

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL ELETROQUÍMICA SEM MASCARAMENTO DE
COMPONENTES CILÍNDRICOS**

GABRIEL GUILHERME BACCA FERRI

RIO GRANDE
2019

GABRIEL GUILHERME BACCA FERRI

**TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL ELETROQUÍMICA SEM MASCARAMENTO DE
COMPONENTES CILÍNDRICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Rio Grande, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

ORIENTADORA: HENARA LILLIAN COSTA MURRAY

RIO GRANDE
2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPMec



Ata nº 02/2019 da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. No primeiro dia do mês de março de dois mil e dezanove, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às oito horas e trinta minutos na sala de videoconferência - NTI, no Campus Carreiros desta Universidade, a que se submeteu o mestrando **Gabriel Guilherme Bacca Ferri**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa Engenharia de Soldagem e Materiais do PPMec, com o seguinte título: **TEXTUALIZAÇÃO SUPERFICIAL ELETROQUÍMICA SEM MASCARAMENTO DE COMPONENTES CILÍNDRICOS**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Pedro Henrique Costa Pereira da Cunha, Elizaldo Domingues dos Santos e Washington Martins da Silva Junior, sob a presidência da Professora Henara Lillian Costa Murray. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram: **APROVADO**.

1. Henara Lillian Costa Murray:
2. Pedro Henrique Costa Pereira da Cunha:
3. Elizaldo Domingues dos Santos:
4. Washington Martins da Silva Junior:

Foi concedido um prazo de 30 dias, para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1.
CPF: 847.359.106-20
2.
CPF: 985.887.370-00
3.
CPF: 987.587.640-20
4.
CPF: 595.123.771-87

Gabriel Guilherme Bacca Ferri:

"Apenas que... busquem conhecimento." Bilu, Et.

AGRADECIMENTOS

Aos meus amados pais, Ruy e Dilce, pelo apoio, dedicação e confiança.

À minha amada namorada, Camila, por acreditar em mim e compartilhar dos meus sonhos.

Ao meu irmão Ruy, aos meus primos, Felipe e Dysrael, à minha avó, Irma, e aos demais familiares e amigos, por desejarem o meu sucesso.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Henara Costa, pela oportunidade e por ser um exemplo de profissional dedicado.

Aos colegas do PPMec FURG, pela troca de experiências e amizade.

Ao amigo e colega Leonardo Conde Dias, por toda ajuda e parceria no decorrer dos mais de dois anos de projeto.

Aos técnicos do laboratório de usinagem, pela ajuda na fabricação dos componentes.

Aos técnicos dos laboratórios de química, computação e metalografia, Jorge, Cedenir e Jorge, pela pronta assistência e interesse.

Aos professores, coordenação e secretaria do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, pela ajuda e oportunidade.

À CAPES e ao CNPq, pelo apoio financeiro.

FERRI, G.G.B. **Texturização superficial eletroquímica sem mascaramento de componentes cilíndricos**. 2019. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Rio Grande, Rio Grande.

RESUMO

A técnica de texturização superficial eletroquímica sem mascaramento (MECT) apresenta-se como bastante promissora no que diz respeito à texturização de componentes de baixo custo, mas ainda não se encontra disponível comercialmente. Este trabalho objetiva contribuir para uma utilização mais ampla desta técnica de texturização em aplicações industriais. Assim, para a execução deste trabalho, um aparato capaz de fabricar texturas em superfícies cilíndricas metálicas foi projetado e construído. O aparato utilizou a texturização superficial eletroquímica sem mascaramento para produzir texturas em amostras de aço baixo carbono. Parâmetros de texturização como a tensão, o tempo de usinagem, a distância entre eletrodos, a concentração e o fluxo de eletrólito foram avaliados, a fim de que as texturas resultantes reproduzissem adequadamente os padrões presentes na ferramenta. Foi avaliado também o emprego de mascaramento por meio de adesivo para a ferramenta, o qual apresentou um desempenho satisfatório e implicou em significativa redução de custo e tempo em relação aos mascaramentos tradicionais. Para a avaliação do desempenho tribológico das superfícies texturizadas, foi utilizada a medição da energia de deslizamento através de ensaios de esclerometria pendular, em condições a seco e lubrificadas. Os resultados mostraram que as energias de deslizamento foram menores nas superfícies lubrificadas e texturizadas do que nas superfícies lubrificadas e polidas, comprovando a capacidade dos bolsos de auxiliarem na lubrificação. Em condições a seco não foi observada redução na energia de deslizamento entre as superfícies texturizadas e polidas.

Palavras chave: Tribologia, texturização superficial, MECT, superfícies cilíndricas, atrito, lubrificação.

FERRI, G.G.B. **Maskless electrochemical surface texturing for cylindrical components**. 2019. Master Dissertation, Universidade Federal de Rio Grande, Rio Grande.

ABSTRACT

Maskless electrochemical surface texturing (MECT) is a promising technique for texturing low-cost components, but it is not yet commercially available. This work aims to contribute to a broader use of this texturing technique in industrial applications. For that, an apparatus for manufacturing textures on cylindrical metal surfaces was designed and constructed. The apparatus used MECT to produce textures in low carbon steel samples. Texturing parameters such as voltage, machining time, gap between electrodes, electrolyte concentration and flow were evaluated to ensure that the resulting textures adequately reproduced the patterns present in the tool. The use of an adhesive tape to mask the tool was also evaluated, showing satisfactory performance and leading to a significant reduction in terms of cost and time when compared with traditional masking methods. For the evaluation of the tribological performance of the textured surfaces, sliding energy was measured under dry and lubricated conditions using pendular sclerometric tests. The results showed that sliding energy was lower for lubricated and textured surfaces than for lubricated and polished surfaces, proving the pockets' ability to assist in lubrication. Under dry conditions there was no reduction in sliding energy between the textured and polished surfaces.

Key words: Tribology, surface texturing, MECT, cylindrical surfaces, friction, lubrication.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Exemplo de contatos conformes (a e b) e não conformes (c e d). Fonte:(HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).</i>	17
<i>Figura 2 - Curvas de Stribeck para contatos conformes (a) e não conformes (b). Fonte:(GACHOT et al., 2017)...</i>	19
<i>Figura 3 – Diferentes configurações de contato para testes de modelo. (a) Pino sobre disco. (b) Bloco sobre anel. (c) Pino sobre placa (d) Anel sobre anel. Fonte:(Hutchings e Shipway, 2017).</i>	21
<i>Figura 4 - Gráfico característico de teste do tipo pino sobre disco.....</i>	22
<i>Figura 5 - Detritos depositados em texturas. Fonte:(Tomanik, 2013).</i>	24
<i>Figura 6 - Linhas de cavitação observadas em um selo transparente. Direção de rotação da esquerda para a direita. Fonte:(Hamilton et al., 1966).</i>	24
<i>Figura 7 - Variação da pressão devido à presença de um bolso. Fonte:(Tang et al., 2013).</i>	25
<i>Figura 8 - Padrões em “V”. Fonte:(Costa e Hutchings, 2007).</i>	28
<i>Figura 9 - Detalhe de protuberâncias produzidas durante a fabricação de bolsos por LBM. Fonte: (Mishra e Polycarpou, 2011).</i>	32
<i>Figura 10 - Comparação entre crateras produzidas a partir de interferência laser (à esquerda) e laser convencional (à direita). Fonte:(Duarte et al., 2008), (Borghi et al., 2008).</i>	33
<i>Figura 11- Exemplo de procedimento utilizado na usinagem fotoquímica. Fonte:(Zhang e Meng, 2012).</i>	35
<i>Figura 12- Textura na face das ferramentas de corte. Fonte:(Chang et al., 2011).</i>	37
<i>Figura 13 - Perfil dos bolsos usinados por AJM e LST. Fonte: (Wakuda et al., 2003).</i>	38
<i>Figura 14 – Representação do processo de eletrólise. Fonte:(McGeough, 2005).</i>	38
<i>Figura 15- Exemplo de configuração para usinagem eletroquímica. Representação da distância inicial (a) e do estado de equilíbrio (b). Fonte:(McGeough, 2005).</i>	39
<i>Figura 16- Aparato utilizado para o desenvolvimento da Texturização superficial eletroquímica sem mascaramento. Fonte:(COSTA, H. L.; HUTCHINGS, 2009).</i>	40
<i>Figura 17 - Configuração para texturização eletroquímica com mascaramento.</i>	41
<i>Figura 18 - Texturização superficial eletroquímica tradicional (a) e modelo utilizando ânodo auxiliar (b). Fonte:(Qian et al., 2014).</i>	42
<i>Figura 19 - Resultado da texturização superficial eletroquímica tradicional (a) e do modelo utilizando ânodo auxiliar (b). Fonte:(Qian et al., 2014).</i>	42
<i>Figura 20 - Câmara para texturização.....</i>	44
<i>Figura 21- Detalhe do fluxo de eletrólito paralelo à face da amostra, neste caso o eixo.....</i>	45
<i>Figura 22- Dimensões (em mm) da amostra de aço carbono (a) e da ferramenta de aço inoxidável (b).</i>	47
<i>Figura 23 - Detalhe da ferramenta (a) e da área metálica exposta (b).</i>	47
<i>Figura 24 - Dimensões em milímetros da perfuração programada (esquerda) e do resultado final da perfuração a laser (direita).</i>	48
<i>Figura 25- Exemplo de amostra texturizada, polida e cortada.</i>	50
<i>Figura 26 - Medição da profundidade utilizando-se um perfilômetro.....</i>	51

<i>Figura 27 – Foto (a) e representação esquemática do pêndulo utilizado nos ensaios (b).</i>	52
<i>Figura 28 - Detalhe da área pela qual o eletrólito flui. Dimensões em mm.</i>	58
<i>Figura 29 - Perfilometria de uma das texturas produzida nos testes preliminares.</i>	59
<i>Figura 30 - Profundidade máxima aproximada das texturas, em μm.</i>	60
<i>Figura 31 – Perfil de um bolso da amostra usinada com uma mistura de NaCl e NaNO_3.</i>	61
<i>Figura 32 - Diâmetro estimado dos bolsos usinados.</i>	62
<i>Figura 33 - Região entre os bolsos da amostra 1A, usinada por 1 minuto.</i>	63
<i>Figura 34 - Região entre os bolsos da amostra 6A, usinada por 5 minutos.</i>	63
<i>Figura 35 - Imagem de microscopia óptica (esquerda) e análise de perfilometria (direita) de um mesmo bolso.</i>	64
<i>Figura 36 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura de uma região mais ampla do bolso (esquerda) e análise de energia dispersiva das regiões 1 e 2 (direita).</i>	65
<i>Figura 37 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura do interior do bolso (esquerda) e análise de energia dispersiva das regiões 1 e 2 (direita).</i>	65
<i>Figura 38 – Energia de deslizamento durante os ensaios esclerométricos secos.</i>	67
<i>Figura 39 – Energia de deslizamento durante os ensaios esclerométricos lubrificados.</i>	67
<i>Figura 40 – Exemplos de trilhas de desgaste geradas durante o deslizamento: (a) seco polido; (b) lubrificado polido; (c) seco texturizado; (d) lubrificado texturizado.</i>	69

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Comparação das características de diferentes métodos de texturização a laser.</i>	<i>11</i>
<i>Tabela 2 - Comparação das características de diferentes métodos de texturização.</i>	<i>12</i>
<i>Tabela 3 – Código das amostras, concentrações e tempos utilizados nos ensaios de texturização superficial. ...</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 4 - Parâmetros utilizados na texturização por MECT das amostras planas.</i>	<i>53</i>
<i>Tabela 5 - Profundidade das amostras planas ensaiadas.</i>	<i>53</i>
<i>Tabela 6 – Ensaios tribológicos efetuados.</i>	<i>56</i>
<i>Tabela 7 – Resultados dos testes com o esclerômetro pendular. Valores em termos de ângulo de inclinação final à esquerda e em J à direita.</i>	<i>66</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Massa molar relativa do eletrodo
F	Constante de Faraday
h	Altura / Distância do centro de massa
H_s	Número de Hersey, dado por $(\eta \omega) / P$
I	Corrente elétrica
m	Massa metálica usinada eletroquimicamente / Massa do pêndulo
P	Pressão
t	Tempo
W	Largura dos motivos da textura
Z	Número de elétrons na reação
η	Viscosidade absoluta
ω	Velocidade de rotação

LISTA DE ABREVIATURAS

AJM	<i>Abrasive Jet Machining</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DLIP	<i>Direct Laser Interference Patterning</i>
EBL	<i>Electron Beam Lithography</i>
EDS	<i>Energy Dispersive Spectrometry</i>
IPT	<i>Inkjet Printing Texturing</i>
LED	<i>Light emitting diode</i>
LST	<i>Laser surface texturing</i>
MECT	<i>Maskless Electrochemical Texturing</i>
MC	<i>Micro Coining</i>
PCT	<i>Photochemical Texturing</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1. OBJETIVO GERAL	14
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.3. DELINEAMENTO DO TEXTO.....	14
2. REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1. CONCEITOS FUNDAMENTAIS	16
2.2. REGIMES DE LUBRIFICAÇÃO	17
2.3. TESTES DE DESEMPENHO TRIBOLÓGICO EM COMPONENTES TEXTURIZADOS	20
2.4. AVALIAÇÕES POR ESCLEROMETRIA PENDULAR	22
2.5. EFEITOS DA TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL.....	23
2.5.1. EFEITOS DA TEXTURIZAÇÃO EM CONDIÇÕES DE ATRITO SECO.....	26
2.5.2. EFEITOS DA TEXTURIZAÇÃO EM CONDIÇÕES DE LUBRIFICAÇÃO LIMÍTROFE	26
2.5.3. EFEITOS DA TEXTURIZAÇÃO NO REGIME HIDRODINÂMICO DE LUBRIFICAÇÃO	27
2.5.4. EFEITOS DA TEXTURIZAÇÃO NO REGIME MISTO DE LUBRIFICAÇÃO	29
2.5.5. EFEITOS DA TEXTURIZAÇÃO EM CONDIÇÕES DE FORNECIMENTO LIMITADO DE LUBRIFICANTE	30
2.6. TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO DE SUPERFÍCIES TEXTURIZADAS.....	31
2.6.1. TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL A LASER.....	31
2.6.2. TEXTURIZAÇÃO FOTOQUÍMICA	34
2.6.3. TEXTURIZAÇÃO POR DESCARGAS ELÉTRICAS	35
2.6.4. TEXTURIZAÇÃO COM FEIXE DE ÍONS E ELÉTRONS	36
2.6.5. USINAGEM COM JATO ABRASIVO	37
2.6.6. USINAGEM ELETROQUÍMICA E MECT	38
3. MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1. DESENVOLVIMENTO DO APARATO EXPERIMENTAL	44
3.2. FABRICAÇÃO DA FERRAMENTA E DAS AMOSTRAS	46
3.3. ESTUDO DE PARÂMETROS	48
3.4. ENSAIOS DE TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL	49
3.5. AVALIAÇÕES POR PERFILOMETRIA E MEV	51

3.6. ENSAIOS TRIBOLÓGICOS	52
4. <u>RESULTADOS E DISCUSSÕES</u>	57
4.1. RESULTADOS DO ESTUDO DE PARÂMETROS	57
4.2. AVALIAÇÃO DA PROFUNDIDADE E DO PERFIL DAS TEXTURAS USINADAS	59
4.3. AVALIAÇÃO DO DIÂMETRO DAS TEXTURAS E DA REGIÃO ENTRE OS BOLSOS	61
4.4. AVALIAÇÃO DO MATERIAL NA REGIÃO USINADA	64
4.5. RESULTADOS DOS ENSAIOS TRIBOLÓGICOS	66
5. <u>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</u>	70
6. <u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	72
7. <u>APÊNDICES</u>.....	77
APÊNDICE A	78
APÊNDICE B	79
APÊNDICE C.....	80
APÊNDICE D	81

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a texturização superficial chamou a atenção de diversos pesquisadores como uma maneira eficiente de se obter propriedades superficiais melhoradas. A texturização pode proporcionar a obtenção de superfícies superhidrofóbicas e autolimpantes (Callies *et al.*, 2005; Liu e Kim, 2014). Também, a maior biocompatibilidade de próteses metálicas texturizadas tem atraído a atenção da área médica (Gao *et al.*, 2009). Ainda, superfícies texturizadas têm se mostrado capazes de responder melhor a adesão de pinturas e revestimentos, absorção luminosa, vibração, desgaste, atrito e etc. Atualmente são encontradas aplicações para superfícies texturizadas nos campos da óptica, acústica, termodinâmica, bioengenharia e também na lubrificação e tribologia, objetos de estudo deste trabalho (Coblas *et al.*, 2015).

Porém, quando se trata do comportamento tribológico de componentes mecânicos, a texturização superficial pode levar a efeitos tanto positivos quanto negativos. Alguns estudos na literatura apresentaram resultados excepcionais, como por exemplo, redução do atrito de até 38% e do desgaste de até 72%, para uma fração de área texturizada de 5% (Tang *et al.*, 2013). Entretanto, resultados negativos foram também reportados na literatura, evidenciando a dependência dos padrões operacionais e do regime de lubrificação envolvido em cada caso (Dobrica *et al.*, 2010; Vladescu *et al.*, 2015).

Diversas técnicas, ou associações de técnicas, podem ser utilizadas com a finalidade de produzir texturas superficiais. Mesmo que boa parte das técnicas empregadas atualmente consigam obter texturas de elevada resolução e repetibilidade, estas se mostram inviáveis em uma perspectiva de produção industrial de componentes de baixo custo, uma vez que envolvem equipamentos de alto custo, elevado gasto de energia e longos tempos de fabricação. Este é o caso da texturização superficial a laser (*laser surface texturing*, LST), a qual é amplamente utilizada na atualidade. Seu desenvolvimento aconteceu na década de 1990 e desde então foi aprimorada progressivamente (Etsion, 2005). Hoje a LST pode utilizar de pulsos da ordem de femtosegundos, os quais possibilitam resoluções micrométricas. A Tabela 1 relaciona alguns tipos de LST e suas principais características.

Além da texturização a laser, outras técnicas de texturização têm sido desenvolvidas. A Tabela 2 faz uma comparação de algumas técnicas alternativas que

têm apresentado grande potencial de utilização em aplicações industriais. A observação das Tabelas 1 e 2 evidencia o quão evoluídas estão as técnicas de texturização em termos de precisão e resolução, sendo possível fabricar superfícies texturizadas nos mais diversos materiais, contendo geometrias da ordem de nanômetros. Por outro lado, a utilização de técnicas menos precisas, porém mais baratas e capazes de texturizar grandes áreas rapidamente, pode ser a chave para a utilização industrial em larga escala da texturização superficial.

Tabela 1 - Comparação das características de diferentes métodos de texturização a laser.

Fonte: (Gachot *et al.*, 2017).

Características		Texturização a Laser			
		ns	ps	fs	DLIP
Geometria do bolso	w(μm)	$\geq 10\mu\text{m}$	$\geq 5\mu\text{m}$	$\geq 5\mu\text{m}$	$\geq 1\mu\text{m}$
	h(μm)	$\geq 3\mu\text{m}$	nm - mm	nm - mm	nm - μm
Custo	Disponível Comercialmente	Sim	Sim	Sim	Sim
	Custo de equipamento	+++	++++	+++++	+++
	Custo de processamento	+++	+++	+++	+++
	Tempo de processamento	20 - 45 min	>30s	30s - 5 min	>30s
Material	Metais	Sim	Sim	Sim	Sim
	Cerâmicos	Alguns	Alguns	Sim	Alguns
	Vidro	Sim	Sim	Sim	Não
	Polímeros	Sim	Sim	Sim	Sim
"+" significa baixo e "+++++" significa muito alto					
w= largura de cada elemento , h= profundidade de cada elemento.					
Tempo estimado para texturizar uma área lisa e limpa de 100 x 100 mm, w= 150 μm , h= 20 μm , área coberta =0.15					
ns = nanossegundo, ps = picossegundo, fs = femtossegundo, DLIP= direct laser interference patterning					

Evidenciada na literatura a carência de técnicas capazes de aliar velocidade, custo e precisão satisfatório no processo de texturização, faz-se necessário pesquisas direcionadas ao desenvolvimento destas, assim como estudos voltados à compreensão dos fenômenos envolvendo atrito e desgaste e sua relação com a texturização superficial.

Um método de texturização superficial capaz de produzir texturas em tempos muito curtos, mesmo para peças grandes, foi proposto por Costa e Hutchings (2009), chamado de texturização superficial eletroquímica sem mascaramento (MECT). A vantagem da técnica está no fato de que a textura da ferramenta pode ser inteiramente transferida à peça, não existindo a necessidade de que os padrões que compõem a textura sejam feitos um a um, como no caso da texturização a laser, e dispensando a

obrigação de mascarar todas as peças fabricadas, reduzindo consideravelmente os tempos e custos de fabricação. Além disso, os custos do equipamento também são muito reduzidos, assim como a energia gasta no processo, o que proporciona a esta técnica grande possibilidade de aplicação industrial para componentes de baixo custo.

Porém, mesmo com este enorme potencial, a técnica MECT ainda não está disponível comercialmente, como verificado recentemente por Gachot *et al.* (2017), e exposto na Tabela 2. A possibilidade de fabricação de texturas de geometrias diversas em tempos curtos e com baixo custo também é muito conveniente em ambiente de pesquisa, de forma que o uso de MECT em condições laboratoriais tem o potencial de facilitar a avaliação de diferentes padrões de textura em condições tribológicas controladas.

Tabela 2 - Comparação das características de diferentes métodos de texturização.

Fonte: (Gachot *et al.*, 2017)

Características		MECT	PCT	IPT	EBL	MC
Geometria do bolso	w(μm)	$\geq 150 \mu\text{m}$	nm - μm	$\geq 40 \mu\text{m}$	nm - μm	nm - μm
	h(μm)	5 - 100 μm	nm - μm	3 - 100 μm	nm - μm	μm - mm
Custo	Disponível Comercialmente	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
	Custo de equipamento	+	++++	+++	+++++	++++
	Custo de processamento	+	++++	+++	+++++	++
	Tempo de processamento	30s	15 min	8 - 10 min	170 dias	30s - 3 min
Material	Metais	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
	Cerâmicos	Alguns	Alguns	Alguns	Sim	Não
	Vidro	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
	Polímeros	Não	Não	Não	Sim	Sim
"+" significa baixo e "+++++" significa muito alto						
w= largura de cada elemento , h= profundidade de cada elemento.						
Tempo estimado para texturizar uma área lisa e limpa de 100 x 100 mm, w= 150 μm , h= 20 μm , área coberta =0.15						
MECT= Maskless electrochemical texturing, PCT = Photochemical texturing, IPT = Inkjet printing texturing, EBL = Electron beam lithography, MC = Micro coinning.						

A técnica MECT é considerada como sem mascaramento por dispensar o mascaramento das peças individualmente, de modo que existe mascaramento apenas na ferramenta utilizada. Em Costa e Hutchings (2009), o mascaramento da ferramenta foi obtido através da perfuração a laser da ferramenta e da utilização de uma máscara isolante. No trabalho de Parreira (2011), o processo de eletroerosão seguido por pintura com tinta isolante foi responsável pela inserção dos padrões e do isolamento na ferramenta. Neste trabalho será avaliada a utilização de mascaramento por adesivo perfurado a laser. Esta inovação pode reduzir significativamente o tempo, o custo e a

complexidade necessários para a confecção dos mascaramentos no ambiente de pesquisa. Além disso a vazão de eletrólito não acontecerá pelos furos na ferramenta, de forma que será testada a utilização de fluxo de eletrólito paralelo à face da ferramenta e da amostra. Esta inovação tem a intenção de reduzir a perda de carga e aumentar a vazão de eletrólito do conjunto, além de facilitar a fabricação da ferramenta.

Diversas técnicas experimentais e numéricas têm sido utilizadas para avaliar o comportamento tribológico de superfícies texturizadas. Os testes do tipo bloco sobre anel e pino sobre disco são usuais em avaliações de condições de filmes finos de lubrificante. Entretanto, neste trabalho, propõe-se o desenvolvimento de uma nova metodologia de avaliação, através da utilização de um esclerômetro pendular, às vezes referido como pêndulo de Uppsala, adaptado para atender as características pertinentes da avaliação. Testes com mecanismos pendulares foram inicialmente utilizados para avaliar a resistência ao impacto no final do século XIX, a dureza na década de 1930 e a resistência à abrasão na década de 1970. Visgbo e Hogmark (1984) afirmaram que o ensaio pendular poderia ser considerado para diversas aplicações especiais, desde que fossem selecionados os parâmetros relevantes para cada ensaio, como por exemplo a massa do pêndulo e o indentador. Esta avaliação ainda tem a vantagem de ser executada muito rapidamente. Nos ensaios para avaliação da resistência à abrasão, o martelo é substituído por um indentador angular. Porém, acredita-se que com a substituição do indentador angular por um indentador esférico, condições de contato mais suaves possam ser simuladas. Desta forma, seria possível medir-se a energia gasta durante o deslizamento, a qual estaria relacionada com o atrito em condições de desgaste por deslizamento. Com a aplicação de uma quantidade controlada de lubrificante antes dos ensaios, seria possível avaliar esta energia em condições de fornecimento insuficiente de lubrificante.

Portanto, este trabalho tem a finalidade de contribuir com inovações capazes de aproximar ainda mais a texturização superficial de um contexto industrial, aprimorando a técnica de texturização superficial eletroquímica sem mascaramento, a fim de reduzir custos e tempos envolvidos no processo e possibilitar a texturização de peças cilíndricas com resolução satisfatória. Além disso, este trabalho propõe o

desenvolvimento de uma nova metodologia para avaliar os efeitos da texturização superficial em condições de fornecimento insuficiente de lubrificante.

1.1. Objetivo geral

Desenvolver um equipamento capaz de texturizar amostras cilíndricas de aço baixo carbono, similares a eixos e mancais hidrodinâmicos, aperfeiçoando a técnica de texturização superficial eletroquímica sem mascaramento, além de avaliar o efeito das texturas geradas em condições a seco e com fornecimento insuficiente de lubrificante.

1.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos deste trabalho, propõem-se:

- Investigar a possibilidade da utilização de fluxo de eletrólito paralelo à face texturizada.
- Examinar a possibilidade do emprego de mascaramento adesivo em substituição ao mascaramento por fotolitografia.
- Avaliar a influência de diferentes concentrações de eletrólito.
- Determinar a tensão e o tempo de texturização que possibilitam a fabricação das texturas com perfil circular fiel ao mascaramento e com profundidade adequada segundo a literatura.
- Avaliar o perfil das texturas geradas.
- Verificar se o processo de texturização implica em alterações na composição química do material.
- Verificar a possibilidade de avaliação das texturas geradas através da utilização de um esclerômetro pendular.

1.3. Delineamento do texto

O capítulo 2 deste trabalho apresenta uma breve revisão da literatura. A seção 2.1 apresenta conceitos necessários à compreensão dos fenômenos envolvendo contatos lubrificados e desgaste, detalhando algumas noções e definições a respeito da texturização de superfícies e classificação dos tipos de contato. A seção 2.2 revisa

os tipos e regimes de lubrificação. A seção 2.3 menciona algumas das avaliações mais utilizadas em superfícies texturizadas. A seção 2.4 comenta brevemente sobre as avaliações pendulares e esclerométricas. A seção 2.5 comenta e expõe trabalhos da literatura no que diz respeito aos possíveis efeitos da texturização em superfícies deslizantes. A seção 2.6 expõe as técnicas mais utilizadas para a fabricação de superfícies texturizadas e comenta os resultados de trabalhos que utilizaram das mesmas. O capítulo 3 apresenta os materiais e métodos, bem como a manufatura do aparato experimental e os aspectos relevantes denotados no decorrer da pesquisa. O capítulo 4 relaciona e comenta os resultados obtidos. O capítulo 5 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Conceitos fundamentais

Texturização superficial faz referência à modificação intencional de características morfológicas, visando obter uma superfície com padrões uniformemente distribuídos que alterem suas propriedades tribológicas. É realizada através da manufatura de um arranjo de irregularidades superficiais com forma e distribuição controladas, as quais podem tanto ser irregularidades em relevo quanto um arranjo de depressões. Texturas superficiais compostas de um arranjo controlado de depressões são mais comuns na literatura devido às suas vantagens em termos de micro lubrificação e da maior simplicidade de confecção. A texturização superficial pode ser realizada em escala macro, micro ou mesmo nanométrica. A rugosidade, em contraste com a textura superficial, é considerada randômica e é caracterizada pela ausência de uniformidade (Costa, 2005).

O comportamento tribológico de superfícies texturizadas é fortemente dependente do tipo de contato entre as superfícies e do regime de lubrificação (Gachot *et al.*, 2017). É comum classificar a característica do contato existente entre superfícies em movimento relativo em dois tipos. O primeiro tipo são os contatos ditos conformes, aqueles que apresentam um grau elevado de conformidade geométrica entre as superfícies em contato, como é o caso dos mancais de deslizamento. Para este tipo de contato a literatura reporta os melhores resultados quanto a redução do atrito e aumento da espessura do filme lubrificante. A segunda classificação abrange os contatos não conformes, aqueles onde a relação entre as superfícies apresenta baixa conformidade geométrica no contato, cames e engrenagens por exemplo. Para este tipo de contato os ganhos reportados na literatura são mais modestos e envolvem mecanismos ainda não totalmente compreendidos, uma vez que surgem cargas e tensões elevadas e tempos de contato muito curtos (Hamrock e Anderson, 1983; Hutchings e Shipway, 2017). A Figura 1 exhibe exemplos dos contatos citados.

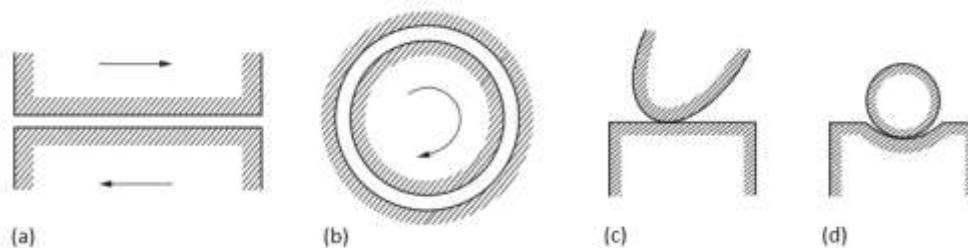


Figura 1 - Exemplo de contatos conformes (a e b) e não conformes (c e d).

Fonte:(HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

2.2. Regimes de lubrificação

Os primeiros estudos experimentais envolvendo mancais e lubrificação remontam aos trabalhos de Beauchamp Tower. O pesquisador verificou a presença de campos de pressão hidrodinâmica no filme lubrificante dos mancais os quais estudava (Tower, 1883; 1885). Em 1886, Osborne Reynolds utilizou uma forma reduzida da equação de Navier-Stokes, juntamente com a equação da continuidade, para gerar uma equação diferencial para a pressão no espaço entre superfícies de deslizamento. Reynolds teve a intenção de explicar analiticamente os resultados encontrados por Tower alguns anos antes. Esta pressão, reportada experimentalmente por Tower e expressa analiticamente por Reynolds, permite que uma carga seja transmitida entre as superfícies com atrito extremamente baixo. Isto ocorre porque, como demonstrado por Tower, as superfícies estão completamente separadas por uma película de lubrificante formada hidrodinamicamente. Nesta situação, as propriedades físicas do lubrificante, como a viscosidade dinâmica, determinam o comportamento do sistema (Reynolds, 1886; Hamrock *et al.*, 2004).

Na lubrificação hidrodinâmica, o filme que separa as superfícies impede o contato entre estas. A pressão responsável pela sustentação da carga resulta das forças viscosas, gerando uma condição ideal, uma vez que isto proporciona um baixo atrito e uma alta resistência ao desgaste. Neste caso, as características de atrito surgem amplamente do cisalhamento do próprio lubrificante. As superfícies em oposição devem ser neste caso conformes. Ainda que uma carga normal possa ser suportada devido à pressão gerada no contato entre as duas superfícies em deslizamento, esta pressão não atinge valores capazes de causar significativa deformação elástica nas superfícies (Hutchings e Shipway, 2017).

No contexto da lubrificação limítrofe, as superfícies não estão completamente separadas por uma camada de lubrificante. Os efeitos do filme lubrificante são

reduzidos devido ao contato entre as asperezas, sendo mais importante as propriedades físicas e químicas de filmes de superfície fina, os quais geram uma espessura de filme com proporções moleculares. A formação destas camadas de ordem molecular pode ser atribuída a alguns mecanismos e interações, entre eles a adsorção química e a adsorção física, sendo que reações químicas que envolvem ou não o substrato podem estar presentes. As propriedades do lubrificante são de menor importância no caso limítrofe, uma vez que o coeficiente de atrito é praticamente independente da viscosidade do lubrificante. As características do atrito são ditadas pelas propriedades dos sólidos envolvidos e do filme lubrificante nas interfaces comuns. Evidentemente o desgaste e o atrito nos casos de lubrificação limítrofe são mais acentuados do que nos casos de lubrificação hidrodinâmica e elastohidrodinâmica, entretanto estes ainda são bem menores do que nos casos de contatos não lubrificados (Stachowiak e Batchelor, 2013; Hutchings e Shipway, 2017).

Entre os extremos da lubrificação hidrodinâmica e da lubrificação limítrofe existem ainda outros regimes de lubrificação. No caso de contatos não conformes, onde a pressão é elevada, temos o que é chamado de regime elastohidrodinâmico de lubrificação. Neste regime, as superfícies se deformam elasticamente e a viscosidade do lubrificante cresce de forma exagerada devido às altíssimas pressões de contato, da ordem de 1 a 4 GPa (Hamrock *et al.*, 2004).

O comportamento no regime de lubrificação misto é regido por uma combinação de efeitos da lubrificação limítrofe e hidrodinâmica. A transição do regime hidrodinâmico para misto não ocorre instantaneamente. À medida em que a carga aumenta, uma parte maior desta é suportada pela pressão de contato entre as asperezas dos sólidos.

As curvas de Stribeck constituem uma ferramenta interessante para a compreensão dos regimes de lubrificação (Figura 2). Estas curvas relacionam a velocidade de operação e a espessura do filme lubrificante com o atrito. Elas descrevem a transição entre os diferentes regimes de lubrificação com o aumento da velocidade e da viscosidade. São geralmente traçadas com o atrito sendo a ordenada e a espessura relativa do filme lubrificante sendo a abscissa. A espessura relativa do filme lubrificante é caracterizada pelo número de Hersey, dado por:

$$H_s = \frac{\eta\omega}{P}$$

Em que:

$P = \text{Pressão, Pa}$

$\eta = \text{viscosidade absoluta, Pa} \cdot \text{s}$

$\omega = \text{velocidade de rotação, rps}$

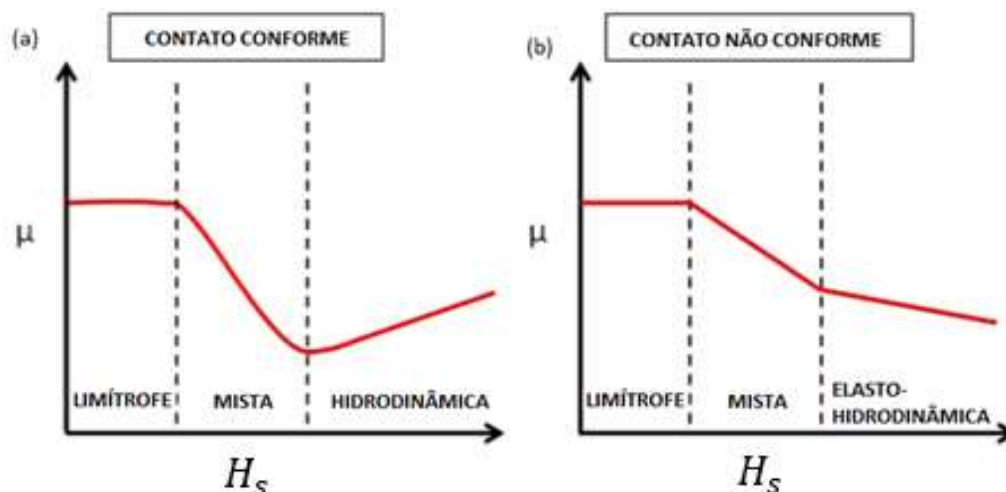


Figura 2 - Curvas de Stribeck para contatos conformes (a) e não conformes (b).

Fonte: (GACHOT et al., 2017).

Para números de Hersey muito pequenos não ocorre a formação real de uma película lubrificante, verifica-se elevado coeficiente de atrito, resultado do intenso contato entre as asperidades, característica do regime de lubrificação limítrofe. No limiar do regime de lubrificação mista, o coeficiente de atrito começa a cair com o aumento do número de Hersey, uma vez que agora parte da carga está suportada pelo filme lubrificante. Quanto maior a espessura do filme lubrificante, maior será a parte da carga suportada por este e assim menor o atrito observado no conjunto. Com o aumento da velocidade a espessura do filme lubrificante cresce, chegando ao ponto em que não ocorre mais contato entre as superfícies, neste caso a carga é inteiramente suportada pela película lubrificante, caracterizando o regime hidrodinâmico de lubrificação (Stachowiak e Batchelor, 2013). Da mesma forma, quando a velocidade diminui, a espessura do filme também diminui para manter o campo de pressão. A partir deste ponto, aumentos na velocidade e espessura do filme lubrificante acabam por gerar mais atrito nos casos de lubrificação hidrodinâmica, devido principalmente à força de cisalhamento resultante na própria película lubrificante (Hamrock *et al.*, 2004; Hutchings e Shipway, 2017).

Para contatos não conformes, em regime de lubrificação de filme completo, pode-se observar que para valores muito elevados do número de Hersey o atrito tende a cair. Este efeito ocorre quando o aumento do número de Hersey se dá pelo aumento da velocidade do fluido, o que pode resultar em altas taxas de cisalhamento. Quando o lubrificante é sujeito a taxas de cisalhamento excessivas, normalmente na ordem de 10^6 s^{-1} , o lubrificante passa a apresentar comportamento não newtoniano, de modo que a viscosidade do fluido diminui progressivamente, diminuindo as perdas por cisalhamento (Zhu *et al.*, 2015).

Os parâmetros que definem a espessura da camada lubrificante, nos casos de lubrificação hidrodinâmica, são o carregamento, a velocidade, a geometria do contato e as propriedades do lubrificante. Acontece que nem sempre o fornecimento de lubrificante é suficiente para sustentar a camada hidrodinâmica de forma estável para as condições de carregamento, velocidade e propriedades do lubrificante presentes. Esta situação é caracterizada como de fornecimento limitado de lubrificante (*starved condition*) (Costa, 2013).

Grande parte dos componentes mecânicos, como mancais de deslizamento, são usualmente projetados para operar em condições hidrodinâmicas de lubrificação, desta maneira, dependem de fornecimento suficiente de lubrificante, capaz de manter as superfícies separadas para as condições vigentes. Uma diminuição no fornecimento de lubrificante vai impossibilitar a formação de uma camada estável separando as superfícies e o componente não poderá operar em condições hidrodinâmicas, resultando em maior atrito e desgaste. Este fenômeno é comum quando ocorrem falhas no sistema de alimentação de lubrificante, ou em condições de movimento alternado por exemplo.

2.3. Testes de desempenho tribológico em componentes texturizados

Existem diversos testes utilizados para avaliar o desempenho tribológico de componentes. Estes podem ser agrupados em quatro categorias: testes de campo, testes de bancada, testes de componente e testes de modelo. Testes de campo são geralmente demorados e de alto custo, porém avaliam o desempenho em condições reais. Testes de bancada são realizados com partes ou subsistemas, os quais reproduzem a condição real em um ambiente de laboratório. Testes de componentes são aqueles realizados com as peças originais, porém em um sistema simplificado.

Existem ainda os testes de modelo, utilizados para simular uma condição crítica, como por exemplo um carregamento, temperatura ou sentido de rotação. Este tipo difere dos testes de campo, bancada e componente, os quais simulam uma função real. São realizados em um ambiente de laboratório sob condições de teste controladas e parâmetros variáveis (Torbacke *et al.*, 2014; Hutchings e Shipway, 2017).

Os testes de modelo mais comumente empregados para avaliar atrito e desgaste utilizam de um sistema onde um pino ou bloco é pressionado sobre um disco. São utilizados carregamentos e velocidades controladas e deslocamento alternado ou rotativo. Estes testes são padronizados pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM G99-17). A Figura 3 traz alguns exemplos de configurações adotadas na execução deste tipo de teste.

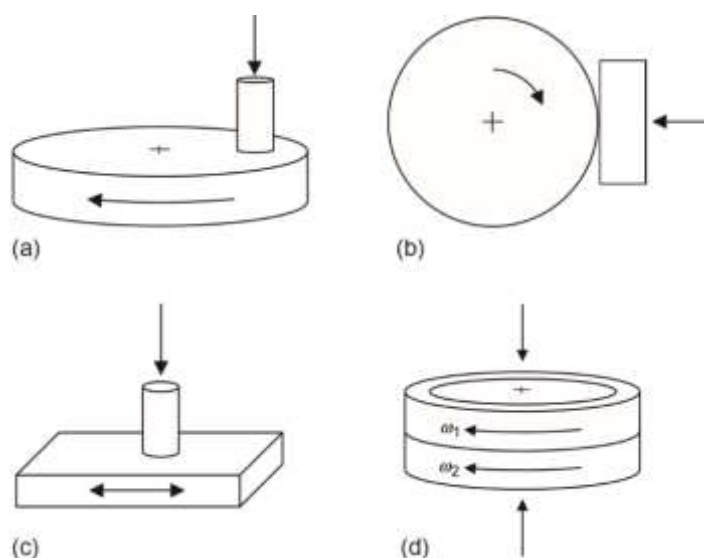


Figura 3 – Diferentes configurações de contato para testes de modelo. (a) Pino sobre disco. (b) Bloco sobre anel. (c) Pino sobre placa (d) Anel sobre anel. Fonte:(Hutchings e Shipway, 2017).

A Figura 4 apresenta um gráfico típico de um teste do tipo pino sobre disco para avaliação do atrito de superfícies texturizadas. No eixo vertical está plotado o atrito, enquanto no eixo horizontal tem-se a velocidade de deslizamento e o tempo. Este gráfico é resultado do trabalho de Kovalchenko *et al.* (2005). Os pesquisadores compararam superfícies texturizadas por laser, polidas e lixadas. A diferença no coeficiente de atrito entre a amostra polida e lixada refletiu a diferença de rugosidade, com a lubrificação sendo mais efetiva no caso polido. O disco texturizado por laser (LST) apresentou coeficiente de atrito ainda menor do que o da amostra polida, sendo que a rugosidade entre os bolsos é semelhante à do disco polido. Em velocidades mais altas, as diferenças no atrito se tornam desprezíveis, devido ao aumento na

espessura da camada do filme lubrificante nestas velocidades. Isto ocorre porque, no caso de espessuras maiores, as interações na camada de lubrificante dominam o comportamento do atrito. Desta forma, as texturas e a rugosidade desempenham um papel mínimo.

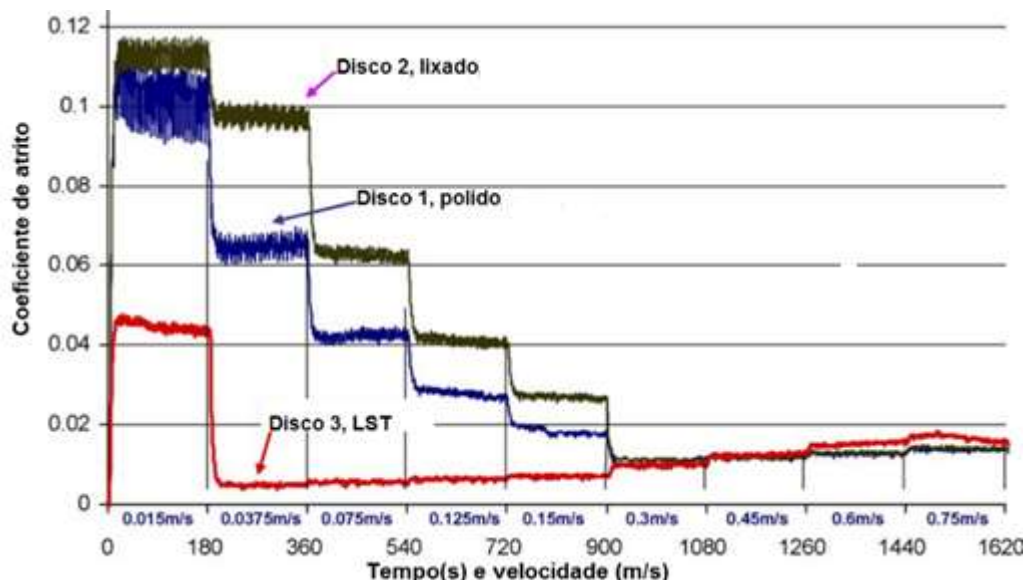


Figura 4 - Gráfico característico de teste do tipo pino sobre disco.

Fonte:(Kovalchenko *et al.*, 2005).

2.4. Avaliações por esclerometria pendular

A utilização de avaliações de propriedades de materiais através do uso de sistemas pendulares de impacto é antiga. Patentes de equipamentos para avaliar dureza baseados na perda de energia através de sistemas pendulares possuem registro anterior ao final da década de 1930 (Pendulum hardness tester, 1930; Sward, 1933). O teste conhecido como ensaio Charpy foi muito utilizado para fornecer informações sobre a resistência à fratura. Consiste em soltar de uma altura conhecida um pêndulo com massa definida para impactar um espécime entalhado de material. A energia transferida para o material pode ser deduzida a partir da comparação da diferença de altura do pêndulo antes e depois do impacto. O mesmo conceito também é utilizado no teste do tipo Izod, a diferença está basicamente na maneira como a amostra é presa ao aparato.

Vingsbo e Hogmark (1984) utilizaram um equipamento de testes Charpy modificado para avaliar a relação da energia gasta na produção dos sulcos com a resistência abrasiva. Os pesquisadores provaram que o método era preciso e reproduzível, desta forma, útil para classificar diferentes materiais quanto à resistência

a abrasão. Sales *et al.* (1999) avaliaram a qualidade de fluidos de corte a partir da quantificação da energia específica de riscamento. Pustovalov *et al.* (2013) propuseram um equipamento do tipo esclerômetro pendular capaz de proporcionar análise de resistência à corrosão a partir de relações da emissão acústica do riscamento.

Como observado nos parágrafos anteriores, a literatura é rica em exemplos de utilização de avaliações baseadas nos princípios da esclerometria pendular. A seção 3.6 descreve a metodologia adotada neste trabalho, a fim de utilizar a esclerometria pendular como ferramenta de avaliação para superfícies texturizadas.

2.5. Efeitos da texturização superficial

A texturização superficial tem se mostrado uma opção viável para o aperfeiçoamento de propriedades ligadas ao atrito e ao desgaste em componentes mecânicos. Estas melhorias de desempenho se devem principalmente aos 3 fatores descritos nos próximos parágrafos.

O primeiro fator é a capacidade das cavidades de atuarem como micro reservatório de lubrificante, efeito semelhante ao provocado pelo processo de brunimento. O brunimento foi o primeiro caso de ampla utilização da texturização superficial na engenharia, extensivamente utilizado desde a década de 1940 em motores diesel. Este processo tem o objetivo de prevenir falha em componentes que trabalham em regimes severos, com cargas, temperaturas e velocidades elevadas. Consiste da manufatura de sulcos em regiões críticas, em conjunto com regiões relativamente planas. Os sulcos servem como reservatório para o óleo lubrificante, enquanto as regiões planas garantem a capacidade de apoio. Este processo é muito utilizado em cilindros de motores automotivos, mas também em outros componentes.

O segundo fator está ligado à tendência de que detritos presentes no lubrificante se depositem nas texturas (Figura 5), transformando-as em armadilhas capazes de armazenar detritos. Quando circulam pela interface os detritos acabam por prejudicar a vida útil do filme lubrificante e o desempenho do conjunto, aumentando o desgaste (Tomanik, 2013).

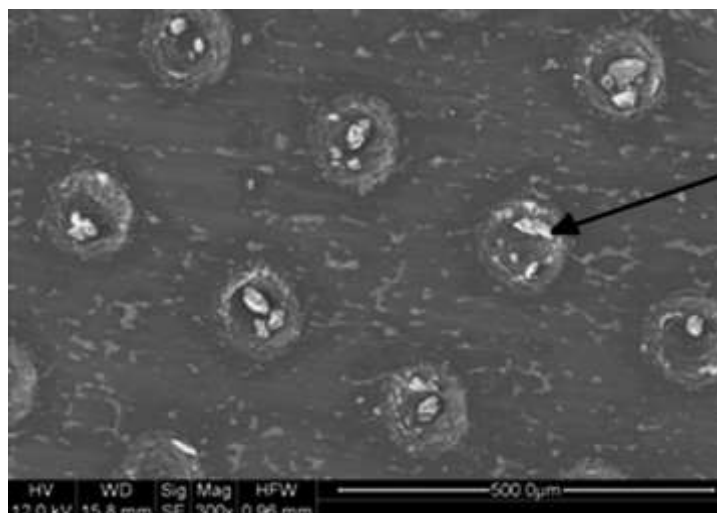


Figura 5 - Detritos depositados em texturas. Fonte:(Tomanik, 2013).

O terceiro fator é a atuação como um micro mancal hidrodinâmico, através da geração de pressão hidrodinâmica, proporcionada pelas texturas, que resulta em elevação da capacidade de carga.

As primeiras verificações evidenciando a geração de pressão hidrodinâmica proporcionada por irregularidades são resultado do trabalho desenvolvido por Hamilton *et al.* (1966). Os pesquisadores conduziram investigações em um conjunto experimental composto por um rotor e um selo opticamente transparente. Verificaram a presença de interrupções no filme lubrificante causadas por linhas onde ocorria cavitação, estas pareciam coincidir com irregularidades superficiais (Figura 6).

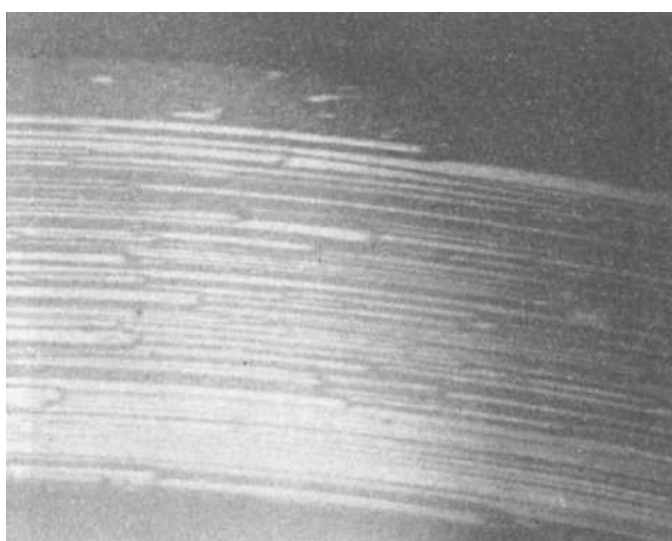


Figura 6 - Linhas de cavitação observadas em um selo transparente. Direção de rotação da esquerda para a direita. Fonte:(Hamilton *et al.*, 1966).

Um modelo analítico foi então elaborado para prever o efeito da geometria de micro irregularidades na capacidade de carga de selos mecânicos. O modelo elaborado pelos pesquisadores considerava o efeito provocado pela cavitação no contato lubrificado hidrodinamicamente.

A geração de pressão hidrodinâmica é atribuída principalmente ao fenômeno de cavitação, presente na região divergente dos bolsos devido à diminuição da pressão nesta área. A pressão não pode assumir valores menores do que a pressão de vapor do lubrificante, pois isto causa a sua vaporização. Desta forma, a pressão de cavitação é a pressão mínima possível no conjunto. Esse fato possibilita a capacidade de carga adicional observada, decorrente da pressão positiva resultante. (Tang *et al.*, 2013). A bolha de cavitação que se forma em cada bolso evita que os picos de pressão negativa cancelem os picos de pressão positiva (Gachot *et al.*, 2017). A Figura 7 ilustra a pressão resultante quando da ocorrência ou não do fenômeno da cavitação.



Figura 7 - Variação da pressão devido à presença de um bolso. Fonte:(Tang *et al.*, 2013).

Foi assim evidenciado que micro irregularidades e cavidades estavam intimamente envolvidas no processo de lubrificação hidrodinâmica entre duas superfícies paralelas. O mecanismo de elevação da capacidade de carga demonstrou ser uma provável forma de controle do desempenho em lubrificação hidrodinâmica. Esta constatação estimulou o uso da texturização superficial com os objetivos de

aumentar a capacidade de carga e diminuir o atrito em contatos lubrificados hidrodinamicamente (Hamilton *et al.*, 1966).

2.5.1. Efeitos da texturização em condições de atrito seco

Para os contatos em regime de atrito seco, os principais efeitos da texturização superficial mencionados na literatura são a redução do atrito estático e a redução do desgaste, este último causado principalmente pelo aprisionamento de detritos proporcionado pelas texturas.

A redução do atrito estático através da texturização é amplamente utilizada na indústria de fabricação de discos rígidos desde a década de 1990. Chilamakuri e Bhushan (1997) desenvolveram um modelo estatístico para projetar curvas de estimativa do número crítico de texturas em função do seu raio, as quais podem prever tanto a deformação plástica quanto diminuir o atrito estático, no caso de atrito seco em discos rígidos.

Redução no desgaste para o caso de atrito seco foi verificada no trabalho de Borghi *et al.* (2008). Os pesquisadores compararam o efeito de texturas circulares de 100µm de diâmetro e 50µm de profundidade em condições de atrito seco e lubrificado com uma gota de óleo. Amostras de aço nitretado foram avaliadas em um aparato do tipo pino sobre disco. Os pesquisadores reportaram redução no atrito de 10% no caso texturizado seco. Além disso, neste caso foi observada a deposição de resíduos de desgaste nas texturas. No caso não texturizado seco o atrito e o desgaste foram maiores, possivelmente devido à maior quantidade de resíduos de desgaste na interface de deslizamento.

2.5.2. Efeitos da texturização em condições de lubrificação limítrofe

No caso de lubrificação limítrofe a superfície suporta o carregamento, sendo que a força de atrito é reduzida por camadas finas, de ordem molecular, presentes nas superfícies dos sólidos em contato. Este regime de lubrificação está presente em muitos componentes mecânicos, geralmente no início ou no fim do movimento, onde as velocidades de deslizamento são mais baixas ou as cargas mais altas. Os mecanismos responsáveis pelo atrito, segundo Pettersson e Jacobson (2007), são influenciados por uma série de parâmetros, dentre eles o lubrificante, a dureza e a

rugosidade da superfície. A introdução de texturas pode diminuir o atrito, mas é necessário que as texturas consigam gerar pressão hidrodinâmica suficiente.

Wang *et al.* (2007) exploraram o efeito do tamanho e profundidade de bolsos circulares na redução do atrito no regime de lubrificação limítrofe. Os bolsos avaliados possuíam diâmetros entre 20 e 60 μm e profundidade entre 2,5 e 10 μm . Os testes foram conduzidos com cargas entre 98 e 296 N e velocidades entre 0,2 e 1,3 m/s. Os resultados encontrados sugerem que os bolsos de menor diâmetro e profundidade possibilitam as maiores reduções no atrito. Os pesquisadores avaliaram que no caso de lubrificação limítrofe a superfície está submetida a uma grande pressão de contato, assim os bolsos com lubrificante estão submetidos a deformação plástica e elástica. Portanto, o lubrificante armazenado nas texturas pode estar sujeito a pressão hidrostática suficiente para induzir reações capazes de balancear a força normal e, portanto, reduzir o atrito. Este efeito deve depender da taxa de deformação e da velocidade de deslizamento. Sob a mesma carga, quanto menor o tamanho do bolso, maior a pressão de compressão gerada.

2.5.3. Efeitos da texturização no regime hidrodinâmico de lubrificação

Inúmeros trabalhos, tanto experimentais quanto numéricos, investigaram o efeito de texturas no regime de lubrificação hidrodinâmico nos últimos anos. Redução no atrito e elevação da capacidade de carga foram reportados com frequência.

A influência da texturização na espessura do filme lubrificante foi estudada por Costa e Hutchings (2007). O caso em questão avaliava o deslizamento alternado entre superfícies planas texturizadas de aço sobre contra corpos cilíndricos em condições de lubrificação hidrodinâmica. Padrões como bolsos, linhas paralelas e texturas em “V”, ou *chevrons*, foram sistematicamente variadas e testadas pelos pesquisadores, além da fração de área texturizada, da profundidade e largura das texturas. Seus resultados apontaram para espessuras de filme lubrificante menores do que as de amostras não texturizadas para os casos em que as características das texturas eram muito maiores do que a largura de contato. Padrões compostos de bolsos circulares apresentaram a maior espessura de filme lubrificante para uma fração de área texturizada de 11%. Entre os padrões investigados, os do tipo “V” (Figura 8), especialmente aqueles apontando na direção de deslizamento, foram os mais

eficazes no aumento da espessura do filme lubrificante, enquanto as linhas paralelas foram as menos eficazes.

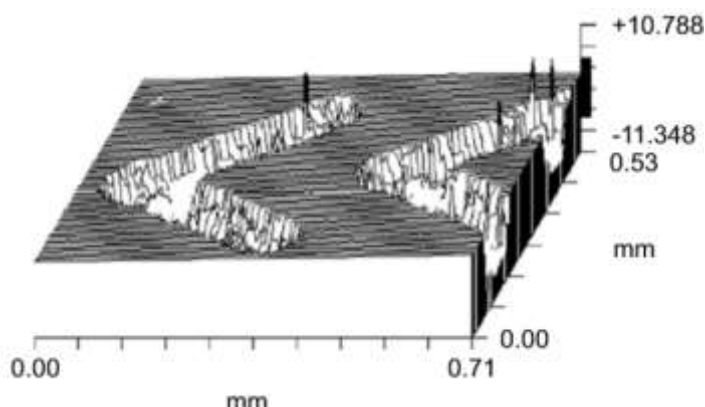


Figura 8 - Padrões em "V". Fonte:(Costa e Hutchings, 2007).

Yu *et al.* (2010) analisaram a influência da forma do bolso e da direção de deslizamento na geração de pressão hidrodinâmica entre contatos conformes. Bolsos circulares, triangulares e elípticos foram testados. Para a análise, os pesquisadores utilizaram um modelo teórico baseado em apenas um bolso, assim como o método da sobre relaxação sucessiva. Uma vez que a intenção dos autores era analisar o formato e a orientação do bolso em relação ao deslizamento, os bolsos simulados tiveram a mesma área ($17671\mu\text{m}^2$), profundidade ($8\mu\text{m}$) e relação de área coberta (7%). Os resultados apontaram para capacidades de carga reduzidas para elipses com eixo maior orientado paralelo ao deslizamento e para triângulos apontados na direção do deslizamento, em relação aos bolsos circulares. Contudo, a orientação oposta apresentou capacidade de carga superior quando comparada aos bolsos circulares, demonstrando assim forte influência da orientação da textura. Este estudo apontou para as elipses com eixo maior perpendicular ao deslizamento como a mais favorável textura para elevação da capacidade de carga.

Um conjunto anel cilindro lubrificado hidrodinamicamente foi analisado numericamente através de um algoritmo para cavitação com conservação de massa por Checo *et al.* (2014). Os pesquisadores relataram que para o caso de contato não conforme, aqueles onde o raio do anel era muito pequeno, a criação de texturas em formato de bolsos levaria a desempenhos prejudiciais. Contudo, para os casos conformes eles encontraram reduções do atrito de até 73% e aumento da espessura do filme lubrificante de 86%. A pressão de pico e a capacidade de carga aumentaram com o tamanho dos bolsos, de modo que a textura ideal é uma matriz quadrada de

bolsos aproximadamente do tamanho da largura do anel. A profundidade ótima sugerida pelos resultados é de 10 μ m, embora provavelmente dependa fortemente da carga.

2.5.4. Efeitos da texturização no regime misto de lubrificação

No regime de lubrificação misto as texturas foram apontadas como eficientes para aprisionar resíduos de desgaste, reduzir o atrito e aumentar a espessura da camada lubrificante.

O trabalho de Borghi *et al.* (2008), citado na seção 2.5.1, demonstrou que assim como no caso de atrito seco, no regime de lubrificação misto as texturas também atuavam como armadilhas de detritos, reduzindo o desgaste.

Texturas do tipo “cruz” feitas a partir de interferência laser foram analisadas em um teste do tipo esfera sobre disco e regime de lubrificação misto, em Rosenkranz *et al.* (2015). A camada lubrificante foi mantida por um tempo até 130 vezes maior no caso texturizado em relação ao caso polido. Este estudo também apontou o mecanismo de aprisionamento de detritos como eficiente na redução do desgaste em lubrificação mista.

O comportamento tribológico do aço com texturas circulares de diâmetros entre 15 e 800 μ m foi avaliado em testes do tipo pino sobre disco unidirecional em regime misto de lubrificação no trabalho de Braun *et al.* (2014). A área texturizada e a relação entre profundidade e diâmetro foram mantidas constantes em 10% e 0.1 respectivamente. Foi relatada redução no atrito de até 80% para o caso ótimo, sendo que o diâmetro que leva às maiores reduções no atrito depende da velocidade e da temperatura do lubrificante. Uma redução na temperatura do lubrificante de 100 para 50 °C resultou em variação do diâmetro com maior redução do atrito de 40 pra 200 μ m.

A atuação dos bolsos como micro mancais hidrodinâmicos e o consequente aumento da espessura do filme lubrificante acaba por reduzir a relação entre carregamento e velocidade para a qual o sistema não apresenta uma separação completa entre as superfícies. O trabalho de Kovalchenko *et al.* (2005) demonstrou que este efeito causa um deslocamento nas curvas de Stribeck, expandindo o intervalo para o qual a lubrificação ocorre em filme completo.

2.5.5. Efeitos da texturização em condições de fornecimento limitado de lubrificante

Com o objetivo de avaliar os efeitos da condição limitada de fornecimento de lubrificante em superfícies de metal de rolamento texturizadas, Zhang *et al.* (2014), fabricaram bolsos circulares em discos de metal de rolamento e efetuaram testes do tipo pino sobre disco em diferentes condições de trabalho. Os resultados encontrados pelos pesquisadores sugerem que o aprisionamento de partículas de desgaste, a atuação como micro reservatório de lubrificante e a geração de pressão hidrodinâmica estão presentes também em condições de fornecimento limitado de lubrificante.

Superfícies de cobre texturizadas com bolsos circulares foram avaliadas em condições de fornecimento limitado de lubrificante, no trabalho de (Li *et al.*, 2014). Além de superfícies polidas, superfícies texturizadas com bolsos de 1100 μ m de diâmetro, profundidade de 10 μ m e densidade de texturas de 5, 13 e 35% foram examinados, numa configuração do tipo pino sobre disco, lubrificado com uma fina camada de óleo Mobil Vacuoline 1405. Para os testes com aumento linear do carregamento de 20N até 400N (2.54N/s) e velocidade de rotação constante de 150 rpm, o caso com 13% de densidade de texturas teve um desempenho significativamente mais favorável, reduzindo o atrito pela metade, além de quintuplicar o tempo até a falha e aumentar a capacidade de carga em até 4 vezes. Assim, demonstrou-se que as texturas ajudaram a melhorar o desempenho tribológico, devido principalmente à atuação como micro reservatório de lubrificante. Entretanto, uma vez que o desempenho da superfície com 13% de área texturizada foi superior ao da superfície com 35%, fica evidente que existe uma densidade ótima de texturização para este caso.

Mishra e Polycarpou (2011) investigaram experimentalmente o comportamento tribológico de diversas texturas feitas a partir de LST em condições de operação de fornecimento limitado de lubrificante em compressores de refrigeração. Os testes tribológicos foram efetuados em uma configuração do tipo pino sobre disco, o material utilizado foi o ferro fundido cinzento, comumente empregado em compressores de refrigeração. A condição de falta de lubrificante foi simulada com a aplicação de uma gota de lubrificante sobre a superfície. Bolsos com diâmetros de 40 μ m e 60 μ m, profundidades de 10.5 μ m, 7.5 μ m e 4 μ m, densidades de texturização de 5% e 20% foram testados, assim como amostradas não texturizadas. Foram

registrados coeficientes de atritos tão baixos quanto 0,05. As amostras não texturizadas falhavam após aproximadamente 10 minutos de experimento, enquanto todas as amostras texturizadas não apresentaram comportamento típico de falha após as 3 horas de duração do experimento. As vantagens no comportamento tribológico foram consideradas independentes do tipo de lubrificante e refrigerante.

2.6. Técnicas de fabricação de superfícies texturizadas

Diversas técnicas vêm sendo utilizadas com a finalidade de produzir texturas superficiais. A escolha da técnica adequada é de fundamental importância, dado que além dos custos e tempos envolvidos no processo, a definição alcançada na impressão dos padrões, bem como a profundidade e os ângulos de incidência acabarão refletindo nos resultados obtidos. Dentre as técnicas mais utilizadas na literatura estão a texturização a laser (Etsion, 2005), a texturização fotoquímica (Zhang e Meng, 2012) e a texturização superficial eletroquímica sem mascaramento (Costa e Hutchings, 2009). Existem ainda outras técnicas menos usuais que utilizam de jatos abrasivos, feixes de íons reativos, litografia com feixe de elétrons (Pease, 1981), além de outras formas químicas e mecânicas, (Pettersson e Jacobson, 2006).

2.6.1. Texturização superficial a Laser

A texturização a laser é amplamente utilizada em uma vasta gama de materiais, de metais a cerâmicos e polímeros. A perda de material ocorre predominantemente por vaporização devido à alta energia fornecida pela focalização do feixe laser, processo denominado ablação. Áreas refundidas e afetadas termicamente estão presentes na região próxima às texturas devido à alta energia fornecida no processo. Além disso, os bolsos apresentam protuberâncias nos contornos (Figura 9), geralmente eliminadas por processos posteriores de polimento.

Há décadas, a texturização a laser é utilizada industrialmente na área de componentes eletrônicos e de armazenamento magnético (Chilamakuri e Bhushan, 1997). Esta técnica evoluiu bastante e hoje existem variantes da mesma que possibilitam pulsos da ordem de femtosegundos, proporcionando texturas com geometrias de 5µm, e ainda reduzindo significativamente os problemas causados pelo alto aporte térmico (Etsion, 2005). Entretanto a texturização a laser apresenta alguns

inconvenientes. Uma delas é que o tempo total para produzir as texturas em grandes áreas é elevado, uma vez que as geometrias são produzidas individualmente. A fusão localizada pode introduzir tensões residuais e micro trincas, capazes de levar a falha do componente. Também, os custos de equipamento são altos. A utilização de pulsos laser mais curtos não acaba definitivamente com os problemas introduzidos pela alta energia, além disso os custos de equipamento são maiores (Gachot *et al.*, 2017). As regiões refundidas também possuem uma dureza mais elevada, que pode causar aumento no desgaste dos componentes em contato com essas regiões.

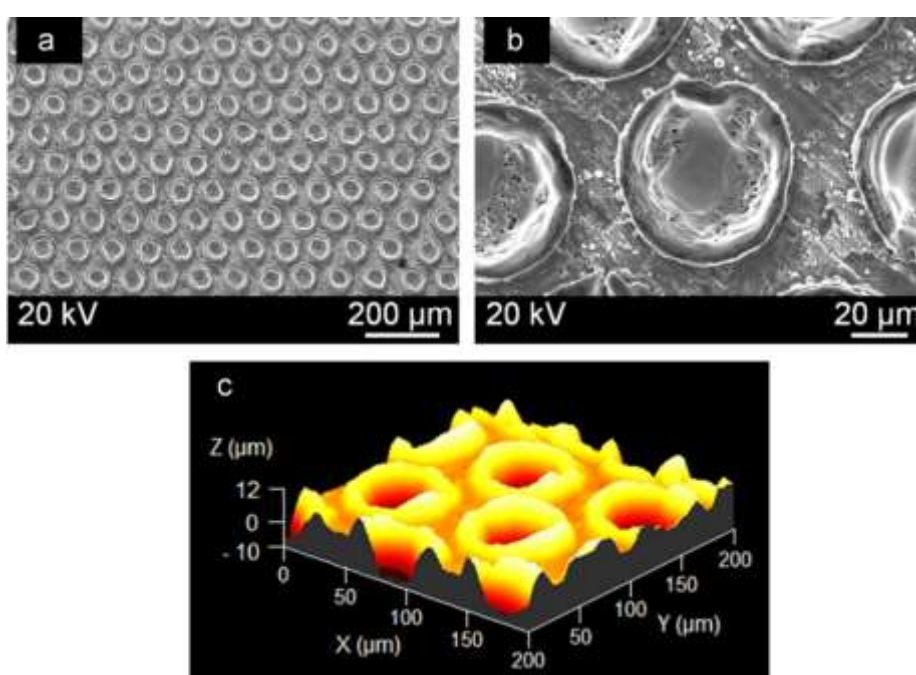


Figura 9 - Detalhe de protuberâncias produzidas durante a fabricação de bolsos por LBM.

Fonte: (Mishra e Polycarpou, 2011).

Existe ainda uma técnica que utiliza da energia de feixes laser sem necessariamente causar a ablação do material, conhecida como interferência laser (DLIP). Esta técnica emprega diversos feixes laser para produzir campos de interferência, causando gradientes de temperatura e tensão superficial capaz de movimentar o material na superfície. Uma vez que ocorre deslocamento de material, esta técnica altera a topografia da superfície como um todo, ao contrário do laser tradicional que apenas produzia ressaltos ou rebaixos. A Figura 10 permite visualizar as diferenças na formação das texturas a partir da interferência laser e do laser convencional. Este método pode produzir geometrias maiores do que 1 μm e ser aplicado em metais, polímeros e alguns cerâmicos (Mücklich *et al.*, 2006).

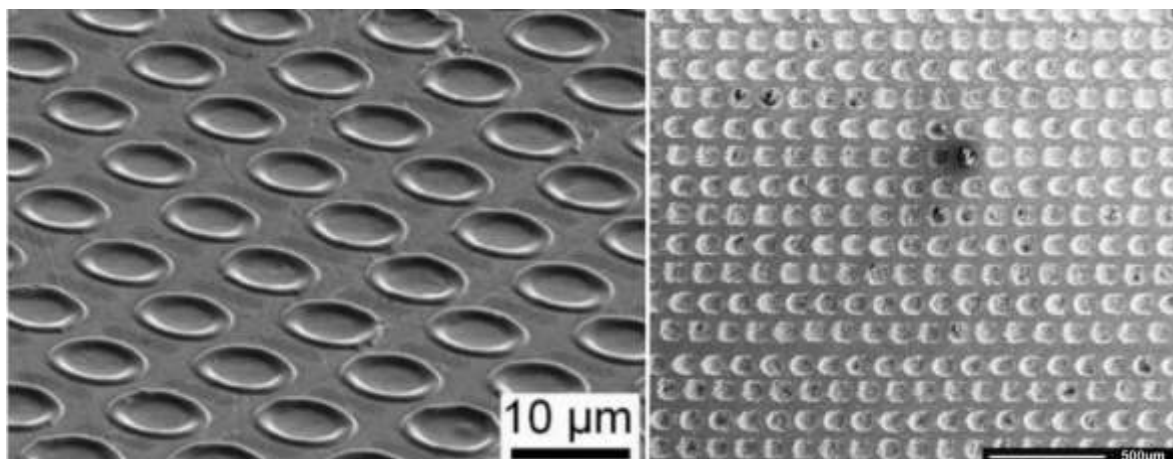


Figura 10 - Comparação entre crateras produzidas a partir de interferência laser (à esquerda) e laser convencional (à direita). Fonte: (Duarte *et al.*, 2008), (Borghi *et al.*, 2008).

Diversos estudos podem ser mencionados como exemplo da utilização da texturização a laser para melhoria do desempenho tribológico, entre eles o trabalho de Borghi *et al.* (2008). Este estudo demonstrou ser possível a redução do coeficiente de atrito de 0,8 para 0,2, em superfícies texturizadas a laser com bolsos circulares e regime de lubrificação hidrodinâmico com carregamento normal maior que 3N. Redução de 10% no coeficiente de atrito foi observada para o caso não lubrificado com carregamento normal de 1N.

Um modelo para demonstrar o potencial da redução do atrito com a utilização de bolsos esféricos fabricados por LST foi desenvolvido por Ronen *et al.* (2001). Foi verificado que a interação entre bolsos adjacentes é significativa e que seus efeitos na pressão hidrodinâmica não podem ser negligenciados. Alterações na densidade da área dos bolsos entre 5% e 20% alteravam o atrito em menos de 7%, o aumento do número de bolsos sobre o comprimento axial do anel do pistão reduzia o atrito bruscamente até um número de 12 bolsos, depois disso a redução era mais moderada. Encontraram um valor ótimo da relação profundidade e diâmetro do bolso que varia entre cerca de 0,1 e 0,18. Seu trabalho evidenciou que redução de atrito de 30% ou mais é perfeitamente viável com a utilização de texturas superficiais.

Stoeterau *et al.* (2017) conduziram um estudo exploratório afim de reduzir o atrito entre o cavaco e a face de ferramentas de corte. Insertos de metal duro foram texturizados a laser com esferas parciais de diâmetros 350 µm e 110 µm e então usinagens foram conduzidas em diferentes materiais com diferentes velocidades de

corte e taxas de alimentação a profundidade constante, utilizando uma emulsão de fluido de corte a 10%. Os resultados mostraram que cavacos contínuos com grande comprimento de contato podem produzir força hidrodinâmica suficiente para induzir uma redução na força de corte, porém, para outros tipos de cavaco, os pesquisadores não observaram redução significativa na força de corte.

O método de interferência laser também apresentou resultados favoráveis quanto ao desempenho tribológico das texturas geradas. No trabalho de Duarte *et al.* (2008), foram reportadas diminuições no coeficiente de atrito de aproximadamente 20% para diversas estruturas de texturas superficiais em testes do tipo pino sobre disco. Os pesquisadores ainda evidenciaram um aumento na vida útil do filme lubrificante de 1500% para as texturas do tipo cruz. Este aumento é creditado à capacidade da textura em agir como reservatório para o lubrificante. As texturas do tipo linha tiveram um desempenho inferior às superfícies planas. Este efeito se deve ao fato de que estas estruturas atuam como canais que promovem o escoamento do lubrificante. O trabalho de Rosenkranz *et al.* (2015), citado anteriormente e que apontou para aumento da vida útil do filme lubrificante de mais de 130 vezes, também utilizou de texturas em forma de cruz obtidas através de interferência laser.

2.6.2. Texturização fotoquímica

A texturização fotoquímica (photochemical texturing, PCT) é uma técnica amplamente utilizada na indústria, principalmente na área de fabricação de placas de circuito impresso. Esta técnica é capaz de produzir gravações complexas com detalhes precisos, além de ser aplicável a uma vasta gama de materiais.

De forma simplificada, o processo consiste da exposição da região a ser usinada a uma solução corrosiva. Inicialmente ocorre o recobrimento de toda a região com uma resina fotossensível. Esta resina depositada é seletivamente exposta a radiação UV com o auxílio de uma máscara com o padrão de usinagem desejado. Desta forma, a região exposta à radiação UV é sensibilizada. Na etapa de revelação da resina, as regiões expostas à radiação UV são removidas por um revelador, restando assim uma região do substrato exposta e uma região recoberta pela resina fotossensível. O passo seguinte consiste do ataque das regiões expostas com uma solução corrosiva, capaz de atacar o substrato, porém inerte em relação à resina. Após o ataque a resina é removida e o resultado do processo é um substrato

texturizado (Zhang e Meng, 2012). A Figura 11 ajuda a ilustrar esse procedimento. O trabalho de Costa e Hutchings (2007) utilizou da usinagem fotoquímica para a fabricação das texturas avaliadas, assim como o trabalho de Shinde *et al.* (2018).

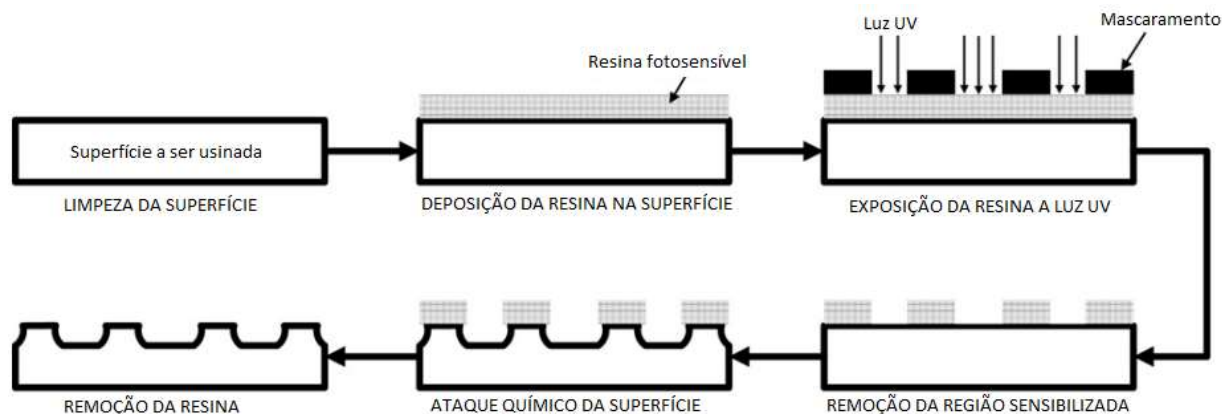


Figura 11- Exemplo de procedimento utilizado na usinagem fotoquímica. Fonte: (Zhang e Meng, 2012).

2.6.3. Texturização por descargas elétricas

O processo de texturização por descarga elétrica consiste na erosão metálica simultânea de um eletrodo e do substrato imersos em um fluido dielétrico. Por meio da conversão da energia elétrica em energia térmica, induzida por uma alta tensão no espaço entre os eletrodos, ocorre a vaporização de uma parcela minúscula de material. Pode ser usado em qualquer material condutor elétrico e em alguns cerâmicos. Apresenta como vantagens a possibilidade de fabricação de geometrias complexas, com ângulos pequenos e geometrias da ordem de 100 μm , entretanto o elevado tempo de processamento devido à baixa taxa de remoção de material é um entrave para a utilização acentuada da técnica (Costa, 2005; Coblas *et al.*, 2015).

Koshy e Tovey (2011) utilizaram a texturização por descarga elétrica para gerar texturas em ferramentas de corte. A intenção dos pesquisadores era possibilitar melhor penetração e retenção do lubrificante e assim diminuir o atrito entre o cavaco e a face da ferramenta. Verificaram redução significativa na força de corte para ferramentas texturizadas com típicas crateras criadas a partir de descarga elétrica. A redução na força de corte foi maior para as texturas em forma de cratera do que para as texturas lineares, atestando assim a possibilidade de utilização de texturas criadas a partir de descarga elétrica. Constataram ainda que esta redução era mais considerável quando as velocidades de corte eram baixas.

O efeito da texturização por descarga elétrica em chapas de alumínio foi avaliado por Zhou *et al.* (2011) para diferentes velocidades e pressões de contato em um teste do tipo lâmina sobre lâmina (*flat-on-flat*). Foi avaliado que para os casos onde ocorriam pressões de contato suficientemente elevadas, ocorria redução no coeficiente de atrito, porém o mesmo não acontecia para baixas pressões de contato. Para o caso onde a pressão de contato era muito baixa, a utilização de texturas típicas de EDM chegou a ser prejudicial, uma vez que o coeficiente de atrito observado era maior do que o verificado em superfícies laminadas.

2.6.4. Texturização com feixe de íons e elétrons

A utilização de íons focalizados (*focused ion beam*, FIB) atraiu atenção como técnica de texturização superficial por permitir tanto a extração quanto a deposição de material, possibilitando resolução da ordem de 100 nm ou até menos. Os íons são produzidos de uma fonte de metal líquido, geralmente Gálio, e então focados, estes penetram o material e enquanto transferem energia removem os átomos da peça. Este método apresenta como vantagem a alta resolução, sem restrições de material do substrato. Entretanto, da mesma forma que outras técnicas já citadas, o tempo de texturização é elevado, limitando a técnica para texturização de superfícies pequenas. Um feixe de elétrons focado também pode ser utilizado para texturizar superfícies, dado que estes possuem elevada energia, capaz de produzir pressão suficiente para fundir e retirar o metal fundido de dentro da área da textura. Contudo, o custo do equipamento é alto devido à necessidade da texturização acontecer no vácuo (Coblas *et al.*, 2015)

Com a intenção de retardar o desgaste em ferramentas de micro fresagem, Chang *et al.* (2011) produziram, através da utilização de íons focados, sulcos perpendiculares, paralelos e a 45° (Figura 12) na aresta de uma ferramenta de corte de 2mm de diâmetro e 10mm de comprimento. O efeito destas texturas foi avaliado medindo-se a força de corte. Os sulcos posicionados perpendicularmente à face tiveram um desempenho mais significativo na redução da força de corte e apresentaram um desgaste menor no flanco da ferramenta em relação às demais texturas. As texturas formadas por sulcos perpendiculares também apresentaram desempenho interessante no trabalho de Kawasegi *et al.* (2017), estes utilizaram FIB seguido de tratamento térmico para texturizar ferramentas de diamante.

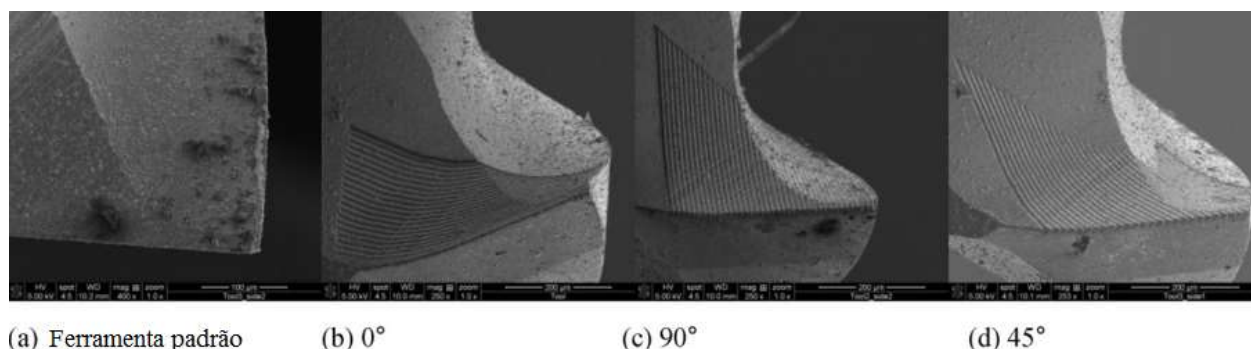


Figura 12- Textura na face das ferramentas de corte. Fonte:(Chang *et al.*, 2011).

2.6.5. Usinagem com jato abrasivo

Na usinagem com jato abrasivo (*abrasive jet machining*, AJM) fragmentos do substrato são removidos pelo choque com partículas abrasivas aceleradas por uma corrente de fluido. Existem duas formas de criar texturas a partir do uso do jato abrasivo, numa delas as partículas de abrasivo são aceleradas a partir de um bocal muito pequeno, a outra forma consiste da utilização de um processo de mascaramento. A utilização do bocal só pode produzir texturas de algumas dezenas de micrometros, no entanto dispensa a utilização do complicado processo de mascaramento. A aplicação de mascaramento, embora dispendiosa, proporciona texturas da ordem de 50 μm (Arslan *et al.*, 2016).

Wakuda *et al.* (2003) verificaram o efeito de micro bolsos no comportamento do atrito entre cerâmicos a base de nitreto de silício e aço. Para tal fim usinaram micro bolsos através do uso de AJM e LST, cada técnica apresentou um perfil de bolsos bem característicos, sendo que os bolsos produzidos a partir de AJM tinham um perfil mais esférico, como pode ser observado na Figura 13. O grupo constatou que as características tribológicas têm grande dependência do tamanho e da densidade dos bolsos, enquanto que a forma do bolso, e assim também o processo utilizado para sua fabricação, não afetaram de forma significativa o coeficiente de atrito.

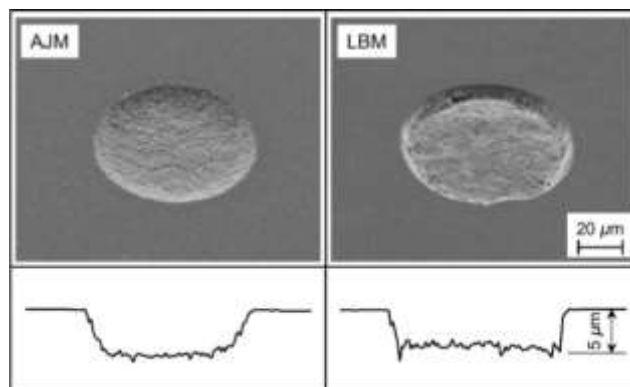


Figura 13 - Perfil dos bolsos usinados por AJM e LST. Fonte: (Wakuda *et al.*, 2003)

2.6.6. Usinagem eletroquímica e MECT

Uma forma interessante de se produzirem texturas origina-se da usinagem eletroquímica. Este processo consiste da utilização da eletrólise com a finalidade de produzir corrosão localizada e assim a forma desejada. O processo de eletrólise por sua vez concerne a reação não espontânea de decomposição de uma substância, por meio de corrente elétrica. Ocorre quando a corrente passa por uma solução aquosa entre os dois condutores, representado esquematicamente na Figura 14.

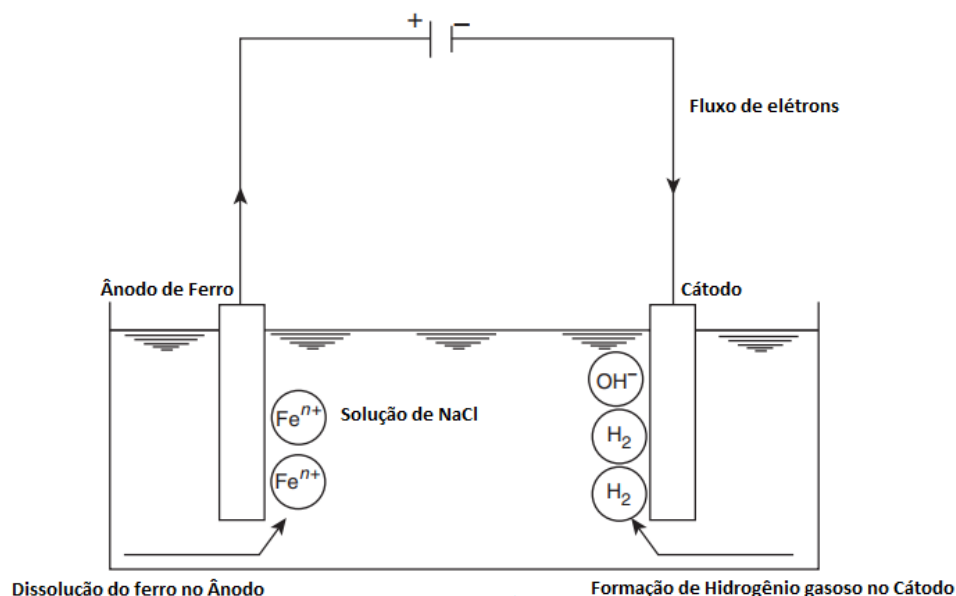


Figura 14 – Representação do processo de eletrólise. Fonte: (Mcgeough, 2005).

Neste processo a peça metálica a ser usinada (ânodo) está conectada ao polo positivo de uma fonte de alimentação, enquanto a ferramenta (cátodo) está conectada ao polo negativo. Ocorre assim dissolução anódica na peça metálica (Mcgeough,

2005). A taxa de dissolução nas regiões anódicas mais próximas da ferramenta é maior porque a queda ôhmica na solução é menor. Deste modo, a forma da ferramenta acaba sendo replicada fielmente na peça, como representado na Figura 15 (Costa e Hutchings, 2009).

A taxa de remoção de material metálico pode ser calculada pela lei de Faraday:

$$m = \frac{A}{Z} * \frac{It}{F}$$

Onde m é a taxa de massa metálica usinada eletroquimicamente; I é a corrente que passa por um tempo t ; A/ZF é chamado de equivalente eletroquímico do ânodo metálico, sendo que Z é o número de elétrons na reação, A é a massa molar relativa do eletrodo e F é a constante de Faraday (Mcgeough, 2005).

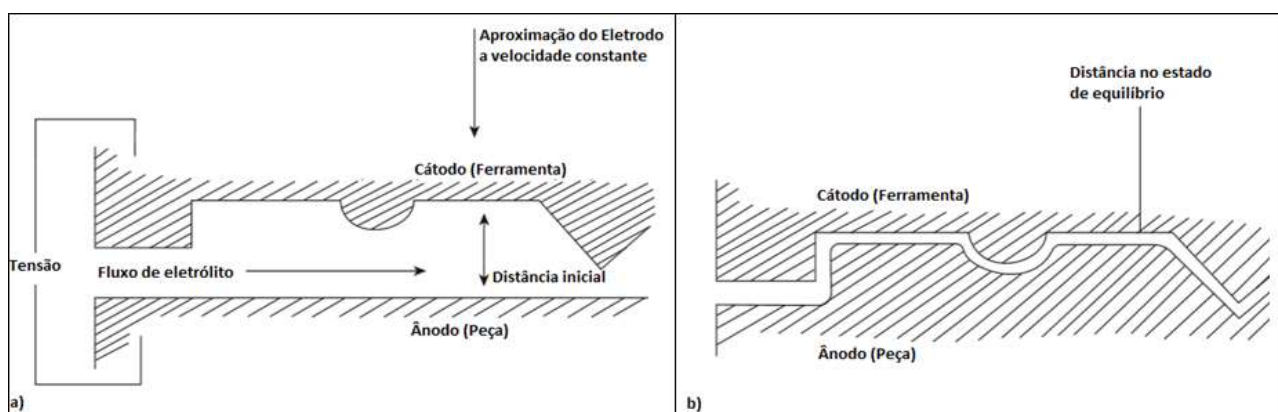


Figura 15- Exemplo de configuração para usinagem eletroquímica. Representação da distância inicial (a) e do estado de equilíbrio (b). Fonte:(Mcgeough, 2005).

Para que ocorra usinagem eletroquímica eficiente, as taxas de fluxo do eletrólito não podem ser muito baixas, uma vez que a eficiência é reduzida por falta de eletrólito para conduzir a corrente. O fluxo insuficiente ainda impede a remoção dos produtos de usinagem, o que dificulta a dissolução do metal. O acúmulo de gás gerado catodicamente pode levar a um curto-circuito entre a ferramenta e a peça, causando danos aos eletrodos e o fim da usinagem. Quando formas complexas devem ser produzidas, torna-se um problema considerável o projeto de ferramentas que incorporem a quantidade certa de fluxo para o eletrólito (Mcgeough, 2005).

Em 2009 outra maneira vantajosa e com amplo potencial para a utilização em escala industrial da usinagem eletroquímica para a texturização superficial foi investigada por Costa e Hutchings, denominada texturização eletroquímica sem mascaramento (MECT). O método permite que uma única ferramenta seja utilizada

como cátodo, na qual a textura é incorporada através de um padrão de perfurações e mascaramento, permitindo a utilização para muitas operações de texturização, evitando assim a necessidade de aplicar as máscaras individualmente nas peças. Os pesquisadores aplicaram este método em peças de aço com baixo teor de carbono, produzindo até 50 μm de profundidade e largura entre 120 μm e 150 μm para perfurações de 220 μm da ferramenta.

O aparato experimental utilizado para a fabricação das texturas por Costa e Hutchings (2009) está exposto na Figura 16. Neste esquema o eletrólito é bombeado e emerge pelos furos na ferramenta. Então entra em contato com a peça, removendo os produtos da dissolução e conduzindo-os para fora desta região. O eletrólito é filtrado e retorna ao processo. A corrente é utilizada na forma de uma onda quadrada, fornecendo tempo de pulso e de descanso, o que possibilita limpeza da região nos tempos de descanso. A eficiência do processo é comprometida pela perda de carga que ocorre na passagem de eletrólito pelos furos na ferramenta. O isolamento da ferramenta é feito com uma máscara perfurada.

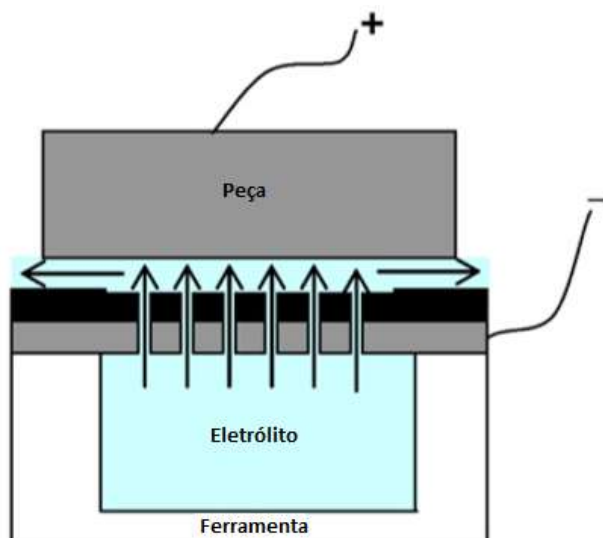


Figura 16- Aparato utilizado para o desenvolvimento da Texturização superficial eletroquímica sem mascaramento. Fonte:(COSTA, H. L.; HUTCHINGS, 2009).

Em Parreira *et al.* (2012), usinagem por descarga elétrica foi utilizada para perfurar as ferramentas. O isolamento foi conseguido com a utilização de uma camada de tinta de 10 μm , tendo sido produzidas diversas texturas em superfícies de aço carbono de forma eficiente. O distanciamento entre eletrodos utilizado pelos pesquisadores não pôde ser menor do que 100 μm , mesmo com a utilização de uma

bomba de alta pressão. Os pesquisadores creditaram este efeito à vaporização do eletrólito.

Com o intuito de elevar a remoção de produtos durante o processo de micro usinagem eletroquímica com mascaramento, Chen *et al.* (2015) estudaram os efeitos da corrente pulsada na geração de texturas. Seus resultados experimentais demonstraram que o ciclo de trabalho utilizado desempenha um papel considerável no aprimoramento da remoção dos produtos e na otimização da uniformidade das texturas. Comparando ciclos de trabalho de 20, 40, 60 e 80%, obtiveram a maior eficiência de corrente com um ciclo de trabalho de 20% a uma frequência de 10 kHz. Além disso, a profundidade das texturas aumentou de 6 μ m para 20 μ m com a redução do ciclo de trabalho de 80 para 20%. Uma matriz de texturas com um diâmetro de aproximadamente 110,6 μ m e uma profundidade de 11 μ m foram geradas com sucesso na superfície cilíndrica utilizando-se uma distância entre eletrodos de 2mm.

A configuração exibida na Figura 17 foi utilizada por Chen *et al.* (2015) para a texturização de superfícies cilíndricas. Para o mascaramento isolante foi utilizado polidimetilsiloxano. Os pesquisadores texturizaram $\frac{1}{4}$ da superfície cilíndrica em cada usinagem, de modo que a parte texturizada era protegida pelo mascaramento nas usinagens subsequentes.

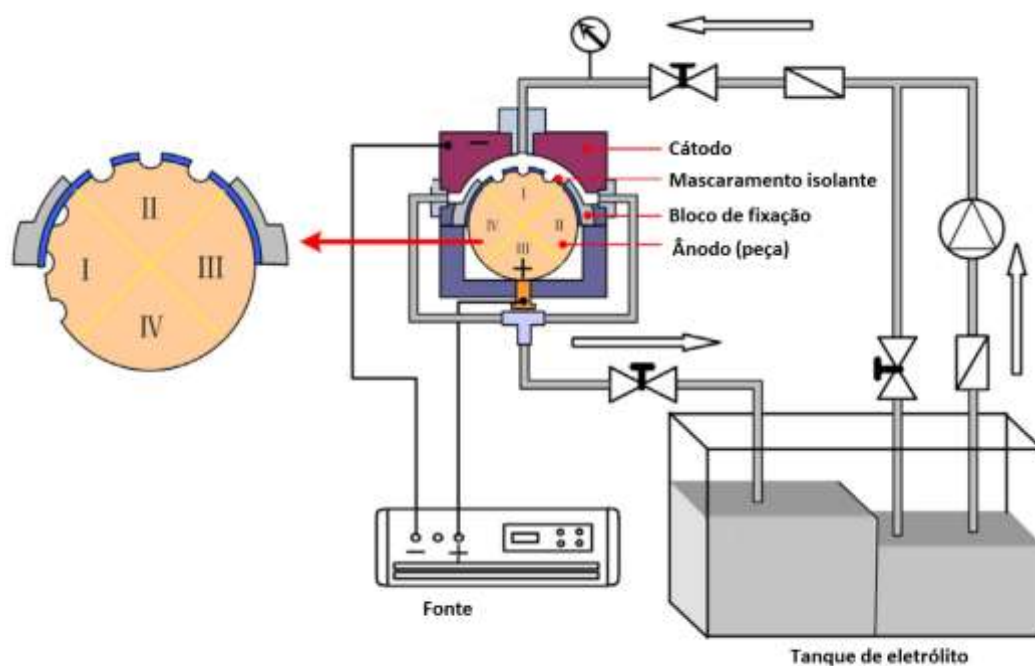


Figura 17 - Configuração para texturização eletroquímica com mascaramento.

Fonte:(Chen *et al.*, 2015).

Qian *et al.* (2014) propuseram a utilização de um ânodo auxiliar para melhorar a localização da usinagem na texturização eletroquímica com mascaramento. A intenção dos pesquisadores era eliminar a usinagem lateral que acontece abaixo da máscara isolante. A Figura 18 expõe a diferença na configuração proposta. Como pode ser verificado na Figura 19, a utilização do ânodo auxiliar foi eficiente para proporcionar bolsos mais uniformes e com menos usinagem lateral abaixo do isolamento.

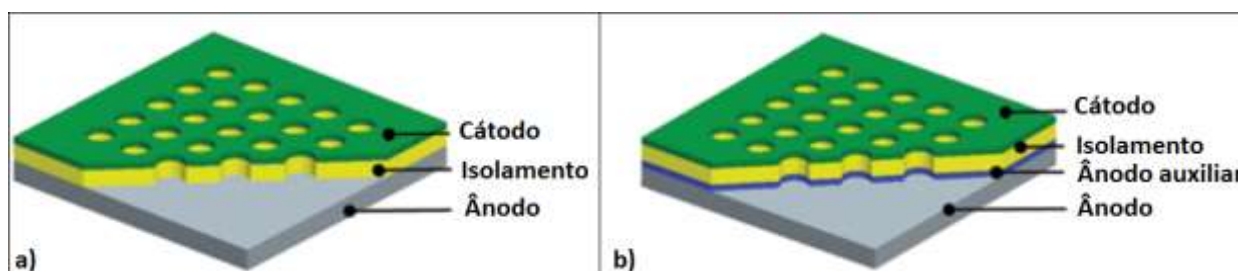


Figura 18 - Texturização superficial eletroquímica tradicional (a) e modelo utilizando ânodo auxiliar (b). Fonte:(Qian *et al.*, 2014).

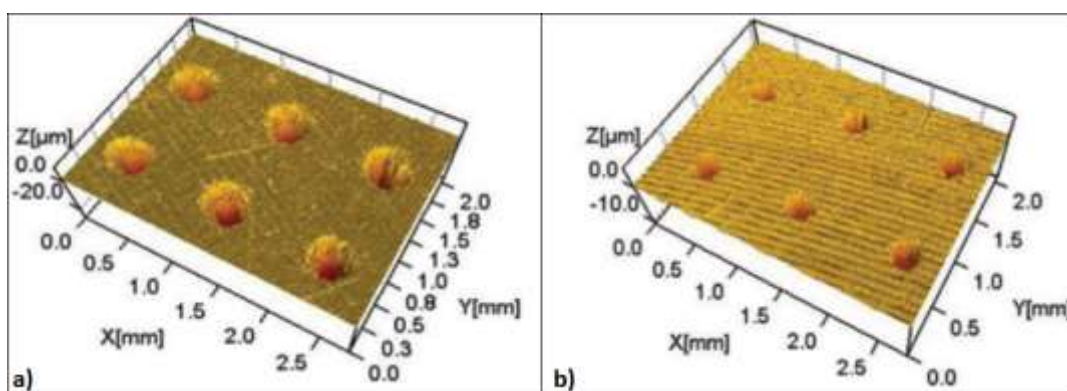


Figura 19 - Resultado da texturização superficial eletroquímica tradicional (a) e do modelo utilizando ânodo auxiliar (b). Fonte:(Qian *et al.*, 2014).

Durante a investigação do comportamento tribológico do ferro fundido cinzento submetido a texturização eletroquímica sem mascaramento, os resultados encontrados por Da Silva e Costa (2017) revelaram redução no atrito de até 2,5 vezes e do desgaste superior a 5 vezes, quando comparando amostras polidas mecanicamente e texturizadas. No entanto, quando da comparação de amostras texturizadas e amostras polidas eletroquimicamente tal melhoria no desempenho foi menor. Isto evidencia que os benefícios foram parcialmente devidos à exposição dos flocos de grafite da matriz, expostos durante o processo de dissolução eletroquímica, uma vez que estes deveriam estar agindo como lubrificante sólido no meio. À medida

em que o desgaste aumentou e o contato entre o bloco e o anel tornou-se mais conforme, os benefícios obtidos pela texturização foram reduzidos.

Em relação as câmaras para texturização utilizadas nos trabalhos citados nos últimos parágrafos, este trabalho tem a intenção de aumentar a vazão de eletrólito através da utilização de fluxo paralelo às faces da amostra e da ferramenta. Esta configuração evita a passagem do eletrólito pelos minúsculos bolsos usinados na ferramenta.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Desenvolvimento do aparato experimental

A primeira etapa do trabalho foi o projeto do equipamento utilizado no processo de texturização. Foram avaliados os modelos de câmaras de texturização utilizados nos trabalhos de Costa e Hutchings (2009), Parreira (2011), Qian *et al.* (2014), Chen *et al.* (2015) e Silva (2016). A partir destes, um novo modelo de câmara foi proposto, o qual é apresentado na Figura 20. Este novo modelo de câmara de texturização foi projetado levando-se em consideração as necessidades de posicionar uma amostra cilíndrica e a ferramenta, além de possibilitar a passagem de eletrólito e corrente elétrica entre as mesmas. O equipamento precisava ser eletricamente isolante, possuir fácil usinabilidade e resistir ao eletrólito sem sofrer demasiado desgaste ou corrosão. Em vista das necessidades mencionadas, foi selecionado o nylon como material para a confecção do equipamento. O desenho técnico dos componentes encontra-se nos Apêndices C e D.

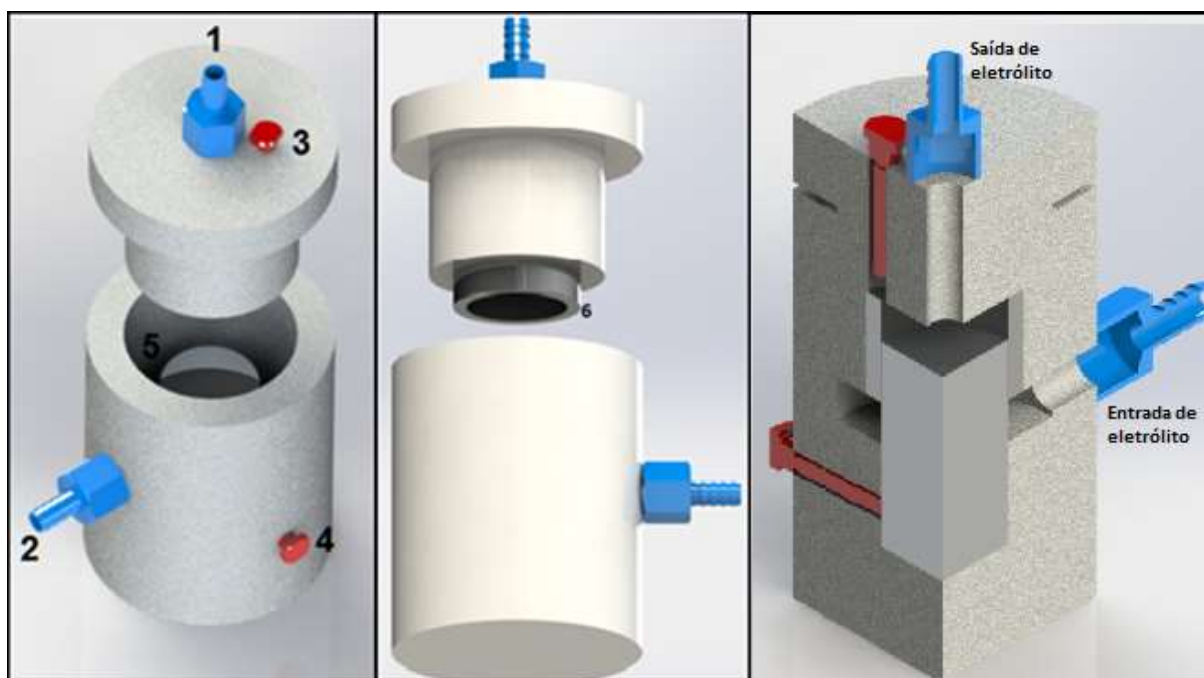


Figura 20 - Câmara para texturização

Os pontos 1 e 2 indicados na Figura 20 são respectivamente as conexões para a saída e entrada de eletrólito. Os pontos 3 e 4 são as conexões elétricas, que perfuram a parede de nylon e tocam a peça ou a ferramenta a fim de possibilitar o contato elétrico. Em relação aos trabalhos desenvolvidos por Costa e Hutchings

(2009), Parreira (2011) e Silva (2016), esta nova configuração de câmara de texturização teve como intenção principal testar a passagem do fluxo paralelo à face a ser texturizada, como representado pela área em azul na Figura 21. Espera-se que esta configuração para a vazão de eletrólito seja capaz de reduzir a perda de carga, reportada pelos pesquisadores citados como uma das limitações das configurações adotadas até então. Além disso, ela permite menor complexidade de fabricação, pois as versões anteriormente citadas necessitam que o eletrólito passe através de microfuros na ferramenta, os quais são de difícil fabricação.

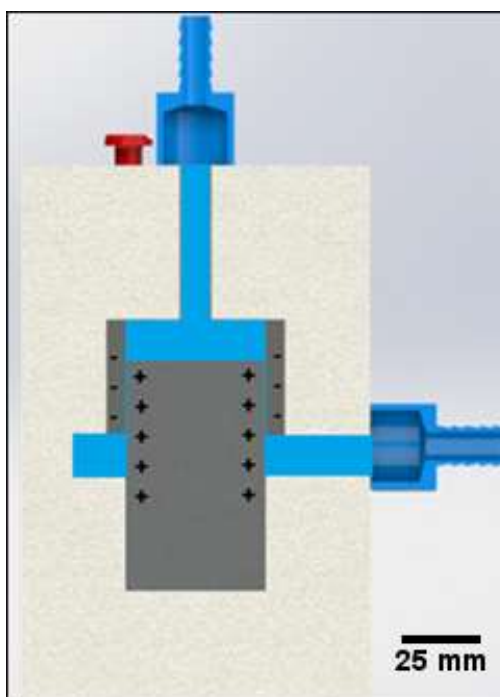


Figura 21- Detalhe do fluxo de eletrólito paralelo à face da amostra, neste caso o eixo.

Nesta nova configuração existe a possibilidade de texturizar tanto mancais quanto eixos, bastando para isto que seja invertida a polaridade das conexões elétricas. Os testes executados tiveram a intenção de simular a texturização de mancais. Assim sendo, foi texturizada a face interna de tubos, os quais eram encaixados por pressão no aparato como representado no ponto 6 da Figura 20. Os ensaios poderiam ter sido efetuados em eixos, representados no ponto 5 da Figura 20, sem maiores dificuldades. A única alteração na natureza do processo seria referente a quem vai desempenhar o papel de peça e ferramenta, polo positivo e negativo respectivamente. É também interessante que a ferramenta seja de um material resistente à corrosão, o que permite sua utilização por uma quantidade maior de ciclos, sem que as suas dimensões efetivas sejam alteradas.

O aparato contou também com uma fonte de tensão constante, a qual forneceu a corrente e tensão necessárias para a usinagem eletroquímica, uma bomba e um reservatório foram utilizados para promover a circulação do eletrólito.

Torna-se indispensável a utilização de um circuito capaz de transformar a tensão contínua da fonte em pulsada. Neste trabalho, foi utilizado para este fim o circuito eletrônico exibido no Apêndice A. O qual é composto por um microcontrolador Arduino UNO e um transistor TIP 122. O microcontrolador deve ser programado, utilizando-se para isso um programa baseado na linguagem C. O Apêndice B apresenta um exemplo de programa utilizado para fornecer como resposta uma onda quadrada de frequência dependente da seleção efetuada no potenciômetro, neste caso 1 ou 0,5Hz. Esta aparelhagem permite a seleção de uma gama variável de combinações de tempos e durações de pulsos. Os parâmetros dependem apenas do programa inserido no microcontrolador e das características do transistor e da fonte utilizados.

3.2. Fabricação da ferramenta e das amostras

As amostras utilizadas foram usinadas a partir de tubos de aço 1020. A parte interna das amostras foi lixada sequencialmente com lixas de abrasivos com granulometria 80, 120, 240, 320, 400, 600, 1000, 1500 e então polidas com pasta de diamante de 2 μm por 5 minutos a 400 rpm, a fim de receber um acabamento espelhado. As dimensões das amostras após o corte, usinagem e polimento estão representadas na Figura 22.a. Uma vez que a área definida para ser texturizada é de aproximadamente 40 mm², pode-se utilizar uma mesma amostra cilíndrica para vários ensaios.

A ferramenta utilizada foi usinada a partir de um eixo maciço de aço inoxidável AISI 316. Assim como as amostras, a ferramenta também recebeu um acabamento espelhado após a usinagem, as dimensões finais estão representadas na Figura 22.b.

O mascaramento da ferramenta é indispensável para o processo, sem o isolamento proporcionado pela máscara a usinagem eletroquímica não estaria restringida à uma pequena região, inviabilizando a produção dos padrões. Com o intuito de avaliar o emprego de adesivo vinil como mascaramento para a ferramenta nos ensaios de texturização, a ferramenta foi recoberta por uma área de adesivo perfurado a laser (Figura 23). As medidas da perfuração a laser programada, assim

como a perfuração real efetuada no adesivo, estão representadas na Figura 24. As demais partes metálicas expostas da ferramenta foram revestidas com fita isolante, ficando exposta apenas a área metálica perfurada anteriormente no adesivo. Desta maneira o processo de mascaramento foi bastante simplificado, contudo, este mascaramento permite apenas a fabricação de texturas de diâmetros mais elevados, a partir de 650 μm para este caso.

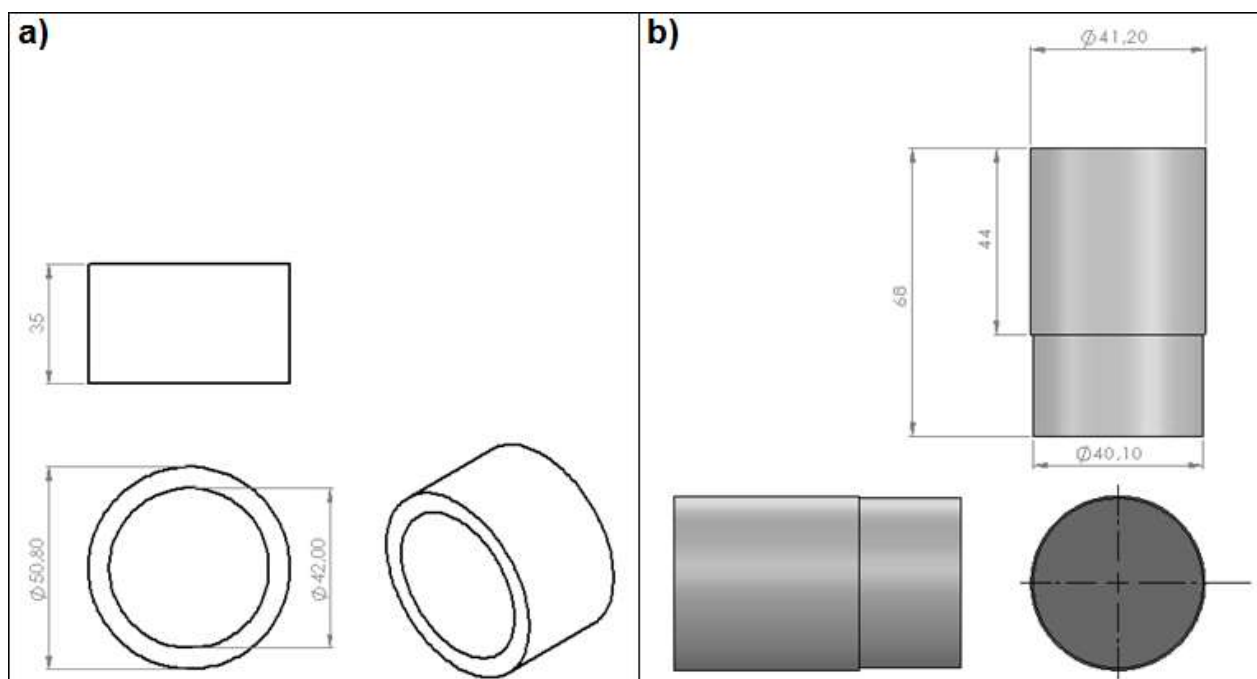


Figura 22- Dimensões (em mm) da amostra de aço carbono (a) e da ferramenta de aço inoxidável (b).

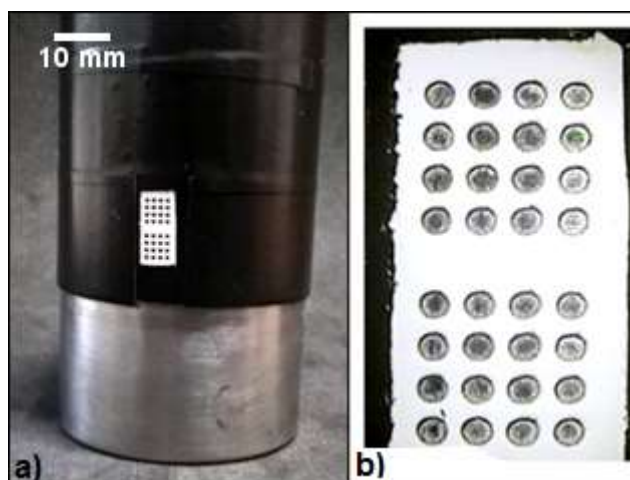


Figura 23 - Detalhe da ferramenta (a) e da área metálica exposta (b).

A utilização de mascaramento adesivo é uma maneira barata, rápida e reprodutível de recobrir a ferramenta, adequada para os testes a serem executados. Mascaramentos mais elaborados, que envolvam princípios fotoquímicos, por exemplo, e que possibilitem a usinagem de padrões de dimensões reduzidas, podem ser utilizados sem que ocorram mudanças no restante do aparato empregado nos testes. Assim sendo, pode-se utilizar o mascaramento com adesivo vinil a fim de se avaliar os parâmetros mais eficientes para a usinagem, e então utilizar estes mesmos parâmetros para texturizar padrões menores, se assim desejado.

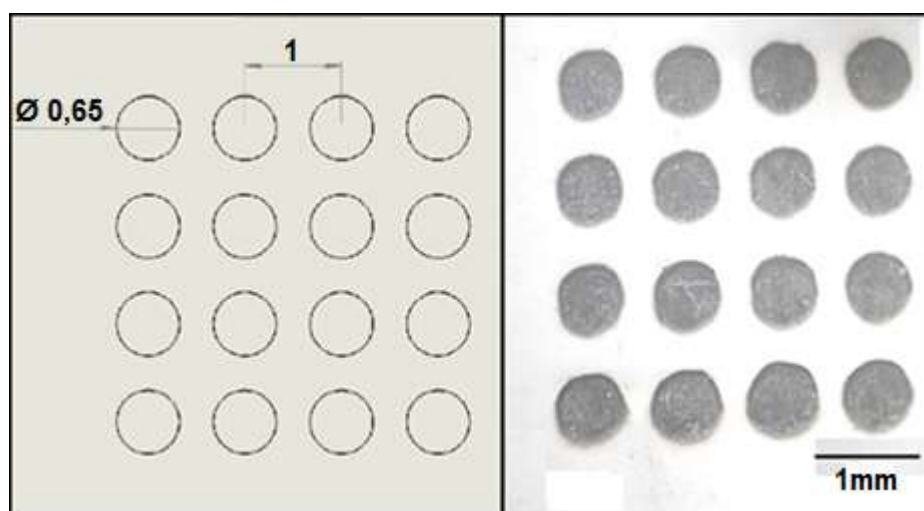


Figura 24 - Dimensões em milímetros da perfuração programada (esquerda) e do resultado final da perfuração a laser (direita).

3.3. Estudo de parâmetros

Após a preparação do aparato, da ferramenta e das amostras, foram iniciados os testes para a seleção dos parâmetros que permitissem a reprodução do padrão da ferramenta na peça. O desempenho do processo de texturização eletroquímica é fortemente influenciado por variações nos parâmetros envolvidos. Pequenas variações na distância entre eletrodos, vazão e concentração de eletrólito, corrente, tensão e tempo de texturização podem inviabilizar a remoção eficiente de material.

Inicialmente foram selecionados parâmetros referidos em estudos semelhantes da literatura. A frequência de 50Hz foi utilizada com sucesso nos trabalhos de Parreira (2011) e Costa e Hutchings (2009). O ciclo de trabalho de 20% foi apontado como mais adequado para usinar profundidades maiores, nos trabalhos de Chen *et al.* (2015). Logo, a tensão aplicada possui a forma de uma onda retangular, com duração de picos e vales de 4ms e 16ms respectivamente.

O distanciamento correto entre os eletrodos é de grande importância para que a texturização aconteça, sendo que quanto menor a distância entre eles mais profundos serão os bolsos usinados para um mesmo tempo, desde que o fluxo de eletrólito seja suficiente (Parreira *et al.*, 2012). No projeto de câmara de texturização adotado neste trabalho, a distância entre os eletrodos é função da diferença na distância entre a face interna da amostra e a face da ferramenta. Desta maneira, para diminuir essa distância é necessária uma ferramenta com diâmetro maior. Logo, para os testes que se seguiram, a distância entre eletrodos foi fixada em 400µm.

Inicialmente foi utilizado como eletrólito o sal de cozinha em água. Este eletrólito, mesmo contendo certa quantidade de impurezas, apresenta resultado semelhante ao esperado para o NaCl em água destilada, porém com a vantagem de um menor custo. Os primeiros testes foram realizados em concentrações de 50g/L e um minuto de texturização a 6V. A partir destes parâmetros, tanto a concentração quanto a tensão e o tempo de texturização foram elevados progressivamente, até resultados visualmente satisfatórios serem encontrados.

Para efetuar a medição da vazão de eletrólito do sistema, a conexão de retorno de eletrólito foi removida do reservatório e conectada a um recipiente de 20L, graduado a cada 5L. O tempo necessário para que 5L de eletrólito fossem despejados no recipiente graduado foi medido 8 vezes.

Os parâmetros favoráveis e os resultados encontrados nos estudos de parâmetro serão apresentados e comentados na seção de resultados do trabalho.

3.4. Ensaios de texturização superficial

A partir do estudo de parâmetros foi elaborada uma sequência de ensaios que possibilitassem determinar a capacidade do aparato produzido, em termos de dimensões texturizadas, além da influência das concentrações de eletrólito nas texturas usinadas. Foram mantidos constantes nos ensaios a frequência de 50Hz, o ciclo de trabalho de 20%, a tensão de 12V, a distância entre eletrodos de 400µm e a vazão de 110ml/s, enquanto a concentração dos eletrólitos e o tempo de usinagem foram variados para cada ensaio, conforme a Tabela 3. Foram testadas concentrações de 2M, 3M e 4M de NaCl em água destilada. Com a intenção de avaliar o desempenho de uma solução contendo NaNO₃ em combinação com NaCl, foram também realizados 3 ensaios com NaCl 2M mais NaNO₃ 1M em água destilada.

Tabela 3 – Código das amostras, concentrações e tempos utilizados nos ensaios de texturização superficial.

TEMPO DE USINAGEM	NaCl 2M	NaCl 3M	NaCl 4M	NaCl 2M + NaNO ₃ 1M
1 minuto	1A	4A	7A	1C
3 minutos	2A	5A	8A	2C
5 minutos	3A	6A	9A	3C

Os ensaios foram todos executados utilizando-se a mesma ferramenta. Após cada ensaio, a ferramenta era reposicionada, a fim de texturizar outra região da mesma amostra cilíndrica. A face da ferramenta era limpa com algodão para remover qualquer possível resíduo do processo anterior. Após texturizadas, as amostras foram polidas por 2 minutos com pasta de diamante de 2 μ m a rotação de 400rpm, para que fossem removidos os óxidos formados na superfície. Em seguida as amostras foram cortadas em amostras menores, cada uma representando uma concentração por tempo de texturização (Figura 25), totalizando 12 amostras, listadas na Tabela 3.

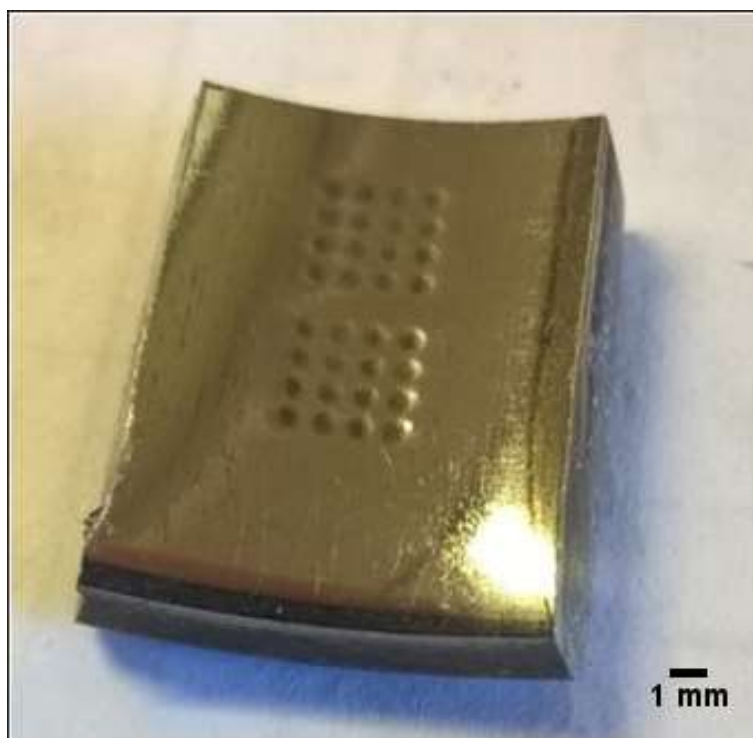


Figura 25- Exemplo de amostra texturizada, polida e cortada.

3.5. Avaliações por perfilometria e MEV

Com a intenção de mensurar as características das texturas obtidas, as amostras foram avaliadas por perfilometria e microscopia eletrônica de varredura.

As medidas da profundidade e do perfil dos bolsos foram efetuadas utilizando-se um perfilômetro da marca Bruker, modelo ContourGT, disponível no Laboratório Multiusuário de Análise de Superfícies (LAMAS/UFRGS) (Figura 26). Uma vez que o equipamento limita a avaliação à uma área de aproximadamente 1mm², não foi possível avaliar todos os bolsos gerados. Um bolso representativo foi escolhido dentre os 32 usinados em cada amostra. Vale ressaltar que ocorrem pequenos desvios de forma entre eles e que a própria curvatura da amostra cilíndrica dificulta as medições e avaliações utilizando software.

As observações por microscopia eletrônica de varredura foram realizadas utilizando-se um equipamento modelo Jeol JSM - 6610LV, disponível no Centro de Microscopia Eletrônica da Zona Sul (Ceme-Sul/FURG). Foram também efetuadas análises por energia dispersiva (EDS), com a intenção de avaliar possíveis variações na composição química da região texturizada.



Figura 26 - Medição da profundidade utilizando-se um perfilômetro.

3.6. Ensaios tribológicos

Esta seção descreve os procedimentos realizados durante o trabalho na tentativa de efetuar uma avaliação da energia perdida no deslizamento sobre amostras texturizadas por MECT, utilizando-se um esclerômetro pendular adaptado.

O equipamento utilizado para as avaliações foi adaptado a partir de um dispositivo empregado para ensaios de impacto Charpy, no trabalho de De Carvalho (2018), no qual o martelo original havia sido substituído por um suporte e um indentador angular. No presente trabalho, o esclerômetro pendular foi modificado para que pudesse medir a energia gasta para deslizar um contra-corpo esférico contra a superfície texturizada. Para tanto, foi construído um novo porta-indentador, capaz de amparar uma esfera de aço SAE 52100 de 5mm de diâmetro, possibilitando assim um choque que envolva menos deformação. O porta amostra foi adaptado e recebeu um sistema de controle micrométrico da posição da base, possibilitando assim o controle da profundidade de penetração do indentador (De Carvalho, 2018). A massa do pêndulo também foi reduzida, para que uma condição menos severa de contato pudesse ser simulada. Uma foto do equipamento e o esquema de funcionamento estão representados na Figura 27.

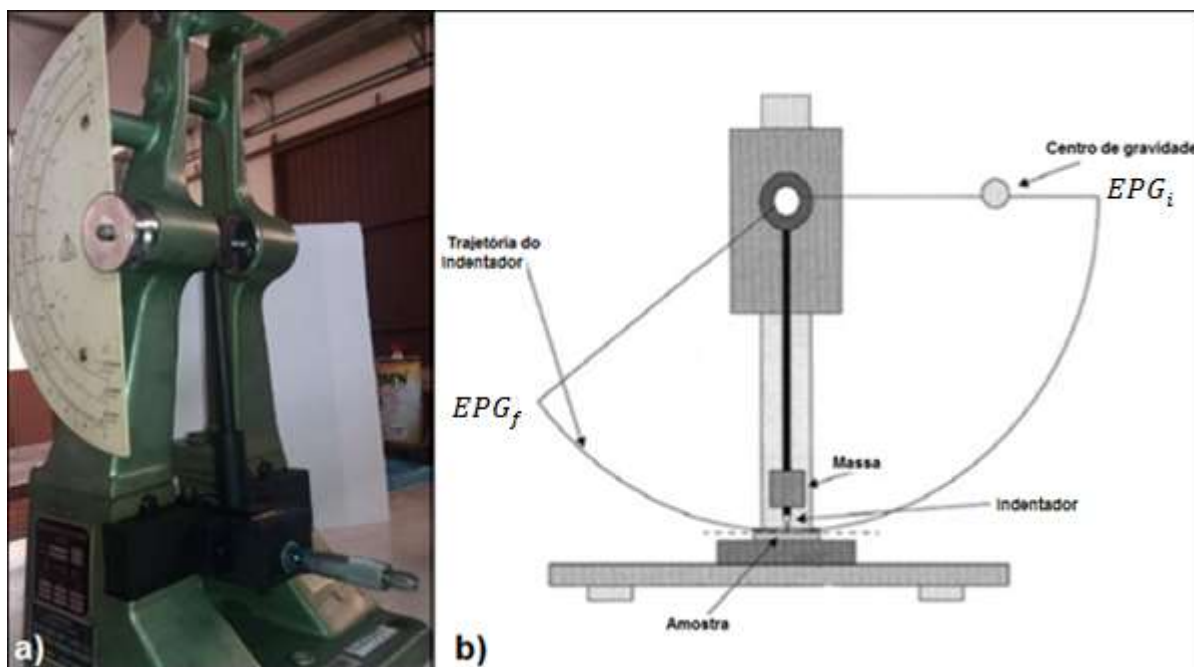


Figura 27 – Foto (a) e representação esquemática do pêndulo utilizado nos ensaios (b).

Fonte (a): (DE CARVALHO, R.A. 2018). Fonte (b): (Iqbal *et al.*, 2014).

Inicialmente, várias tentativas foram realizadas para avaliar a energia de deslizamento das amostras cilíndricas produzidas. Porém, as amostras cilíndricas não puderam ser avaliadas. A inclinação das amostras acabava comprometendo os resultados, uma vez que o equipamento não permitia o controle do deslocamento lateral e angular da amostra. Deste modo, não era possível garantir que o trajeto do indentador reproduziria o mesmo ângulo de penetração em relação às trilhas texturizadas das diferentes amostras.

Com o intuito de verificar a validade da análise utilizando-se um esclerômetro pendular, foram ensaiadas 3 amostras planas de aço baixo carbono, texturizadas por MECT em experimentos anteriores do grupo de pesquisa. Por se tratarem de amostras planas a penetração do indentador descreve um ângulo reto em relação às trilhas. Os parâmetros utilizados na texturização das amostras planas estão listados na Tabela 4. Como resultado desta texturização foram obtidas as profundidades apresentadas na Tabela 5. O diâmetro médio dos bolsos era de 135 μ m.

Tabela 4 - Parâmetros utilizados na texturização por MECT das amostras planas.

	Amostras Planas
Material	Aço 1020
Tensão	32 V
Ciclo de trabalho	20%
Eletrólito	NaNO ₃
Espaçamento	0 - 500 μ m

Tabela 5 - Profundidade das amostras planas ensaiadas.

Amostra	Profundidade média (μ m)
1	1.5
2	3.5
3	7

As amostras planas eram posicionadas no porta amostras. A mesa que contém o porta amostras era então elevada até que a amostra tocasse o indentador, sendo que o mesmo se encontrava neste momento posicionado verticalmente, como na Figura 27. Um dispositivo capaz de emitir uma pequena corrente elétrica era utilizado para sinalizar o contato entre a amostra e o indentador, acendendo um *led (light emitting diode)* e emitindo um sinal sonoro quando acontecia o contato. Desta forma era possível garantir que a posição inicial do conjunto mesa e amostra não estava acima da posição mais baixa do indentador. Após o contato, a haste do indentador

era elevada até a posição inicial e a mesa era elevada 80µm verticalmente, de forma a garantir uma profundidade de penetração máxima aproximadamente constante de 80µm. A haste do indentador era então solta da posição inicial e acelerada pela massa até o choque com a superfície da amostra. Após o choque a haste percorria seu trajeto circular empurrando o medidor, o que possibilita registrar o maior ângulo do trajeto após o contato.

Como o pêndulo descreve um movimento circular, as maiores deformações decorrentes do deslizamento ocorrerão quando a haste do pêndulo estiver na posição ortogonal em relação à amostra. As deformações são proporcionalmente menores para posições anteriores e posteriores da haste do pêndulo durante o deslizamento.

Para calcular a energia perdida no deslizamento é necessário efetuar um balanço de energia, levando em consideração a energia perdida pelo atrito nos mancais, rolamentos e partes móveis do conjunto (ED), assim como a diferença na energia potencial gravitacional do conjunto composto pela haste e indentador, na maior posição vertical depois (EPG_f) e antes (EPG_i) do choque (Figura 27 b). Logo, a energia dissipada pelo deslizamento pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\Delta E = EPG_i - EPG_f - ED$$

A EPG_i pode ser calculada utilizando-se a massa e a altura de elevação do pêndulo, que são funções do ângulo inicial (152°) e do centro de massa.

$$EPG_i = m * g * h$$

Em que:

m = massa do pêndulo (367,78 gramas);

g = gravidade (9,81 m/s²);

h = altura do centro de massa (172,44 mm);

Observação: A distância do centro de massa ao centro de rotação é 91,58 mm.

$$EPG_i = 367,78 * 9,81 * ((\sin(152^\circ - 90^\circ) * 91,58) + 91,58)$$

$$EPG_i = 0,62215 \text{ kg} * \text{m}^2/\text{s}^2 = 622,15 * 10^{-3} \text{ J}$$

A EPG_f depende do ângulo final, que para o caso em vazio, ou seja, quando não ocorre o deslizamento em relação à amostra, é de 148° . A energia perdida neste

caso será considerada como a energia dissipada pelos mancais, rolamentos e partes móveis, isto é, a energia dissipada pelas perdas.

Assim temos:

$$ED = EPG_i - EP_{(148^\circ)}$$

Onde:

$$EP_{(148^\circ)} = 367,78 * 9,81 * ((\sin(148^\circ - 90^\circ) * 91,58) + 91,58)$$

$$EP_{(148^\circ)} = 610,62 * 10^{-3} J$$

Logo:

$$ED = EPG_i - EP_{(148^\circ)}$$

$$ED = 622,15 * 10^{-3} - 610,62 * 10^{-3}$$

$$ED = 11,53 * 10^{-3} J$$

Desta forma a energia dissipada pelo deslizamento pode ser calculada como segue.

$$\Delta E = 622,15 * 10^{-3} - EPG_f - 11,53 * 10^{-3}$$

Onde a EPG_f depende apenas do ângulo final registrado pelo equipamento nos ensaios.

Para cada uma das 3 amostras planas foram realizados dois ensaios lubrificados sobre a textura e dois ensaios lubrificados sobre a região lisa, assim como dois ensaios secos sobre a região texturizada e dois ensaios secos sobre a região lisa. Para os ensaios lubrificados foi utilizado 0.2ml de óleo SN 10W - 40, depositados com uma pipeta sobre a amostra, simulando uma condição de fornecimento limitado de lubrificante. A energia foi então calculada para cada caso, como descrito nos parágrafos anteriores. A Tabela 6 apresenta a sequência dos testes tribológicos efetuados.

Tabela 6 – Ensaios tribológicos efetuados.

Profundidade média dos bolsos (μm)	Condição de lubrificação	Condição de texturização	Teste
1,5	Seco	Texturizado	1
			2
		Sem textura	3
			4
	Lubrificado	Texturizado	5
			6
		Sem textura	7
			8
3,5	Seco	Texturizado	9
			10
		Sem textura	11
			12
	Lubrificado	Texturizado	13
			14
		Sem textura	15
			16
7	Seco	Texturizado	17
			18
		Sem textura	19
			20
	Lubrificado	Texturizado	21
			22
		Sem textura	23
			24

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos parágrafos a seguir são apresentados e discutidos os resultados encontrados nos estudos de parâmetros, ensaios tribológicos e de texturização, assim como as avaliações por microscopia eletrônica de varredura e perfilometria. Estes resultados e avaliações permitem qualificar o equipamento e as inovações implementadas.

4.1. Resultados do estudo de parâmetros

O primeiro resultado avaliado foi a vazão de eletrólito do conjunto. Foram registrados tempos de 44,5s, 45,7s, 45,9s, 45s, 45,2s, 44,8s, 45,7s e 46,1s para que 5 litros pudessem passar pela região entre a ferramenta e a amostra. Estes valores resultam num tempo médio de 45,4s, com um desvio padrão de 0,6s. A vazão volumétrica pode ser calculada pela equação $Q = V/t$, onde Q representa a vazão volumétrica e V o volume de eletrólito deslocado em um tempo t . Assim tem-se:

$$Q = \frac{5000}{45,4} = 110.2 \text{ ml/s.}$$

Desta maneira pode-se considerar com satisfatória precisão a vazão fornecida pelo sistema como sendo de aproximadamente 110ml/s. Esta vazão é muito superior às vazões de 20ml/s e 3ml/s utilizadas nos trabalhos de Parreira (2011) e Costa e Hutchings (2009) respectivamente. Este aumento foi resultado do emprego da câmara de texturização desenvolvida como parte do aparato, a qual possibilita a passagem do fluxo de eletrólito paralelo à face da ferramenta. Porém, como o *gap* utilizado no presente trabalho também foi maior, isto também pode ter contribuído para o aumento da vazão de eletrólito. A região pela qual o eletrólito flui no interior do conjunto está representada pela área em azul na Figura 28, o detalhe A evidencia a distância entre as faces metálicas.

A velocidade do eletrólito que cruza ortogonalmente a face a ser texturizada pode ser também calculada. Se for desconsiderada a espessura do mascaramento, a diferença entre o raio da ferramenta e o raio interno da amostra pode ser utilizada para calcular a área entre as faces da ferramenta e da amostra.

$$A = \pi R_e^2 - \pi R_i^2$$

$$A = \pi 21^2 - \pi 20,6^2 = 52,27 \text{ mm}^2$$

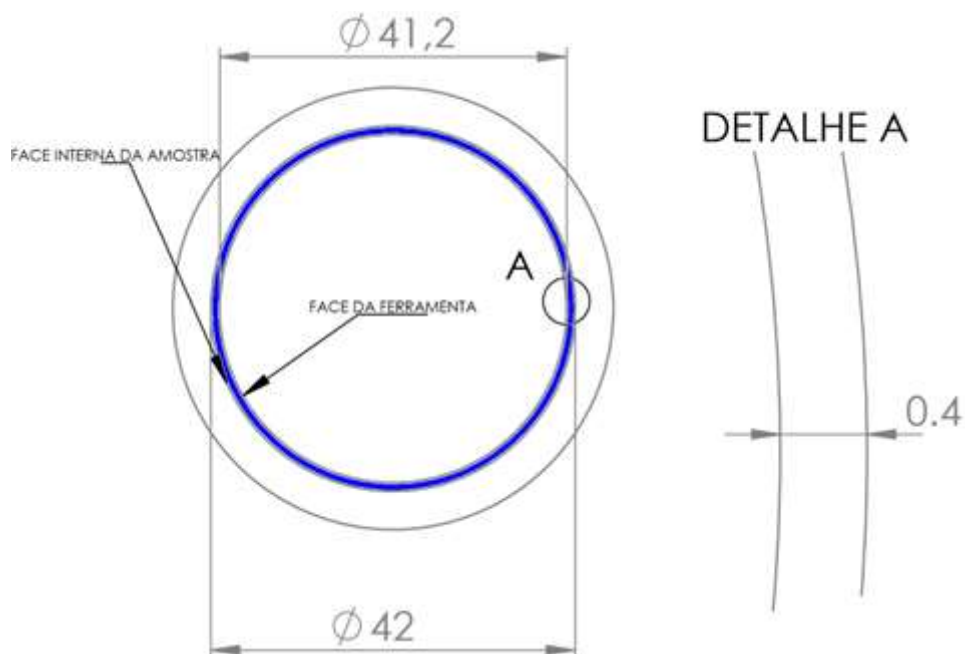


Figura 28 - Detalhe da área pela qual o eletrólito flui. Dimensões em mm.

Desta forma a velocidade do eletrólito na interface pode ser calculada como segue:

$$Vel = \frac{Q}{A} = \frac{110}{52,27} = 2,1 \text{ m/s}$$

Após a verificação da vazão fornecida pelo conjunto e da velocidade do eletrólito na interface, iniciaram-se os testes para a seleção da tensão e das concentrações de eletrólito a serem utilizadas.

A texturização eletroquímica funciona de forma mais eficiente quando a corrente está no formato pulsado. Uma tentativa de utilizar corrente contínua resultou na interrupção do processo de usinagem, devido à queima do fusível da fonte, consequência de uma elevação muito abrupta da corrente.

Alguns testes com usinagens insuficientes foram verificados, até que a tensão de 12V e a concentração de sal de cozinha de 200g/l apresentaram resultados visualmente satisfatórios (Figura 29), para tempos de usinagem de 5 min, vazão de eletrólito de 110ml/s e ciclo de trabalho de 20% . Para os mesmos parâmetros de tensão e distância entre eletrodos, uma concentração de 2M de NaNO_3 foi também testada, mas a mesma não provocou usinagem suficiente nas amostras.

É verificada a presença de uma matriz de bolsos que reproduzem de forma adequada o perfil de mascaramento da ferramenta. Ainda é possível observar que a

profundidade de usinagem foi satisfatória, entre $30\mu\text{m}$ e $40\mu\text{m}$. A forma cilíndrica da amostra não foi removida da medição, a curvatura pode ser observada na Figura 29.

Além disso foram verificados diâmetros de aproximadamente $1000\mu\text{m}$ nos bolsos, bem maiores do que o diâmetro de $650\mu\text{m}$ das circunferências de mascaramento. Este diâmetro elevado resulta provavelmente do tempo de texturização muito longo, assim como da distância entre eletrodos, os quais podem ter levado a excessiva usinagem da região entre os bolsos.

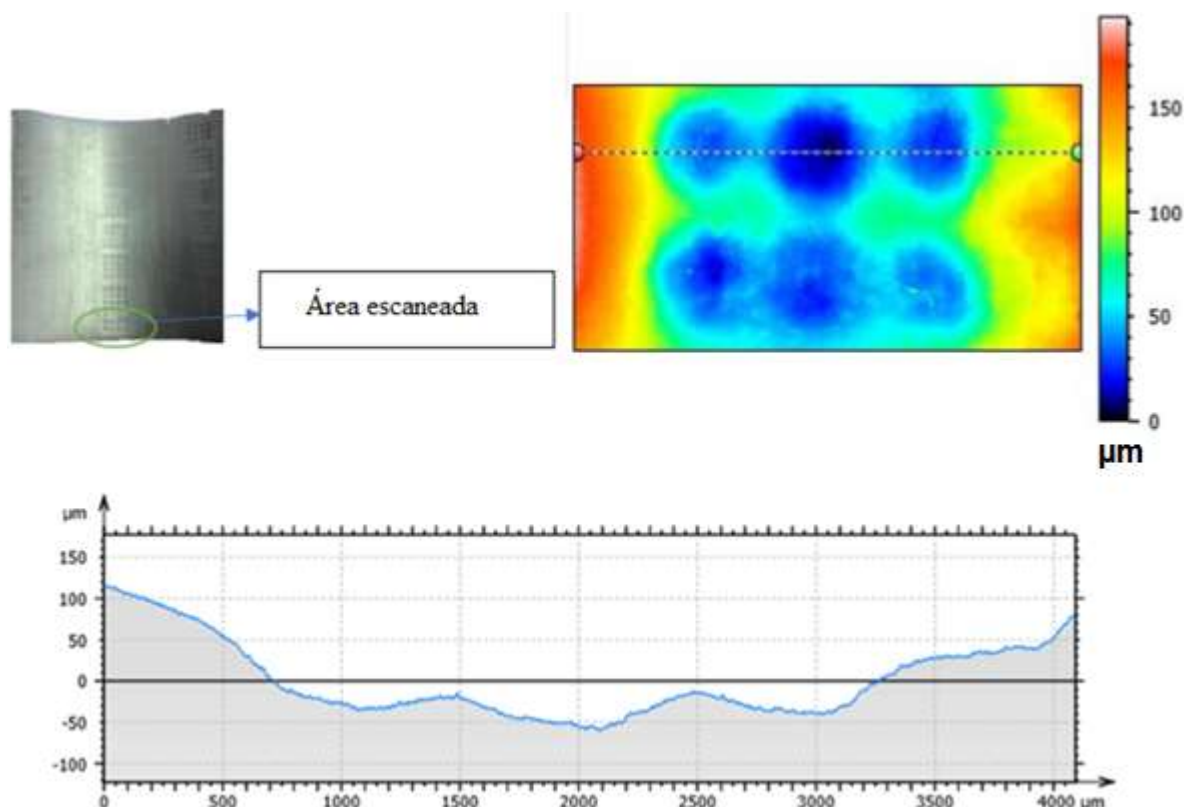


Figura 29 - Perfilometria de uma das texturas produzida nos testes preliminares.

4.2. Avaliação da profundidade e do perfil das texturas usinadas

Os resultados da avaliação da profundidade máxima das texturas por perfilometria estão resumidos na Figura 30. Para a avaliação da profundidade e do perfil das amostras foi utilizado o software Vision64. Tanto o aumento do tempo quanto da concentração resultou em maiores profundidades de usinagem. Contudo, a influência da concentração aparece de forma mais expressiva quando da texturização por apenas 1 min. Para tempos maiores de texturização, concentrações mais elevadas não resultaram em diferenças tão amplas de profundidade. A amostra usinada por 1 min, com uma mistura de NaCl 2M e NaNO_3 1M, apresentou uma

profundidade máxima de aproximadamente 14µm. Esta profundidade foi maior do que aquela encontrada nas amostras usinadas com NaCl 2M e 3M sem a adição de NaNO₃. Porém, para tempos maiores de usinagem, a vantagem da mistura com NaNO₃ não foi verificada. A usinagem por 5 minutos aparentemente gerou texturas de menor profundidade do que aquelas usinadas por 3 minutos, possível resultado de uma remoção acentuada de material entre os bolsos.

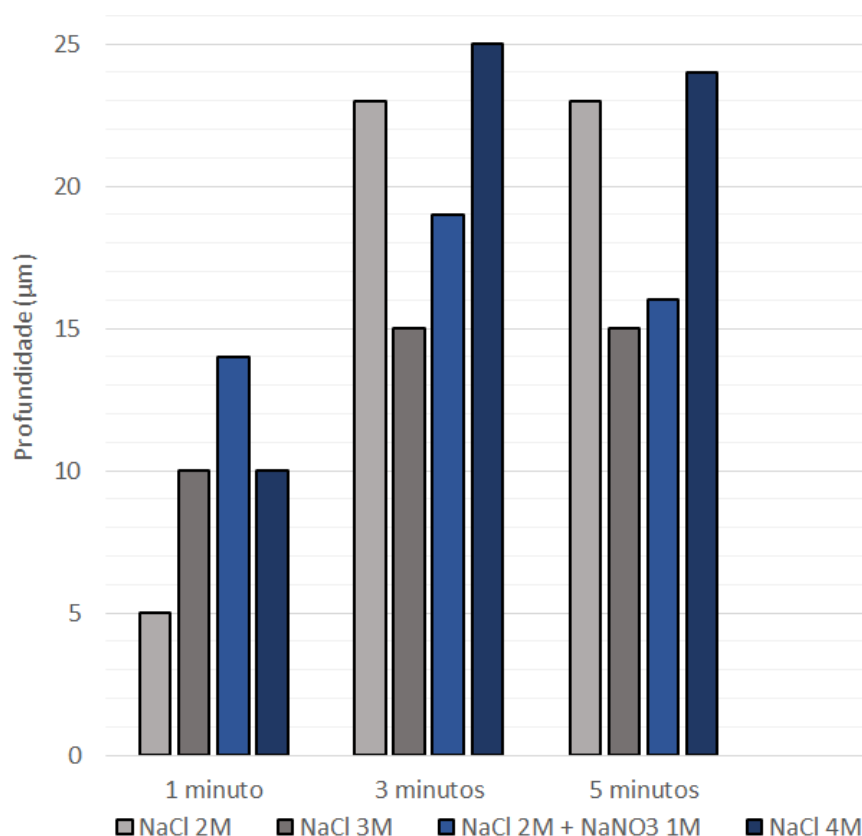


Figura 30 - Profundidade máxima aproximada das texturas, em µm.

A Figura 31 é o resultado da medição do perfil e da profundidade da amostra usinada por um minuto com uma mistura de NaCl 2M e NaNO₃ 1M. Pode-se verificar regularidade na formação do bolso, com um perfil côncavo típico da usinagem eletroquímica. Todos os bolsos usinados durante os ensaios de texturização apresentaram perfil semelhante, com profundidades máximas variando entre 5µm e 25µm.

Foi verificado no trabalho de Wakuda *et al.* (2003), que o coeficiente de atrito tem grande dependência do tamanho e densidade dos bolsos. Entretanto, a forma do bolso não afeta de forma tão significativa o atrito. Logo, espera-se que bolsos de

mesmo diâmetro e profundidade máxima tenham resultados semelhantes quanto ao seu desempenho tribológico, independente do processo de fabricação utilizado.

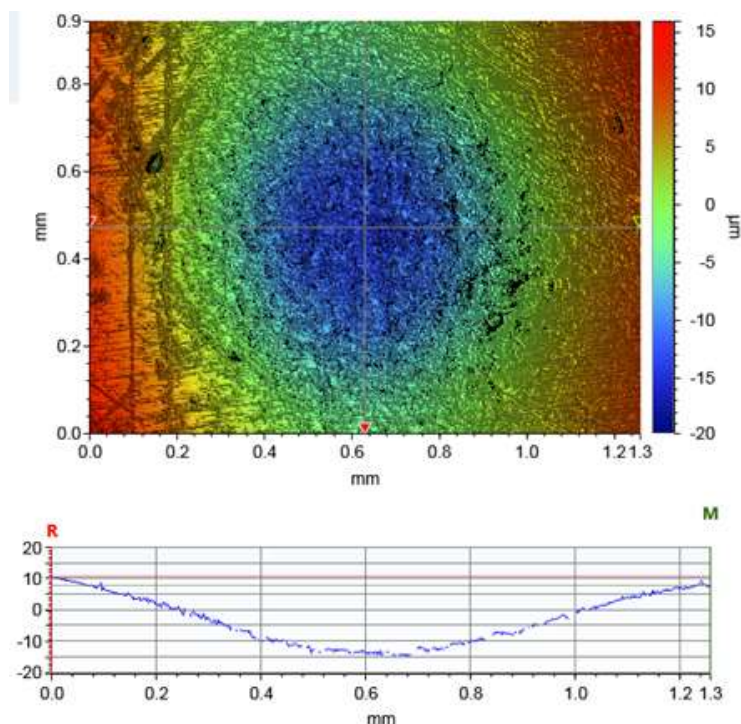


Figura 31 – Perfil de um bolso da amostra usinada com uma mistura de NaCl e NaNO₃.

4.3. Avaliação do diâmetro das texturas e da região entre os bolsos

Devido à diferença de potencial, a usinagem não se limita apenas à região imediatamente perpendicular à zona metálica exposta da ferramenta. Ocorre que uma região adjacente também acaba por ter o material removido, com menor intensidade, resultando em bolsos e texturas de maiores dimensões laterais do que aquelas estabelecidas na ferramenta pelo mascaramento. Assim, após ultrapassado certo tempo, a usinagem eletroquímica tende a aumentar significativamente as dimensões laterais dos bolsos, sem propiciar aumento considerável da profundidade. Este comportamento também foi verificado nos trabalhos de Parreira (2011) e Silva (2016).

Para a avaliação do diâmetro dos bolsos usinados foi necessário fazer uma estimativa da região tomada como zero. A curvatura da amostra cilíndrica, assim como a inclinação da amostra durante as medições, interfere na referência, tornando difícil identificar a região externa ao bolso e exigindo bom senso na investigação. Também cabe salientar que existem pequenas diferenças nos diâmetros dos bolsos para uma

mesma amostra, porém, como já mencionado anteriormente, a avaliação estava restrita a apenas um bolso devido às limitações de uso do equipamento disponível.

A Figura 32 apresenta uma estimativa do diâmetro dos bolsos usinados. Pode-se verificar que a concentração não exerce grande influência no diâmetro resultante para os bolsos usinados, visto que o fator de maior impacto foi o tempo de texturização. A elevação do tempo de usinagem de 1 minuto para 5 minutos resultou em uma diferença máxima de aproximadamente 300 μm no diâmetro e 19 μm na profundidade. Desta maneira fica evidente que se deve optar por tempos menores, a fim de se obter texturas de dimensões laterais reduzidas, mais fiéis ao padrão de mascaramento. Convém destacar que mascaramentos de menores dimensões podem ser obtidos com facilidade, e que possivelmente o mascaramento adesivo seja ainda capaz de propiciar menores dimensões do que as utilizadas neste trabalho.

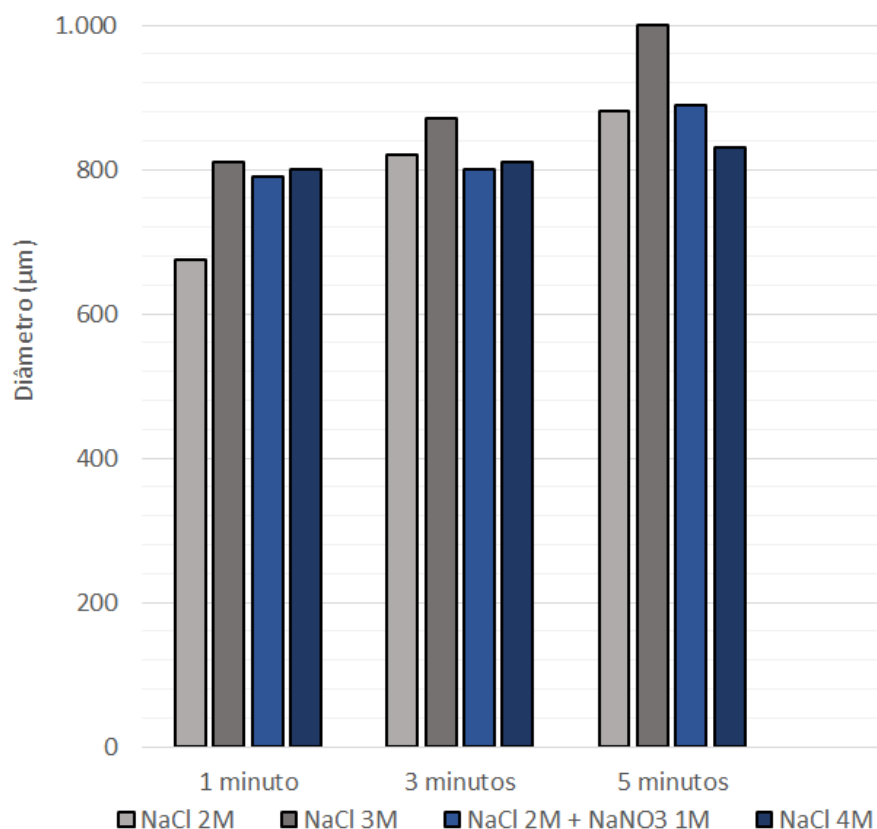


Figura 32 - Diâmetro estimado dos bolsos usinados.

A Figura 33 é referente à amostra 1A, usinada por 1 min, que sofreu pouca usinagem na região entre os bolsos. A Figura 34 é referente à amostra 6A, usinada por 5 min, que sofreu severa remoção de material na região entre os bolsos, proporcionando praticamente a fusão entre eles. Nestas imagens foram removidas, através de seleção de parâmetros no software do equipamento, todas as regiões da

amostra abaixo do zero. Assim, apenas as regiões acima do zero são visíveis, ou seja, as regiões que teoricamente não tiveram material removido durante o processo de texturização. Esta elevada remoção de material entre os bolsos é o fator que impede a obtenção direta de maiores profundidades com maiores tempos de usinagem eletroquímica.

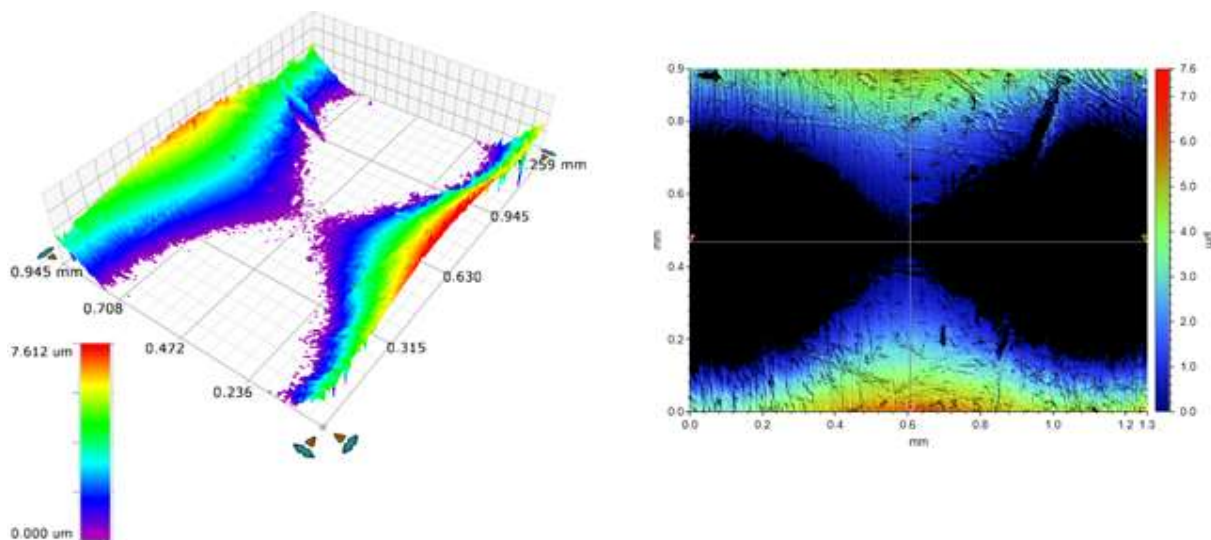


Figura 33 - Região entre os bolsos da amostra 1A, usinada por 1 minuto.

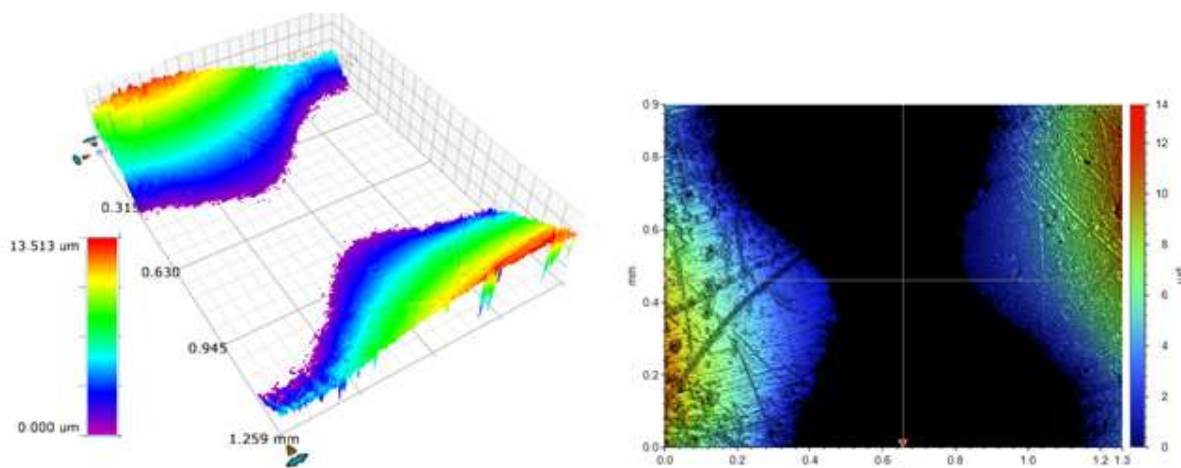


Figura 34 - Região entre os bolsos da amostra 6A, usinada por 5 minutos.

Os diâmetros dos bolsos gerados através de MECT para as amostras cilíndricas estão entre 650 e 1000μm. Nos trabalhos de Li *et al.* (2014), Zhang *et al.* (2014) e Shinde *et al.* (2018), foram avaliadas dimensões e frações de área texturizada semelhantes às geradas neste trabalho, as quais possibilitaram redução no atrito, aumento da capacidade de carga e da vida útil dos componentes. Assim sendo, o aparato desenvolvido é comprovadamente capaz de fabricar texturas superficiais

reportadas na literatura como eficazes para melhorar o desempenho em componentes cilíndricos deslizantes.

4.4. Avaliação do material na região usinada

Durante as primeiras análises utilizando-se o microscópio óptico foi difícil identificar a presença dos bolsos. Apenas regiões de coloração mais escura pareciam estar presentes. O mesmo aconteceu nas avaliações por elétrons retro espalhados no microscópio eletrônico de varredura. Porém, estas regiões mais escuras distribuídas pela superfície da amostra, estavam claramente mais concentradas na região que coincidia com os bolsos. A Figura 35 exibe uma imagem de microscopia óptica de um bolso usinado e a análise de perfilometria do mesmo bolso. Apenas na análise por perfilometria é que se torna possível observar a formação de um bolso propriamente dito, enquanto na imagem de microscopia óptica é difícil identificar profundidade na região escura.

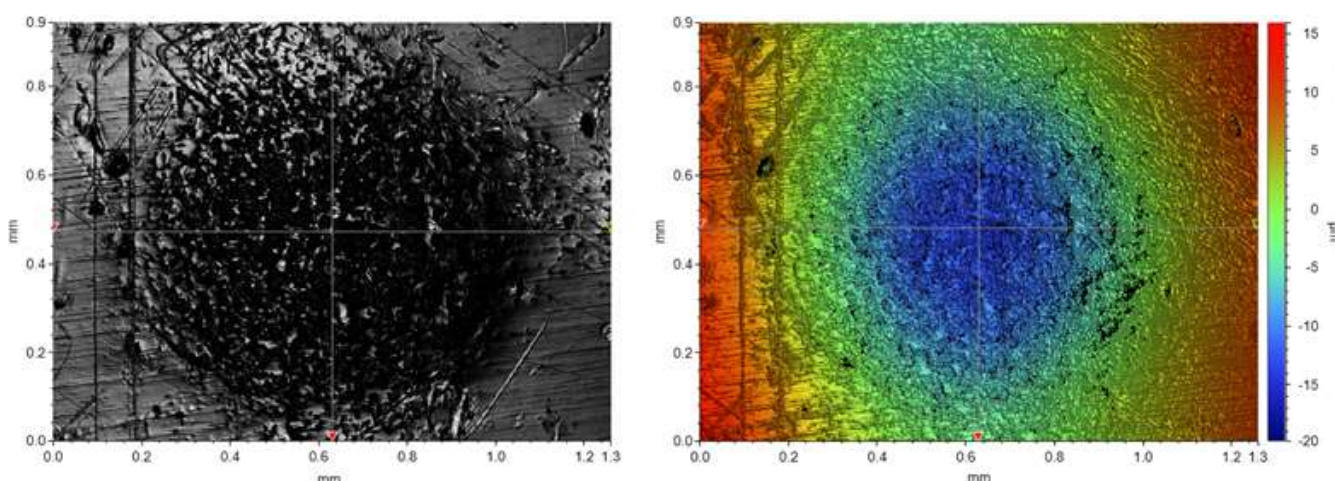


Figura 35 - Imagem de microscopia óptica (esquerda) e análise de perfilometria (direita) de um mesmo bolso.

Para compreender com maior clareza os fenômenos decorrentes da usinagem, foi necessário recorrer a uma análise por energia dispersiva (EDS). A Figura 36 é o resultado da análise para uma região mais ampla do bolso, enquanto a Figura 37 é o resultado da análise de uma região no interior do bolso. Na Figura 36 é possível notar que a região 2, que praticamente não foi usinada durante o processo, apresenta uma quantidade muito menor de carbono exposto do que a região 1, no interior do bolso, a qual teve aproximadamente 15 μ m de material removido. É necessário recordar que a região 2 foi também polida após a usinagem.

A maior quantidade de carbono presente nas regiões escuras sugere uma dissolução preferencial da ferrita em relação à cementita. Além disso, é possível que material da máscara adesiva seja incorporado à superfície dos bolsos. Na texturização de ferro fundido cinzento por MECT, Da Silva e Costa (2017) observaram que a usinagem eletroquímica removeu a matriz metálica expondo a grafita. No trabalho citado anteriormente, este efeito desempenhou um papel favorável, uma vez que a grafita acabava atuando como lubrificante sólido.

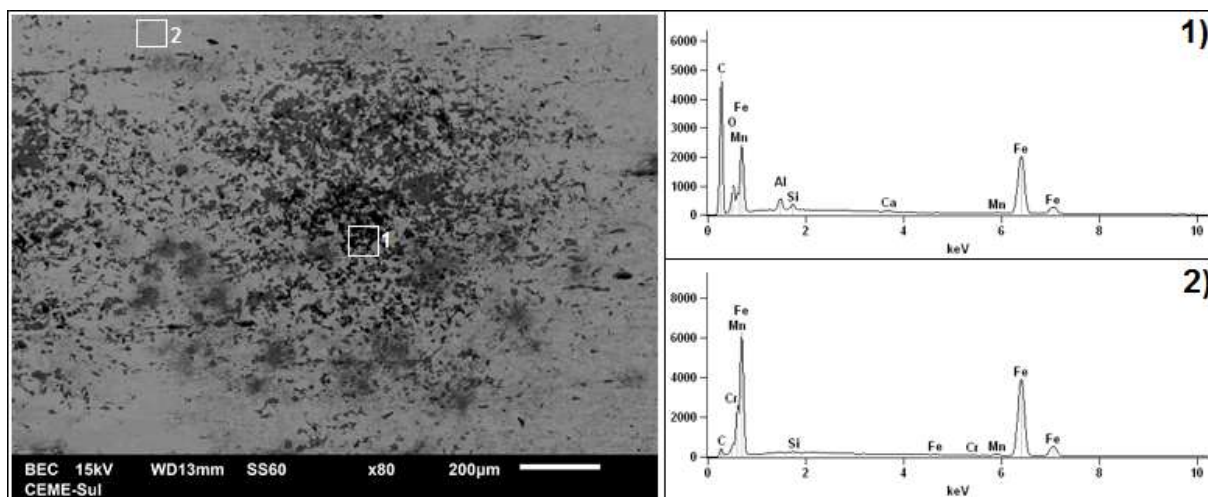


Figura 36 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura de uma região mais ampla do bolso (esquerda) e análise de energia dispersiva das regiões 1 e 2 (direita).

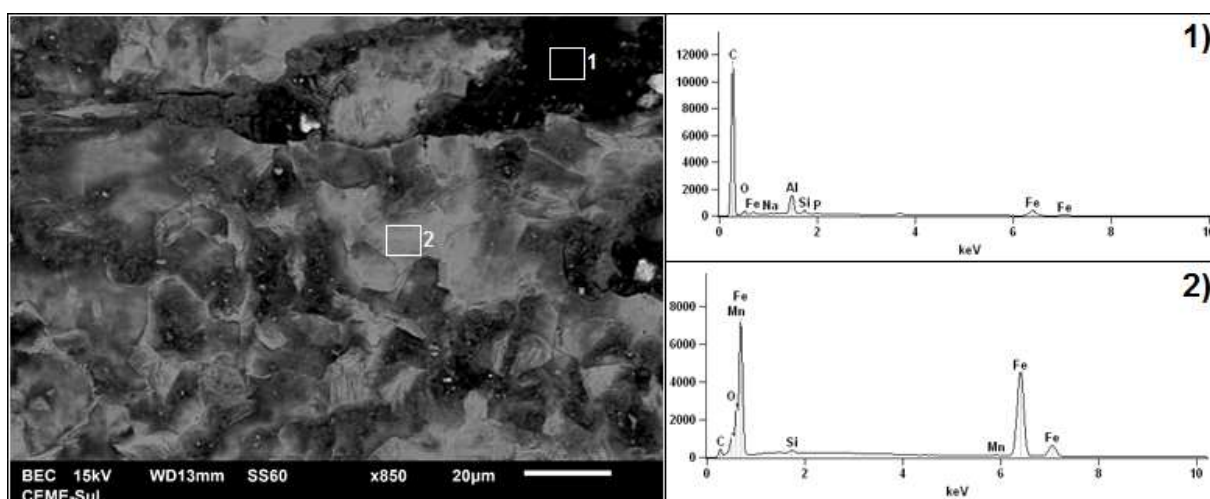


Figura 37 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura do interior do bolso (esquerda) e análise de energia dispersiva das regiões 1 e 2 (direita).

4.5. Resultados dos ensaios tribológicos

Os resultados dos testes tribológicos efetuados utilizando-se o esclerômetro pendular estão listados na Tabela 7, para cada uma das amostras.

Tabela 7 – Resultados dos testes com o esclerômetro pendular. Valores em termos de ângulo de inclinação final à esquerda e em J à direita.

Profundidade média dos bolsos (μm)	Condição de lubrificação	Condição de texturização	Ângulo de inclinação final	Energia perdida no deslizamento (J)
1,5	Seco	Texturizado	129,5	7,0E-02
			132	5,9E-02
		Sem textura	126	8,6E-02
			131	6,3E-02
	Lubrificado	Texturizado	133	5,5E-02
			134	5,1E-02
		Sem textura	123	1,0E-01
			127	8,1E-02
3,5	Seco	Texturizado	124,5	9,3E-02
			127	8,1E-02
		Sem textura	128	7,7E-02
			124	9,5E-02
	Lubrificado	Texturizado	132	5,9E-02
			131	6,3E-02
		Sem textura	124,5	9,3E-02
			129,5	7,0E-02
7	Seco	Texturizado	130,5	6,6E-02
			130	6,8E-02
		Sem textura	130	6,8E-02
			130	6,8E-02
	Lubrificado	Texturizado	137	3,9E-02
			137,5	3,7E-02
		Sem textura	131	6,3E-02
			134	5,1E-02

Apesar do pequeno número de testes, a avaliação por esclerometria pendular se mostrou reprodutível e capaz de fornecer uma rápida análise das energias de deslizamento. Para melhor visualização dos resultados, eles foram plotados na Figura 38 e Figura 39, nas quais cada ponto representa a média dos dois testes realizados para cada condição. Apesar da dispersão dos testes, os resultados permitiram identificar tendências relativas ao efeito das texturas. Observa-se que, para a condição lubrificada, as texturas geradas reduzem a energia gasta pelo pêndulo em relação ao caso sem textura, mas para a condição seca, esta redução não é verificada. Além disso, a profundidade das texturas parece exercer certa influência sobre os resultados, de modo que a menor energia de deslizamento foi registrada para a

amostra que possui profundidade média das texturas de $7\mu\text{m}$, a maior profundidade dentre as amostras avaliadas. Este resultado pode também estar relacionado a uma menor energia de deformação resultante do deslizamento pelos bolsos mais profundos, uma vez que estes possuem uma parcela menor de material e assim menos energia é requerida na deformação do bolso.

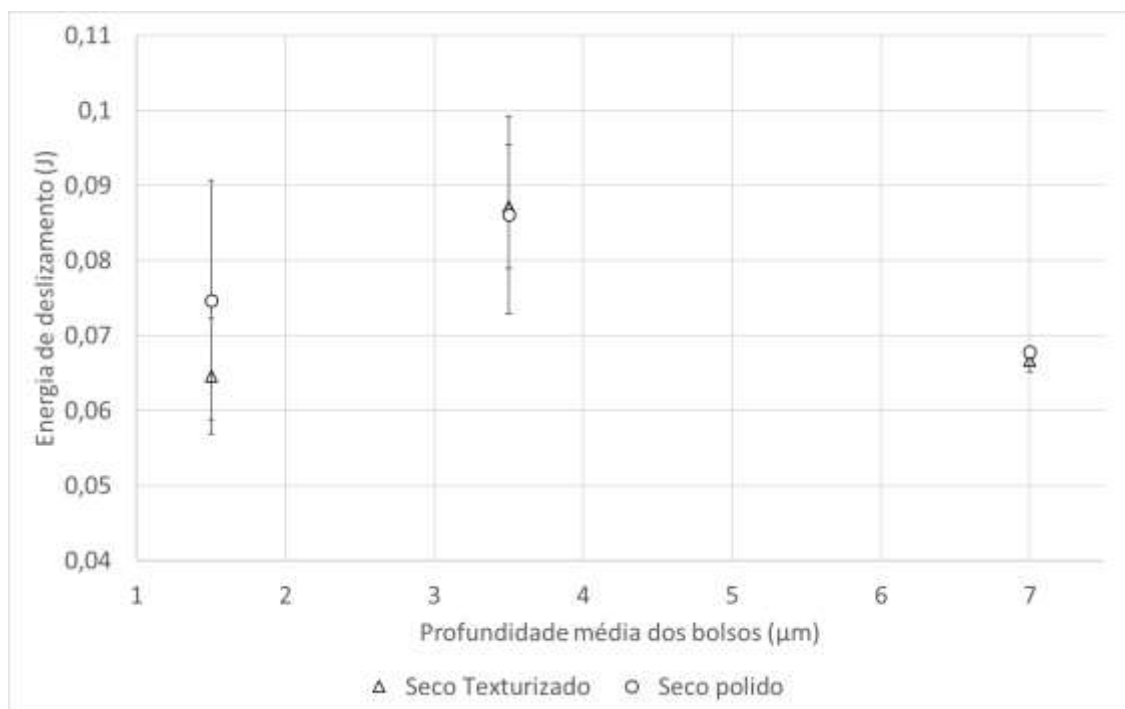


Figura 38 – Energia de deslizamento durante os ensaios esclerométricos secos.

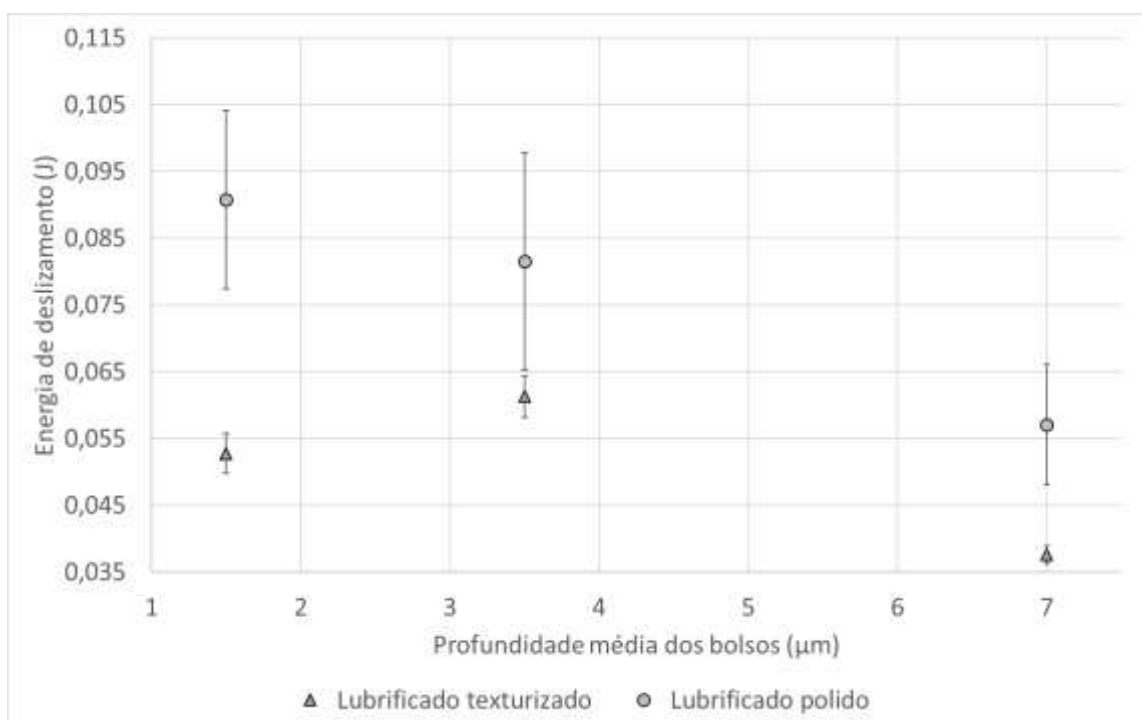


Figura 39 – Energia de deslizamento durante os ensaios esclerométricos lubrificados.

Nos casos de ensaio texturizado e lubrificado, as texturas atuaram como micro reservatório de lubrificante, fornecendo lubrificante na região de contato e, desta forma, reduzindo a energia perdida no deslizamento. Este comportamento foi apontado como um dos fenômenos responsáveis pelas melhorias no desempenho tribológico, em condições de fornecimento limitado de lubrificante, nos trabalhos de Li *et al.* (2014) e Zhang *et al.* (2014).

Para o caso de atrito seco em superfícies texturizadas, a literatura reporta reduções pequenas no atrito, em torno de 10% (Borghini *et al.*, 2008). Esta redução é geralmente atribuída à capacidade das texturas de atuarem como armadilha para os resíduos de desgaste, ou *debris*, de forma que o atrito é reduzido indiretamente, como consequência da menor quantidade de *debris* na interface. A diminuição registrada, neste trabalho, entre os casos de atrito seco polido e seco texturizado não foi significativa do ponto de vista estatístico. Porém, deve-se salientar que os ensaios através do esclerômetro pendular não são cíclicos, ou seja, o indentador passa uma única vez sobre a trilha de desgaste. Dessa forma, a formação de *debris* não teria como influenciar os resultados. Ao contrário dos testes do tipo pino sobre disco, a duração do teste é insuficiente para evidenciar se as texturas são capazes de armazenar *debris* e consequentemente reduzir o atrito e aumentar a vida útil.

A Figura 40 apresenta exemplos de trilhas de desgaste produzidas nos ensaios de esclerometria. As trilhas apresentadas são relativas à amostra com bolsos mais profundos (7 μm), mas tendências semelhantes foram observadas para as demais amostras. Inicialmente, para a amostra texturizada, é possível observar que as trilhas de desgaste realmente coincidem com uma linha de bolsos. Comparando-se os ensaios secos (esquerda) e lubrificados (direita), observa-se uma leve tendência à formação de trilhas de desgaste mais estreitas e com menos dano superficial em condições lubrificadas, comprovando a capacidade do lubrificante de interferir no contato, reduzindo as interações entre as asperidades das superfícies. Porém, essa diferença é bem pequena para as amostras polidas, evidenciando a dificuldade do lubrificante em penetrar efetivamente no contato. Já para o caso da amostra texturizada, observa-se que em condições lubrificadas (Figura 40.d), a trilha de desgaste mostrou-se claramente mais suave e estreita, comprovando a capacidade dos bolsos das texturas de fornecerem lubrificante para o contato durante o deslizamento.

Desta forma, apesar do pequeno número de ensaios realizados e da relativa dispersão dos resultados, os ensaios de esclerometria sugeriram claramente a capacidade da texturização em diminuir o atrito entre as superfícies em condições de fornecimento limitado de lubrificante, o que foi comprovado pela redução da energia gasta durante o deslizamento para as amostras texturizadas. Além disso, os resultados também sugeriram um aumento da resistência ao desgaste, o que foi demonstrado pela presença de trilhas de desgaste mais estreitas e com menos dano superficial para as amostras texturizadas.

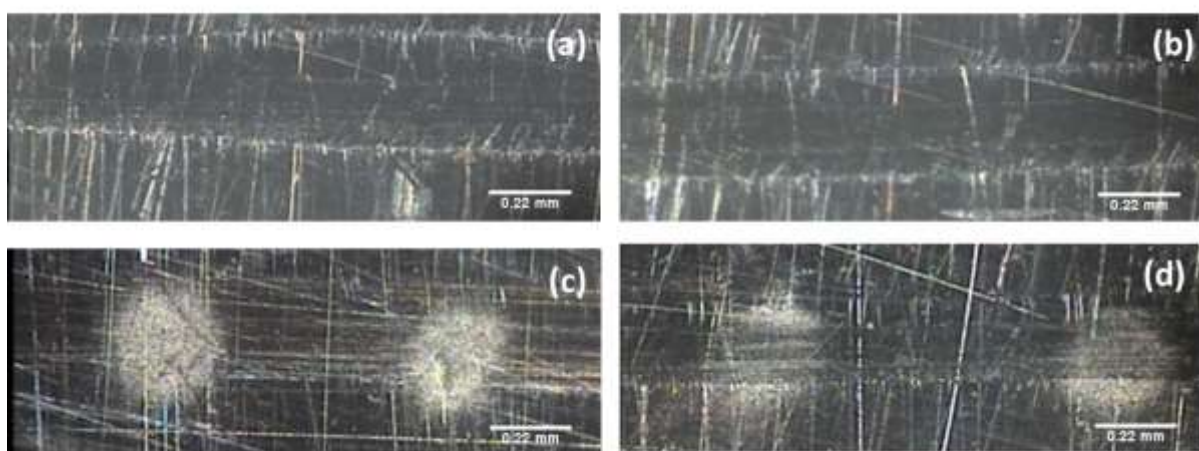


Figura 40 – Exemplos de trilhas de desgaste geradas durante o deslizamento: (a) seco polido; (b) lubrificado polido; (c) seco texturizado; (d) lubrificado texturizado.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O objetivo principal do trabalho foi atingido de forma satisfatória. Foi possível elaborar um aparato acessível e eficiente para a texturização de componentes cilíndricos de aço baixo carbono, visto que as texturas geradas têm dimensões referidas como favoráveis na literatura. Além disso, a esclerometria pendular foi atestada como método para avaliação da energia de deslizamento em amostras texturizadas.

Em relação aos objetivos específicos deste trabalho, conclui-se que:

- A utilização de fluxo de eletrólito unicamente paralelo à face texturizada é viável e contribui significativamente para a redução da perda de carga e aumento da vazão. A vazão observada foi 5 vezes maior do que a registrada em trabalhos anteriores. Entretanto, parte deste aumento provavelmente deve-se também à maior distância entre eletrodos utilizada.
- Para as dimensões avaliadas, o emprego de mascaramento adesivo provou ser uma forma barata e eficiente de substituição do mascaramento por fotolitografia.
- Concentrações elevadas de eletrólito (NaCl 4M) em combinação com tempos curtos de texturização (1 minuto) apresentaram os resultados mais favoráveis. Para tempos maiores, a influência da concentração nas profundidades máximas obtidas acaba não sendo tão significativa. No caso de tempos maiores, podem ser preferíveis concentrações menores de eletrólito por razões econômicas. Tempos maiores de usinagem ainda provocaram remoção acentuada de material entre os bolsos.
- A tensão de 12V, com tempos de texturização de 1 min e distância entre eletrodos de 400 μ m, possibilitaram a fabricação de texturas circulares de 800 μ m de diâmetro e 10 μ m de profundidade.
- Os bolsos apresentaram um perfil côncavo, com profundidade máxima entre 5 μ m e 25 μ m.

- O processo eletroquímico de usinagem altera a composição química da superfície, possivelmente devido a uma dissolução preferencial da ferrita em relação à cementita.
- As amostras cilíndricas não puderam ser avaliadas através da utilização de um esclerômetro pendular, uma vez que as limitações de posicionamento impediam a avaliação. Entretanto, para as amostras planas avaliadas, foi observada redução na energia de deslizamento quando comparados casos lubrificados texturizados e lubrificados polidos. Para os casos de deslizamento a seco não foi observada diferença significativa na energia de deslizamento entre as amostras.

Sugere-se que trabalhos futuros busquem:

- Utilizar ferramentas semicirculares ou ocas, a fim de reduzir o custo da ferramenta e diminuir o tamanho da câmara de texturização.
- Desenvolver um controle de posicionamento micrométrico para controlar a distância entre a ferramenta e a amostra.
- Avaliar o desempenho de eletrólitos saturados, ou ainda saturados com precipitação, em relação as condições insaturadas analisadas neste trabalho.
- Avaliar outros tipos de mascaramento adesivo, assim como maneiras mais precisas e que proporcionem maior resolução para a perfuração dos mesmos.
- Desenvolver no esclerômetro pendular um controle de posicionamento lateral e angular para permitir que amostras cilíndricas possam ser avaliadas pelo equipamento.
- Avaliar o comportamento das texturas produzidas em amostras cilíndricas através de outras técnicas, como por exemplo testes bloco sobre anel ou em tribômetros específicos para a avaliação de mancais rotativos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARSLAN, A. et al. Surface texture manufacturing techniques and tribological effect of surface texturing on cutting tool performance: a review. **Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences**, v. 41, n. 6, p. 447-481, 2016. ISSN 1040-8436.

ASTM(G99-17). **Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus**. West Conshohocken 2017.

BORGHI, A. et al. Tribological effects of surface texturing on nitriding steel for high-performance engine applications. **Wear**, v. 265, n. 7, p. 1046-1051, 2008/09/20/ 2008. ISSN 0043-1648. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164808000914> >.

BRAUN, D. et al. Efficiency of laser surface texturing in the reduction of friction under mixed lubrication. **Tribology international**, v. 77, p. 142-147, 2014. ISSN 0301-679X.

CALLIES, M. et al. Microfabricated textured surfaces for super-hydrophobicity investigations. **Microelectronic engineering**, v. 78, p. 100-105, 2005. ISSN 0167-9317.

CHANG, W. et al. Investigation of microstructured milling tool for deferring tool wear. **Wear**, v. 271, n. 9, p. 2433-2437, 2011. ISSN 0043-1648.

CHECO, H. M. et al. Moving textures: Simulation of a ring sliding on a textured liner. **Tribology International**, v. 72, p. 131-142, 2014. ISSN 0301-679X.

CHEN, X. et al. Pulsed electrochemical micromachining for generating micro-dimple arrays on a cylindrical surface with a flexible mask. **Applied Surface Science**, v. 343, p. 141-147, 2015. ISSN 0169-4332.

CHILAMAKURI, S. K.; BHUSHAN, B. Optimization of asperities for laser-textured magnetic disk surfaces. **Tribology transactions**, v. 40, n. 2, p. 303-311, 1997. ISSN 1040-2004.

COBLAS, D. G. et al. Manufacturing textured surfaces: State of art and recent developments. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology**, v. 229, n. 1, p. 3-29, 2015. ISSN 1350-6501.

COSTA, H. **Starved lubrication of textured surfaces**. 5th World Tribology Conference: Proceedings of the 5th World Tribology Conference, 2013.

COSTA, H.; HUTCHINGS, I. Hydrodynamic lubrication of textured steel surfaces under reciprocating sliding conditions. **Tribology International**, v. 40, n. 8, p. 1227-1238, 2007. ISSN 0301-679X.

COSTA, H. L. **Modification of surface topography: manufacturing methods and applications**. 2005. University of Cambridge

COSTA, H. L.; HUTCHINGS, I. M. Development of a maskless electrochemical texturing method. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 8, p. 3869-3878, 2009/04/21/ 2009. ISSN 0924-0136. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013608006730> >.

DA SILVA, L.; COSTA, H. Tribological behavior of gray cast iron textured by maskless electrochemical texturing. **Wear**, v. 376, p. 1601-1610, 2017. ISSN 0043-1648.

DE CARVALHO, R. A. Comportamento Tribológico de Revestimentos: Esclerometria Pendular. **17ª Mostra da Produção Universitária - MPU - FURG** 2018.

DOBRICA, M. B. et al. Optimizing surface texture for hydrodynamic lubricated contacts using a mass-conserving numerical approach. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology**, v. 224, n. 8, p. 737-750, 2010. Disponível em: < <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1243/13506501JET673> >.

DUARTE, M. et al. Increasing Lubricant Film Lifetime by Grooving Periodical Patterns Using Laser Interference Metallurgy. **Advanced Engineering Materials**, v. 10, n. 6, p. 554-558, 2008/06/01 2008. ISSN 1438-1656. Disponível em: < <https://doi.org/10.1002/adem.200700321> >. Acesso em: 2019/01/15.

ETSION, I. State of the art in laser surface texturing. **Transactions of the ASME-F-Journal of Tribology**, v. 127, n. 1, p. 248, 2005. ISSN 0742-4787.

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

GAO, L. et al. Micro/nanostructural porous surface on titanium and bioactivity. **Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials**, v. 89, n. 2, p. 335-341, 2009. ISSN 1552-4981.

HAMILTON, D.; WALOWIT, J.; ALLEN, C. A theory of lubrication by microirregularities. **Journal of Basic Engineering**, v. 88, n. 1, p. 177-185, 1966. ISSN 0021-9223.

HAMROCK, B. J.; ANDERSON, W. J. Rolling-Element Bearings. 1983.

HAMROCK, B. J.; SCHMID, S. R.; JACOBSON, B. O. **Fundamentals of fluid film lubrication**. CRC press, 2004. ISBN 1135537763.

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

IQBAL, T. et al. Scratch deformations of poly (ether ether ketone) composites. **Fibers and Polymers**, v. 15, n. 5, p. 1042-1050, 2014/05/01 2014. ISSN 1875-0052. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s12221-014-1042-x> >.

KAWASEGI, N. et al. Development and machining performance of a textured diamond cutting tool fabricated with a focused ion beam and heat treatment. **Precision Engineering**, v. 47, p. 311-320, 2017/01/01/ 2017. ISSN 0141-6359. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635916302094> >.

KOSHY, P.; TOVEY, J. Performance of electrical discharge textured cutting tools. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 60, n. 1, p. 153-156, 2011. ISSN 0007-8506.

KOVALCHENKO, A. et al. The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact. **Tribology International**, v. 38, n. 3, p. 219-225, 2005. ISSN 0301-679X.

LI, K. et al. Friction and wear performance of laser peen textured surface under starved lubrication. **Tribology international**, v. 77, p. 97-105, 2014. ISSN 0301-679X.

LIU, T.; KIM, C.-J. Turning a surface superrepellent even to completely wetting liquids. **Science**, v. 346, n. 6213, 2014. ISSN 0036-8075.

MCGEOUGH, J. A. Electrochemical machining. **Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology**, 2005. ISSN 0471238961.

MISHRA, S. P.; POLYCARPOU, A. A. Tribological studies of unpolished laser surface textures under starved lubrication conditions for use in air-conditioning and refrigeration compressors. **Tribology International**, v. 44, n. 12, p. 1890-1901, 2011. ISSN 0301-679X.

MÜCKLICH, F.; LASAGNI, A.; DANIEL, C. Laser Interference Metallurgy—using interference as a tool for micro/nano structuring. **Zeitschrift für Metallkunde**, v. 97, n. 10, p. 1337-1344, 2006. ISSN 0044-3093.

PARREIRA, J. G. Texturização superficial eletroquímica sem mascaramento com finalidades tribológicas. 2011.

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, 2012/11/01/ 2012. ISSN 0257-8972. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897212008183>>.

PEASE, R. Electron beam lithography. **Contemporary Physics**, v. 22, n. 3, p. 265-290, 1981. ISSN 0010-7514.

Pendulum hardness tester. US Patent 1,781,615 1930.

PETTERSSON, U.; JACOBSON, S. Tribological texturing of steel surfaces with a novel diamond embossing tool technique. **Tribology international**, v. 39, n. 7, p. 695-700, 2006. ISSN 0301-679X.

_____. Textured surfaces in sliding boundary lubricated contacts—mechanisms, possibilities and limitations. **Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces**, v. 1, n. 4, p. 181-189, 2007. ISSN 1751-5831.

PUSTOVALOV, D. et al. Pendulum sclerometer for evaluating material corrosion resistance. **Chemical and Petroleum Engineering**, v. 48, n. 11-12, p. 688-692, 2013. ISSN 0009-2355.

QIAN, S. et al. Improving the localization of surface texture by electrochemical machining with auxiliary anode. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 29, n. 11-12, p. 1488-1493, 2014. ISSN 1042-6914.

REYNOLDS, O. On the Theory of Lubrication and Its Application to Mr. Beauchamp Tower's Experiments, Including an Experimental Determination of the Viscosity of Olive Oil. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. 40, n. 242-245, p. 191-203, 1886. ISSN 0370-1662.

RONEN, A.; ETSION, I.; KLIGERMAN, Y. Friction-reducing surface-texturing in reciprocating automotive components. **Tribology Transactions**, v. 44, n. 3, p. 359-366, 2001. ISSN 1040-2004.

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

SALES, W. et al. Utilização da esclerometria pendular no estudo da performance de fluidos de corte. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA-COBEM, 1999.

SHINDE, A. et al. Experimental and Numerical Analysis of Conical Shape Hydrodynamic Journal Bearing With Partial Texturing. **Procedia Manufacturing**, v. 20, p. 300-310, 2018/01/01/ 2018. ISSN 2351-9789. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918300787> >.

SILVA, L. R. R. D. Texturização superficial de cilindros automotivos. 2016.

STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A. W. **Engineering tribology**. Butterworth-Heinemann, 2013. ISBN 0123977762.

STOETERAU, R. L.; JANSSEN, A.; MALLMANN, G. Analysis of dimple textured surfaces on cutting tools. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 39, n. 10, p. 3989-3996, 2017. ISSN 1678-5878.

SWARD, G. G. **Surface testing apparatus**: Google Patents 1933.

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

TOMANIK, E. Modelling the hydrodynamic support of cylinder bore and piston rings with laser textured surfaces. **Tribology International**, v. 59, p. 90-96, 2013/03/01/ 2013. ISSN 0301-679X. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X12000412> >.

TORBACKE, M.; RUDOLPHI, Å. K.; KASSFELDT, E. **Lubricants: introduction to properties and performance**. John Wiley & Sons, 2014. ISBN 1118799712.

TOWER, B. First Report on Friction Experiments. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, v. 34, n. 1, p. 632-659, 1883/06/01 1883. ISSN 0020-3483. Disponível em: < https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1883_034_028_02 >. Acesso em: 2018/11/19.

_____. Research Committee on Friction: Second Report on Friction Experiments. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, v. 36, n. 1, p. 58-70, 1885/06/01 1885. ISSN 0020-3483. Disponível em: < https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1885_036_011_02 >. Acesso em: 2018/11/19.

VINGSBO, O.; HOGMARK, S. Single-pass pendulum grooving — a technique for abrasive testing. **Wear**, v. 100, n. 1, p. 489-502, 1984/12/01/ 1984. ISSN 0043-1648. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0043164884900280> >.

VLADESCU, S.-C. et al. The effects of surface texture in reciprocating contacts—An experimental study. **Tribology International**, v. 82, p. 28-42, 2015. ISSN 0301-679X.

WAKUDA, M. et al. Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact. **Wear**, v. 254, n. 3, p. 356-363, 2003. ISSN 0043-1648.

WANG, X.; ZHANG, H.; HSU, S. The effects of dimple size and depth on friction reduction under boundary lubrication pressure. ASME/STLE 2007 International Joint Tribology Conference, 2007, American Society of Mechanical Engineers. p.909-911.

YU, H.; WANG, X.; ZHOU, F. Geometric Shape Effects of Surface Texture on the Generation of Hydrodynamic Pressure Between Conformal Contacting Surfaces. **Tribology Letters**, v. 37, n. 2, p. 123-130, 2010/02/01 2010. ISSN 1573-2711. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s11249-009-9497-4> >.

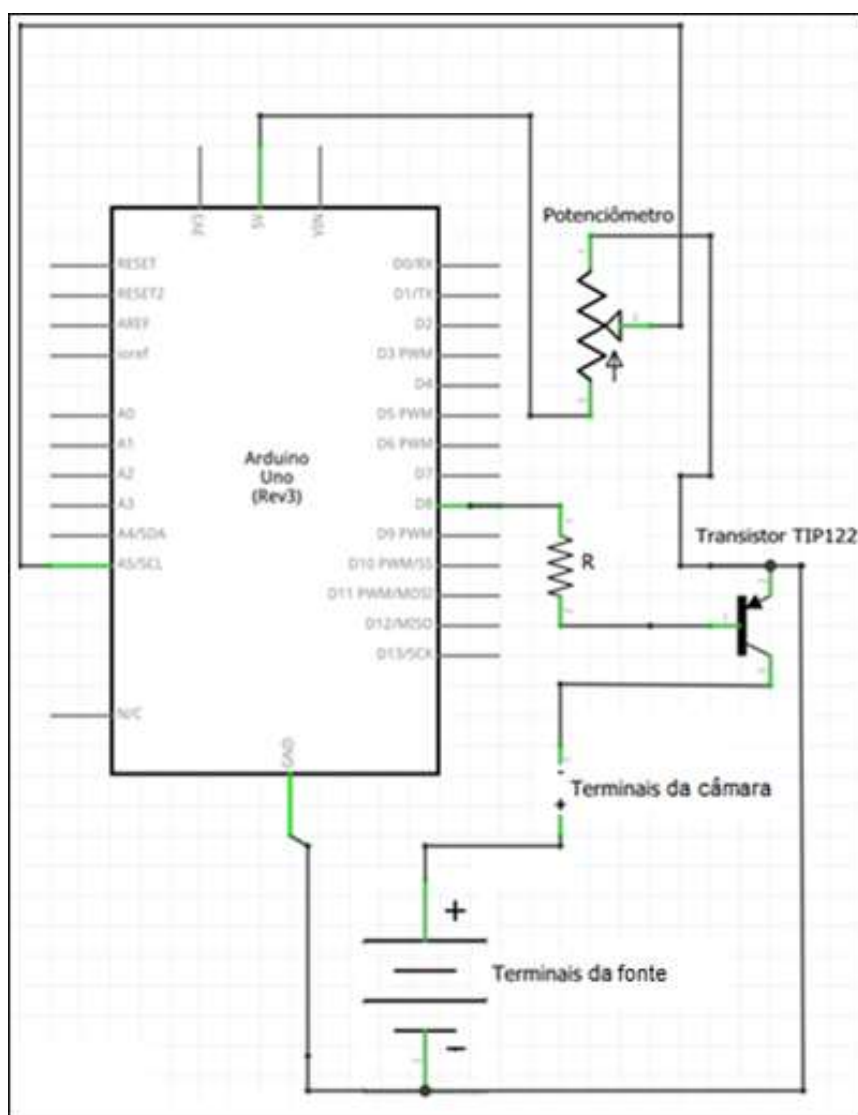
ZHANG, H. et al. A study on the tribological behavior of surface texturing on babbitt alloy under mixed or starved lubrication. **Tribology Letters**, v. 56, n. 2, p. 305-315, 2014. ISSN 1023-8883.

ZHANG, J.; MENG, Y. A study of surface texturing of carbon steel by photochemical machining. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, n. 10, p. 2133-2140, 2012/10/01/ 2012. ISSN 0924-0136. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013612001732> >.

ZHOU, R. et al. Effect of EDT surface texturing on tribological behavior of aluminum sheet. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 211, n. 10, p. 1643-1649, 2011/10/01/ 2011. ISSN 0924-0136. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013611001373> >.

ZHU, D.; WANG, J.; WANG, Q. J. On the Stribeck curves for lubricated counterformal contacts of rough surfaces. **Journal of Tribology**, v. 137, n. 2, p. 021501, 2015. ISSN 0742-4787.

7. APÊNDICES

Apêndice A – Circuito eletrônico utilizado para a modulação de sinal.

Apêndice B – Exemplo de programa utilizado para controlar o arduino.

```
const int sensorPin = A5;
float sensorValor = 0;
float sensorValorGrados = 0;
int tip= 8;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {

  pinMode(tip,OUTPUT);

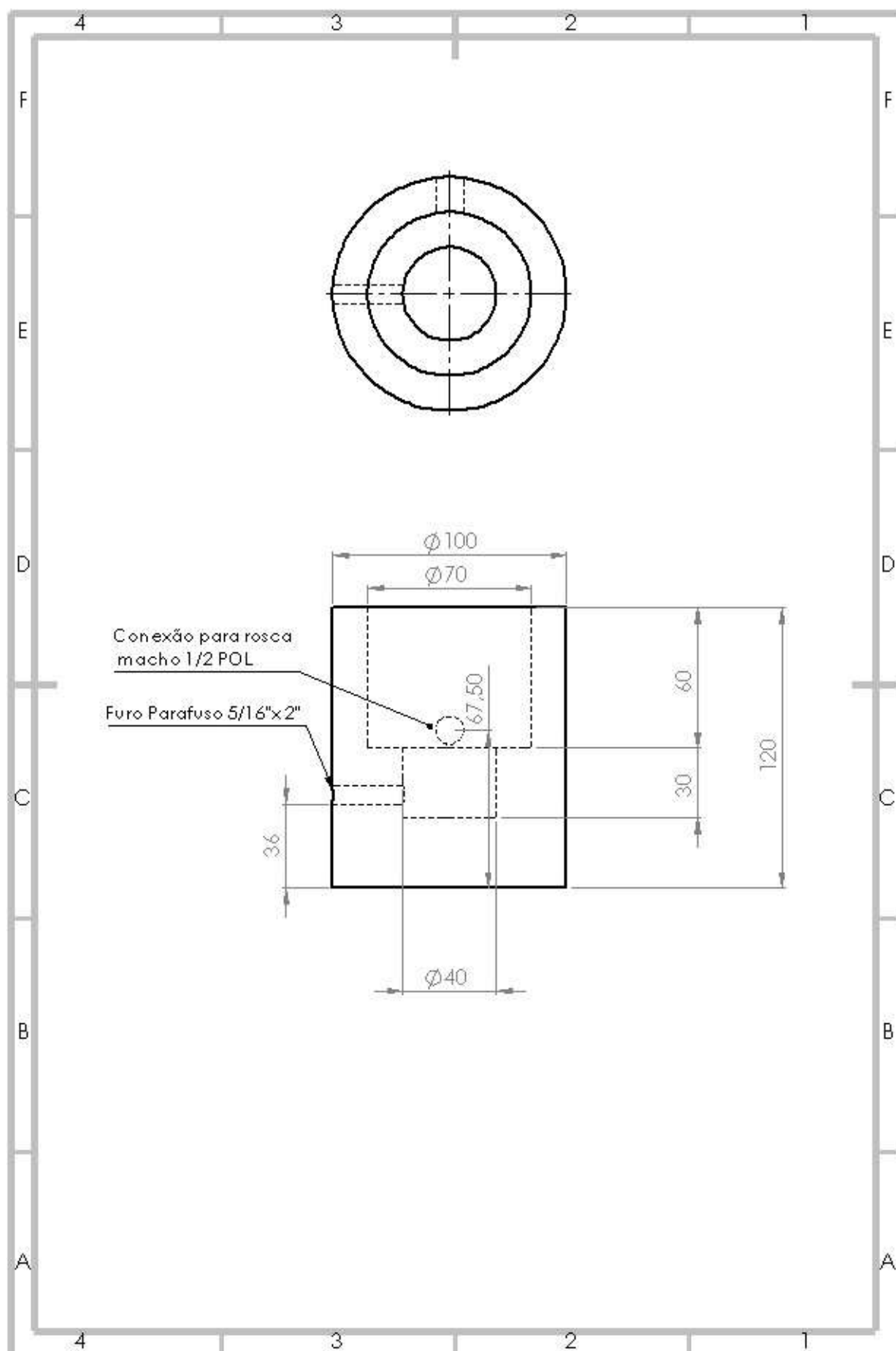
  digitalWrite(led1,HIGH);

  sensorValor = analogRead(sensorPin);
  sensorValor= sensorValor*100/1023;

  if (sensorValor < 45) {

    digitalWrite(tip,HIGH);
    delay(500);
    digitalWrite(tip,LOW);
    delay(500);
  }
  if (sensorValor > 55) {

    digitalWrite(tip,HIGH);
    delay(1000);
    digitalWrite(tip,LOW);
    delay(1000);
  }
}
```

Apêndice C – Desenho técnico da câmara para texturização (peça 1). Em milímetros.

Apêndice D – Desenho técnico da câmara para texturização (peça 2). Em milímetros.

