed lower friction coefficient and wear volume compared to the mechanically and electrochemically polished samples.

Keywords: Cylinder liner, Surface texturing, Block-on-Ring tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Balanço global do consumo energético por veículos de transporte. Os 52% de veículos leves incluem 37% de carros de passageiros e 15% de vans, pick-ups e demais utilitários esportivos. Adaptado de (HOLMBERG et al., 2014).....	2
Figura 1.2 - Energia não aproveitada em veículos de passeio. Adaptado de (HOLMBERG; ANDERSSON; ERDEMIR, 2012).	2
Figura 1.3 – Exemplo de uma textura superficial inserida sob a superfície de uma amostra aço carbono. Adaptado de PARREIRA; GALLO e COSTA (2012).....	3
Figura 2.1 - Áreas de contato real e aparente (ZUM GAHR, 1987).....	5
Figura 2.2 – Exemplos de contatos conformes. (a) Dois planos deslizando. (b) Mancal de rolamento (HUTCHINGS, 1992).....	6
Figura 2.3 – Exemplos de contatos não-conformes. (a) Dentes de engrenagem. (b) Came e seu seguimento. (c) esfera em uma pista de rolamento (HUTCHINGS, 1992).	6
Figura 2.4 - Conjunto típico de pistão e seus anéis (D'AGOSTINO; SENATORE, 2010).	7
Figura 2.5 - Curva de Stribeck para contatos conformes.	8
Figura 2.6 - Curva de Stribeck para contatos não conformes.....	8
Figura 2.7 - Regimes de lubrificação durante o movimento relativo entre o pistão e o cilindro (OLIVEIRA JÚNIOR, 2013).	10
Figura 2.8 – Força de atrito em um pistão e em seus anéis durante um ciclo de 4 tempos (LEARY et al., 1944).	11
Figura 2.9 - Força de atrito em um pistão e em seus anéis durante um ciclo de 4 tempos (LEARY et al., 1944).	11
Figura 2.10 – Partículas abrasivas aprisionadas nas texturas (TOMANIK, 2013).	12
Figura 2.11 – Representação esquemática dos métodos de texturização. Adaptado de Costa e Hutchings (2015).....	14
Figura 2.12 – Ablação a laser. (a) Pulsos maiores resultam em maior ZAC bem como zona refundida protuberante. (b) Pulsos menores permitem uma menor ZAC e diminuição das zonas refundidas.....	15
Figura 2.13 – Processo de texturização fotoquímica. Adaptado de Zhang e Meng (2012)...	15
Figura 2.14 – Impressão de pontos utilizando uma impressora DMP-2800. (a) microscopia óptica após a pintura. (b) microscopia óptica após pintura e remoção da máscara. (c) Perfil em linha. Adaptado de Costa e Hutchings (2015).	16
Figura 2.15 – Perda de elétrons e consequente dissolução anódica.....	17
Figura 2.16 – Representação do mecanismo de usinagem eletroquímica. Adaptado de NPTEL (2008).	18

Figura 2.17 – Aparato experimental utilizado na MECT. Adaptado de PARREIRA; GALLO e COSTA (2012).	19
Figura 2.18 – Processo de usinagem eletroquímico sem mascaramento.....	20
Figura 2.19 – Efeito da polarização na diferença de potencial em uma célula eletrolítica. Adaptado de NPTEL (2008).	20
Figura 2.20 – Influência da distância entre a ferramenta e peça na variação da dimensão de bolsões. a) Influência no diâmetro. b) Influência na profundidade (PARREIRA; GALLO; COSTA, 2012).	21
Figura 2.21 – Efeito no h_{0max} (espessura do filme lubrificante) em função das características geométricas dos padrões inseridos. (a) Efeito da fração de área texturizada. (b) Efeito da fração de área texturizada para sulcos orientados perpendicularmente a direção de deslizamento. (c) Efeito da relação entre a profundidade e largura. (d) Efeito da orientação relativa dos sulcos. (e) Efeito da orientação relativa dos padrões em “V”. Efeito da forma.....	22
Figura 2.22 – Variação dos regimes de lubrificação, mostrados na curva de Stribeck, dado o uso de texturização. Adaptado (DE LA GUERRA et al., 2013).	23
Figura 2.23 – Efeito da força normal no coeficiente de atrito para diferentes velocidades de deslizamento nos regimes: (a) hidrodinâmico; (b) lubrificação insuficiente (GRABON et al., 2013).	25
Figura 2.24 – Representação dos cilindros utilizados: (a) primeiro grupo de cilindros; (b) segundo grupo de cilindros. Dimensões em milímetros. Adaptado de Guo et al. (2013).	26
Figura 2.25 – Resultados numéricos dos parâmetros testados (MORRIS et al., 2014).	27
Figura 2.26 – Padrões das texturas superficiais e seu efeito hidrodinâmico (MORRIS et al., 2014).....	28
Figura 3.1 – Microestrutura dos corpos de prova.	29
Figura 3.2 – Potenciostato BioLogic SP150. A) Saída de sinal potencial e aquisição de sinal de corrente da célula eletroquímica. B) Saída de dados para o processamento por porta USB. C) Saída de dados para processamento por porta Ethernet. Adaptado de (ARDILA, 2013).....	30
Figura 3.3 – Corpos de prova utilizados nos ensaios de corrosão. (a) Amostras cortadas. (b) Amostras embutidas e prontas para os testes de corrosão.	31
Figura 3.4 – Aparato utilizado na célula eletroquímica.	31
Figura 3.5 – Exemplo de ensaio de cronopotenciometria.....	32
Figura 3.6 – Curva típica de um ensaio de polarização potenciodinâmica para uma amostra de ferro fundido cinzento.....	33
Figura 3.7 – Réplica de cilindro automotivo utilizado nos testes de texturização superficial.	34

Figura 3.8 – Equipamento utilizado na geração e tratamento da tensão utilizada durante o MECT. (a) Fonte de tensão. (b) Modulador de sinal. (c) Circuito utilizado para pulsar o sinal.	34
Figura 3.9 – Ferramenta utilizada para texturização de cilindros automotivos.....	35
Figura 3.10 – Primeiro modelo da câmara de texturização.	36
Figura 3.11 – Padrões superficiais inseridos com primeiro projeto de câmara de texturização.	36
Figura 3.12 – Novo modelo da câmara de texturização.	37
Figura 3.13 – Novo modelo de câmara de texturização. 1) Tampa superior do equipamento de texturização feita em Nylon. 2) Tampa interior do equipamento de texturização feita em Nylon. 3) Camisa de cilindro feita de ferro fundido cinzento. 4) Ferramenta de aço inox AISI 304 austenítico perfurada a laser. 5) Entrada do eletrólito. 6) Saída do eletrólito.	37
Figura 3.14 – Sequência de ensaios feitos com a finalidade de encontrar os parâmetros de texturização superficial do ferro fundido cinzento.	38
Figura 3.15 – Exemplo de ferramenta utilizada para texturizar superficialmente corpos de prova para o ensaio anel-bloco.	39
Figura 3.16 – Corpos de prova destinados aos ensaios Anel-bloco.	40
Figura 3.17 – Dimensões médias dos padrões em “V”. Cotas em micrometros (μm).	40
Figura 3.18 – Micrografias ópticas das condições superficiais de ensaio utilizadas neste trabalho. (a) superfície polida mecanicamente. (b) superfície polida mecanicamente e atacada com Nital 2% por 30 segundos. (c) Superfície polida eletroquimicamente. (d) Superfície texturizada por MECT. (e) Detalhe de uma região entre motivos superficiais da superfície texturizada.	41
Figura 3.19 - Tribômetro Block on Ring – FALEX®. O sentido de rotação do eixo é indicado pela seta em vermelho. 1) Corpo de prova. 2) Anel utilizado como contra corpo. 3) Câmara do lubrificante. 4) Termopar.....	42
Figura 3.20 – Sequência de ensaios anel-bloco.....	44
Figura 4.1 – Ensaios de polarização potenciodinâmica para o NaCl PA e para o sal de cozinha.	45
Figura 4.2 – Resultados das interferometrias a laser para Dfp 's de: (a) 100 μm ; (b) 200 μm ; (c) 300 μm ;.....	47
Figura 4.3 – Rugosidade entre os padrões inseridos para as amostras utilizadas na avaliação da melhor Dfp	47
Figura 4.4 - Resultados das interferometrias a laser para tensões de: (a) 2.5 V; (b) 5 V; (c) 7.5 V; (d) 10 V; (e) 12.5 V; (f) 15 V; (g) 17.5 V; (h) 20 V; (i) 30 V; (j) 40 V; (k) 50 V.	48
Figura 4.5 – Microscopia eletrônica de varredura da região interna de um padrão superficial inserido por MECT em uma amostra de ferro fundido cinzento.	48

Figura 4.6 - Peça de ferro fundido cinzento submetida ao <i>MECT</i> para uma <i>Dfp</i> de 100 μm , um tempo de 60 s e uma tensão de 30 V. As regiões escuras correspondem a depósitos de grafita nas regiões onde deveria se concentrar a dissolução anódica.	49
Figura 4.7 – (a) Profundidade e largura média dos padrões inseridos em função da tensão. (b) Relação profundidade/largura dos padrões inseridos e o parâmetro S_q das regiões adjacentes em função da tensão.....	50
Figura 4.8 - Resultados das interferometrias a laser para tempos de ensaio de: (a) 30 s; (b) 45 s; (c) 60 s; (d) 75 s; (e) 90 s; (f) 120 s.	50
Figura 4.9 – (a) Profundidade e largura média dos padrões inseridos em função do tempo. (b) Relação profundidade/largura dos padrões inseridos e o parâmetro S_q das regiões adjacentes em função do tempo.	51
Figura 4.10 – Coeficiente de atrito em função do tempo para testes a 200 e 600 rpm.	52
Figura 4.11 – Topografia das amostras polidas mecanicamente sujeitas a ensaios de 250 segundos de duração. (A) 200 rpm. (B) 600 rpm.....	54
Figura 4.12 – Microscopia eletrônica de varredura, utilizando elétrons retro-espalhados das marcas de desgaste dos testes a 200 rpm: (a) polimento mecânico; (b) polimento eletroquímico; (c) MECT.	55
Figura 4.13 – Topografia das marcas de desgaste dos ensaios a 200 rpm obtida por interferometria 3D (a) polimento mecânico; (b) polimento eletroquímico; (c) MECT.	55
Figura 4.14 – Microscopia eletrônica de varredura, utilizando elétrons retro-espalhados das marcas de desgaste dos testes a 600 rpm: (a) polimento mecânico; (b) polimento eletroquímico; (c) MECT.	56
Figura 4.15 – Topografia das marcas de desgaste dos ensaios a 200 rpm obtida por interferometria 3D (a) polimento mecânico; (b) polimento eletroquímico; (c) MECT.	56
Figura 4.16 – Taxa de desgaste volumétrica para as condições testadas.....	57
Figura 4.17 – Microscopia eletrônica de varredura, utilizando elétrons retro-espalhados das marcas de desgaste: (a) polimento mecânico a 200 rpm; (b) polimento eletroquímico a 200 rpm; (c) MECT a 200 rpm. (d) polimento mecânico a 600 rpm; (e) polimento eletroquímico a 600 rpm; (f) MECT a 600 rpm.	58

LISTA DE SÍMBOLOS

$H_2 \uparrow$ = Hidrogênio gasoso

3D = Tridimensional

A = Área de contato

BSE = Elétrons retro-espalhados

Cl^- = Íon de cloro

cSt = centistokes

d = distância deslizada

Dfp = Distância entre a ferramenta e a peça

e^- = Elétron

E^* = Módulo de elasticidade combinado

Ecr = Potencial de corrosão

EDS = Espectroscopia de energia dispersiva

f = Área texturizada

F = Constante de Faraday.

Fe = Ferro

$Fe(OH)_2$ = Hidróxido de ferro

Fe^{++} = Íon de ferro

$FeCl_2$ = Cloreto de ferro

F_n = Força Normal

fs = femtosegundos

G = Parâmetro adimensional do material

GPa = Giga Pascal

H' = Espessura do filme lubrificante pela equação de Dowson-Hamrock

H^+ = Íon de hidrogênio

h_{0max} = Espessura máxima do lubrificante

H_2O = Água

HV = Dureza Vickers

I = Corrente elétrica constante inserida no sistema

Icr = Corrente de corrosão

k = Taxa de desgaste

KI = Iodeto de potássio

L = Largura do contato

m = Massa da substância liberada em um eletrodo

M = Massa molar da substância

MECT = Método de texturização eletroquímica sem mascaramento

MEV = Microscópio eletrônico de varredura

N = Newton

η = Viscosidade do fluido

Na^+ = Íon de sódio

NaCl = Cloreto de sódio

NaNO₃ = Nitrato de sódio

NaOH = Hidróxido de Sódio

$^{\circ}\text{C}$ = Graus Celcius

OH^- = Hidroxila

PA = Para análise

PMI = Ponto morto inferior

PMS = Ponto morto superior

R^* = Raio de contato

Rpl = Relação entre a profundidade e a largura

rpm = Rotações por minuto

S_q = Rugosidade média quadrática

S_{qB} = Rugosidade média quadrática do bloco

S_{qR} = Rugosidade média quadrática do anel

t = Tempo total em que a corrente é aplicada

U = Parâmetro adimensional da velocidade

u = Velocidade de deslizamento

UV = Ultravioleta

v = Velocidade de deslizamento

V = Velocidade relativa entre o anel e bloco

V = Volt

W = Carga normal

W = Carga normal

w = Parâmetro adimensional da carga

z = Número de valência dos íons da substância

ZAC = Zona afetada pelo calor

α = Coeficiente de pressão-viscosidade

η_o = Viscosidade

λ = Relação entre a rugosidade e a espessura do filme lubrificante

μ = Coeficiente de atrito

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	CONTATO ENTRE DUAS SUPERFÍCIES	5
2.2	ATRITO E DESGASTE EM CILINDROS AUTOMOTIVOS	6
2.2.1	<i>Componentes em Movimento Relativo em Contato com o Cilindro.....</i>	<i>6</i>
2.2.2	<i>Modelos de Lubrificação.....</i>	<i>7</i>
2.3	TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL.....	12
2.3.1	<i>Métodos de Texturização Superficial.....</i>	<i>13</i>
2.3.2	<i>Texturização Superficial sem Mascaramento</i>	<i>16</i>
2.3.3	<i>Parâmetros de Texturização Superficial e a sua Influência nos Regimes de Lubrificação.....</i>	<i>21</i>
2.3.4	<i>Texturização Superficial em Motores de Combustão Interna</i>	<i>24</i>
3	METODOLOGIA.....	29
3.1	MATERIAL DOS CORPOS DE PROVA.....	29
3.2	ENSAIOS DE POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA	29
3.3	ADAPTAÇÃO DA TÉCNICA MECT PARA A TEXTURIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES CILÍNDRICAS	33
3.4	ENSAIOS DE TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL	37
3.5	ENSAIOS TRIBOLÓGICOS BLOCO SOBRE ANEL	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
4.1	POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA	45
4.2	TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL DE CILINDROS AUTOMOTIVOS	46
4.2.1	<i>Influência da Distância entre a Ferramenta e a Peça (Dfp).....</i>	<i>46</i>
4.2.2	<i>Influência da Tensão</i>	<i>47</i>
4.2.3	<i>Influência da Tempo</i>	<i>50</i>
4.3	ENSAIOS TRIBOLÓGICOS BLOCO SOBRE ANEL.....	51
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	59
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A busca pelo aumento da eficiência energética em uma máquina é um desafio que paira sobre os mais diversos campos da engenharia. No que se refere a máquinas térmicas, Carnot (1824) descreveu o ciclo para maior eficiência teórica em um motor dois tempos. Em 1853, baseando-se em ideias dos trabalhos de Carnot, Eugenio Barsanti e Felice Matteucci patentearam o primeiro motor a combustão interna no qual o sistema pistão/cilindro se assemelhava com os utilizados atualmente, sendo possivelmente esta máquina o primeiro motor 4 tempos mecanicamente viável (ENCYCLOPEDIA, 2014). Se iniciava junto com as ideias de Carnot e a patente de Barsanti e Matteucci não apenas uma revolução que ainda hoje movimenta grande parcela da economia mundial, como também uma verdadeira batalha para reduzir o atrito no sistema pistão/cilindro.

Mesmo com todos os avanços obtidos desde o século XIX até hoje, da energia gerada durante a combustão, apenas 21,5% da energia gerada são efetivamente aproveitadas durante a movimentação de veículos de passeio (HOLMBERG; ANDERSSON; ERDEMIR, 2012) e 34% em veículos pesados (HOLMBERG et al., 2014). Dada essa baixa eficiência energética, estimou-se por exemplo que 208 milhões de litros de combustível (gasolina e diesel) foram gastos para vencer o atrito em veículos de passageiros em 2009 (HOLMBERG; ANDERSSON; ERDEMIR, 2012), além de 180 milhões de litros para veículos pesados em 2012 (HOLMBERG et al., 2014). O transporte (de cargas e pessoas) se torna assim responsável pelo consumo de 20% da energia produzida globalmente, além de 18% das emissões de gases causadores do efeito estufa (HOLMBERG; ANDERSSON; ERDEMIR, 2012). A parcela de consumo energético de cada setor pode ser visualizada na Figura 1.1, onde fica claro não apenas que a maioria esmagadora dos responsáveis pelo consumo (e por consequência desperdício) de combustíveis são veículos movidos a motores a combustão interna de movimento alternado, como também veículos leves são responsáveis por mais da metade do consumo destes recursos.

Nos veículos de passeio, o consumo da energia desperdiçada pode ser visualizado na Figura 1.2, ficando claro não apenas que o fator mais impactante nestas perdas é o atrito dos componentes mecânicos, como também que dentro das perdas por atrito, o conjunto cilindro/pistão é o maior responsável por diminuir a eficiência energética. A elevada complexidade tribológica do sistema cilindro/pistão pode ser evidenciada por ser este um dos

poucos conjuntos mecânicos onde, para um menor coeficiente de atrito não é necessariamente empregada a superfície com menor rugosidade possível (BARBER; LUDEMA, 1987). Uma solução para redução do atrito no sistema em questão é a utilização de padrões topográficos superficiais regularmente distribuídos, como por exemplo o brunimento (LEARY et al., 1944), com a finalidade de aumentar a eficiência da lubrificação e por consequência diminuir o atrito.

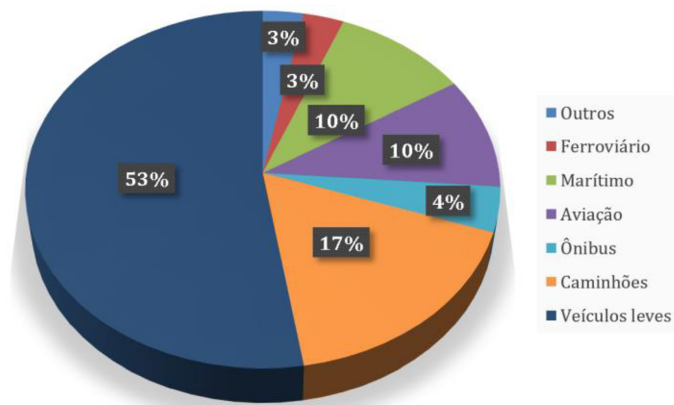


Figura 1.1 – Balanço global do consumo energético por veículos de transporte. Os 52% de veículos leves incluem 37% de carros de passageiros e 15% de vans, pick-ups e demais utilitários esportivos. Adaptado de (HOLMBERG et al., 2014).

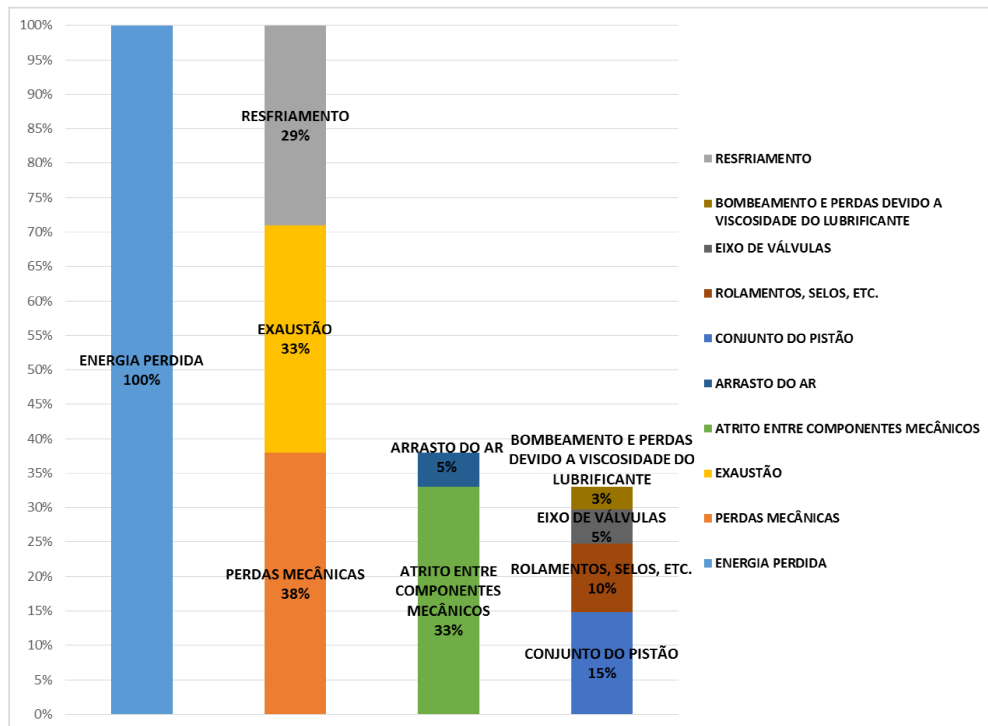


Figura 1.2 - Energia não aproveitada em veículos de passeio. Adaptado de (HOLMBERG; ANDERSSON; ERDEMIR, 2012).

Entende-se por texturização superficial a aplicação de padrões topográficos a uma superfície com a finalidade de melhorar suas propriedades funcionais. Um exemplo de texturização superficial aplicado a uma superfície com a finalidade de reduzir o atrito sobre a mesma é exibido na Figura 1.3, onde padrões em “V” foram produzidos sobre uma amostra plana de ferro fundido cinzento com a finalidade de melhorar a lubrificação ao agir como micro mancais hidrodinâmicos.

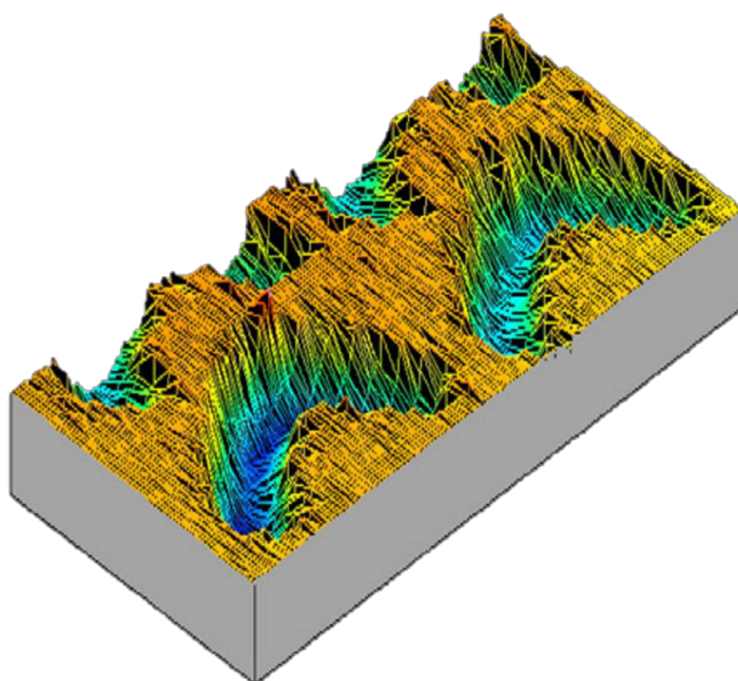


Figura 1.3 – Exemplo de uma textura superficial inserida sob a superfície de uma amostra aço carbono. Adaptado de PARREIRA; GALLO e COSTA (2012).

Uma das aplicações pioneiras da texturização superficial para melhorar o desempenho hidrodinâmico de superfícies foi a investigação sobre o efeito da topografia superficial de selos hidrodinâmicos na geração da pressão hidrodinâmica responsável pelo seu funcionamento (HAMILTON; WALOWIT; ALLEN, 1966). Além da escolha da técnica de texturização superficial, os efeitos de diversos parâmetros geométricos das texturas na espessura do filme lubrificante, na capacidade de carga e no atrito vêm sendo estudados tanto numericamente (BUSCAGLIA; CIUPERCA; JAI, 2007; RAHMANI; SHIRVANI; SHIRVANI, 2010; SCARAGGI, 2012; ZHOU et al., 2012; TOMANIK, 2013), como no campo experimental (ETSION, 2005; KOVALCHENKO et al., 2005; COSTA; HUTCHINGS, 2007; PARREIRA; GALLO; COSTA, 2012) ou mesmo em ambos (RAHNEJAT et al., 2006; MORRIS et al., 2014).

A fim de tornar-se viável sua implementação em escala industrial, não é apenas importante a eficácia das texturas na redução do atrito, como também sua viabilidade

econômica frente ao já bem estabelecido método do brunimento. Diversos métodos de texturização superficial foram propostos ao longo dos anos (COSTA; HUTCHINGS, 2015), sendo o mais aplicado atualmente o método de texturização a laser (ETSION, 2005) que esbarra na sua alta complexidade, custo e alto tempo de texturização (visto cada padrão ser inserido individualmente). Métodos alternativos como a texturização superficial sem mascaramento (MECT) (COSTA; HUTCHINGS, 2009; PARREIRA; GALLO; COSTA, 2012; COSTA; HUTCHINGS, 2015) têm sido propostos a fim de preencher esta lacuna, tornando assim possível a utilização da texturização superficial em larga escala e por um custo baixo.

O presente trabalho tem como finalidade adaptar a técnica MECT de forma a viabilizar a texturização superficial de cilindros automotivos de ferro fundido cinzento, visto esse material ser o mais utilizado em blocos e camisas de motores a combustão interna (BARBER; LUDEMA, 1987). Após a construção deste aparato, serão encontrados os parâmetros mais adequados à texturização superficial de um ferro fundido cinzento de matriz perlítica, com base em parâmetros chave para texturização propostos por Costa e Hutchings (2008). Visando evidenciar a eficácia da texturização superficial por MECT no material analisado, foram realizados ensaios tribológicos lubrificados em dois diferentes regimes de lubrificação.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONTATO ENTRE DUAS SUPERFÍCIES

Quando duas superfícies em contato apresentam movimento relativo, quase sempre ocorrerá desgaste, causando danos em uma ou em ambas as superfícies (HUTCHINGS, 1992). O contato se dá basicamente entre os picos das rugosidades superficiais sendo, portanto, importante a distinção entre zona aparente e real de contato. A Figura 2.1 mostra que a zona real de contato é tão mais próxima da aparente tanto quanto maior for a força normal aplicada sobre as superfícies.

O contato entre duas superfícies reais, as quais possuem rugosidade superficiais, pode ser entendido através do modelo de Greenwood e Williamson (1966), que dá uma ideia da área real de contato, número total de micro contatos, carga e separação das superfícies. Como a área de contato e a separação entre as superfícies dependem da carga de maneiras similares, surge o conceito de dureza elástica, que indica que a área de contato elástica possa ser prevista pela carga, de forma semelhante ao que acontece em contatos plásticos.

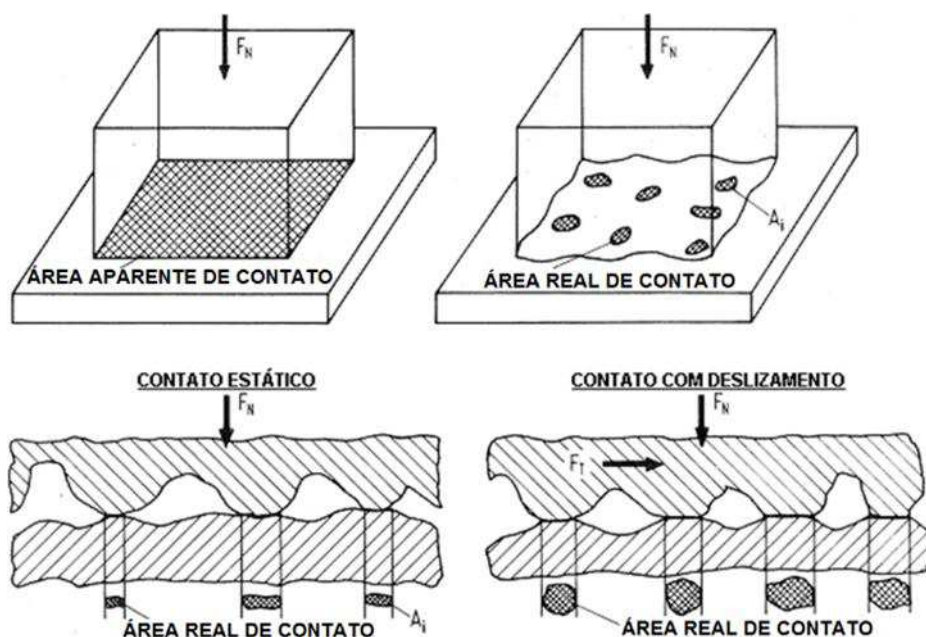


Figura 2.1 - Áreas de contato real e aparente (ZUM GAHR, 1987).

O contato entre duas superfícies pode ser classificado ainda como conforme (Figura 2.2) e não-conforme (Figura 2.3) o que influencia fortemente a distribuição das cargas aplicadas sobre as superfícies, sendo as tensões mais distribuídas nos contatos conformes e mais localizadas nos não-conformes (HUTCHINGS, 1992). A conformidade ou não dos contatos será um fator crucial para o regime de lubrificação entre as superfícies, como será visto posteriormente.

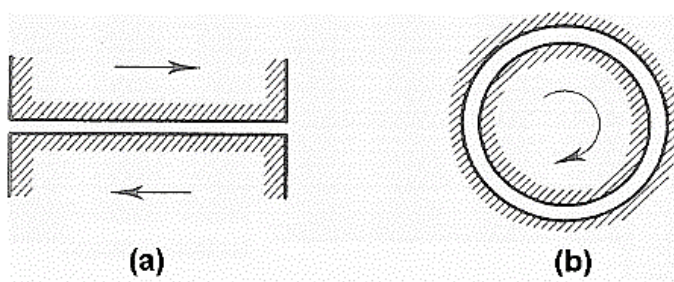


Figura 2.2 – Exemplos de contatos conformes. (a) Dois planos deslizando. (b) Mancal de rolamento (HUTCHINGS, 1992).

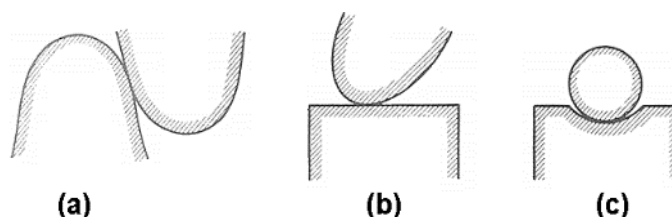


Figura 2.3 – Exemplos de contatos não-conformes. (a) Dentes de engrenagem. (b) Came e seu seguimento. (c) esfera em uma pista de rolamento (HUTCHINGS, 1992).

2.2 ATRITO E DESGASTE EM CILINDROS AUTOMOTIVOS

2.2.1 Componentes em Movimento Relativo em Contato com o Cilindro

Os componentes físicos de um motor a combustão interna em contato direto com o cilindro são o pistão e seus anéis (Figura 2.4). O cilindro é geralmente produzido de ferro fundido cinzento, normalmente sendo revestido de cromo ou molibdênio (ANDERSSON, 1991). A função do cilindro é conter a mistura de comburente e combustível, bem como os gases oriundos da queima, podendo ser usinado diretamente no bloco ou separadamente, recebendo então a denominação de camisa. O pistão, por sua vez, tem como função converter a expansão dos gases gerados na queima em movimento alternativo ao deslizar dentro do

cilindro, podendo ser confeccionado de ferro fundido, aço ou alumínio, dependendo do projeto (PULKRABEK, 1997). O anel tem diâmetro variável, podendo ser até 10% maior que o diâmetro do pistão, sendo dividido em dois grupos: anéis de compressão e anéis de controle de óleo.

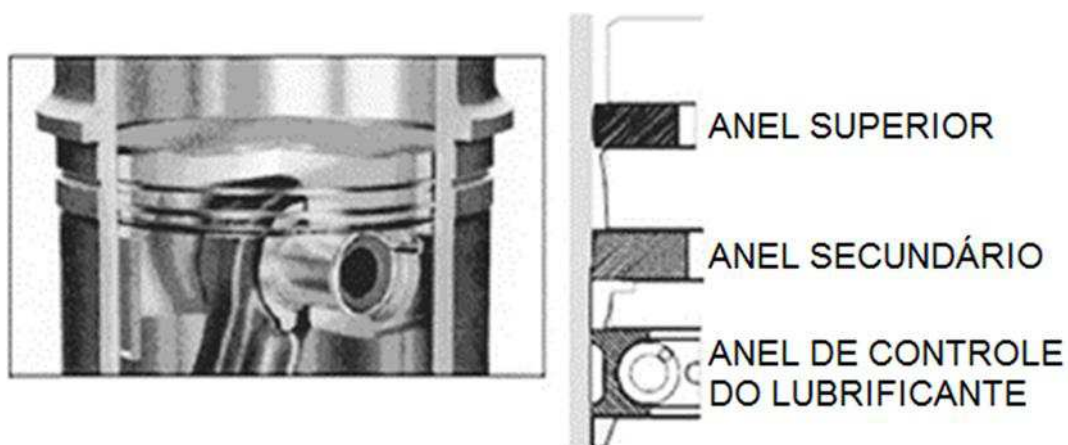


Figura 2.4 - Conjunto típico de pistão e seus anéis (D'AGOSTINO; SENATORE, 2010).

Todo pistão moderno possui ao menos um anel de compressão, também chamado de anel superior. Contudo, usualmente tem-se de 2 a 4 anéis de compressão para garantir uma melhor vedação dos gases, dependendo do projeto do motor. Juntamente com os anéis de compressão, pode-se ter de 0 a 3 anéis de controle de óleo, cuja função é controlar a lubrificação nas paredes do cilindro. Ele deve garantir tanto que não ocorra lubrificação insuficiente, gerando maior atrito, quanto lubrificante em excesso, que ocasiona a queima do óleo lubrificante junto com a mistura ar e combustível (RAHMANI; SHIRVANI; SHIRVANI, 2010).

2.2.2 Modelos de Lubrificação

Uma importante ferramenta na diminuição do atrito e desgaste é a utilização de lubrificantes. A função dos lubrificantes é inserir entre as superfícies em movimento relativo uma fina camada de material com menor tensão de cisalhamento que as superfícies em si. Os lubrificantes podem ser divididos quanto ao seu estado da matéria em sólidos, líquidos e gasosos (HUTCHINGS, 1992), cada qual com vantagens e desvantagens dependendo do sistema em que serão aplicados. A escolha do lubrificante a ser utilizado é fundamentalmente influenciada pelo regime de lubrificação vigente. Os regimes de lubrificação podem ser mais bem compreendidos com o auxílio das curvas de Stribeck para sistemas conformes e não conformes, ilustradas nas Figuras 2.5 e 2.6 respectivamente.

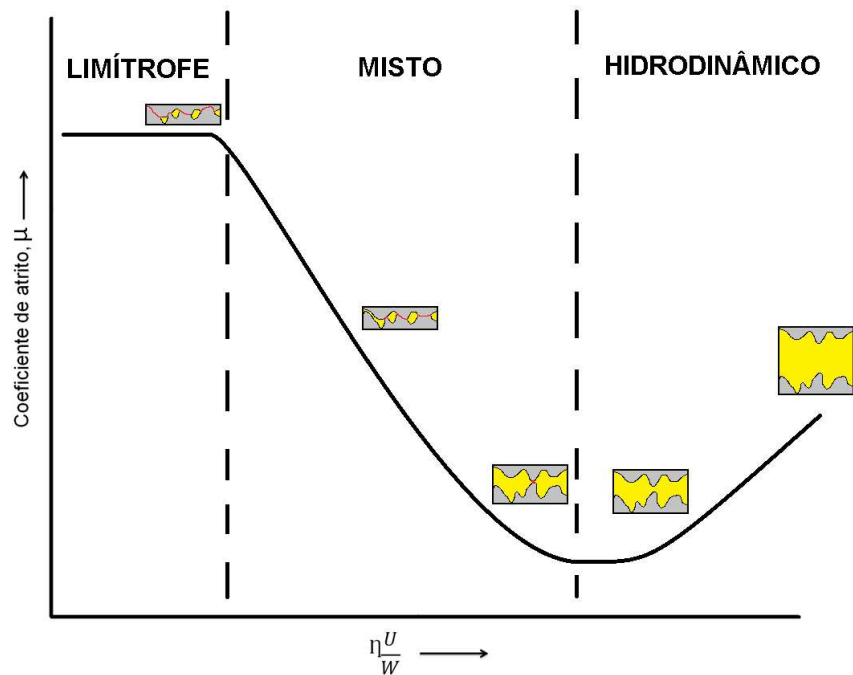


Figura 2.5 - Curva de Stribeck para contatos conformes.

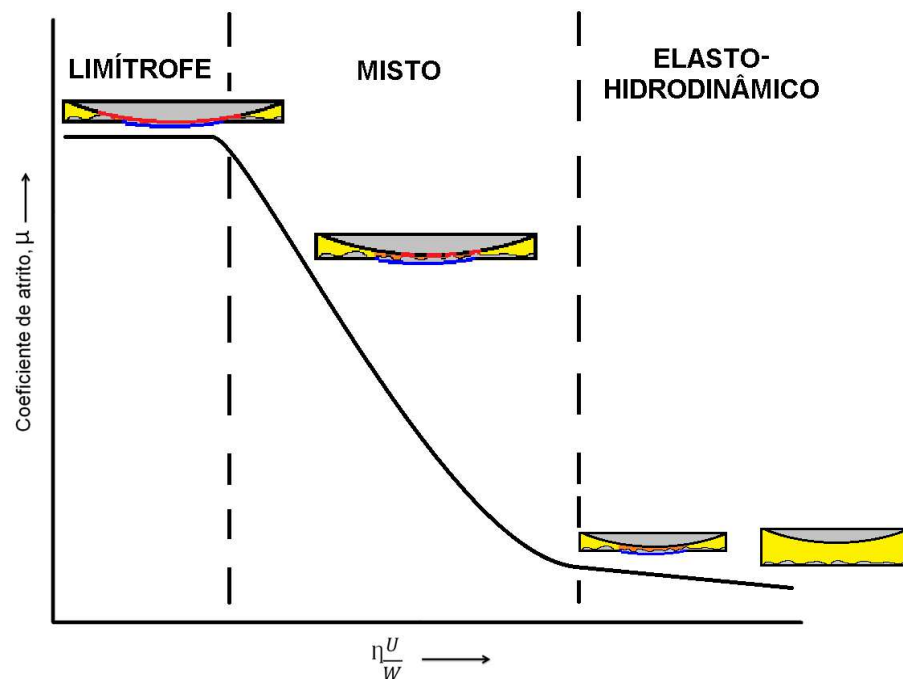


Figura 2.6 - Curva de Stribeck para contatos não conformes.

Onde:

μ = Coeficiente de Atrito

η = Viscosidade do fluido

U = Velocidade de deslizamento

W = Carga Normal

Para contatos conformes, a lubrificação hidrodinâmica pode ser entendida como o regime de lubrificação onde as duas superfícies são separadas por uma camada relativamente espessa de lubrificante em relação à rugosidade presente (HUTCHINGS, 1992). Este tipo de lubrificação está associado a altas velocidades relativas entre as superfícies, alta viscosidade e/ou baixas cargas. Quanto maior a velocidade de deslizamento U entre as superfícies mais pressão hidrodinâmica é gerada (SADEGHI, 2010), sendo inclusive possível a utilização de mancais lubrificados a gás caso esta velocidade de deslizamento seja elevada o suficiente. Após o ponto de mínimo da curva, é observado um aumento no coeficiente de atrito com o aumento de $\left(\eta \frac{U}{W}\right)$ no regime hidrodinâmico. Este fato pode ser explicado pelo aumento da espessura do filme lubrificante, gerando mais camadas do mesmo a serem cisalhadas e por consequência maior coeficiente de atrito. Para valores intermediários de $\left(\eta \frac{U}{W}\right)$ a carga é suportada parcialmente pelo filme lubrificante e parcialmente pelas asperidades, sendo este regime chamado de misto ou micro-elastohidrodinâmico, pelo fato de as pontas das asperidades agirem como micro não-conformidades. Para baixos valores de $\left(\eta \frac{U}{W}\right)$, o filme de lubrificante é ínfimo ou mesmo inexistente, sendo os esforços do contato suportados majoritariamente pelas asperidades das superfícies, caracterizando o regime limítrofe.

O regime elastohidrodinâmico ocorre quando existe deformação elástica, proveniente sobretudo da alta pressão entre contatos não conformes (Figura 2.6) sem, contudo, existir contato específico entre as superfícies (SADEGHI, 2010). Dois fatores explicam a existência de lubrificação efetiva mesmo em um regime de pressões de contato tão extremas. O primeiro é a própria deformação elástica que aumenta a área de contato e a separação entre as superfícies e o segundo fator é o fato de que a viscosidade do fluido aumenta várias ordens de grandeza dada as grandes pressões pontuais, aproximando o comportamento do mesmo do de um lubrificante sólido e possibilitando a permanência do lubrificante na região do contato (HUTCHINGS, 1992). Com a queda de $\left(\eta \frac{U}{W}\right)$, de maneira análoga ao regime hidrodinâmico o contato passa a ser suportado tanto pelo lubrificante como pelos picos das asperidades caracterizando um regime misto. Diminuindo ainda mais o valor de $\left(\eta \frac{U}{W}\right)$, chega-se a uma espessura de filme desprezível, atingindo-se o regime de lubrificação limítrofe.

O conjunto formado pelo pistão, anéis e cilindro formam um componente tribológico complexo, pois dadas as grandes faixas de variação de carga, velocidade, temperatura e lubrificação entre o Ponto Morto Superior (*PMS*) e Ponto Morto Inferior (*PMI*), podem operar diversos regimes de lubrificação como o hidrodinâmico, misto e limítrofe (Figura 2.7).

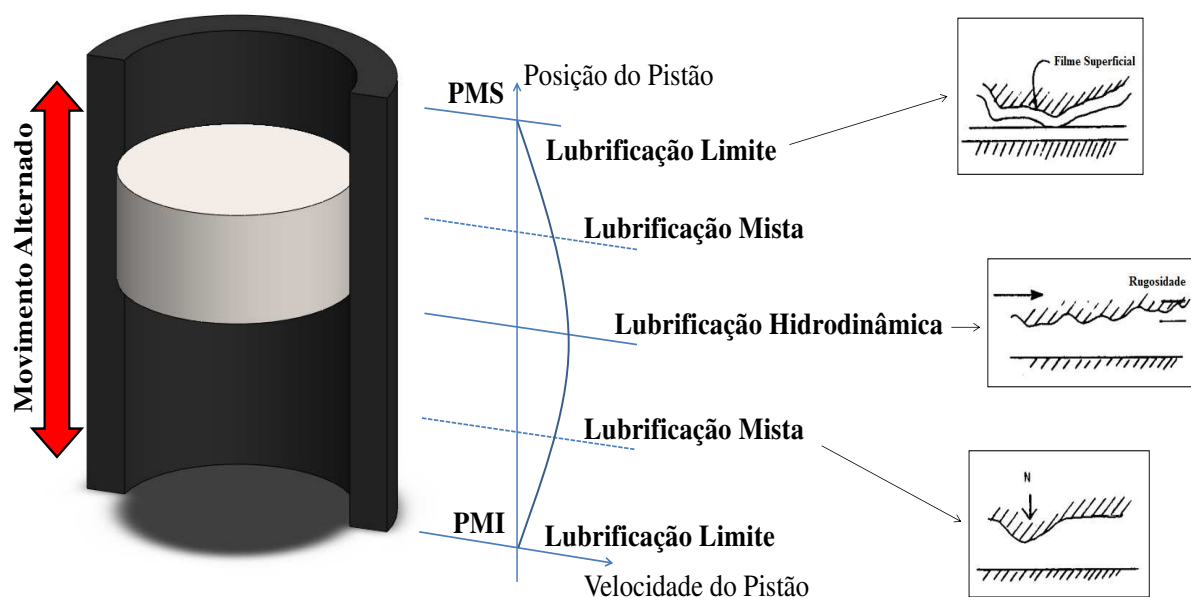


Figura 2.7 - Regimes de lubrificação durante o movimento relativo entre o pistão e o cilindro (OLIVEIRA JÚNIOR, 2013).

Durante o PMS e o PMI ocorre a maior parte do atrito, visto que com a inversão do movimento e consequente diminuição da velocidade relativa entre o pistão e o cilindro, o filme lubrificante é espremido para fora do contato pelas altas forças atuantes, podendo até mesmo ocorrer periodicamente contato não lubrificado (PULKRABEK, 1997). Para evitar este fenômeno, aditivos modificadores de atrito (MIKLOZIC; GRAHAM; SPIKES, 2001) e anti-desgaste (FULLER et al., 1997; SPIKES, 2004) são adicionados ao lubrificante para garantir que mecanismos de lubrificação limítrofe operem nessas regiões de velocidades muito baixas (HSU; GATES, 2005). Com o aumento da velocidade relativa do pistão sobre as paredes do cilindro, é gerada pressão hidrodinâmica que arrasta o filme lubrificante para as regiões de contato, levando aos regimes misto e hidrodinâmico, o que diminui o atrito (RAHMANI; SHIRVANI; SHIRVANI, 2010). Os gráficos da Figura 2.8 ilustram o aumento do coeficiente de atrito nas proximidades do ponto morto superior, bem como o maior atrito durante a expansão em função das maiores pressões e forças atuantes durante esta parte do ciclo.

Com base nas variações de comportamento tribológico observados no contato entre o pistão, seus anéis e o cilindro, Rahmani (2010) cita como ideal um regime de lubrificação entre o hidrodinâmico e o misto. A espessura do filme lubrificante deve ser a mínima possível no ponto intermediário entre o PMS e PMI para evitar consumo excessivo de lubrificante sendo, portanto adaptada a curva de Stribeck na Figura 2.9.

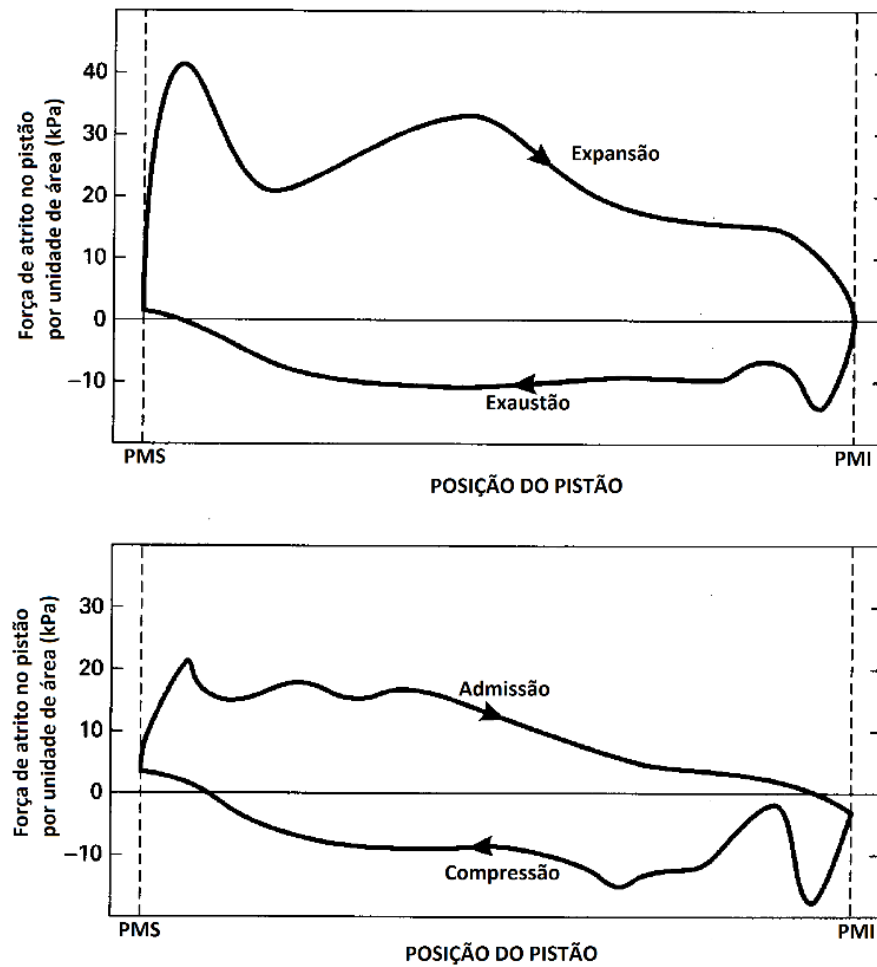


Figura 2.8 – Força de atrito em um pistão e em seus anéis durante um ciclo de 4 tempos (LEARY et al., 1944).

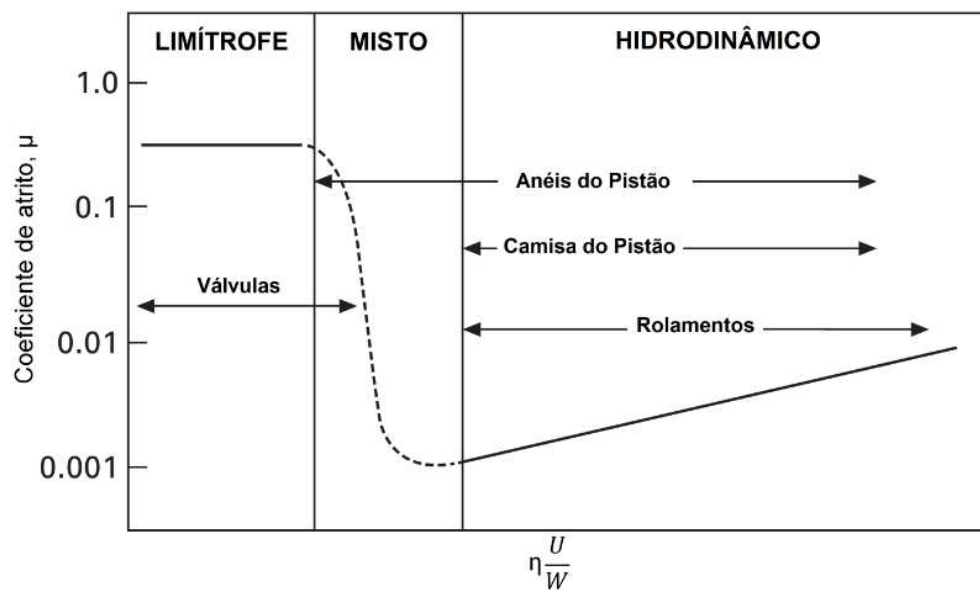


Figura 2.9 - Força de atrito em um pistão e em seus anéis durante um ciclo de 4 tempos (LEARY et al., 1944).

2.3 TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL

A superfície de um material é o local onde ocorre a maioria das interações físico-químicas, sendo que modificações superficiais de ordem micro e nanométrica têm sido objetivo de estudos em diversos campos da ciência, com avanços em campos como a óptica, termodinâmica, biologia e tribologia, originando as então chamadas superfícies funcionais (BRUZZONE et al., 2008).

A investigação da eficácia da aplicação de texturização superficial em motores a combustão interna, como por exemplo o brunimento, bem como seus efeitos na diminuição do atrito e desgaste já recebem atenção desde a década de 40 (LEARY et al., 1944; LIVENGOD; WALLOUR; UNITED STATES NATIONAL ADVISORY COMMITTEE, 1947). Com o avanço das técnicas de texturização, como por exemplo a texturização a laser, novas investigações se tornaram possíveis (RYK; ETSION, 2006) aproveitando o efeito das texturas tanto como reservatórios de lubrificante (SAEIDI et al., 2016), como micro mancais hidrodinâmicos (COSTA; HUTCHINGS, 2007) e como sumidouros de partículas de desgaste como mostra a Figura 2.10, segundo (Tomanik, 2013).

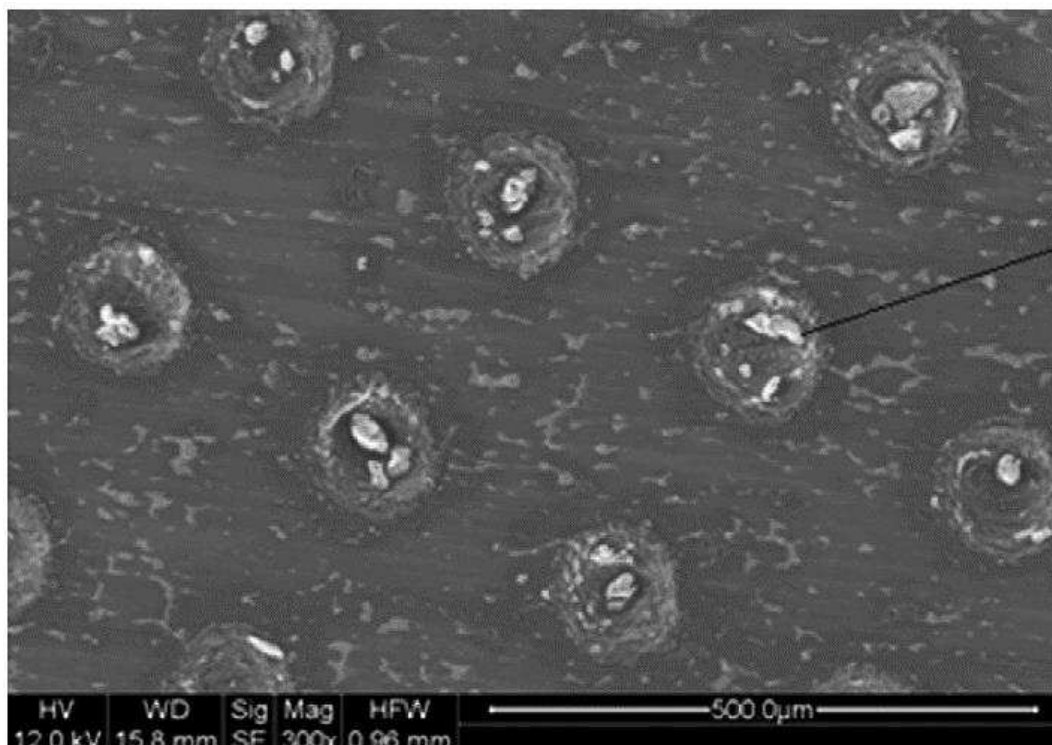


Figura 2.10 – Partículas abrasivas aprisionadas nas texturas (TOMANIK, 2013).

2.3.1 Métodos de Texturização Superficial

Os métodos de texturização superficial são divididos de acordo com a natureza física de sua modificação superficial, segundo Costa e Hutchings (2008) em:

- Adição: os padrões superficiais são criados a partir da adição de material em determinadas regiões da superfície.
- Remoção: os padrões superficiais são criados a partir da remoção de material em determinadas regiões da superfície.
- Movimentação: a modificação superficial ocorre através da deformação plástica e redistribuição do material da superfície.
- Auto formação: Regiões com diferentes resistências ao desgaste desgastam-se diferentemente, originando os padrões superficiais.

Os principais métodos de texturização no estado atual da arte foram sumarizados por Costa e Hutchings (2015) na Figura 2.11, sendo os métodos com * os que necessitam de uma etapa chamada mascaramento que será abordada com mais detalhes a seguir.

Dentre os métodos de texturização por remoção de material, destacam-se os que envolvem ablação a laser, sendo a ablação a passagem do material do estado sólido para o gasoso instantaneamente dado as altas energias inseridas pelo feixe do laser. Por ser um método que pode ser aplicado em uma grande gama de materiais, o método a laser ainda é o mais bem sucedido do ponto de vista industrial (ETSION, 2005). Um dos problemas deste método é uma zona protuberante em volta dos padrões superficiais inseridos oriunda de reflexão que pode ocorrer concomitantemente à ablação. Um exemplo é ilustrado na Figura 2.12(a). Esta região normalmente tem uma dureza elevada dada sua elevada taxa de resfriamento e pode agir como abrasivo aumentando assim o desgaste (KOVALCHENKO et al., 2005), sendo necessária sua eliminação através de polimento. Outra alternativa para a remoção das asperidades oriundas do processo de texturização a laser é a utilização de lasers de pulsos na ordem dos fentosegundos (*fs*), os quais concentram mais energia por pulso, diminuindo a Zona Afetada pelo Calor (ZAC) e por consequência a zona refundida Figura 2.12 (b). O problema com essa solução é o custo dos lasers de fentosegundos. Outro problema é a velocidade do processo, pois cada motivo individual que compõe o padrão de texturização deve ser produzido individualmente, tornando o processo de texturização longo quando for necessário texturizar grandes superfícies (COSTA; HUTCHINGS, 2015).

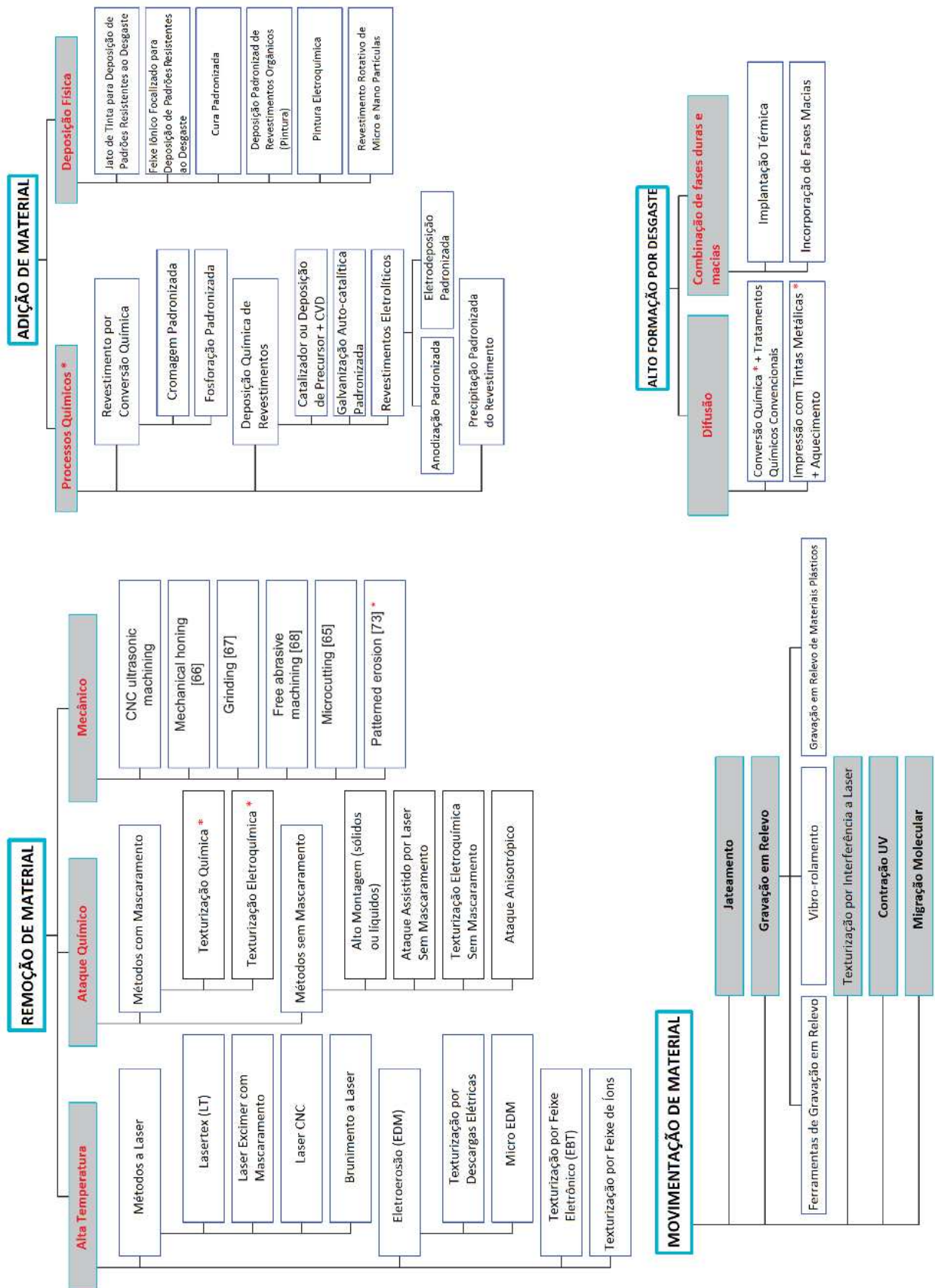


Figura 2.11 – Representação esquemática dos métodos de texturização. Adaptado de Costa e Hutchings (2015).

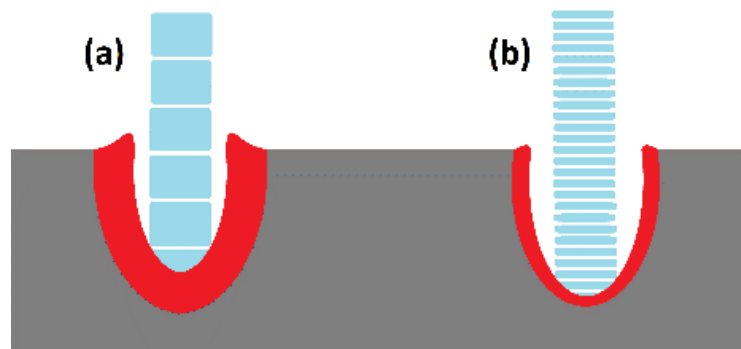


Figura 2.12 – Ablação a laser. (a) Pulsos maiores resultam em maior ZAC bem como zona refundida protuberante. (b) Pulsos menores permitem uma menor ZAC e diminuição das zonas refundidas.

Como visto na Figura 2.11 alguns processos, em especial os que necessitam de uma reação química em áreas seletivas, se utilizam de uma etapa conhecida como mascaramento, a qual consiste em criar uma camada protetora não reativa sobre a peça a ser texturizada deixando exposta apenas as regiões onde se quer que ocorra a reação. Dentre as técnicas de texturização com mascaramento destacam-se:

- Texturização fotoquímica: Este método consiste em mascarar a superfície a ser texturizada por fotolitografia e depois atacar quimicamente a superfície, de acordo com o esquema da Figura 2.13. A amostra é primeiramente limpa, em seguida um filme fotossensível é aplicado na superfície em uma sala com iluminação amarela (pois o filme não reage ao comprimento de onda do amarelo) e aquecido brandamente para haver a cura do revestimento. Uma máscara com furos é posta sobre o revestimento para bloquear seletivamente a passagem de luz ultravioleta (UV) à qual a amostra revestida é exposta na etapa seguinte. Após a exposição, procede-se a revelação do filme fotossensível, que resulta no mascaramento da própria peça com um padrão idêntico ao usado na máscara com furos. A etapa seguinte é o ataque químico, que ocorre nas regiões não protegidas pelo revestimento fotossensível. O revestimento é por fim removido completamente utilizando-se solventes.

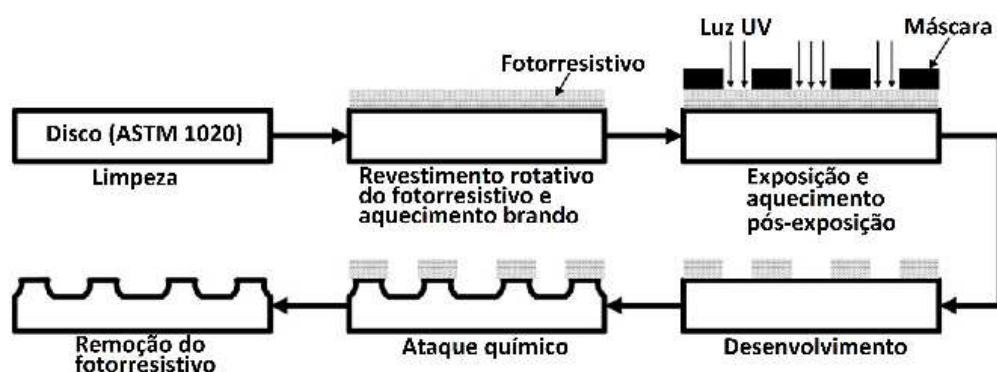


Figura 2.13 – Processo de texturização fotoquímica. Adaptado de Zhang e Meng (2012).

- Mascaramento por impressão a jato de tinta: Neste método padrões são impressos sobre a superfície a ser texturizada e a tinta da impressora funciona como barreira protetora para o ataque químico posterior. Como observado por Costa e Hutchings (2015) o grau de polimento da superfície é um importante parâmetro, pois reduz o ângulo de contato aparente, provavelmente pelo espalhamento da gota de tinta pelos sulcos da rugosidade. Um exemplo de aplicação deste método é ilustrado na Figura 2.14.

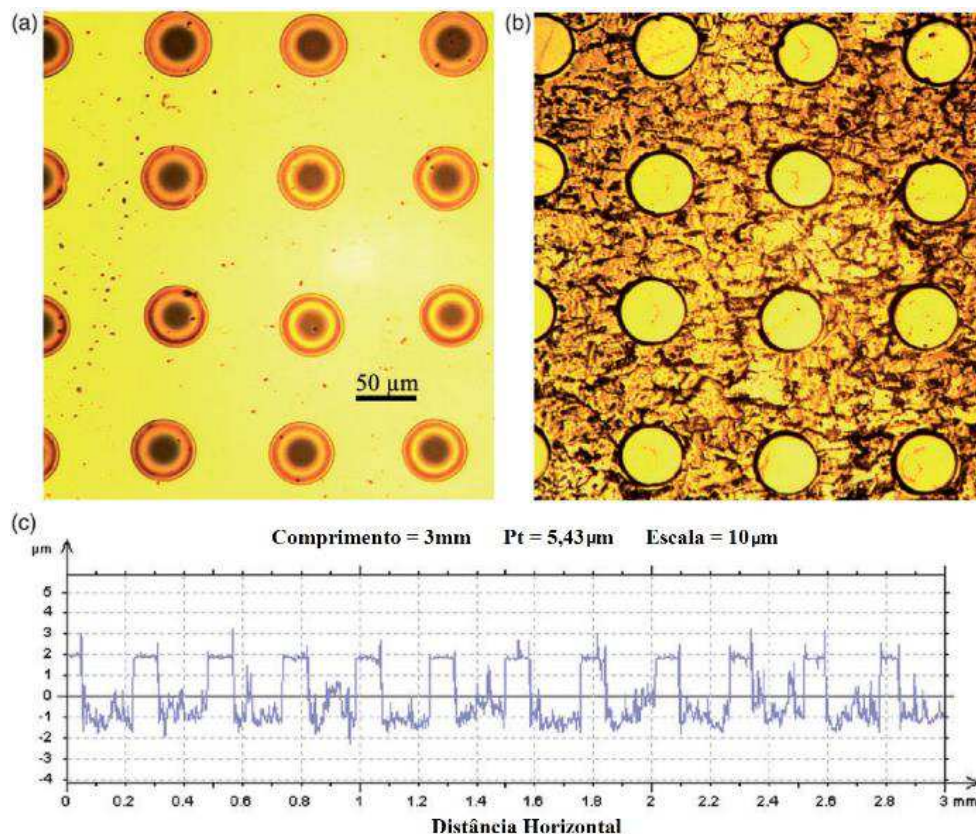


Figura 2.14 – Impressão de pontos utilizando uma impressora DMP-2800. (a) microscopia óptica após a pintura. (b) microscopia óptica após pintura e remoção da máscara. (c) Perfil em linha. Adaptado de Costa e Hutchings (2015).

2.3.2 Texturização Superficial sem Mascaramento

Micro usinagem eletroquímica é um processo de elevada importância industrial por não desgastar ferramentas de usinagem, não inserir tensões no material, produzir uma superfície de baixa rugosidade além de ser aplicável a superfícies complexas de materiais condutores de eletricidade independentemente da sua dureza (BHATTACHARYYA; MUNDA, 2003). O processo tem como base o fenômeno da dissolução anódica, onde fará o papel de

ânodo o material com menor potencial de redução, ou seja, menor tendência a adquirir elétrons.

No caso da usinagem eletroquímica de uma peça de ferro puro (Fe^{++}) em uma solução eletrolítica de cloreto de sódio ($NaCl$), a dissociação da água e do sal ocorre quando uma diferença de potencial é aplicada, conforme as Equações 2.1 e 2.2. Por conta desta diferença de potencial entre o corpo de prova (ânodo) e a ferramenta (cátodo) os íons positivos se movem em direção à ferramenta, e os positivos em direção à peça ser usinada. Os íons de hidrogênio levam então os elétrons do cátodo (ferramenta) para formar hidrogênio gasoso, como visto na equação 2.3, ao mesmo tempo que no ânodo ocorrerá a dissolução dos átomos ferro conforme a equação 2.4. A dissociação do ferro pode ser explicada pelo fato dos elétrons perdidos durante o processo serem os responsáveis pela estabilidade da ligação metálica, como ilustra a Figura 2.15. Uma vez arrancados os elétrons os núcleos atômicos encontram menos resistência para se dispersar. Íons de sódio se combinarão com a hidroxila (OH^-) formando hidróxido de sódio, conforme a Equação 2.5, os íons de ferro formaram uma “lama” ao se combinarem tanto com a hidroxila como com o cloro (Cl^-), conforme as equações 2.6 e 2.7. Uma representação destes fenômenos é dada na Figura 2.16.

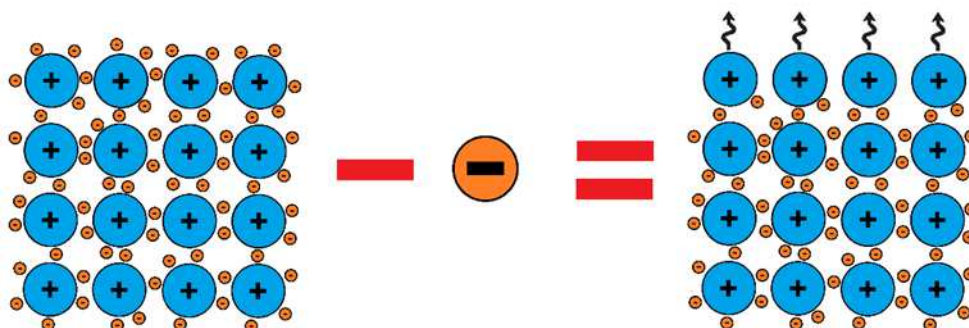
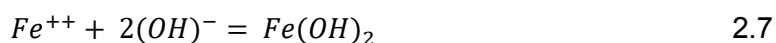
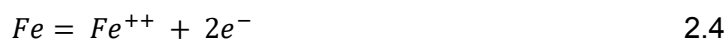


Figura 2.15 – Perda de elétrons e consequente dissolução anódica.



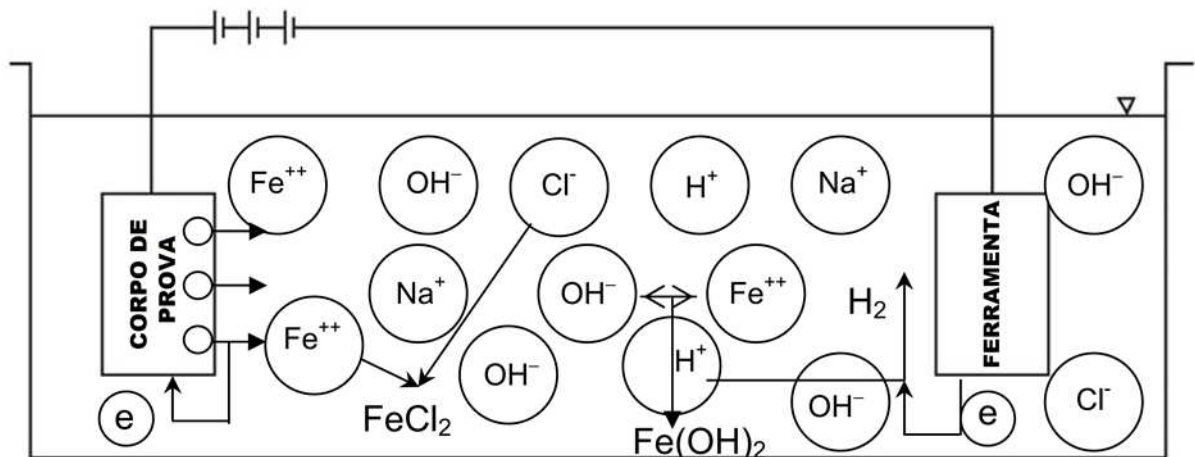


Figura 2.16 – Representação do mecanismo de usinagem eletroquímica. Adaptado de NPTEL (2008).

A taxa de remoção de material no ânodo pode ser prevista pela primeira lei de Faraday (Equação 2.8) desde que 3 condições sejam atendidas:

- A valência dos íons produzidos deve ser conhecida.
- A dissolução iônica deve ser a única reação no ânodo.
- O metal deve ser removido apenas por dissolução e não por desintegração da ferramenta.

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

Onde:

m = massa da substância liberada em um eletrodo (g).

I = corrente elétrica constante inserida no sistema (A).

t = tempo total em que a corrente é aplicada (s).

F = 96.485 C mol⁻¹, constante de Faraday.

M = Massa molar da substância (g.mol⁻¹).

z = Número de valência dos íons da substância.

Através da Equação 2.8 fica claro que os dois principais parâmetros do processo são a corrente e o tempo. Mesmo que os processos de texturização por ataque químico sejam mais rápidos que os a laser quando aplicados a grandes áreas, a necessidade de mascarar cada peça a ser texturizada se mostra um grande empecilho para sua aplicação prática na

indústria. Uma solução foi proposta por Costa e Hutchings (2009) através de um método de texturização eletroquímica sem mascaramento (MECT). O aparato básico para texturizar cilindros automotivos pelo método MECT é visualizado na Figura 2.16.

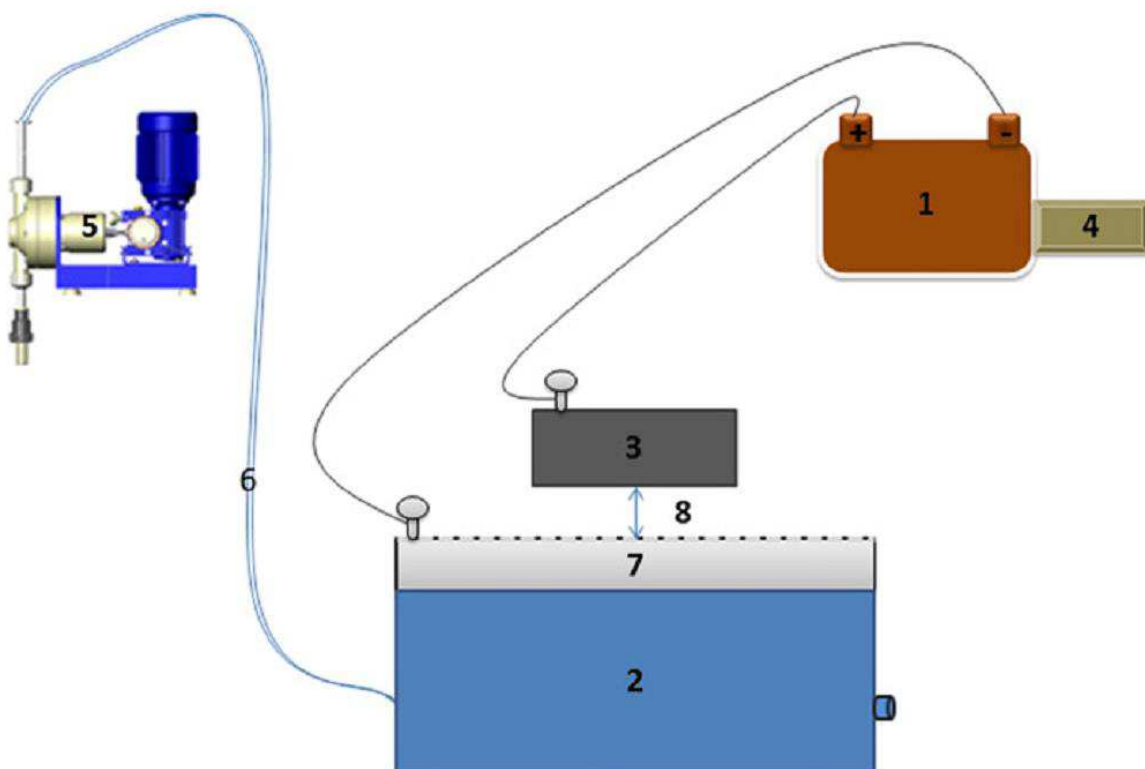


Figura 2.17 – Aparato experimental utilizado na MECT. Adaptado de PARREIRA; GALLO e COSTA (2012).

Uma fonte de tensão contínua (1) fornece a corrente necessária para a polarização anódica, sendo o polo negativo conectado à ferramenta (7) e o positivo à peça a ser texturizada (3). O eletrólito (2) é bombeado por uma tubulação (6) através de uma bomba peristáltica (5), entrando assim o eletrólito em contato com a peça (3) por meio de furos na ferramenta (7), escoando posteriormente pela distância entre a ferramenta e a peça (D_{fp}) (8). Um circuito eletrônico (4) é utilizado para pulsar a corrente, visando assim durante os pulsos não eletrizados limpar os produtos oriundos da dissolução anódica bem como arrefecer a superfície. Para a texturização superficial de aço carbono foram obtidos bons resultados com pulsos eletrizados de 3.2 ms intercalados por pulsos de limpeza e arrefecimento de 18.2 ms (PARREIRA; GALLO; COSTA, 2012), bem como com o uso de NaNO_3 (COSTA; HUTCHINGS, 2009) e NaCl (PARREIRA; GALLO; COSTA, 2012) como eletrólitos.

A Figura 2.17 detalha o processo de usinagem eletroquímica envolvido neste método. Apesar de toda região em contato com o eletrólito ser atacada eletroquimicamente, a região

diretamente atingida pelo fluxo de eletrólito sofre menor queda ôhmica (Figura 2.18) do que as demais regiões, sofrendo assim maior dissolução.

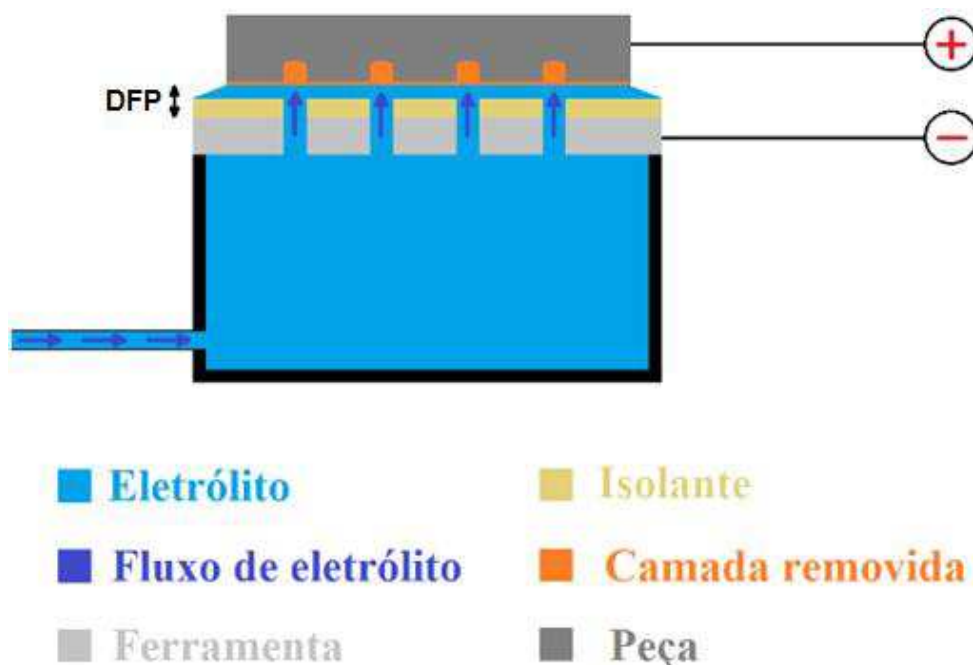


Figura 2.18 – Processo de usinagem eletroquímica sem mascaramento.

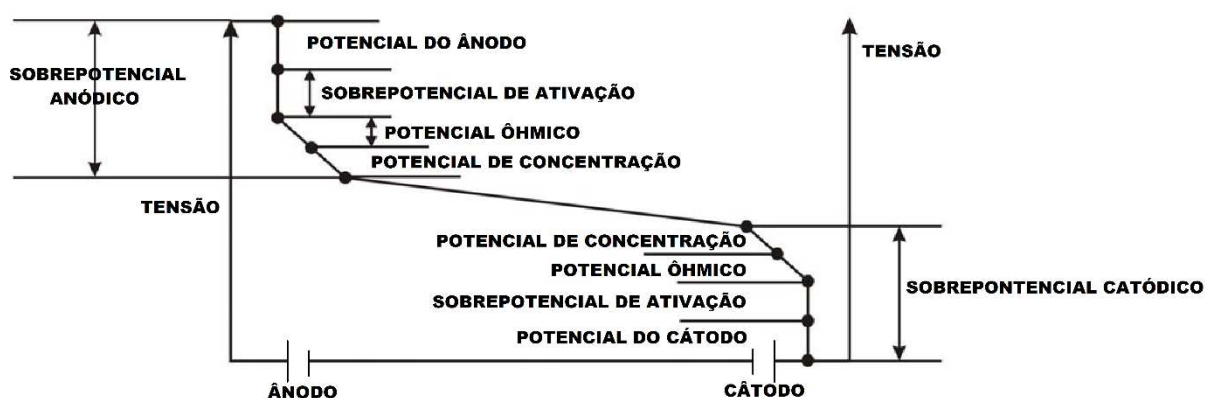


Figura 2.19 – Efeito da polarização na diferença de potencial em uma célula eletrolítica. Adaptado de NPTEL (2008).

Como observado por PARREIRA; GALLO e COSTA (2012), a distância entre a ferramenta e a peça (*Dfp*) tem efeito direto sobre a profundidade das texturas inseridas (Figura 2.19), uma vez que maiores distâncias entre ferramenta e a peça tanto aumentam a queda de potencial ôhmico como também dificultam o transporte de massa, como observado na Figura 2.18.

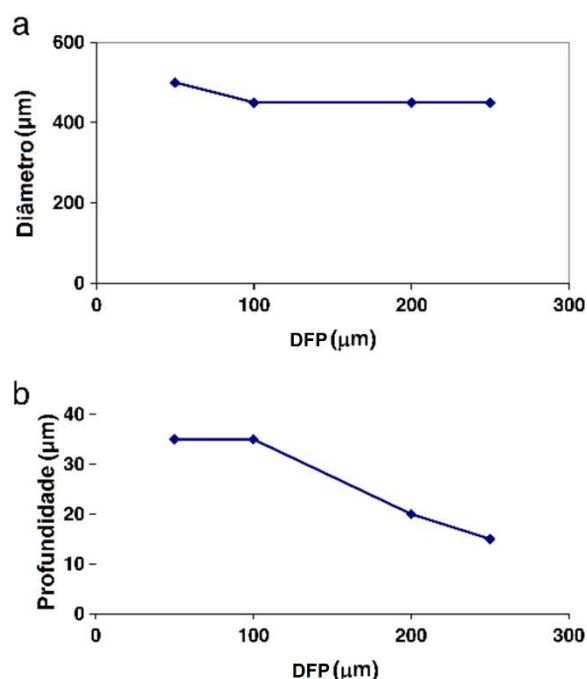


Figura 2.20 – Influência da distância entre a ferramenta e peça na variação da dimensão de bolsões. a) Influência no diâmetro. b) Influência na profundidade (PARREIRA; GALLO; COSTA, 2012).

2.3.3 Parâmetros de Texturização Superficial e a sua Influência nos Regimes de Lubrificação

Dada a grande gama de possibilidades no que se refere à utilização de padrões superficiais para melhoria da lubrificação em um sistema, a definição de parâmetros para comparação da efetividade de cada modelo de textura torna-se necessária. Segundo Costa e Hutchings (2007) alguns parâmetros importantes para avaliação são: formato da textura, percentual de área coberta, relação profundidade/largura e orientação relativa entre textura e a direção de deslizamento.

Costa e Hutchings (2007) investigaram experimentalmente a eficiência de sulcos, bolsos circulares e padrões em “V” (Figura 2.21), obtendo no último o melhor padrão no que se refere ao ganho em espessura de filme lubrificante. Qiu; Minson; Raeymaekers; (2013) estudaram o efeito da forma da textura nos coeficientes de atrito e rigidez de mancais de deslizamento lubrificadas a ar, comparando padrões esféricos e elípticos com fundo plano e curvo além de triângulos e formatos em “V”. Estes autores obtiveram como resultado que o motivo em forma de elipse tem um desempenho 13,6% superior na redução do atrito em relação ao esférico (o segundo mais efetivo neste quesito), contudo uma capacidade de carga 7,6% inferior em relação ao mesmo.

O percentual de área coberta pelas texturas é outro parâmetro a ser analisado. Percentuais em torno de 10% a 12% se mostraram os mais efetivos para redução de atrito no regime hidrodinâmico (MORRIS et al., 2014) (COSTA; HUTCHINGS, 2007) (SEGU et al., 2013) e limitrofe (KIM; CHAE; CHOI, 2014). Um valor excelente de área coberta pela textura existe pelo fato de que os efeitos de ganho de pressão hidrodinâmica gerado pelas texturas são contrabalanceados pela diminuição da área de contato (COSTA; HUTCHINGS, 2007), além da possibilidade de ocorrência de cavitação (FOWELL et al., 2012).

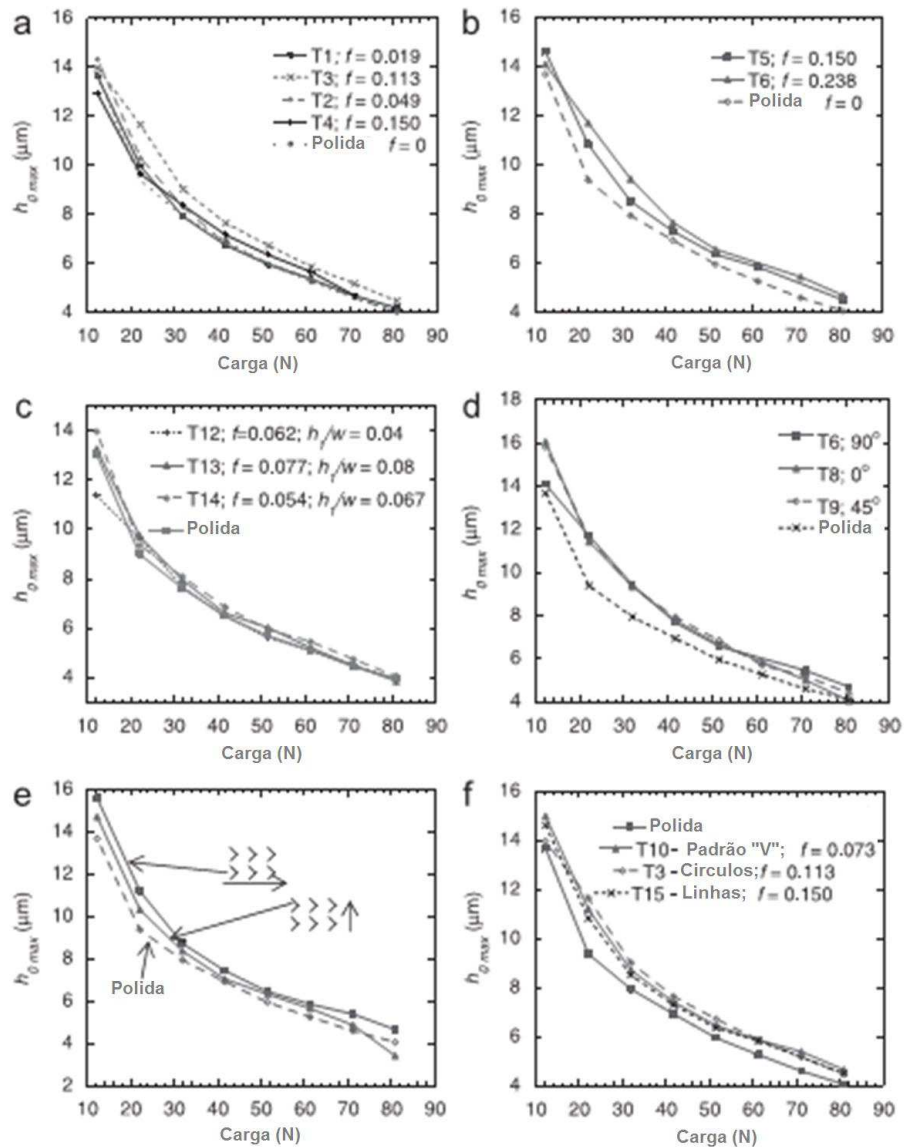


Figura 2.21 – Efeito no h_{0max} (espessura do filme lubrificante) em função das características geométricas dos padrões inseridos. (a) Efeito da fração de área texturizada. (b) Efeito da fração de área texturizada para sulcos orientados perpendicularmente a direção de deslizamento. (c) Efeito da relação entre a profundidade e largura. (d) Efeito da orientação relativa dos sulcos. (e) Efeito da orientação relativa dos padrões em “V”. Efeito da forma.

A relação entre profundidade e largura (Rpl) da textura é tida por alguns autores como o principal fator no efeito hidrodinâmico das texturas (YUAN; HUANG; WANG, 2011). A existência de um valor otimizado para essa relação foi investigada com a utilização da equação de Reynolds (RONEN; ETSION; KLIGERMAN, 2001) (RAHMANI; SHIRVANI; SHIRVANI, 2007). Os resultados experimentais encontrados por Costa e Hutchings (2007) mostraram boa concordância com as simulações, no que se refere ao fato de que texturas com uma profundidade com valores em torno de 10% em relação a sua largura terem melhor desempenho na redução do atrito. Kim; Chae; Choi (2014), através de ensaios pino-disco, notaram que quanto menor a espessura do filme lubrificante, mais incisivo é o efeito das texturas sobre a lubrificação. Foi notado também por Kim; Chae; Choi (2014) que valores altos do parâmetro $\left(\eta \frac{U}{W}\right)$ em contatos conformes (Figura 2.5) tendem a aumentar o coeficiente de atrito em texturas superficiais com relação entre profundidade e diâmetro em torno de 0,3, sendo este fato explicado como resultado da dinâmica do fluido nas proximidades da textura.

De La Guerra et al. (2013) observaram reduções de até 30% do coeficiente de atrito, sobretudo no regime misto (Figura 2.22) para um contato pontual obtido através de esferas de aço polido deslizando sobre discos de cobre, sendo estes discos texturizados por fotolitografia. Neste estudo foi evidenciado que as texturas ajudam a aumentar o suporte hidrodinâmico bem como funcionam como sumidouros de partículas de desgaste endógenas ao processo de desgaste.

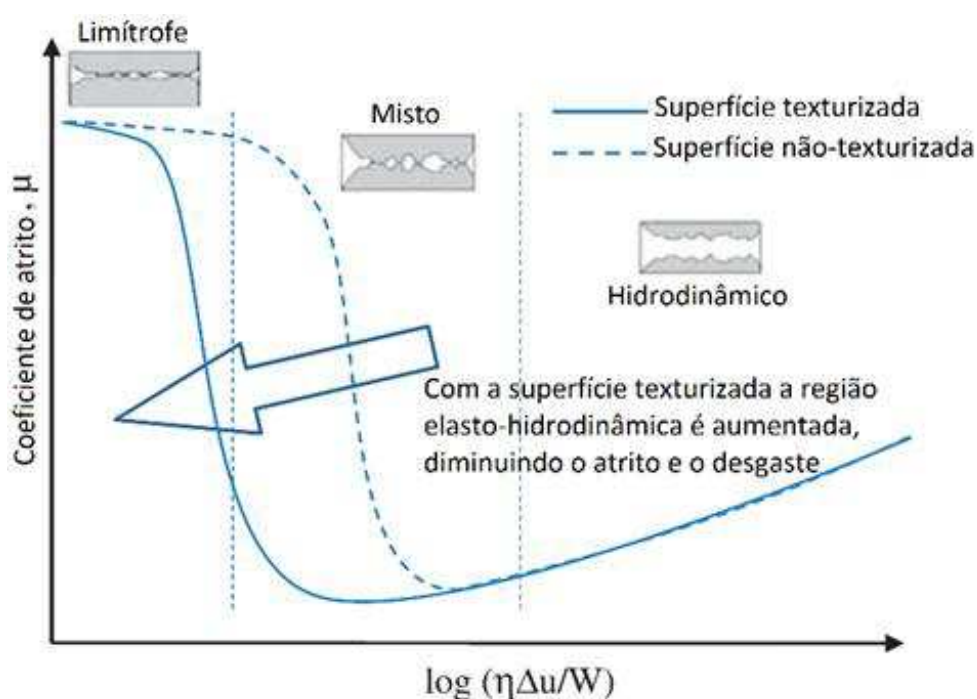


Figura 2.22 – Variação dos regimes de lubrificação, mostrados na curva de Stribeck, dado o uso de texturização. Adaptado (DE LA GUERRA et al., 2013).

Costa e Hutchings (2007), através de testes de deslizamento alternado utilizando um contato linear de um cilindro de 16 mm contra planos texturizados, constataram que para um contato hertziano menor que o tamanho de um motivo individual, as superfícies texturizadas possuem um desempenho inferior às polidas. Com a utilização de uma secção de cilindro maior, com 200 mm de diâmetro e consequente maior área de contato hertziano, obtiveram-se melhores resultados para as superfícies texturizadas que para as polidas. Estes resultados identificaram a necessidade da área de contato ser maior que a área individual de cada motivo.

A orientação dos motivos em relação ao movimento relativo também exerce influência nos ganhos conseguidos com a texturização superficial. Costa e Hutchings (2007) apontam que para baixas cargas sulcos perpendiculares tem um desempenho pior que os paralelos pois uma menor proporção de área texturizada se encontra sob o contato. Costa e Hutchings (2007) observaram ainda que para cargas mais elevadas os sulcos paralelos apresentaram o pior resultado pois segundo o autor dada as altas cargas os sulcos paralelos canalizariam o lubrificante para fora da região de contato no sentido do deslizamento. Yuan; Huang; Wang (2011) por outro lado, através do uso de ensaios de deslizamento, apontam que para menores pressões de contato sulcos perpendiculares com profundidade de 7 μm tem o melhor resultado, visto o efeito hidrodinâmico das texturas perpendiculares serem melhor observados a baixas cargas. Para cargas mais elevadas Huang; Wang (2011) observaram que sulcos paralelos e com profundidade de 19 μm apresentaram maior redução no coeficiente de atrito pelo fato de canalizarem lubrificante para a região do contato, sendo sulcos em padrões angulados os que obtém os melhores resultados pelo fato de se aproveitarem das vantagens dos sulcos paralelos e perpendiculares.

2.3.4 Texturização Superficial em Motores de Combustão Interna

Dados os variados regimes de lubrificação presentes durante um ciclo de um pistão, como visto na Figura 2.7, a correta escolha dos parâmetros de texturização torna-se complexa. A investigação de padrões topográficos diferentes do brunimento foi investigada teoricamente por Ronen et al. (2001) e posteriormente seus resultados foram corroborados experimentalmente por Etsion (2010). Grabon et al. (2013) estudaram o efeito de padrões de texturização superficial com bolsos circulares de 5 μm de profundidade e 1,5 mm a 2 mm de diâmetro em conjunto com o brunimento através de testes de movimento alternado em comparação com amostras apenas brunidas em regimes de lubrificação hidrodinâmica e com aplicação insuficiente de lubrificante (starved). Os resultados obtidos são exibidos na Figura

2.23, onde se observa que os padrões circulares inseridos juntamente com o brunimento causaram uma clara diminuição no atrito para todas as velocidades analisadas. Observa-se ainda que quanto maior a velocidade de deslizamento maior a redução no coeficiente de atrito. Na Figura 2.23b nota-se que nas condições de lubrificação insuficiente a redução no coeficiente de atrito não foi tão substancial, chegando o atrito a ser maior nas amostras com padrões circulares nas cargas mais baixas.

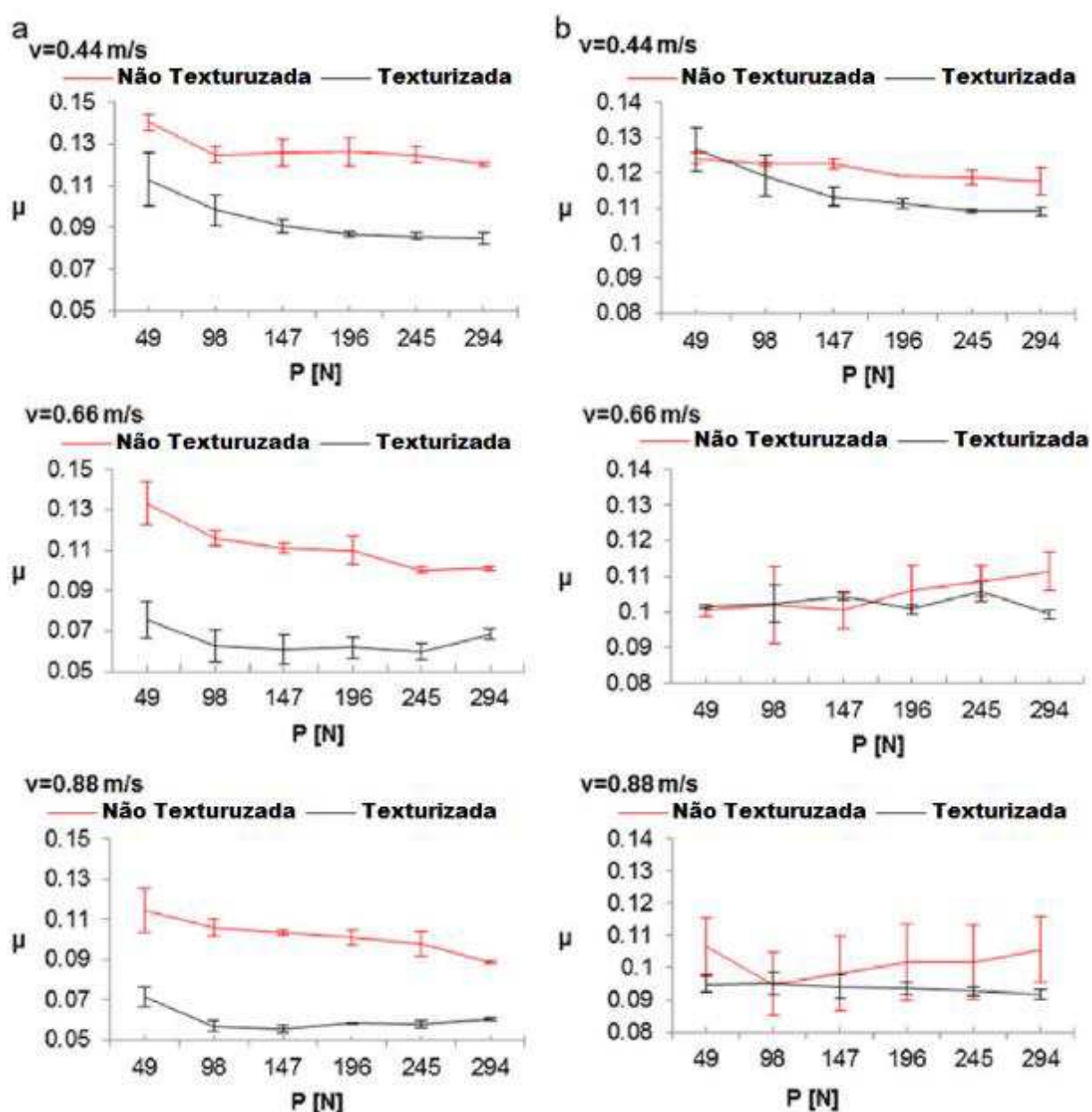


Figura 2.23 – Efeito da força normal no coeficiente de atrito para diferentes velocidades de deslizamento nos regimes: (a) hidrodinâmico; (b) lubrificação insuficiente (GRABON et al., 2013).

Guo et al. (2013) investigaram a aplicação de texturas em motores a diesel náuticos. Os cilindros passaram por retífica, brunimento e texturização a laser, onde foram criados dois grupos de padrões côncavos, sulcos e um misto de ambos como ilustra a Figura 2.24 e detalha a Tab. 2.1. Os cilindros foram testados por 5 dias, sendo a cada dia 200 rpm, 400 rpm e 800 rpm por 2 horas cada, em um equipamento que simula o movimento alternativo do pistão e seus anéis sobre o cilindro. Como resultados, Guo et al. (2013) encontraram que os padrões circulares que possuíam relação de 0.1 entre a profundidade e o diâmetro apresentaram melhor desempenho na redução do desgaste que os com 0.3, de acordo com os resultados obtidos por Costa e Hutchings (2007).

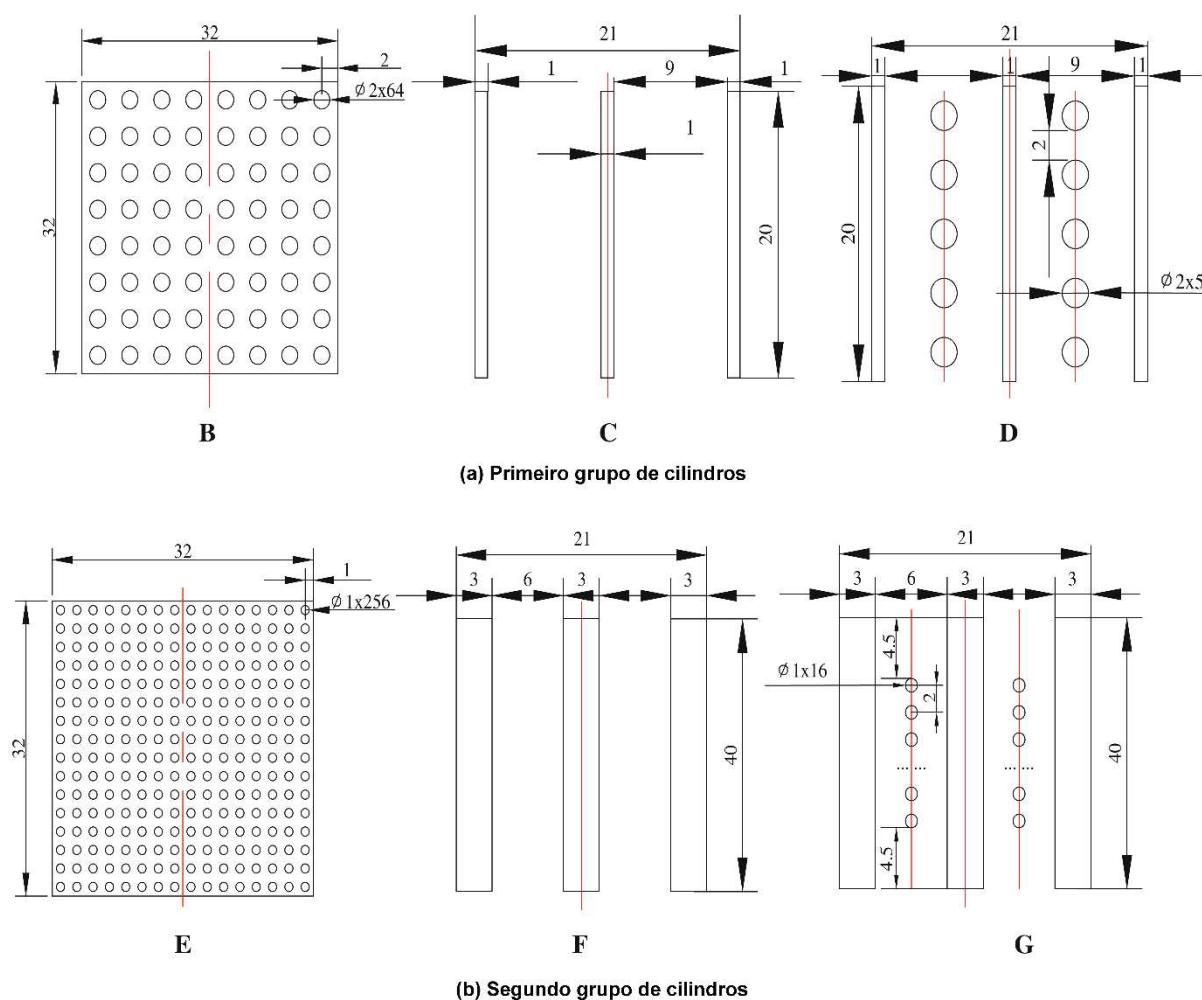


Figura 2.24 – Representação dos cilindros utilizados: (a) primeiro grupo de cilindros; (b) segundo grupo de cilindros. Dimensões em milímetros. Adaptado de Guo et al. (2013).

Tabela 2.1 – Parâmetros do processo de texturização. Adaptado de GUO et al. (2013).

Grupo	Referência do cilindro	Côncavo			Sulco		
		Diâmetro (mm)	Profundidade (μm)	Razão profundidade-diâmetro	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Profundidade (μm)
1	Cilindro sem tratamento A	-	-	-	-	-	-
	Concavidade regular B	2	200	0.1	-	-	-
	Sulco regular C	-	-	-	20	1	200
	Côncavo e sulco D	2	200	0.1	20	1	200
2	Concavo regular E	1	300	0.3	-	-	-
	Sulco regular F	-	-	-	40	3	300
	Concavo e Sulco G	1	300	0.3	40	3	300

Morris et al. (2014) investigaram numericamente através da equação de Reynolds a aplicação de texturas em formato de “V”, inicialmente propostos por Costa e Hutchings (2007), em cilindros de motores a combustão interna. Nas simulações computacionais foram comparados os parâmetros: espessura do “V”, razão de área texturizada, ângulo do “V” e profundidade. Os resultados são exibidos na Figura 2.25, onde observa-se que a espessura do “V” é um fator pouco significativo na redução do atrito. Um percentual de área texturizada de 35% gerou a maior redução de atrito. Para o ângulo do “V”, observou-se um máximo na redução de atrito para 80°. Profundidades dos “V” por volta de 2 μm a 3 μm resultaram na maior redução do atrito. Testes posteriores indicaram que a orientação dos motivos em “V” possui influência na redução de atrito, sendo que quando contrapostos (Figura 2.26, padrão 8) um lado direciona o fluxo de lubrificante enquanto o outro canaliza, aumentando a eficiência da lubrificação na redução de atrito.

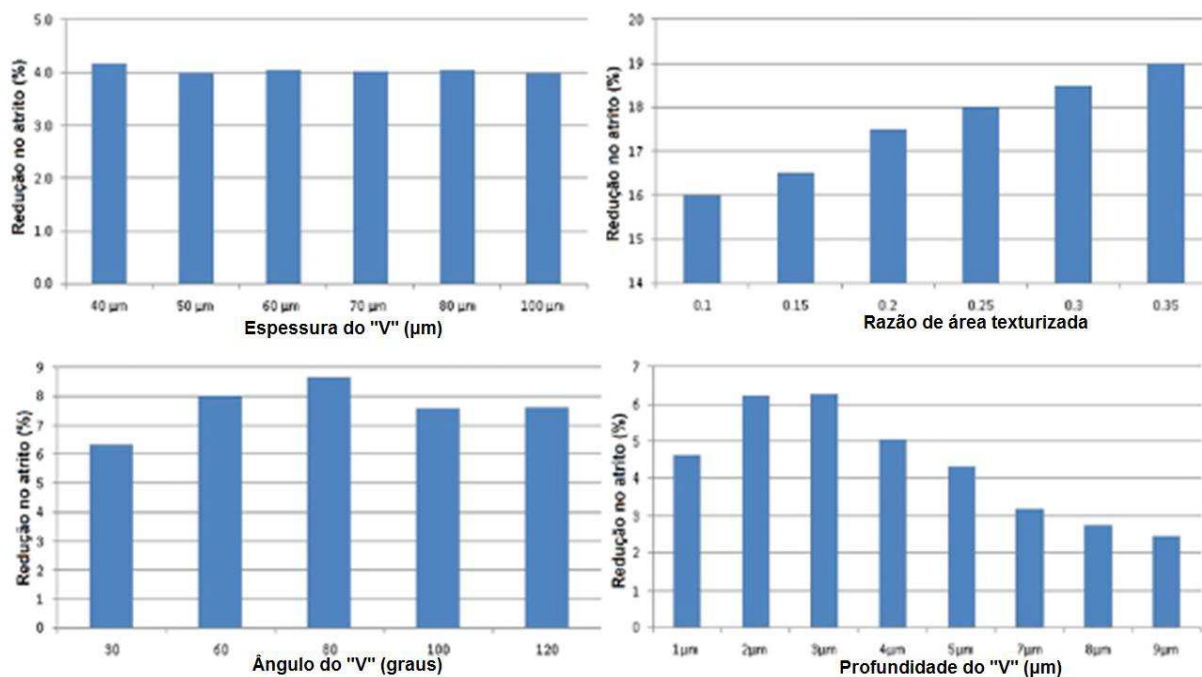


Figura 2.25 – Resultados numéricos dos parâmetros testados (MORRIS et al., 2014).

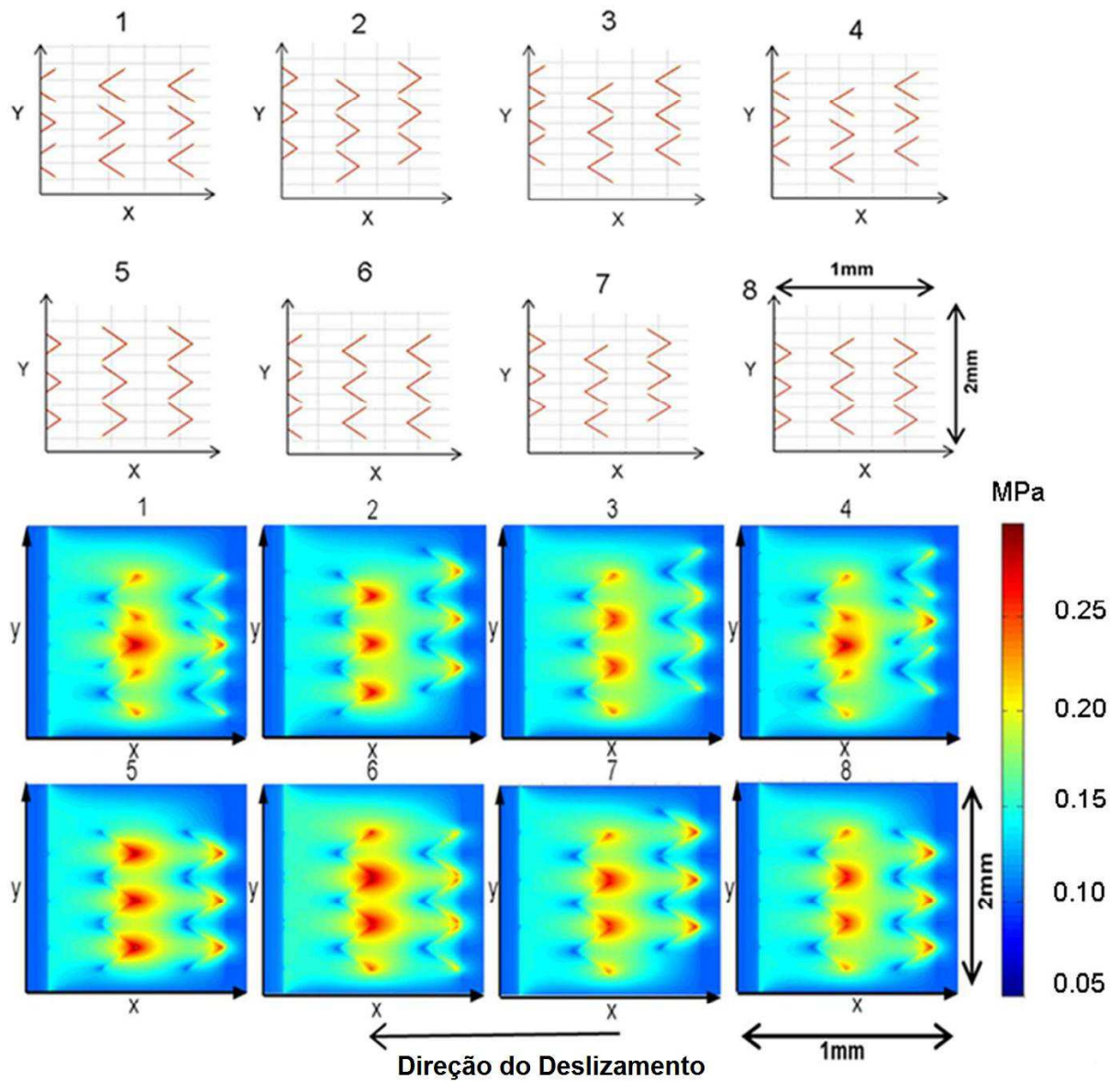


Figura 2.26 – Padrões das texturas superficiais e seu efeito hidrodinâmico (MORRIS et al., 2014).

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

3.1 MATERIAL DOS CORPOS DE PROVA

Todos os corpos de prova analisados neste trabalho foram produzidos de ferro fundido cinzento de matriz perlítica (Figura 3.1), dureza Vickers (utilizando carga de 62,5 kg) de $185 \pm 2,5$ HV, micro dureza da matriz perlítica de 274 HV e espaçamento interlamelar da perlita de $0,34 \mu\text{m}$.

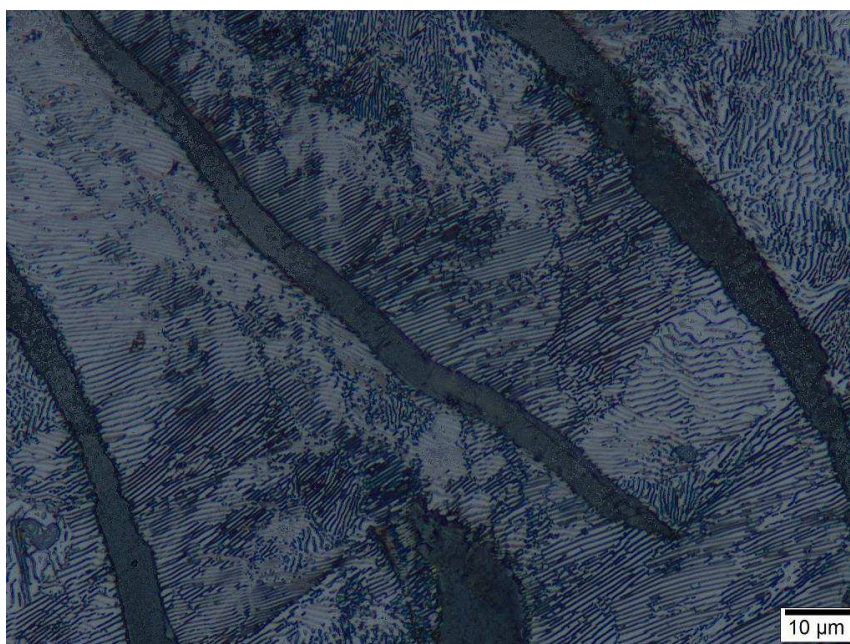


Figura 3.1 – Microestrutura dos corpos de prova.

3.2 ENSAIOS DE POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA

Antes da realização dos ensaios de texturização, foram realizados alguns ensaios de polarização dinâmica em amostras de ferro fundido cinzento para melhor compreender seu

processo de dissolução anódica. Através das curvas de polarização potenciodinâmica pode-se comparar a influência na dissolução anódica da adição de pequenas quantidades de Iodeto de Potássio (*KI*) no sal de cozinha em comparação com o NaCl para análise (*PA*). Caso essa influência seja irrelevante, justifica-se o uso do sal de cozinha para os ensaios de texturização superficial pelo método *MECT*, visto o custo do sal de cozinha ser cerca de 10 vezes menor em relação ao NaCl *PA*. Ambos os eletrólitos foram testados a um volume de 200 ml e a uma concentração de 200 g.L⁻¹.

Para os testes de polarização dinâmica foi utilizado um potenciostato do fabricante BioLogic modelo SP150 (Figura 3.2), os softwares EC Lab®V10.18, e EC Lab Express® V3.4.



Figura 3.2 – Potenciostato BioLogic SP150. A) Saída de sinal potencial e aquisição de sinal de corrente da célula eletroquímica. B) Saída de dados para o processamento por porta USB. C) Saída de dados para processamento por porta Ethernet. Adaptado de (ARDILA, 2013).

Os corpos de prova (eletrodo de trabalho) utilizados nos testes de corrosão foram confeccionados em ferro fundido cinzento com 1 cm² de área de secção transversal, conforme a Figura 3.3(a). Foi fixado então nas amostras um contato elétrico e em seguida o corpo de prova foi embutido a frio utilizando uma resina acrílica para restringir a área de contato do metal com o eletrólito durante a dissolução anódica, como ilustra a Figura 3.3(b). Os corpos de prova foram então polidos com lixas de granulometria 80, 120, 220, 320, 400, 600, 1200 e 2000, visto este ser o acabamento superficial dado posteriormente nos ensaios de texturização superficial pelo método *MECT*.

A Figura 3.4 ilustra o béquer de plástico utilizado como célula eletroquímica para armazenar o eletrólito, bem como o eletrodo de referência (calomelano saturado), contra eletrodo (rede de platina) e o corpo de prova.

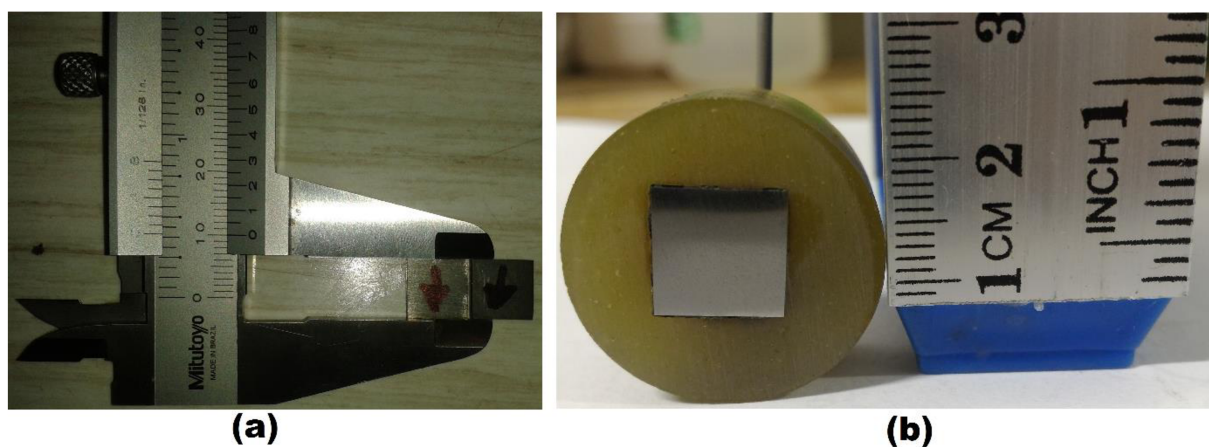


Figura 3.3 – Corpos de prova utilizados nos ensaios de corrosão. (a) Amostras cortadas. (b) Amostras embutidas e prontas para os testes de corrosão.

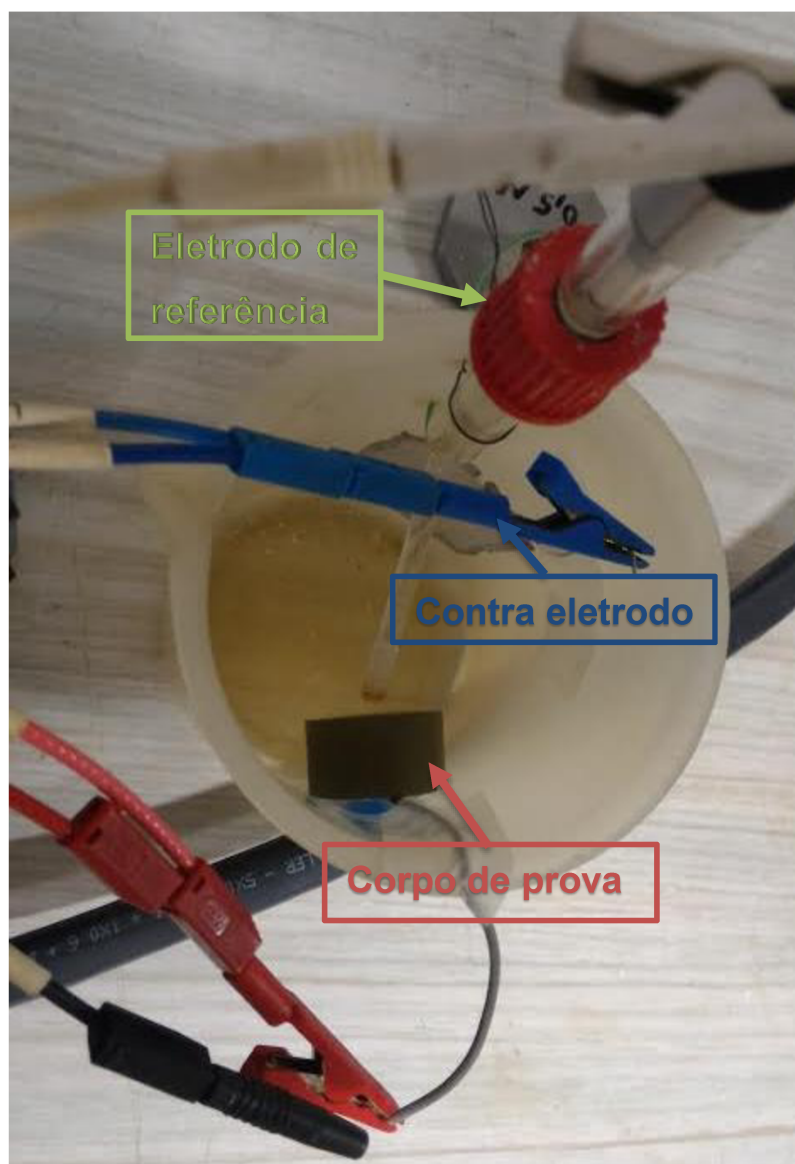


Figura 3.4 – Aparato utilizado na célula eletroquímica.

Quando uma amostra é exposta a um meio corrosivo ocorrem simultaneamente fenômenos de corrosão e redução na superfície da mesma. Estando esta amostra envolta em um meio corrosivo e não ligada a nenhuma instrumentação, ao se estabilizarem as magnitudes dos fenômenos corrosivos e redutivos sob a superfície do material este assume um potencial em relação ao eletrodo de referência chamado de potencial de corrosão (E_{cr}), sendo que para o sistema analisado nestas condições o material encontra-se em equilíbrio eletroquímico com o meio (GENTIL, 2007). O teste realizado nas condições acima descritas é chamado de cronopotenciometria, sendo exemplificado para uma amostra de ferro fundido cinzento na Figura 3.5. Através do teste de cronopotenciometria se garante uma camada de óxido inicial de espessura semelhante para todos os testes de polarização potenciodinâmica posteriores.

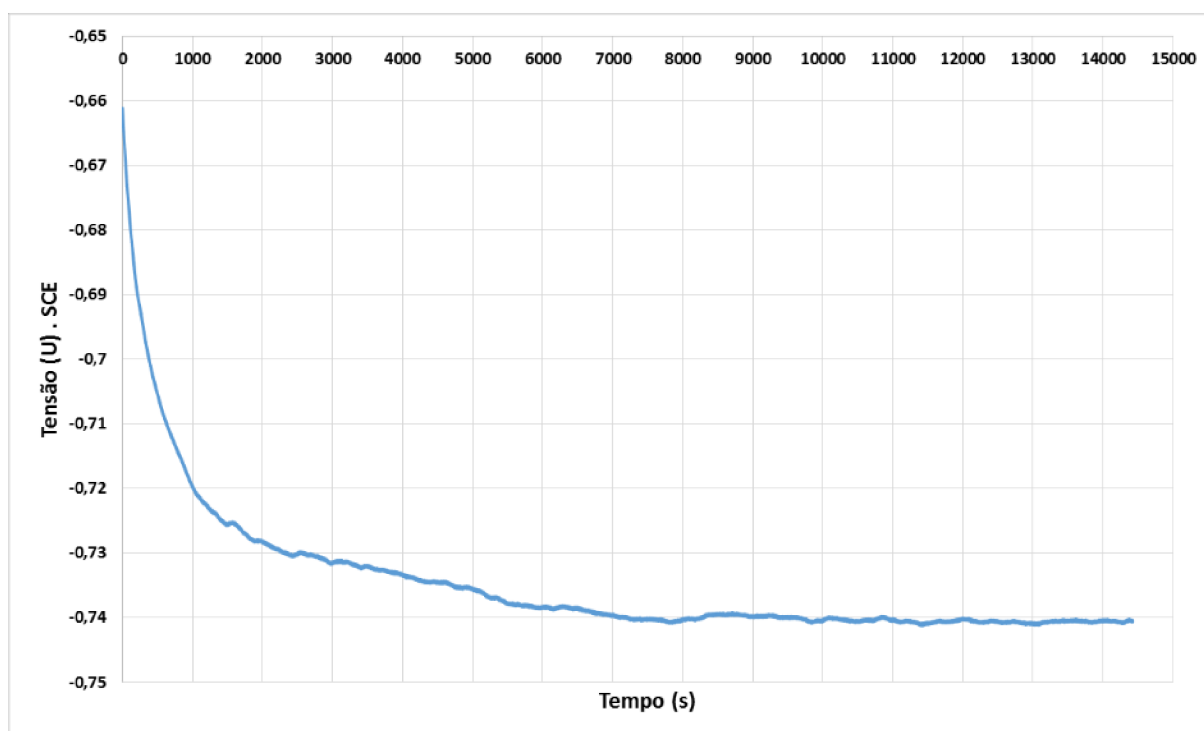


Figura 3.5 – Exemplo de ensaio de cronopotenciometria.

Após estabilizado o potencial de corrosão do material em relação ao eletrodo de referência, aplica-se um potencial crescente no corpo de prova, plotando este potencial em relação a resposta em corrente do material. Nomeia-se este ensaio de polarização potenciodinâmica, podendo ser identificada em sua curva as fases catódicas, anódicas e passivas do sistema em questão, bem como o potencial de corrosão (E_{cr}) e sua corrente correspondente (I_{cr}), como ilustra a Figura 3.6.

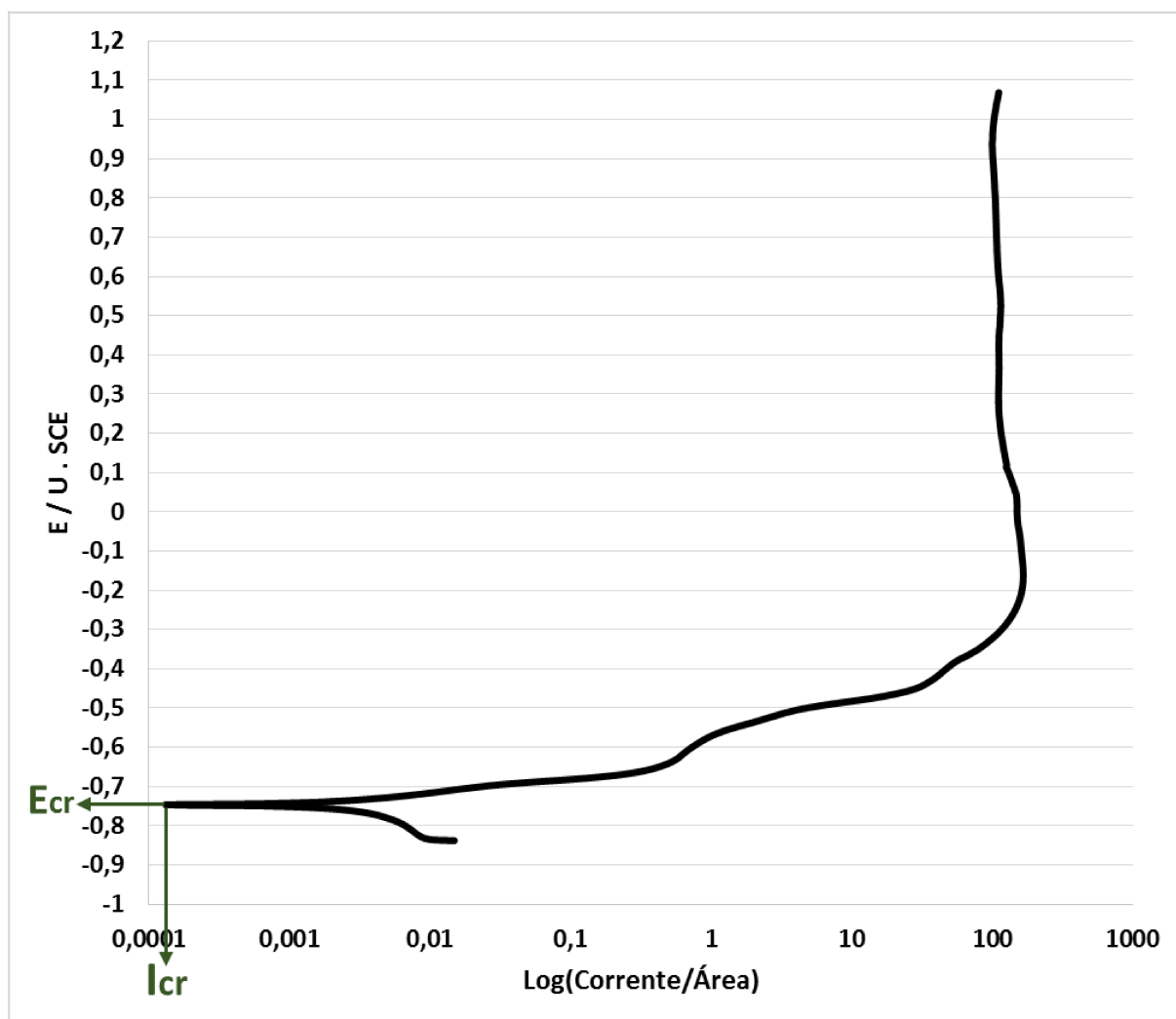


Figura 3.6 – Curva típica de um ensaio de polarização potenciodinâmica para uma amostra de ferro fundido cinzento.

3.3 ADAPTAÇÃO DA TÉCNICA MECT PARA A TEXTURIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES CILÍNDRICAS

Para os ensaios de texturização superficial foram utilizados como corpos de prova réplicas de camisas do motor da motocicleta Honda CRF 450® tal qual utilizados por Morris et al (2014). Os cilindros possuíam 97,5 mm de altura, 96 mm de diâmetro externo. As réplicas em questão tiveram suas superfícies internas lixadas por lixas de granulometria 80, 120, 220, 320, 400, 600 1200 e 2000, sendo então os cilindros divididos em grupos três grupos de diâmetros internos 96,3, 96,2 e 96,1 mm. Um exemplar de cilindro utilizado é ilustrado na Figura 3.7.



Figura 3.7 – Réplica de cilindro automotivo utilizado nos testes de texturização superficial.

Os equipamentos destinados a pulsar o sinal de tensão durante o teste são detalhados na Figura 3.8, sendo utilizados uma fonte de tensão TCA-75-40 do fabricante TECTROL®, o equipamento modulador de sinal MFG-4202 do fabricante MINIPA® e um o circuito pulsador de sinal de tensão.

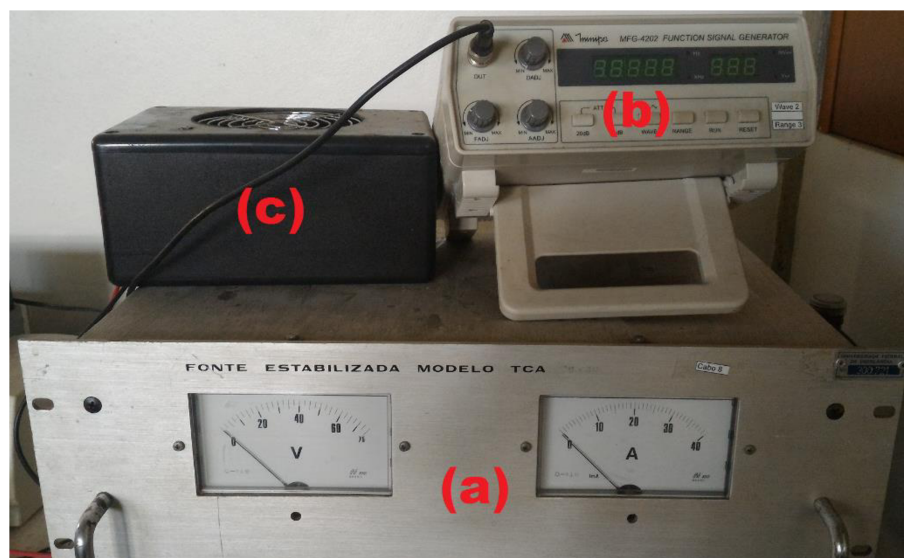


Figura 3.8 – Equipamento utilizado na geração e tratamento da tensão utilizada durante o MECT. (a) Fonte de tensão. (b) Modulador de sinal. (c) Circuito utilizado para pulsar o sinal.

Em virtude da técnica MECT (COSTA; HUTCHINGS, 2009; PARREIRA; GALLO; COSTA, 2012) ter sido desenvolvida para texturizar superfícies planas, a texturização de superfícies cilíndricas requereu uma série de adaptações na técnica, as quais são descritas nessa seção.

A ferramenta utilizada no processo de texturização foi fabricada a partir de um tubo de aço inox AISI 304 austenítico, tubo o qual possuía 100 mm de altura, 96 mm de diâmetro externo e 95,5 mm de diâmetro interno. Esta ferramenta foi perfurada a laser onde foram inseridos os padrões em “V” a serem implantados nos corpos de prova pelo método de texturização superficial sem mascaramento. Após perfurada a laser a ferramenta teve sua superfície externa pintada eletrostaticamente, visto esse método de pintura aderir apenas as regiões da peça carregadas eletricamente, não “entupindo” os furos feitos a laser. Na superfície interna da ferramenta foi soldado um contato elétrico para que seja possível utilizar a mesma no método MECT. A Figura 3.9 ilustra a ferramenta utilizada durante os testes.



Figura 3.9 – Ferramenta utilizada para texturização de cilindros automotivos.

A câmara de texturização utilizada para conter o eletrólito, ferramenta e corpo de prova foi usinada a partir de um tarugo de Nylon, visto este material ser isolante elétrico, ser de fácil usinabilidade e possuir elevada resistência a corrosão. No design desta câmara de texturização deve-se atentar para que a mesma mantenha a ferramenta e a peça coaxiais, fazendo assim com que a D_{fp} não varie para diferentes as regiões a serem texturizadas. O eletrólito deve também ter espaço para fluir livremente através da D_{fp} durante toda a duração do ensaio, permitindo assim que um novo fluxo de eletrólito eletrizado reaja com o corpo de prova.

O primeiro modelo de câmara de texturização, ilustrado na Figura 3.10, projetado falhou por não permitir a saída efetiva do eletrólito que ficava na interface entre a ferramenta e a peça, fazendo com que apenas o primeiro pulso eletrizado dissolvesse anodicamente de maneira efetiva a superfície do material. Durante os pré-testes, mesmo para tempos de teste de 600 segundos, a uma tensão de 30 V e uma D_{fp} de 100 μm , a profundidade média dos padrões não ultrapassou os 10 micrometros conforme ilustra a Figura 3.11.

Para os testes posteriores foi idealizado um novo modelo de câmara de texturização, exibida na Figura 3.12, a qual permite mais facilmente a saída do eletrólito da região entre a ferramenta e a peça. A diferença básica entre os dois modelos se dá pelo modo de prender o corpo de prova, o qual não é mais completamente envolto pela câmara de texturização, sendo esta região livre responsável pelo fluxo de eletrólito para fora da Dfp permitindo que o próximo pulso eletrizado texturize mais efetivamente a superfície, conforme ilustra o esquema da Figura 3.13.



Figura 3.10 – Primeiro modelo da câmara de texturização.

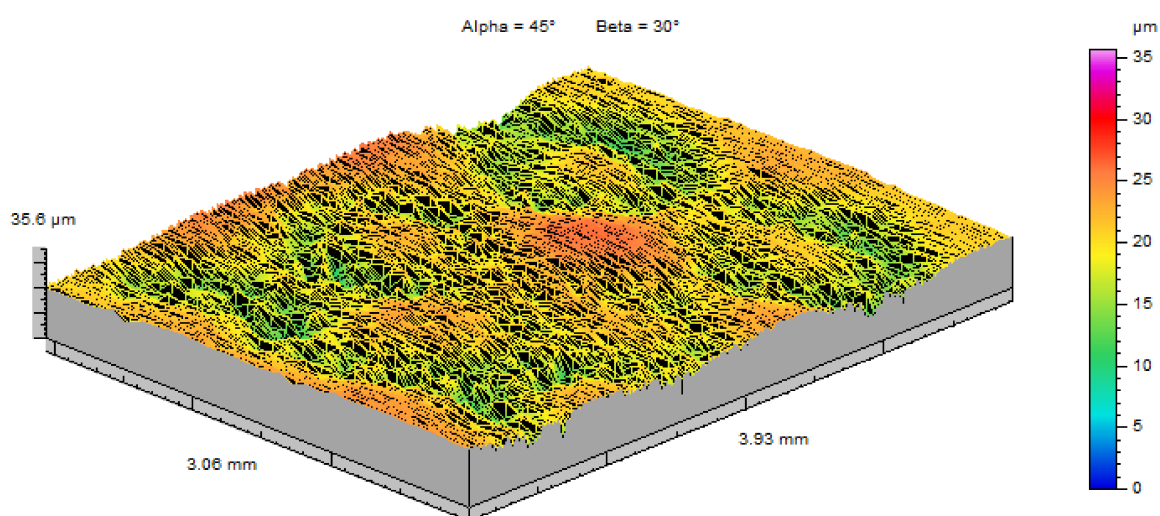


Figura 3.11 – Padrões superficiais inseridos com primeiro projeto de câmara de texturização.



Figura 3.12 – Novo modelo da câmara de texturização.

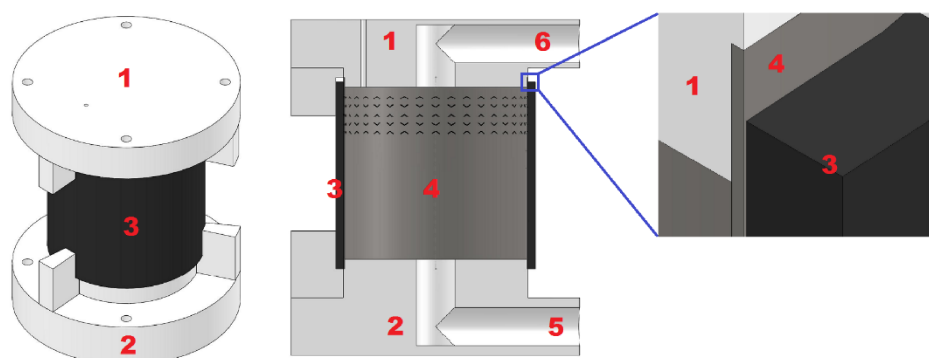


Figura 3.13 – Novo modelo de câmara de texturização. 1) Tampa superior do equipamento de texturização feita em Nylon. 2) Tampa inferior do equipamento de texturização feita em Nylon. 3) Camisa de cilindro feita de ferro fundido cinzento. 4) Ferramenta de aço inox AISI 304 austenítico perfurada a laser. 5) Entrada do eletrólito. 6) Saída do eletrólito.

3.4 ENSAIOS DE TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL

É possível encontrar na literatura (COSTA; HUTCHINGS, 2009; PARREIRA; GALLO; COSTA, 2012) parâmetros de texturização a serem usados em amostras de aço carbono. Essa seção descreve ensaios cujo objetivo foi encontrar os parâmetros mais adequados para a texturização de ferros fundidos cinzentos, de forma que a técnica possa ser utilizada para texturizar cilindros automotivos.

Os ensaios de texturização foram realizados utilizando-se o aparato descrito na Figura 3.13. Foram avaliados a influência de 3 parâmetros no processo: a distância entre a ferramenta e a peça (D_{fp}), a tensão e o tempo. Os testes foram organizados de acordo com o esquema da Figura 3.14. A fim de avaliar a reprodutibilidade dos ensaios foram realizadas três repetições para cada condição ensaiada.

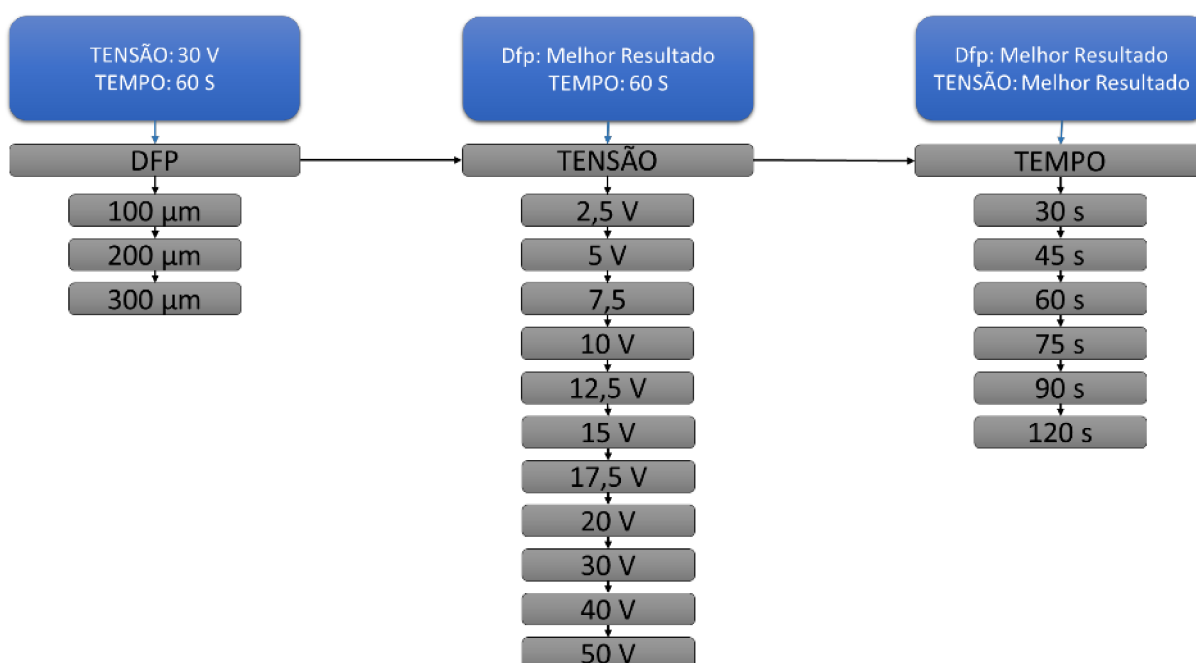


Figura 3.14 – Sequência de ensaios feitos com a finalidade de encontrar os parâmetros de texturização superficial do ferro fundido cinzento.

Após os testes foram realizadas interferometrias a laser das superfícies texturizadas, sendo avaliadas a influência de *Dfp*, tensão e tempo sobre a relação entre a profundidade e a largura (*Rpl*) dos motivos individuais que compõem as texturas (bolsos). Além disso, avaliou-se a rugosidade final nas regiões entre os bolsos.

Após encontrar-se as condições ótimas para a texturização das superfícies cilíndricas de ferro fundido, foram também texturizadas amostras planas de ferro fundido cinzento. Estas amostras foram utilizadas nos ensaios bloco sobre anel, descritos a seguir na seção 3.5 que objetivam avaliar o comportamento tribológico de superfícies de ferro fundido cinzento texturizadas por MECT. Quanto à rugosidade inicial das amostras planas antes dos ensaios de texturização, os corpos de prova foram lixados e polidos até um acabamento final feito com sílica coloidal (0,06 µm), visando com isso minimizar os efeitos da rugosidade inicial dos testes no resultado, por não ser este o escopo deste trabalho.

O equipamento utilizado para texturizar estas amostras de superfície plana o mesmo utilizado por Parreira; Gallo; Costa (2012). As ferramentas utilizadas para texturizar os corpos de prova foram confeccionados a partir de chapas laminadas de aço inoxidável AISI 304 austenítico, as quais possuem 10 mm de largura, 10 mm de altura e 0,3 mm de espessura. Estas chapas foram perfuradas a laser e passaram por pintura eletrostática em uma de suas faces tal qual os cilindros utilizados nos testes de texturização anteriores. Um exemplo de ferramenta para texturizar superficialmente os corpos de prova é ilustrado na Figura 3.15.

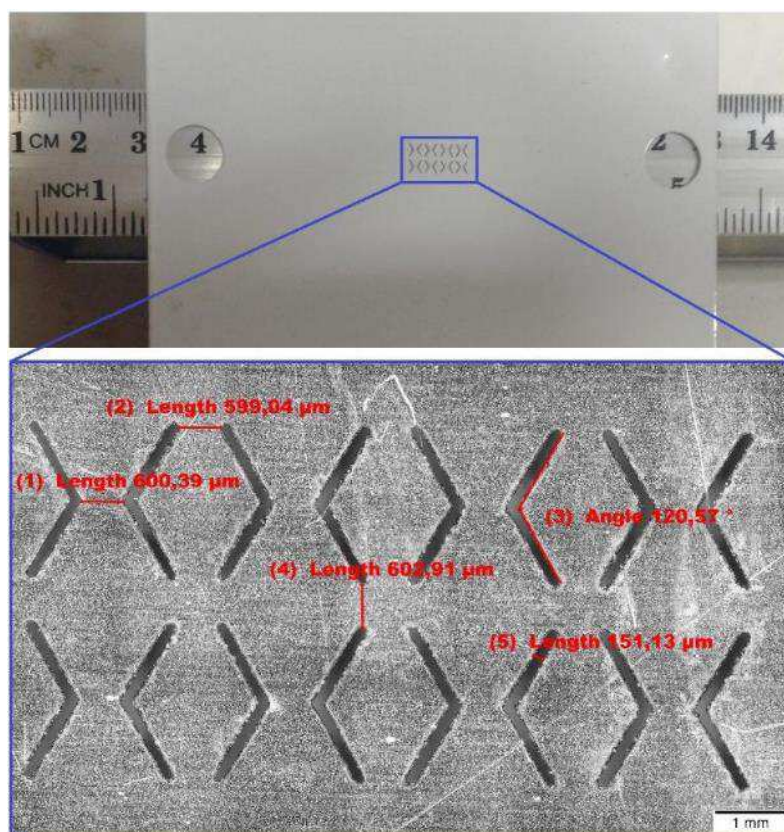


Figura 3.15 – Exemplo de ferramenta utilizada para texturizar superficialmente corpos de prova para o ensaio anel-bloco.

3.5 ENSAIOS TRIBOLÓGICOS BLOCO SOBRE ANEL

Com o objetivo de estudar os efeitos da texturização superficial na redução do coeficiente de atrito em ensaios lubrificadas de amostras de ferro fundido cinzento foram realizados ensaios bloco sobre anel. Os anéis utilizados nos testes são os padrões fornecidos pela Falex® do aço SAE 4620 com dureza variando entre 753 e 775 HV. Quanto as rugosidades dos anéis utilizados foram feitas interferometrias a laser de uma área de 1 mm² em três diferentes posições da sua superfície, sendo definidos como aceitáveis para os testes os anéis que possuíssem o parâmetro S_q entre 0,19 e 0,21 µm. O lubrificante utilizado durante os testes foi o óleo mineral SAE 40 com uma viscosidade (η_0) variando de 159.9 cSt a 40 °C até 15.2 cSt a 100 °C e coeficiente de pressão-viscosidade (α) de 2.93 GPa⁻¹.

Os blocos foram fabricados com as dimensões conforme a norma ASTM D271 94 (2014), tendo 6,35 mm de largura, 15,76 mm de comprimento e 10 mm de altura, sendo ilustrados na Figura 3.16. As amostras foram divididas em 3 grupos. O primeiro grupo

consistia de amostras lixadas e polidas até um acabamento superficial correspondente a um $S_q = 0,098 \pm 0,004 \mu\text{m}$.

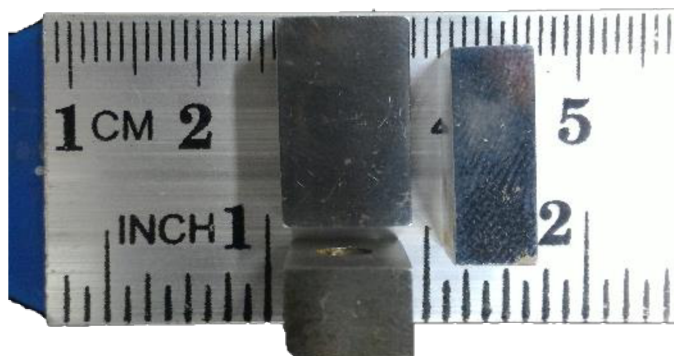


Figura 3.16 – Corpos de prova destinados aos ensaios Anel-bloco.

Além do polimento, o segundo grupo de amostras foi texturizado pela técnica MECT. Os padrões de textura consistiam de arranjos de bolsos em “V”, cujas dimensões (em escala de aproximadamente 6,5 vezes) e distribuição foram confeccionados de acordo com otimizações obtidas por Morris (MORRIS et al., 2014). As dimensões médias dos padrões em “V” das ferramentas são ilustradas na Figura 3.17. A rugosidade nas regiões externas aos padrões superficiais foi estimada como $S_q = 0,211 \pm 0,032 \mu\text{m}$.

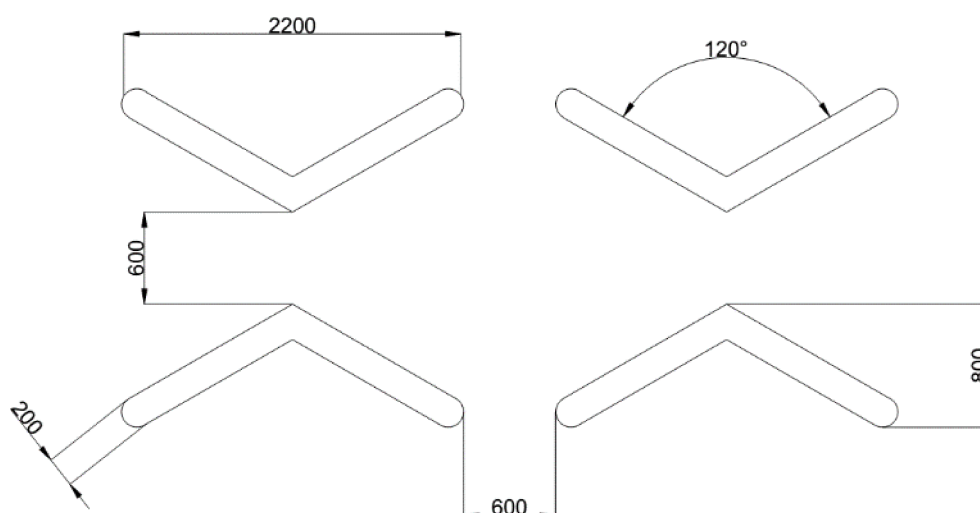


Figura 3.17 – Dimensões médias dos padrões em “V”. Cotas em micrometros (μm).

O terceiro grupo de amostras passou por um processo de polimento eletroquímico, usando o mesmo eletrólito, tensão e tempo utilizados para a texturização superficial, apresentando uma rugosidade de $S_q = 0,171 \pm 0,027 \mu\text{m}$. O motivo para a utilização dessas amostras é que isso permitiria separar o efeito da dissolução anódica na exposição dos veios

de grafita presente nos ferros fundidos cinzentos do efeito da presença dos bolsos em “V” sobre o desempenho tribológico das superfícies texturizadas. Como será visto nos resultados dos testes de texturização, a técnica MECT promove uma dissolução anódica residual nas regiões próximas aos bolsos, a qual expõe os veios de grafita. De fato, o polimento eletroquímico já é usado com sucesso como método de tratamento superficial em ferros fundidos cinzentos para ressaltar os veios de grafita e assim otimizar o efeito do ferro fundido como material auto lubrificante (SUGISHITA; FUJIYOSHI, 1981).

Micrografias para as três condições superficiais testadas utilizadas neste trabalho são apresentadas na Figura 3.18. A Figura 3.18a mostra a superfície após o polimento mecânico final. A Figura 3.18b ilustra a matriz perlítica do ferro fundido cinzento utilizado é evidenciada por um ataque de Nital 2% por 30 segundos, tendo essa figura apenas a finalidade de evidenciar a matriz do material em questão, uma vez que não foram utilizadas amostras atacadas por Nital nos testes. A superfície das amostras polidas eletroquimicamente é representada pela Figura 3.18c, onde observa-se os veios de grafita ressaltados. Por fim, a Figura 3.18d representa a superfície a qual foi submetida ao MECT, sendo a Figura 3.18e o detalhe de uma região entre dois motivos superficiais.

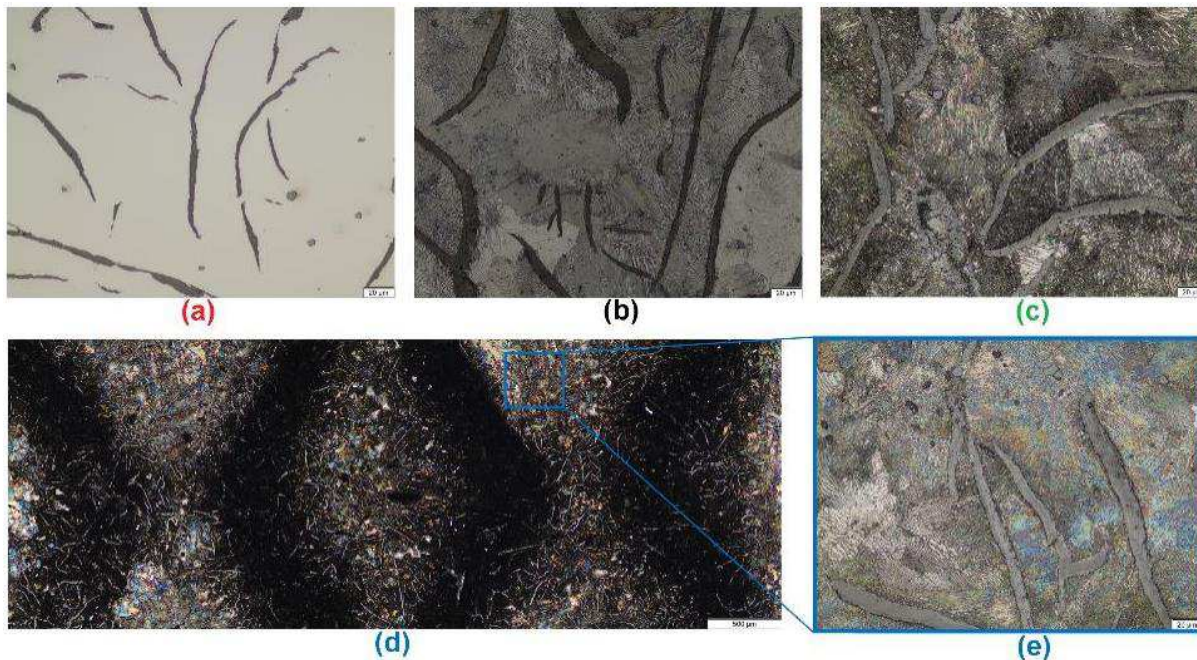


Figura 3.18 – Micrografias ópticas das condições superficiais de ensaio utilizadas neste trabalho. (a) superfície polida mecanicamente. (b) superfície polida mecanicamente e atacada com Nital 2% por 30 segundos. (c) Superfície polida eletroquimicamente. (d) Superfície texturizada por MECT. (e) Detalhe de uma região entre motivos superficiais da superfície texturizada.

Como tribômetro para os ensaios anel-bloco foi utilizado o equipamento Falex Block-on-Ring® modelo 374-89F-107-2, cuja câmara hermética de testes é exibida na Figura 3.19.

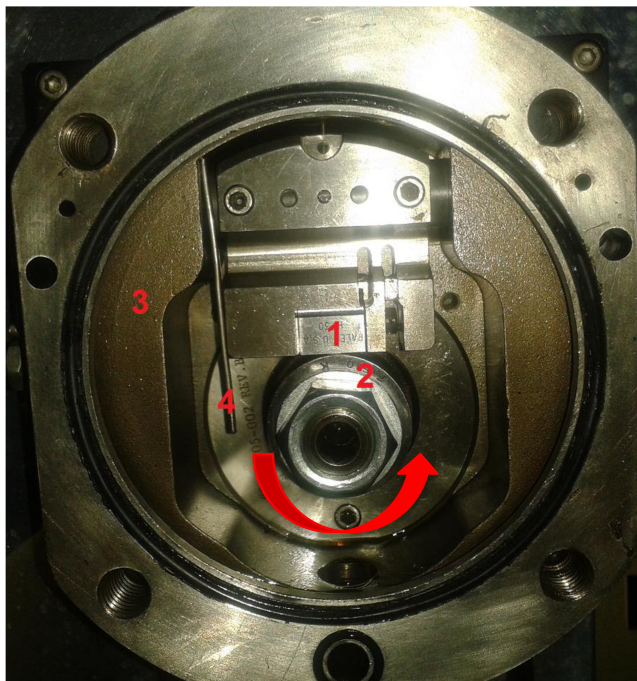


Figura 3.19 - Tribômetro Block on Ring – FALEX®. O sentido de rotação do eixo é indicado pela seta em vermelho. 1) Corpo de prova. 2) Anel utilizado como contra corpo. 3) Câmara do lubrificante. 4) Termopar.

Foram realizados testes com uma carga de 35 kg e duração de 20 minutos, pois com base nos pré-testes esta foi a menor carga em que se conseguiu um gráfico com uma quantidade de ruído relativamente baixa em relação aos testes anteriores no sistema analisado. Além disso, para esta carga e tempo conseguiu-se estabilizar a curva do coeficiente de atrito para os testes com amostras texturizadas e não texturizadas. No que se refere à velocidade de rotação do anel em relação ao bloco foram feitos testes a 200 e 600 rpm, visto que a velocidade relativa entre os corpos em contato é um importante fator no mecanismo de lubrificação vigente, como já mostrado na curva de Stribeck (Figura 2.6). A temperatura média dos foi mensurada como 75 °C e 90 °C para os testes a 200 e 600 rpm respectivamente.

A pressão média de contato inicial foi calculada utilizando a equação de contato de Hertz para um sistema linha-plano, conforme a equação 3.1 (WILLIAMS, 1994).

$$P_m = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{E^*W}{R^*L\pi}} \quad 3.1$$

Onde E^* é o módulo de elasticidade do contato, R^* é o raio de contato, L é a largura do contato e W é a carga. Utilizando esta equação foi mensurada uma pressão média de contato de 0.229 GPa entre o bloco e o anel.

A espessura inicial do filme lubrificante foi calculada utilizando a equação de Dowson-Hamrock (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013), mostrada na Equação 3.2.

$$H^* = 1.6G^{0.6}U^{0.7}W^{-0.13} \quad 3.2$$

Onde G , U e W são respectivamente, os parâmetros adimensionais do material, velocidade e carga, mostrados nas equações 3.3, 3.4 e 3.5.

$$G = \alpha E^* \quad 3.3$$

$$U = \frac{V\eta_0}{E^*R^*} \quad 3.4$$

$$W = \frac{w}{E^*A} \quad 3.5$$

Onde α é o coeficiente de pressão-viscosidade ($m^2.N^{-1}$), V é a velocidade do anel em relação ao bloco ($m.s^{-1}$), η_0 é a viscosidade do lubrificante (Pa.s), w é a carga e A é a área de contato. Para 200 e 600 rpm a espessura inicial de filme lubrificante foi estimada como 0.223 e 0.311 μm respectivamente. Utilizando estes valores e os valores da rugosidade superficial (S_q) para cada condição testadas foi possível calcular o parâmetro (λ) para cada condição (Tabela 3.1), sendo este parâmetro definido na Equação 3.6, onde S_q^* é a rugosidade combinada entre o bloco (S_{qB}) e o anel (S_{qR}), dada pela Equação 3.7 (GREENWOOD; JOHNSON; MATSUBARA, 1984). Em virtude do desgaste causado no bloco pelo anel pelos instantes iniciais de ensaio, é esperado um rápido aumento na rugosidade das amostras polidas mecanicamente a 600 rpm, aumentando assim seu λ -Coeficiente para valores abaixo de 3, estando assim a parte majoritária destes ensaios também no regime misto. Por outro lado, é esperado que este desgaste mude também a geometria do contato, fazendo com que o contato fique mais conforme com o prosseguimento do teste, sendo este fato discutido nos resultados.

$$\lambda = \frac{H^*}{S_q^*} \quad 3.6$$

$$S_q^* = \sqrt{S_{qB}^2 + S_{qR}^2} \quad 3.7$$

Tabela 3.1 - λ -Coeficiente para cada condição testada.

Condição Superficial	Rotação (rpm)	H* (μm)	S_q^* (μm)	λ
Polida Mecanicamente	200	0.324	0.233 ± 0.004	1.455
Polida Eletroquimicamente	200	0.324	0.284 ± 0.032	1.143
Texturizada	200	0.324	0.263 ± 0.027	1.231
Polida Mecanicamente	600	0.699	0.233 ± 0.004	3.138
Polida Eletroquimicamente	600	0.699	0.284 ± 0.032	2.465
Texturizada	600	0.699	0.263 ± 0.027	2.656

Durante os ensaios foram traçadas curvas do coeficiente de atrito em função do tempo, curvas estas utilizadas para atestar a efetividade da texturização superficial sob regimes envolvendo contato lubrificado. Após finalizado o ensaio as amostras foram limpas com acetona e passaram por interferometria a laser, onde sua superfície foi mapeada e através da utilização do software MountainsMap® o volume das marcas de desgaste foi mensurado.

A sequência dos ensaios pode ser melhor visualizada na Figura 3.20, sendo que para cada ensaio foram realizadas três repetições, bem como feitas interferometrias a laser da superfície desgastada dos blocos para avaliação de perda volumétrica de material. Foram feitas também análises por microscopia eletrônica de varredura das trilhas de desgaste após os ensaios, utilizando o recurso de EDS para verificação da formação de possíveis tribocamadas.



Figura 3.20 – Sequência de ensaios anel-bloco.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA

Os comportamentos catódico e anódico do Ferro Fundido Cinzento são ilustrados na Figura 4.1. Nesta figura, compara-se o uso de uma solução em água destilada de sal de cozinha comum como eletrólito com o de uma solução de NaCl *PA*, ambas na mesma concentração. São apresentados resultados de três repetições para cada eletrólito. Observa-se que as curvas de polarização são muito semelhantes entre ambos os eletrólitos, sendo o potencial de corrosão para ambos os casos aproximadamente -0,74 V.

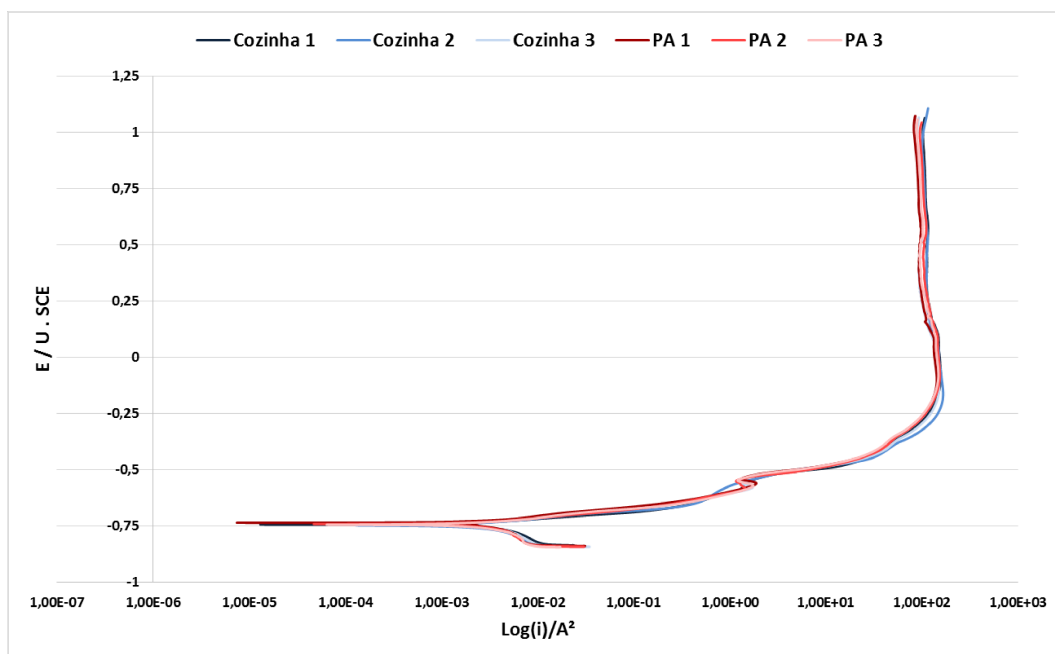


Figura 4.1 – Ensaio de polarização potenciodinâmica para o NaCl *PA* e para o sal de cozinha.

Além de outras impurezas em pequenas quantidades, a principal diferença entre o NaCl *PA* é a adição de KI. Com base nos resultados da Figura 4.1, valida-se a utilização do sal de cozinha em substituição ao NaCl *PA*, visto a pouca diferença entre os comportamentos

eletroquímicos dos dois sistemas. A diminuição do custo deste estágio do processo é um ponto importante na sua viabilidade de implementação em escala industrial, visto o custo do sal de cozinha ser cerca 10 vezes menor que o NaCl PA.

4.2 TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL DE CILINDROS AUTOMOTIVOS

4.2.1 Influência da Distância entre a Ferramenta e a Peça (D_{fp})

Com o objetivo de entender a influência da distância entre a ferramenta e a peça (D_{fp}) foi fixada uma tensão inicial de 30 V e um tempo de 60 segundos, sendo testadas D_{fp} de 100, 200 e 300 μm . Não foram testadas D_{fp} menores que 100 μm dada a dificuldade de acoplamento e desacoplamento da ferramenta e da peça nestas condições, especialmente após os ensaios onde ambas as partes se encontram molhadas.

Mapas de topografia superficial 3D para as diferentes D_{fp} investigadas são apresentados na Figura 4.2. A análise visual destes mapas mostra que foi possível a obtenção de um padrão de textura com arranjos em “V” nos três casos. Além disso, observa-se que aparentemente as regiões fora dos bolsos em “V” também sofrem dissolução, mas com muito menor intensidade.

Esta localização da dissolução anódica na região mais próximas dos furos em “V” presentes na tampa da ferramenta ocorre devido à menor queda ôhmica nessas regiões (COSTA; HUTCHINGS, 2009), que estão mais próximas das regiões condutoras na tampa da ferramenta (Figura 2.18). Além disso, o transporte de massa é mais eficiente devido à menor dispersão do jato de eletrólito.

Um dos parâmetros para avaliar a eficiência nesta localização da dissolução anódica nas regiões dos bolsos é a rugosidade superficial fora dos bolsos. A Figura 4.3 apresenta os valores de rugosidade quadrática média (S_q) para os diferentes valores de D_{fp} . Observa-se que para uma $D_{fp} = 100 \mu\text{m}$ obteve-se o menor valor de S_q na região fora dos bolsos, correspondendo a superfícies mais lisas.

Com base nestes resultados se escolheu como melhor D_{fp} 100 μm , tanto pela maior homogeneidade dos padrões inseridos como também pelo menor valor do parâmetro S_q . O valor mais baixo de S_q e a melhor definição dos padrões inseridos para a D_{fp} de 100 μm podem ser explicados com base na Figura 2.19, visto que menores valores da distância entre a ferramenta e a peça resultam em uma menor queda ôhmica. Além disso, tem-se um transporte de massa mais eficiente dada a menor dispersão do jato de eletrólito. Essa menor

dispersão também deve resultar menor rugosidade nas regiões entre os bolsos, pois a dissolução concentra-se melhor apenas na região desejada. O valor da melhor Dfp entra em acordo com o obtido por Parreira; Gallo; Costa (2012) visto que em ambos os casos foram texturizadas superfícies com conformidade entre a ferramenta e a peça.

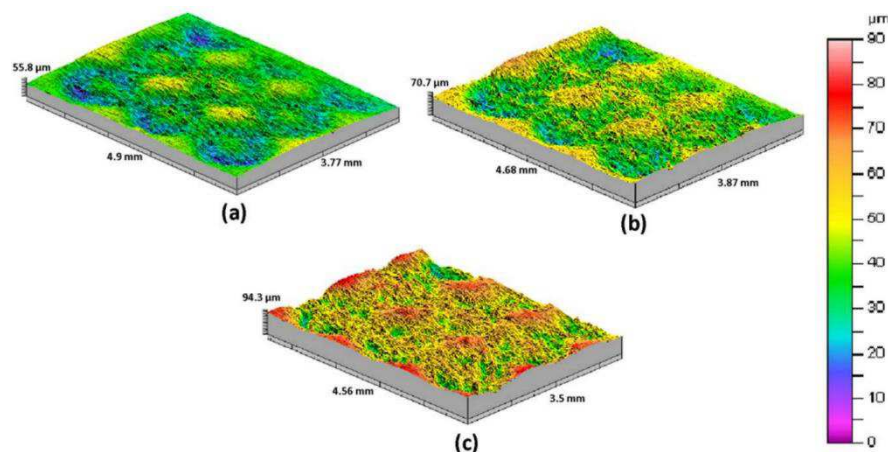


Figura 4.2 – Resultados das interferometrias a laser para Dfp 's de: (a) 100 μm ; (b) 200 μm ; (c) 300 μm ;

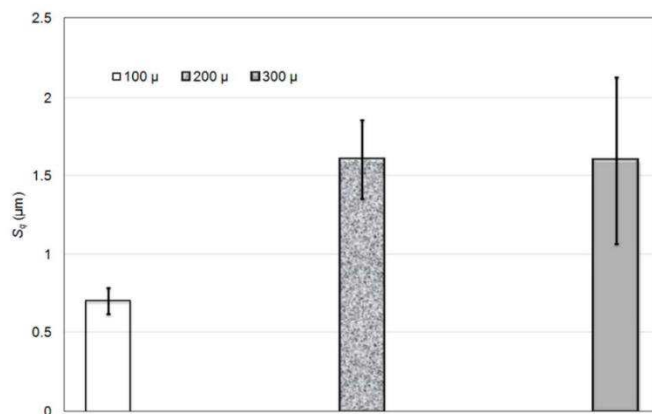


Figura 4.3 – Rugosidade entre os padrões inseridos para as amostras utilizadas na avaliação da melhor Dfp .

4.2.2 Influência da Tensão

Uma vez escolhida a Dfp mais efetiva para o processo, iniciou-se a investigação para a melhor tensão de trabalho. Inicialmente foram investigadas as tensões entre 2.5 e 50 V (2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20, 30, 40 50), para uma Dfp de 100 μm e um tempo de 60 s.

A Figura 4.4 ilustra a perda de resolução dos padrões em forma de “V” obtidos para tensões a partir de 20 V. Acredita-se que esse fenômeno possa ser explicado pelo fato da

dissolução anódica ser muito intensa para tensões a partir de 20 V. Neste caso, é possível que grandes quantidades de grafita sejam arrancadas por perda de suporte mecânico ao ter sua matriz dissolvida anodicamente, conforme sugere a Figura 4.5. Apesar do uso de corrente pulsada, como é grande o volume de grafita arrancada a cada pulso eletrizado para tensões acima de 20 V, os pulsos não eletrizados não são suficientes para “limpar” a grafita acumulada da superfície usinada. Este acúmulo de grafita é mostrado na Figura 4.6. Como a grafita é um componente de maior inércia eletroquímica quando comparada com o ferro, é possível que a mesma impeça que a dissolução anódica continue na região desejada, mas sim nas regiões adjacentes, diminuindo com isso a resolução dos padrões inseridos.

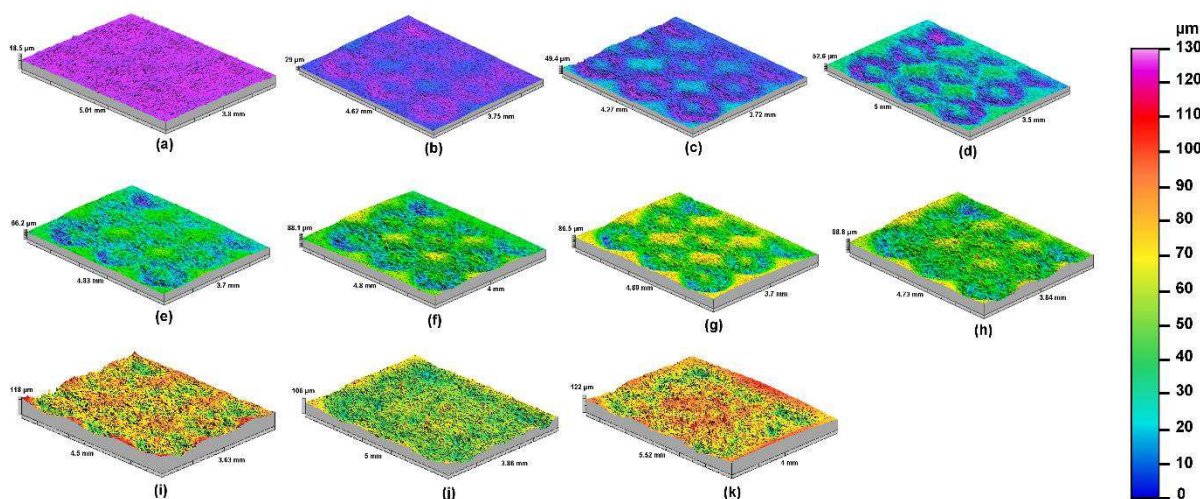


Figura 4.4 - Resultados das interferometrias a laser para tensões de: (a) 2.5 V; (b) 5 V; (c) 7.5 V; (d) 10 V; (e) 12.5 V; (f) 15 V; (g) 17.5 V; (h) 20 V; (i) 30 V; (j) 40 V; (k) 50 V.

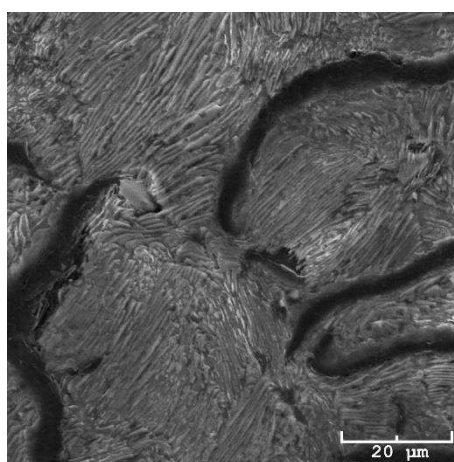


Figura 4.5 – Microscopia eletrônica de varredura da região interna de um padrão superficial inserido por *MECT* em uma amostra de ferro fundido cinzento.



Figura 4.6 - Peça de ferro fundido cinzento submetida ao *MECT* para uma *Dfp* de 100 μm , um tempo de 60 s e uma tensão de 30 V. As regiões escuras correspondem a depósitos de grafita nas regiões onde deveria se concentrar a dissolução anódica.

Com base nestes resultados e na resolução da fonte de tensão disponível, foram investigados os valores adjacentes, tanto inferiores quanto superiores à tensão de 10 V. Foram calculados a profundidade e a largura médias dos motivos que compõem as texturas. A Figura 4.7a correlaciona profundidade e largura média dos motivos com a tensão aplicada para valores de tensão até 20 V. Analisando a Figura 4.7a, observa-se que de acordo com o previsto pela Equação (2.8), maiores tensões resultam em maiores profundidades dos motivos. Por outro lado, quando se aumenta a tensão, tanto o desvio padrão destas profundidades como as larguras dos motivos aumentam. Novamente, sugere-se que o aumento na quantidade de grafita arrancada pela perda de suporte mecânico da matriz, grafita essa a qual possui maior inércia química que o ferro, reduza a dissolução anódica em termos de profundidade e aumente em termos de largura dos bolsos.

Em seguida, calculou-se a relação entre a profundidade e largura dos motivos (*Rpl*). Na Figura 4.7b é plotado o valor de *Rpl* em função da tensão aplicada. Adicionalmente, apresenta-se na Figura 4.7b os valores do parâmetro *Sq* calculado na região entre os motivos (bolsos). Os resultados da Figura 4.7b mostram um aumento significativo do parâmetro *Rpl* até valores de 7,5 V. A partir deste valor, o efeito da tensão é menor. O máximo valor foi de aproximadamente 0.09, para tensões entre 12,5 e 17,5 V. Este valor está bem próximo de 0,1, descrito na literatura (RONEN; ETSION; KLIGERMAN, 2001; COSTA; HUTCHINGS, 2007) como ideal do ponto de vista de melhoria da eficiência de lubrificação e redução de atrito em condições de lubrificação hidrodinâmica. Por outro lado, as tensões de 7,5 e 10 V, apesar de apresentarem valores de *Rpl* ligeiramente menores (0,075 e 0,065 respectivamente) apresentaram a menor rugosidade nas regiões entre os bolsos. A Como o valor de *Rpl* foi ligeiramente superior para a tensão de 7,5 V, esta foi selecionada como a melhor tensão para a texturização eletroquímica de ferro fundido. No caso de aço carbono,

que não apresenta grafita, a dissolução anódica mais eficiente ocorreu para uma tensão de 30V (COSTA; HUTCHINGS, 2009; PARREIRA; GALLO; COSTA, 2012).

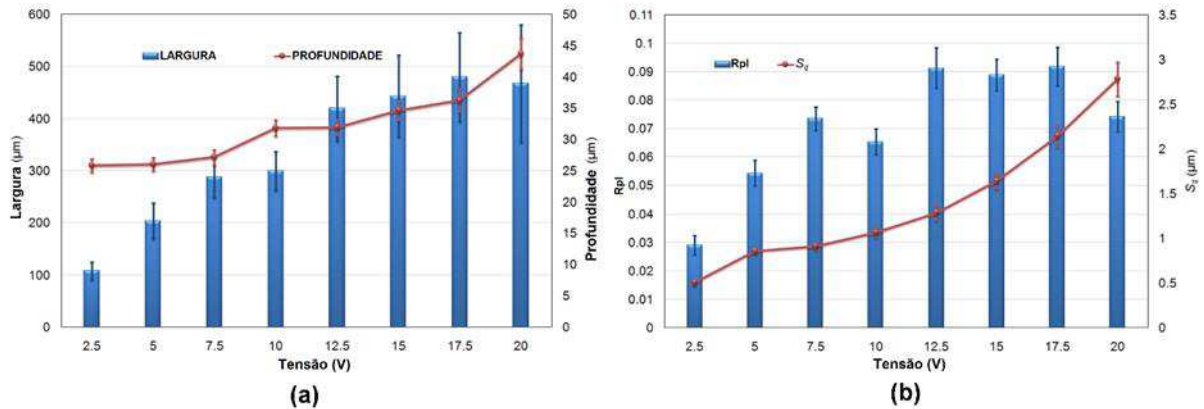


Figura 4.7 – (a) Profundidade e largura média dos padrões inseridos em função da tensão. (b) Relação profundidade/largura dos padrões inseridos e o parâmetro Sq das regiões adjacentes em função da tensão.

4.2.3 Influência da Tempo

Tendo a Dfp de 100 μm e a tensão de 7,5 V apresentado os melhores resultados iniciou-se a investigação do parâmetro de tempo de ensaio. Além do já testado tempo de 60 segundos, foram também testados os tempos de ensaio de 30, 45, 75, 90 e 120 segundos, conforme esquematizado na Figura 3.14. Os mapas topográficos 3D para os testes referentes ao tempo de ensaio são ilustrados na Figura 4.8. A Figura 4.9a ilustra a evolução da profundidade e da largura em função do tempo de ensaio, e a Figura 4.9b por sua vez exibe a variação da Rpl e do parâmetro Sq também em função do tempo.

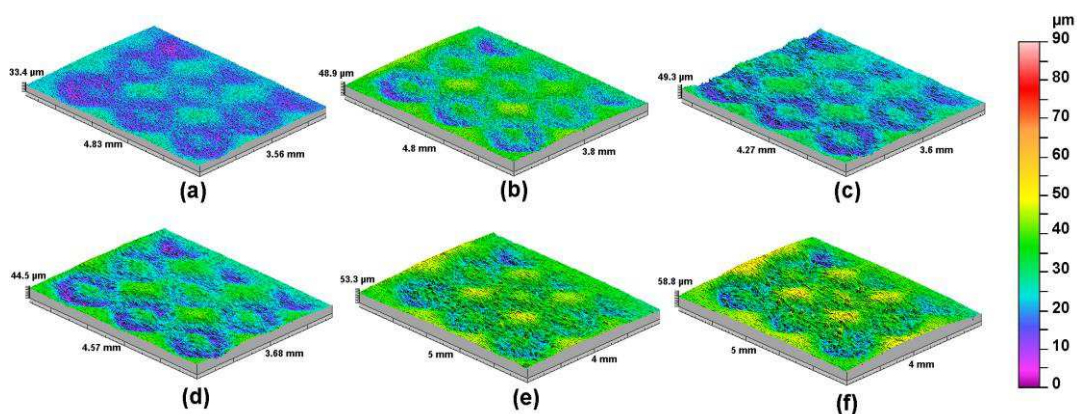


Figura 4.8 - Resultados das interferometrias a laser para tempos de ensaio de: (a) 30 s; (b) 45 s; (c) 60 s; (d) 75 s; (e) 90 s; (f) 120 s.

De acordo com a Figura 4.9a se observa uma leve tendência ao aumento da profundidade média com o aumento do tempo de ensaio, o que é compreensível dado o maior tempo para as reações anódicas ocorrerem. Uma possível explicação para a profundidade dos padrões inseridos não aumentar proporcionalmente com o tempo como previsto pela Equação 2.8 é o fato do filme de carbono formado durante o ensaio formar uma “pseudo” barreira apassivadora (Figura 4.6), dificultando a reação anódica da matriz do ferro fundido. A tendência de aumento da largura dos padrões com o tempo corrobora a possível influência dessa camada de carbono na região de trabalho, visto que as regiões próximas passam a ser mais favoráveis a dissolução anódica, resultando no aumento da largura dos padrões, bem como em um aumento da rugosidade das regiões próximas (medida através do parâmetro S_q) como visto na Figura 4.9b. Com base na R_{pl} ilustrado na Figura 4.9b o tempo de 60 segundos se manteve como melhor para aplicação do processo MECT na texturização superficial do ferro fundido cinzento.

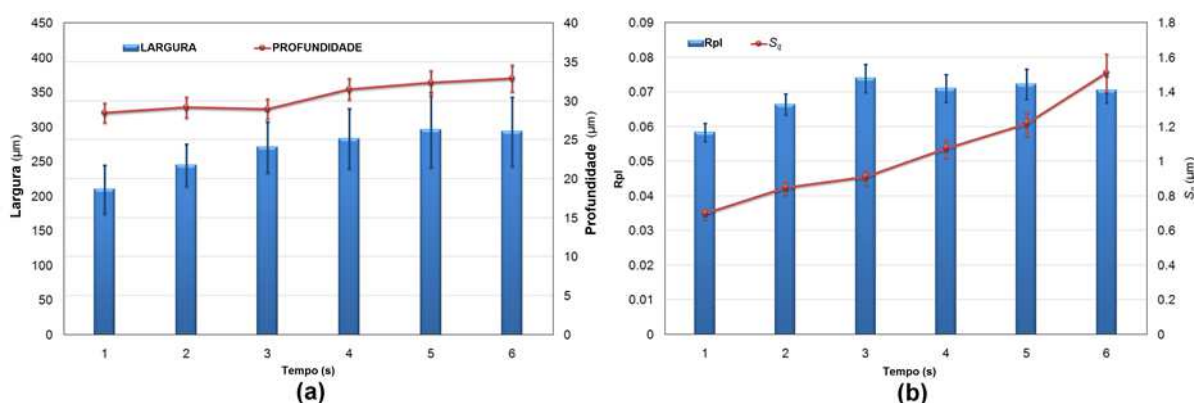


Figura 4.9 – (a) Profundidade e largura média dos padrões inseridos em função do tempo. (b) Relação profundidade/largura dos padrões inseridos e o parâmetro S_q das regiões adjacentes em função do tempo.

4.3 ENSAIOS TRIBOLÓGICOS BLOCO SOBRE ANEL

A Figura 4.10 ilustra os valores do coeficiente de atrito mensurado para os testes a 200 rpm (a) e 600 rpm (b). Apenas uma curva é apresentada para cada condição, mas diferentes reproduções das curvas foram feitas indicando boa reprodutibilidade. A evolução do coeficiente de atrito com o tempo mostrou um comportamento típico apresentado na literatura para testes bloco sobre anel (RAPOPORT et al., 2007; LU et al., 2015), onde um pico inicial é seguido por uma abrupta redução no atrito. Este período inicial de running-in foi observado

para todas as condições e velocidades. O período de running-in foi mais longo para as amostras polidas mecanicamente que para as polidas eletroquimicamente e texturizadas. Este fato se deve provavelmente a presença dos veios de grafita, os quais foram ressaltados pela dissolução anódica da matriz perlítica em volta dos mesmos. As propriedades de lubrificante sólido dos veios de grafita expostos durante o polimento eletroquímico (SUGISHITA; FUJIYOSHI, 1981) e MECT (DA SILVA, 2016) provavelmente contribuíram para a redução do coeficiente de atrito nos instantes iniciais dos testes, onde a velocidade de deslizamento é menor e por consequência a espessura do filme lubrificante também (SPIKES, 1997), agindo no regime de lubrificação limite. A ocorrência de lubrificação limite nos instantes iniciais de testes bloco sobre anel foram elegantemente reportadas por (RAPOPORT et al., 2007).

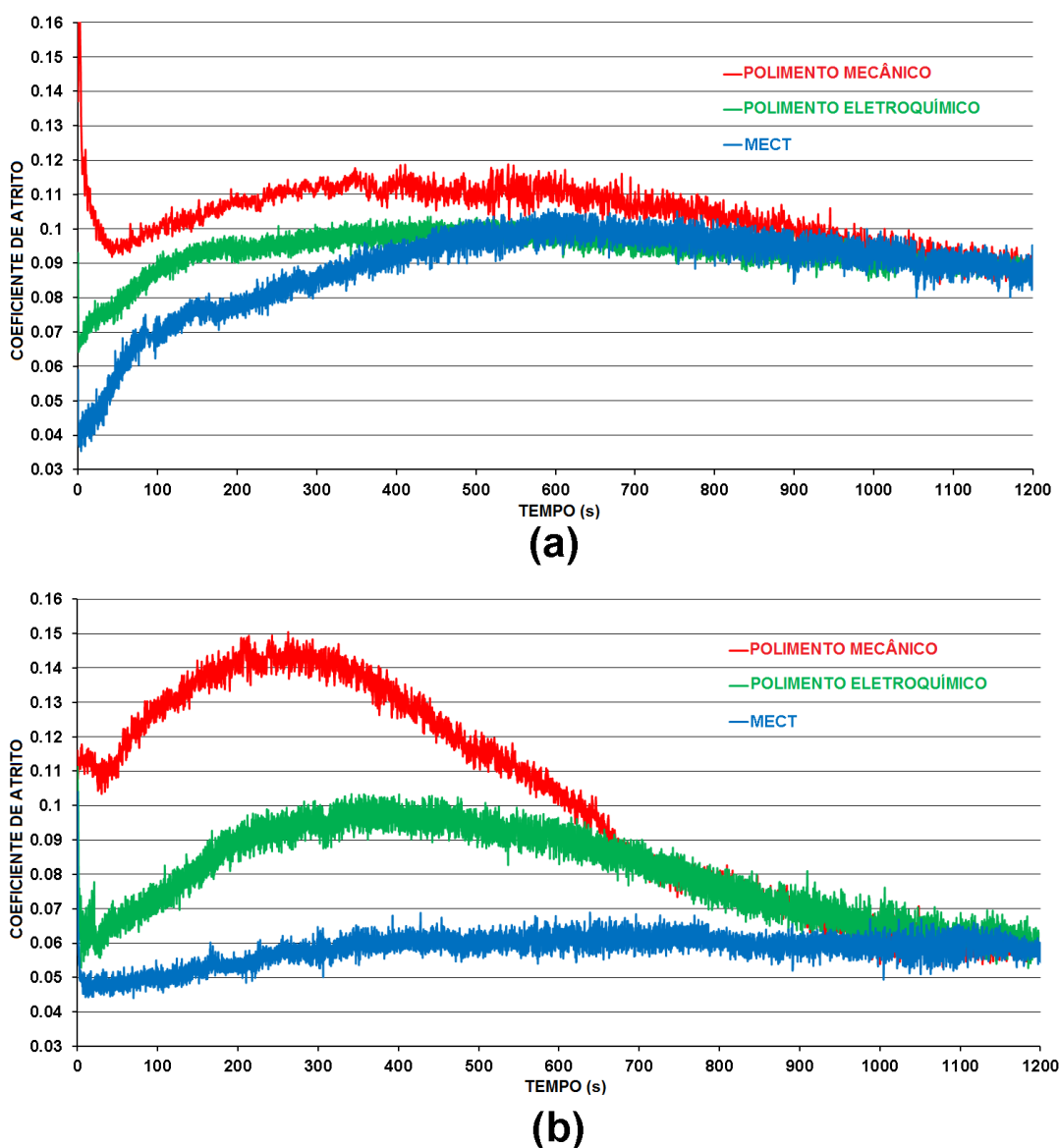


Figura 4.10 – Coeficiente de atrito em função do tempo para testes a 200 e 600 rpm.

Após um curto período inicial de regime transiente, uma redução drástica foi observada nos blocos texturizados quando comparados com os blocos polidos, onde os blocos polidos eletroquimicamente apresentaram um comportamento intermediário. O primeiro fato é relacionado as texturas superficiais em forma de “V”. Em condição de lubrificação mista, texturas superficiais podem ser muito úteis, tendo a contribuição dos bolsos na distribuição pressão hidrodinâmica e na ação como reservatórios de lubrificante ajudado na redução do coeficiente de atrito (KOVALCHENKO et al., 2004; BRAUN et al., 2014; MORRIS et al., 2014), mesmo para ferros fundidos (KIM; CHAE; CHOI, 2014). O segundo fato são os veios de grafita expostos, os quais agem como lubrificantes sólidos no contato. Este efeito secundário também ocorre para os blocos polidos eletroquimicamente, justificando seu comportamento intermediário. O efeito positivo da grafita durante o deslizamento de ferros fundidos (SUGISHITA; FUJIYOSHI, 1981), incluindo em testes bloco sobre anel (TETI et al., 2016), é largamente reportado na literatura.

Outro aspecto comum a todas as curvas apresentadas é que após o período de running-in, o atrito aumenta com o aumento do tempo, para logo em seguida cair. Este aumento no coeficiente de atrito é particularmente acentuado para os blocos polidos mecanicamente a 600 rpm. A fim de investigar mais profundamente este comportamento, alguns testes foram interrompidos após 250 segundos de ensaio, a fim de identificar o possível fenômeno que causa este pico no coeficiente de atrito. As calotas de desgaste medidas nestes testes foram mensuradas por interferometria 3D. Apesar das maiores distâncias deslizadas em virtude das maiores velocidades de rotação, a perda volumétrica após 250 segundos de ensaio foi muito maior a 200 rpm (0.03 mm^3) que para 600 rpm (0.01 mm^3). Isto ocorre porque a velocidades mais altas o filme lubrificante fica mais espesso (SPIKES, 1997), reduzindo contato entre as asperidades e o desgaste. Outro ponto foi que a temperatura mensurada foi menor para os testes a 600 rpm (75°C) que a 200 rpm (90°C), provavelmente em virtude de uma convecção mais eficiente. A menores temperaturas a viscosidade do lubrificante aumenta, aumentando a espessura do filme lubrificante (SPIKES, 1997).

Uma vez que os anéis são muito mais duros que os blocos, o desgaste se restringiu majoritariamente aos blocos, não sendo identificadas marcas de desgaste nos anéis. Por consequência, o desgaste progrediu em termos da mudança da geometria do contato de inicialmente um contato em linha para um contato mais conforme, mudança esta que ocorreu mais rapidamente nos testes a 200 rpm. A ocorrência de desgaste preferencial nos blocos menos duros e por consequência a transição entre um contato de linha não conforme para um contato mais conforme é discutido por RAPOPORT et al., (2007), utilizando um sensor de deslocamento.

Como exemplo, a Figura 4.11 apresenta as marcas de desgaste produzidas após estes testes interrompidos para os blocos polidos mecanicamente. Utilizando o software MontainsMap®, o raio de curvatura médio das marcas de desgaste foi mensurado utilizando 10 medições igualmente espaçadas para cada bloco. Para os testes a 200 rpm, o raio de curvatura nos blocos foi de 18.1 ± 0.22 mm, o que é muito próximo do raio do anel, e o raio das marcas de desgaste para os testes a 600 rpm foi de 22.4 ± 0.97 mm, logo menos conforme que seus análogos a 200 rpm. A pressão de contato cai substancialmente em contatos conformes quando comparada a contatos não conformes (JOHNSON, 1985). Logo, com o aumento da marca de desgaste aumenta também a conformidade, diminuindo a pressão de contato e aumentando a espessura do filme lubrificante. Após um certo grau de conformidade o filme lubrificante aumenta a ponto de reduzir significativamente o contato entre as asperidades, diminuindo o atrito para o deslizamento posterior.

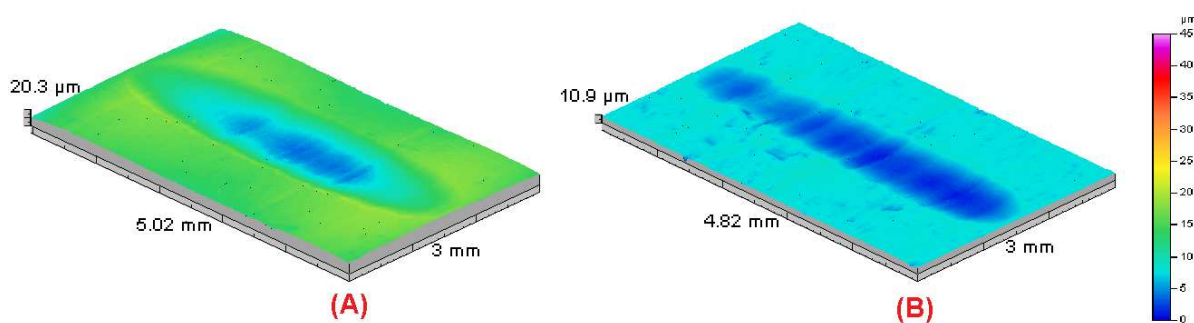


Figura 4.11 – Topografia das amostras polidas mecanicamente sujeitas a ensaios de 250 segundos de duração. (A) 200 rpm. (B) 600 rpm.

Ainda analisando a Figura 4.10 observa-se que para os testes a 200 rpm, após 500 segundos de ensaio, as curvas de coeficiente de atrito para os blocos texturizados e polidos eletroquimicamente tornam-se indistinguíveis, entretanto o atrito permanece inferior ao dos blocos polidos mecanicamente. É crível que após 500 segundos de ensaio o desgaste dos blocos foi o suficiente para remover os bolsos em forma de “V”, logo o único efeito benéfico seria o dos veios de grafita expostos. Observa-se que ao fim dos testes a 200 rpm as texturas superficiais estão quase que completamente removidas das marcas de desgaste, como ilustra a Figura 4.12c. A Figura 4.12 consiste da microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando elétrons retro-espalhados (BSE) das marcas de desgaste. As topografias das amostras de desgaste mostram pequenos traços de texturas superficiais remanescentes (Figura 4.13), mas estas são provavelmente muito rasas para ter qualquer efeito como reservatório de lubrificante ou no aumento de pressão hidrodinâmica. Após 1000 segundos de ensaio todos os blocos apresentaram valores de coeficiente de atrito na casa de 0.09.

Como os veios de grafita não são mais visíveis nas marcas de desgaste ao fim dos testes, para os blocos texturizados e polidos eletroquimicamente (Figuras 4.12b e 4.12c), seu comportamento em relação ao atrito permanece muito próximo ao dos blocos polidos mecanicamente.

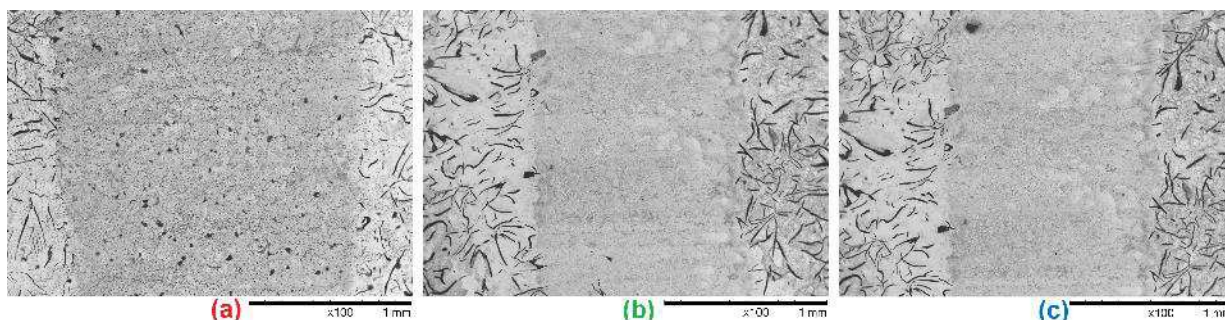


Figura 4.12 – Microscopia eletrônica de varredura, utilizando elétrons retro-espalhados das marcas de desgaste dos testes a 200 rpm: (a) polimento mecânico; (b) polimento eletroquímico; (c) MECT.

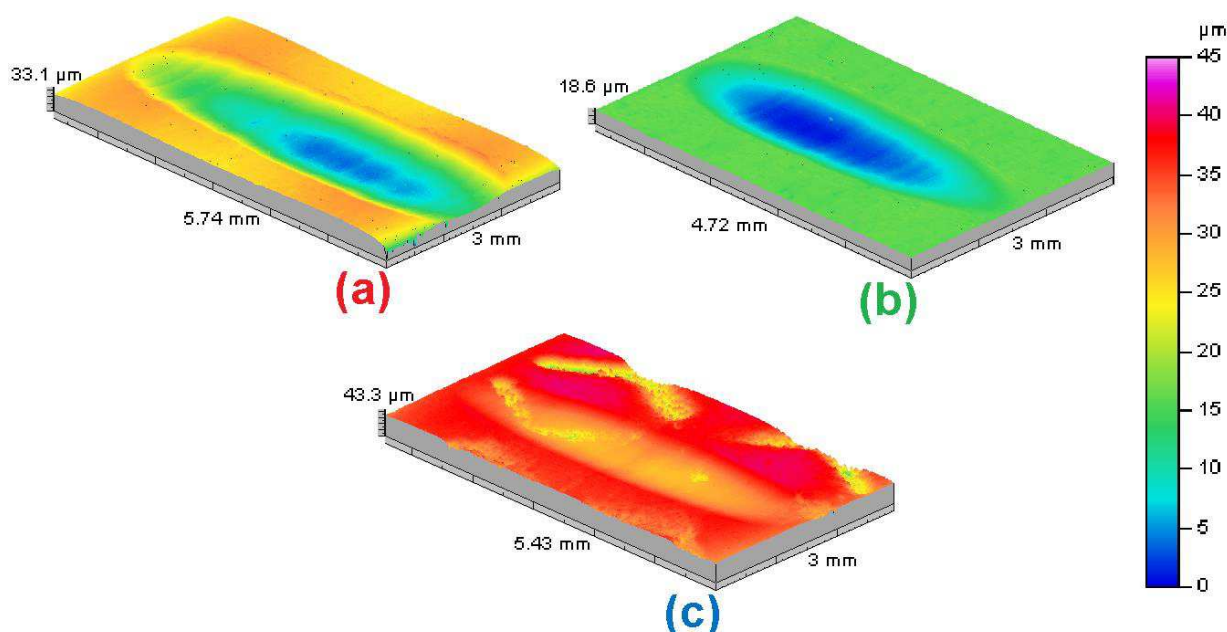


Figura 4.13 – Topografia das marcas de desgaste dos ensaios a 200 rpm obtida por interferometria 3D (a) polimento mecânico; (b) polimento eletroquímico; (c) MECT.

Para os testes a 600 rpm, os coeficientes de atrito para os blocos texturizados foram mais baixos que para os polidos mecanicamente, tendo novamente os blocos texturizados eletroquimicamente apresentado um comportamento intermediário. Após 1000 segundos de teste, as três condições apresentaram os mesmos valores de coeficiente de atrito. Como ilustra a Figura 4.14, os bolsos em forma de “V” e os veios de grafita expostos ainda

permanecem dentro das marcas de desgaste ao fim dos testes. Analisando a interferometria 3D das marcas de desgaste (Figura 4.15), o raio médio da marca de desgaste foi idêntico ao raio de curvatura do anel. Dada a alta conformidade entre o anel e a marca de desgaste, as pressões de contato foram pequenas ao fim dos testes. Uma vez que o filme lubrificante a 600 rpm deveria ser mais espesso que a 200 rpm, postula-se que ao fim dos ensaios a 600 rpm o regime de lubrificação tende ao hidrodinâmico, com negligenciável contato entre asperidades. Esta hipótese é corroborada pelos baixos valores no coeficiente de atrito, em torno de 0.06, ao fim dos ensaios nas três condições testadas.

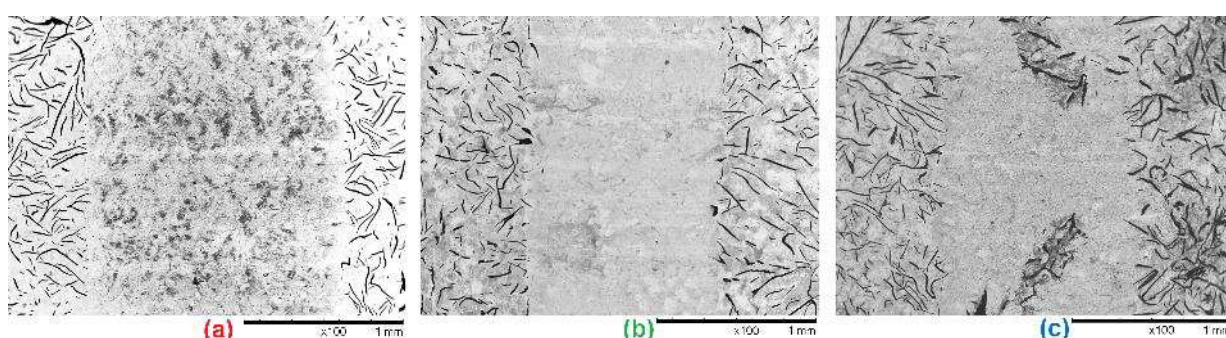


Figura 4.14 – Microscopia eletrônica de varredura, utilizando elétrons retro-espalhados das marcas de desgaste dos testes a 600 rpm: (a) polimento mecânico; (b) polimento eletroquímico; (c) MECT.

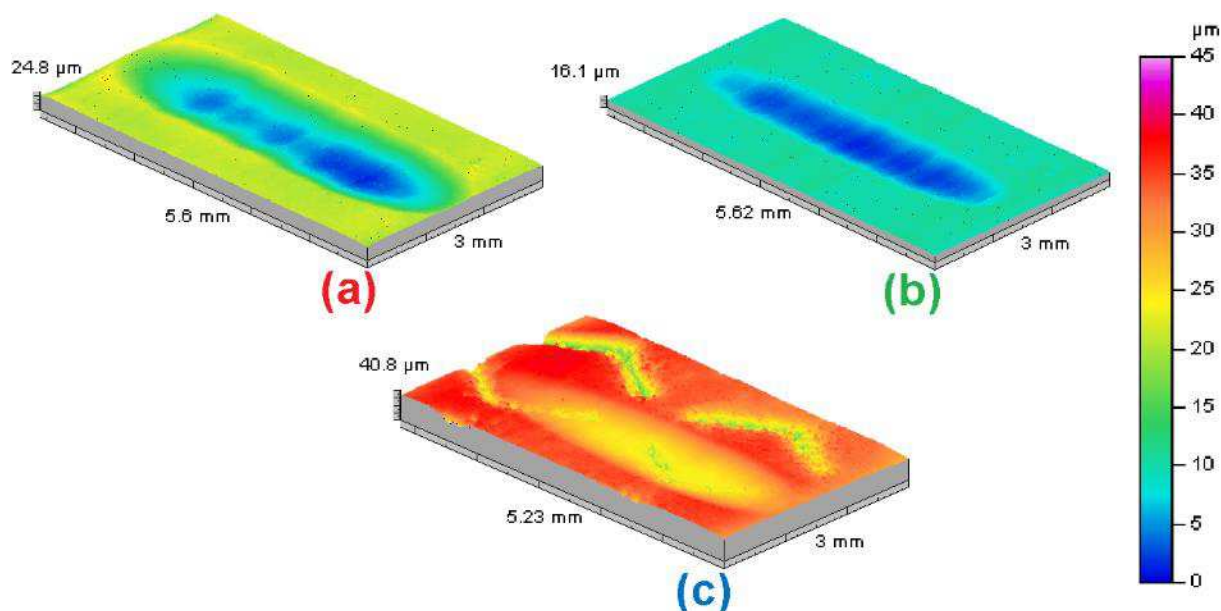


Figura 4.15 – Topografia das marcas de desgaste dos ensaios a 200 rpm obtida por interferometria 3D (a) polimento mecânico; (b) polimento eletroquímico; (c) MECT.

Vários autores propuseram que sob condições de filme lubrificante pleno, os efeitos da texturização podem ser muito pequenos. Costa e Hutchings (2007) não encontraram diferenças nos coeficientes de atrito entre superfícies polidas e texturizadas, mesmo com um pequeno aumento na capacidade de carga para superfícies texturizadas. Trabalhos recentes (VLĂDESCU et al., 2016; VLĂDESCU et al., 2016) utilizando interferometria a laser ultrafina indicaram que em condições de filme lubrificante pleno os efeitos da texturização são negligenciáveis ou até ligeiramente prejudiciais, mesmo que melhorem o fluxo de lubrificante.

Outro ponto que emerge das interferometrias 3D das marcas de desgaste dos blocos é que o desgaste cai quando a velocidade de rotação passa de 200 para 600 rpm. Taxas de desgaste (k) foram calculadas usando a equação de Archard (ARCHARD, 1953), representada na Equação 4.1, onde d é a distância deslizada e V é a perda volumétrica.

$$k = \frac{V}{wd} \quad 4.1$$

As taxas de desgaste são apresentadas na Figura 4.16 mostram uma redução de aproximadamente 82% nas taxas de desgaste entre os testes a 200 e 600 rpm, a qual ocorre devido a maior espessura do filme lubrificante formado com as maiores velocidades de rotação do anel. Este gráfico mostra ainda uma redução em torno de 81% nas taxas de desgaste encontradas para os blocos texturizados em comparação com os blocos polidos mecanicamente. Para comparação, quando o polimento eletroquímico foi utilizado no lugar do MECT a redução foi de 72% a 200 rpm e 65% a 600 rpm. Com isso se corrobora a hipótese que não apenas os veios de grafita expostos, como também a texturização contribuiu para a redução do atrito.

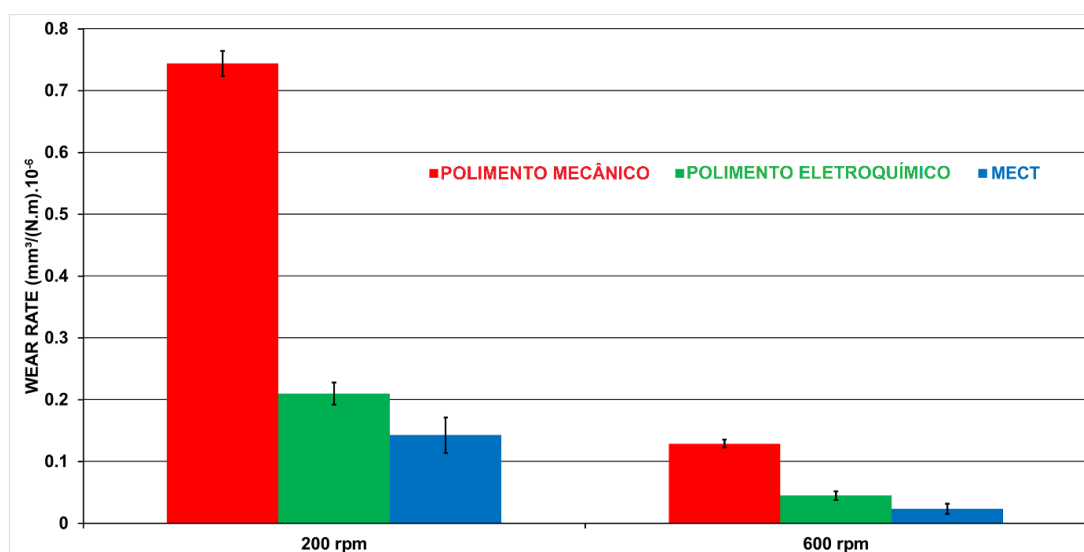


Figura 4.16 – Taxa de desgaste volumétrica para as condições testadas.

A Figura 4.17 ilustra obtidas através de MEV BSE das marcas de desgaste produzidas a 200 e 600 rpm a uma maior ampliação. Para os blocos polidos mecanicamente (Figuras 4.17a e 4.17d), largos aglomerados carbonosos (acima de 90% C) foram identificados através do recurso EDS. Para as amostras polidas eletroquimicamente (Figuras 4.17b e 4.17e) e texturizadas (Figuras 4.17c e 4.17f), ao invés de aglomerados isolados foi encontrada uma fina e bem distribuída camada carbonosa, formando uma tribocamada contínua, o qual pode ser uma das causas dos baixos coeficiente de atrito encontrados nestas condições.

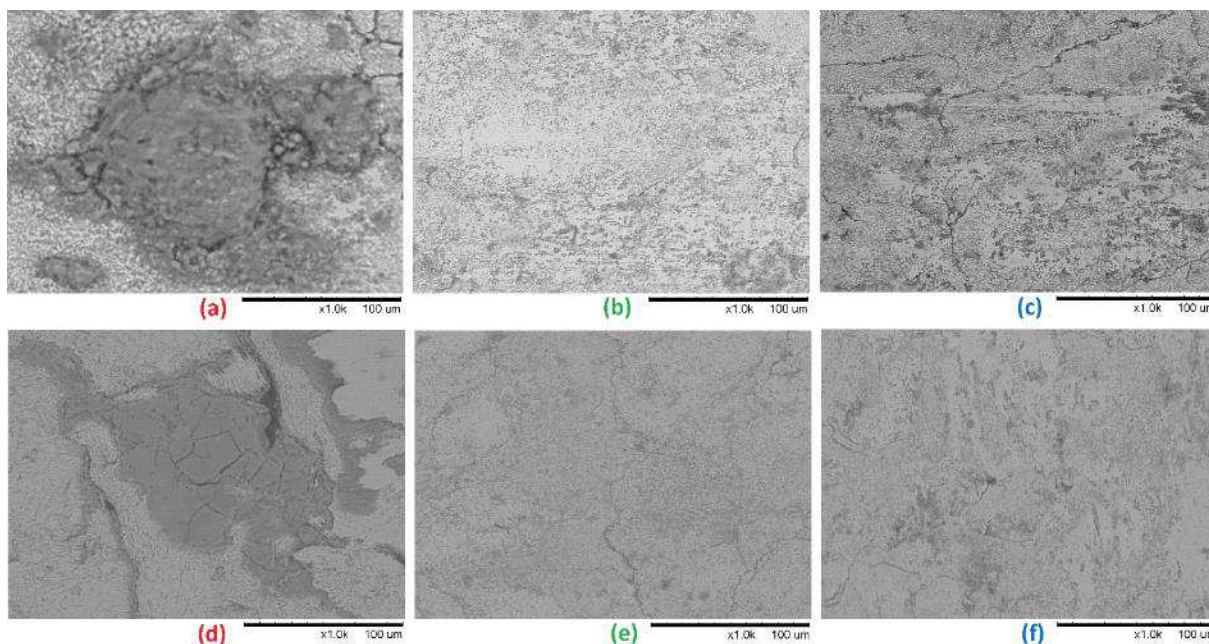


Figura 4.17 – Microscopia eletrônica de varredura, utilizando elétrons retro-espalhados das marcas de desgaste: (a) polimento mecânico a 200 rpm; (b) polimento eletroquímico a 200 rpm; (c) MECT a 200 rpm. (d) polimento mecânico a 600 rpm; (e) polimento eletroquímico a 600 rpm; (f) MECT a 600 rpm.

CAPÍTULO IV

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi abordada a possibilidade de se utilizar o método de texturização superficial sem mascaramento (MECT) para a texturização de cilindros automotivos de ferro fundido cinzento de matriz perlítica. A fim de tornar a técnica mais barata foi investigada a possibilidade de se utilizar sal de cozinha como eletrólito no método MECT.

Quanto a texturização superficial, concluiu-se que:

- O sal de cozinha pode ser utilizado para substituir o NaCl PA como eletrólito na aplicação do método MECT para o ferro fundido cinzento, visto a presença de impurezas e KI no mesmo pouco influenciar seu comportamento anódico em relação ao ferro fundido cinzento.
- O método de texturização superficial sem mascaramento pode ser efetivamente empregado para a texturizar cilindros automotivos de ferro fundido cinzento.
- Dentre os valores pesquisados, a melhor distância entre os eletrodos (Dfp) no processo MECT para texturizar cilindros automotivos de ferro fundido cinzento e a de 100 μm .
- Dentre os valores pesquisados, a melhor tensão para se texturizar cilindros automotivos de ferro fundido cinzento pelo processo MECT foi a de 7,5 V. Esta tensão resulta em padrões superficiais mais bem definidos, além de uma menor rugosidade das áreas externas as texturas superficiais.
- Para a Dfp e tensão acima descritos, o tempo de 60 segundos resultou em uma relação entre a profundidade e a largura (Rpl) mais próxima de 0,1.

Outro ponto investigado neste trabalho foi, através de ensaios bloco sobre anel, o comportamento tribológico da texturização superficial em relação ao polimento mecânico e eletroquímico para amostras de ferro fundido cinzento.

Quanto aos ensaios bloco sobre anel, concluiu-se que:

- Em ensaios de 20 minutos, tanto para uma velocidade de rotação de 200 quanto de 600 rpm do anel em relação ao bloco as amostras texturizadas superficialmente

apresentaram tanto um coeficiente de atrito como um volume desgastado inferior as amostras polidas mecanicamente e eletroquimicamente.

- Em todas as condições de tratamento superficial analisadas os ensaios a 600 rpm apresentaram um menor volume desgastado que os ensaios a 200 rpm.
- Mesmo que inferior aos ganhos oriundos da texturização superficial na redução do atrito e desgaste, o polimento eletroquímico é uma alternativa viável na redução de atrito em contatos tribológicos envolvendo o ferro fundido cinzento, por ressaltar os veios de grafita do mesmo.
- A tribocamada resultante das amostras texturizadas e polidas eletroquimicamente apresentou aglomerações de grafita muito mais refinadas do que as das amostras polidas mecanicamente, para ambas as velocidades testadas.

O trabalho alcançou os objetivos previstos, contudo para que haja continuidade no estudo da utilização da técnica de texturização superficial para redução do atrito e desgaste em cilindros automotivos propõem-se:

- Testar através de ensaios lubrificados de movimento alternado a influência da orientação, densidade, carga e Rp das texturas superficiais inseridas nos cilindros automotivos.
- Através do uso de termopares e termocâmeras, verificar a influência da texturização superficial na dissipação de calor no contato tribológico lubrificado.
- Investigar a eficácia de superfícies que combinem texturização superficial e revestimentos anti-desgaste, como por exemplo o Nikasil ou Diamond Like Carbon (DLC), na redução do atrito e desgaste em cilindros automotivos.

CAPÍTULO IV

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSSON, B. S. Paper XVIII (iii) Company Perspectives in Vehicle Tribology - Volvo. In: D. DOWSON, C. M. T. e GODET, M. (Ed.). **Tribology Series**: Elsevier, v. Volume 18, 1991. p.503-506. ISBN 0167-8922.

ARCHARD, J. F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces. **Journal of Applied Physics**, v. 24, n. 8, p. 981-988, 1953.

ARDILA, M. A. N. **Influência do Nióbio na textura e resistência a corrosão de aços inoxidáveis ferríticos em ambientes aerados e desaerados**. 2013. f. - Universidade Federal de Uberlândia.

ASTM. **D2714 - 94(2014)**. 100 Barr Harbor Dr. P.O. box C-700 West Conshohocken, Pennsylvania UnitedStates: ASTM International 2014.

BARBER, G. C.; LUDEMA, K. C. The break-in stage of cylinder-ring wear: A correlation between fired engines and a laboratory simulator. **Wear**, v. 118, n. 1, p. 57-75, 1987/07/15 1987. ISSN 0043-1648.

BHATTACHARYYA, B.; MUNDA, J. Experimental investigation into electrochemical micromachining (EMM) process. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 140, n. 1–3, p. 287-291, 9/22/ 2003. ISSN 0924-0136.

BRAUN, D.; GREINER, C.; SCHNEIDER, J.; GUMBSCH, P. Efficiency of laser surface texturing in the reduction of friction under mixed lubrication. **Tribology International**, v. 77, p. 142-147, 2014. ISSN 0301-679X.

BRUZZONE, A. A. G.; COSTA, H. L.; LONARDO, P. M.; LUCCA, D. A. Advances in engineered surfaces for functional performance. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 57, n. 2, p. 750-769, // 2008. ISSN 0007-8506.

BUSCAGLIA, G. C.; CIUPERCA, I.; JAI, M. On the optimization of surface textures for lubricated contacts. **Journal of Mathematical Analysis and Applications**, v. 335, n. 2, p. 1309-1327, 11/15/ 2007. ISSN 0022-247X.

CARNOT, S. **Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer atte puissance**. Bachelier Libraire, 1824. p.

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, 8// 2007. ISSN 0301-679X.

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, Apr 21 2009. ISSN 0924-0136.

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, Apr 2015. ISSN 1350-6501.

D'AGOSTINO, V.; SENATORE, A. 10 - Fundamentals of lubrication and friction of piston ring contact. In: RAHNEJAT, H. (Ed.). **Tribology and Dynamics of Engine and Powertrain**: Woodhead Publishing, 2010. p.343-386. ISBN 978-1-84569-361-9.

DA SILVA, L. R. R. Maskless electrochemical texturing of automotive cylinders liners. **Materials Performance and Characterization** v. in press, 2016.

DE LA GUERRA, E.; ECHARRI, J.; CHACÓN TANARRO, E.; LAFONT MORGADO, P.; DIAZ LANTADA, A.; MUNOZ-GUIJOSA, J. M.; MUNOZ SANZ, J. L. Optimising lubricated friction coefficient by surface texturing. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, February 4, 2013 2013.

ENCYCLOPEDIA, N. W. Internal combustion engine. 18 de abril de 2014, às 16:25 2014.

ETSION, I. State of the Art in Laser Surface Texturing. **Journal of Tribology**, v. 127, n. 1, p. 248-253, 2005. ISSN 0742-4787.

ETSION, I. 13 - Surface texturing for in-cylinder friction reduction. In: RAHNEJAT, H. (Ed.). **Tribology and Dynamics of Engine and Powertrain**: Woodhead Publishing, 2010. p.458-470e. ISBN 978-1-84569-361-9.

FOWELL, M. T.; MEDINA, S.; OLVER, A. V.; SPIKES, H. A.; PEGG, I. G. Parametric study of texturing in convergent bearings. **Tribology International**, v. 52, p. 7-16, Aug 2012. ISSN 0301-679X.

FULLER, M.; YIN, Z.; KASRAI, M.; BANCROFT, G. M.; YAMAGUCHI, E. S.; RYASON, P. R.; WILLERMET, P. A.; TAN, K. H. Chemical characterization of tribochemical and thermal films generated from neutral and basic ZDDPs using X-ray absorption spectroscopy. **Tribology International**, v. 30, n. 4, p. 305-315, 1997. ISSN 0301-679X.

GENTIL, V. **Corrosão**. LTC, 2007. p. ISBN 9788521618041.

GRABON, W.; KOSZELA, W.; PAWLUS, P.; OCHWAT, S. Improving tribological behaviour of piston ring–cylinder liner frictional pair by liner surface texturing. **Tribology International**, v. 61, n. 0, p. 102-108, 5// 2013. ISSN 0301-679X.

GREENWOOD, J. A.; JOHNSON, K. L.; MATSUBARA, E. A surface roughness parameter in Hertz contact. **Wear**, v. 100, n. 1, p. 47-57, 1984/12/01 1984. ISSN 0043-1648.

GREENWOOD, J. A.; WILLIAMSON, J. B. P. **Contact of Nominally Flat Surfaces**. 1966. 300-319 p.

GUO, Z.; YUAN, C.; LIU, P.; PENG, Z.; YAN, X. Study on Influence of Cylinder Liner Surface Texture on Lubrication Performance for Cylinder Liner–Piston Ring Components. **Tribology Letters**, v. 51, n. 1, p. 9-23, 2013/07/01 2013. ISSN 1023-8883.

HAMILTON, D. B.; WALOWIT, J. A.; ALLEN, C. M. A Theory of Lubrication by Microirregularities. **Journal of Fluids Engineering**, v. 88, n. 1, p. 177-185, 1966. ISSN 0098-2202.

HOLMBERG, K.; ANDERSSON, P.; ERDEMIR, A. Global energy consumption due to friction in passenger cars. **Tribology International**, v. 47, p. 221-234, 3// 2012. ISSN 0301-679X.

HOLMBERG, K.; ANDERSSON, P.; NYLUND, N.-O.; MÄKELÄ, K.; ERDEMIR, A. Global energy consumption due to friction in trucks and buses. **Tribology International**, v. 78, p. 94-114, 10// 2014. ISSN 0301-679X.

HSU, S. M.; GATES, R. S. Boundary lubricating films: formation and lubrication mechanism. **Tribology International**, v. 38, n. 3, p. 305-312, Mar 2005. ISSN 0301-679X.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. Edward Arnold, 1992. p. ISBN 9780340561843.

JOHNSON, K. L. **Contact Mechanics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. p.

KIM, B.; CHAE, Y. H.; CHOI, H. S. Effects of surface texturing on the frictional behavior of cast iron surfaces. **Tribology International**, v. 70, n. 0, p. 128-135, 2// 2014. ISSN 0301-679X.

KIM, B.; CHAE, Y. H.; CHOI, H. S. Effects of surface texturing on the frictional behavior of cast iron surfaces. **Tribology International**, v. 70, p. 128-135, 2014. ISSN 0301-679X.

KOVALCHENKO, A.; AJAYI, O.; ERDEMIR, A.; FENSKE, G.; ETSION, I. The Effect of Laser Texturing of Steel Surfaces and Speed-Load Parameters on the Transition of Lubrication Regime from Boundary to Hydrodynamic. **Tribology Transactions**, v. 47, n. 2, p. 299-307, 2004/04/01 2004. ISSN 1040-2004.

KOVALCHENKO, A.; AJAYI, O.; ERDEMIR, A.; FENSKE, G.; ETSION, I. The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact. **Tribology International**, v. 38, n. 3, p. 219-225, 3// 2005. ISSN 0301-679X.

LEARY, W. A.; JOVELLANOS, J. U.; AERONAUTICS, U. S. N. A. C. F.; CENTER, A. R. **A Study of Piston and Ring Friction**. National Advisory Committee for Aeronautics, 1944. p.

LEARY, W. A.; JOVELLANOS, J. U.; UNITED STATES. NATIONAL ADVISORY COMMITTEE FOR, A.; AMES RESEARCH, C. **A Study of Piston and Ring Friction**. National Advisory Committee for Aeronautics, 1944. p.

LIVENGOOD, J. C.; WALLOUR, C.; UNITED STATES NATIONAL ADVISORY COMMITTEE FOR, A. **A Study of Piston-ring Friction**. National Advisory Committee for Aeronautics, 1947. p.

LU, Z. C.; ZENG, M. Q.; GAO, Y.; XING, J. Q.; ZHU, M. 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, 9/15/ 2015. ISSN 0043-1648.

MIKLOZIC, K. T.; GRAHAM, J.; SPIKES, H. Chemical and physical analysis of reaction films formed by molybdenum dialkyl-dithiocarbamate friction modifier additive using Raman and atomic force microscopy. **Tribology Letters**, v. 11, n. 2, p. 71-81, Aug 2001. ISSN 1023-8883.

MORRIS, N.; LEIGHTON, M.; DE LA CRUZ, M.; RAHMANI, R.; RAHNEJAT, H.; HOWELL-SMITH, S. Combined numerical and experimental investigation of the micro-hydrodynamics of chevron-based textured patterns influencing conjunctural friction of sliding contacts. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology**, 2014.

NPTEL. **Electro Chemical Machining. Non-conventional machining - Module 9**. KHARAGPUR, I. I. O. T. <http://www.nptel.ac.in/courses/112105127/pdf/LM-38.pdf>. NPTEL 2008.

OLIVEIRA JÚNIOR, M. M. D. **Lubrificação sólida em meio fluido**. 2013. 94 f. Dissertação Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia.

PARREIRA, J. G.; GALLO, C. A.; COSTA, H. L. New advances on maskless electrochemical texturing (MECT) for tribological purposes. **Surface and Coatings Technology**, v. 212, p. 1-13, 11// 2012. ISSN 0257-8972.

PARREIRA, J. G.; GALLO, C. A.; COSTA, H. L. New advances on maskless electrochemical texturing (MECT) for tribological purposes. **Surface and Coatings Technology**, v. 212, n. 0, p. 1-13, 11// 2012. ISSN 0257-8972.

PULKRABEK, W. W. **Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine**. Prentice Hall, 1997. p. ISBN 9780135708545.

QIU, M.; MINSON, B. R.; RAEYMAEKERS, B. The effect of texture shape on the friction coefficient and stiffness of gas-lubricated parallel slider bearings. **Tribology International**, v. 67, n. 0, p. 278-288, 11// 2013. ISSN 0301-679X.

RAHMANI, R.; SHIRVANI, A.; SHIRVANI, H. Optimization of Partially Textured Parallel Thrust Bearings with Square-Shaped Micro-Dimples. **Tribology Transactions**, v. 50, n. 3, p. 401-406, 2007/06/26 2007. ISSN 1040-2004.

RAHMANI, R.; SHIRVANI, A.; SHIRVANI, H. 14 - Optimised textured surfaces with application in piston ring/cylinder liner contact. In: RAHNEJAT, H. (Ed.). **Tribology and Dynamics of Engine and Powertrain**: Woodhead Publishing, 2010. p.470-517. ISBN 978-1-84569-361-9.

RAHNEJAT, H.; BALAKRISHNAN, S.; KING, P. D.; HOWELL-SMITH, S. In-Cylinder Friction Reduction Using a Surface Finish Optimization Technique. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, v. 220, n. 9, p. 1309-1318, 2006.

RAPOPORT, L.; MOSHKOVICH, A.; PERFILYEV, V.; TENNE, R. 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, 2007. ISSN 1573-2711.

RONEN, A.; ETSION, I.; KLIGERMAN, Y. Friction-Reducing Surface-Texturing in Reciprocating Automotive Components. **Tribology Transactions**, v. 44, n. 3, p. 359-366, 2001/01/01 2001. ISSN 1040-2004.

RYK, G.; ETSION, I. Testing piston rings with partial laser surface texturing for friction reduction. **Wear**, v. 261, n. 7-8, p. 792-796, 10/20/ 2006. ISSN 0043-1648.

SADEGHI, F. 6 - Elastohydrodynamic lubrication. In: RAHNEJAT, H. (Ed.). **Tribology and Dynamics of Engine and Powertrain**: Woodhead Publishing, 2010. p.171-226e. ISBN 978-1-84569-361-9.

SAEIDI, F.; MEYLAN, B.; HOFFMANN, P.; WASMER, K. Effect of surface texturing on cast iron reciprocating against steel under starved lubrication conditions: A parametric study. **Wear**, v. 348-349, p. 17-26, 2/15/ 2016. ISSN 0043-1648.

SCARAGGI, M. Lubrication of textured surfaces: A general theory for flow and shear stress factors. **Physical Review E**, v. 86, n. 2, p. 026314, 08/23/ 2012.

SEGU, D. Z.; CHOI, S. G.; CHOI, J. H.; KIM, S. S. The effect of multi-scale laser textured surface on lubrication regime. **Applied Surface Science**, v. 270, n. 0, p. 58-63, 4/1/ 2013. ISSN 0169-4332.

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

SPIKES, H. A. Mixed lubrication — an overview. **Lubrication Science**, v. 9, n. 3, p. 221-253, 1997. ISSN 1557-6833.

STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**. Elsevier Science, 2013. p. ISBN 9780123977762.

SUGISHITA, J.; FUJIYOSHI, S. The effect of cast iron graphites on friction and wear performance I: Graphite film formation on grey cast iron surfaces. **Wear**, v. 66, n. 2, p. 209-221, 2/2/ 1981. ISSN 0043-1648.

TETI, R.; PAGANO, N.; ANGELINI, V.; CESCHINI, L.; CAMPANA, G. Research and Innovation in Manufacturing: Key Enabling Technologies for the Factories of the Future - Proceedings of the 48th CIRP Conference on Manufacturing Systems Laser Remelting for Enhancing Tribological Performances of a Ductile Iron. **Procedia CIRP**, v. 41, p. 987-991, 2016/01/01 2016. ISSN 2212-8271.

TOMANIK, E. Modelling the hydrodynamic support of cylinder bore and piston rings with laser textured surfaces. **Tribology International**, v. 59, n. 0, p. 90-96, 3// 2013. ISSN 0301-679X.

TUNG, S. C.; MCMILLAN, M. L. Automotive tribology overview of current advances and challenges for the future. **Tribology International**, v. 37, n. 7, p. 517-536, 7// 2004. ISSN 0301-679X.

VLĂDESCU, S.-C.; MEDINA, S.; OLVER, A. V.; PEGG, I. G.; REDDYHOFF, T. Lubricant film thickness and friction force measurements in a laser surface textured reciprocating line contact simulating the piston ring–liner pairing. **Tribology International**, v. 98, p. 317-329, 6// 2016. ISSN 0301-679X.

VLĂDESCU, S.-C.; OLVER, A. V.; PEGG, I. G.; REDDYHOFF, T. Combined friction and wear reduction in a reciprocating contact through laser surface texturing. **Wear**, v. 358–359, p. 51-61, 7/15/ 2016. ISSN 0043-1648.

WILLIAMS, J. **Engineering Tribology**. Cambridge University Press, 1994. p. ISBN 9780521609883.

YUAN, S.; HUANG, W.; WANG, X. Orientation effects of micro-grooves on sliding surfaces. **Tribology International**, v. 44, n. 9, p. 1047-1054, 8// 2011. ISSN 0301-679X.

ZHOU, Y.; ZHU, H.; TANG, W.; MA, C.; ZHANG, W. Development of the theoretical model for the optimal design of surface texturing on cylinder liner. **Tribology International**, v. 52, n. 0, p. 1-6, 8// 2012. ISSN 0301-679X.

ZUM GAHR, K. H. **Microstructure and Wear of Materials**. Elsevier Science, 1987. p. ISBN 9780080875743.