

JAKELINE GUIMARÃES PARREIRA

**TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL ELETROQUÍMICA
SEM MASCARAMENTO COM FINALIDADES
TRIBOLÓGICAS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2011

JAKELINE GUIMARÃES PARREIRA

**TEXTURIZAÇÃO SUPERFICIAL ELETROQUÍMICA SEM
MASCARAMENTO COM FINALIDADES TRIBOLÓGICAS.**

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof^a. Dra: Henara Lillian Costa

Co-Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Gallo

UBERLÂNDIA – MG

2011

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

- P259t Parreira, Jakeline Guimarães, 1983-
Texturização superficial eletroquímica sem mascaramento com finalidades tribológicas / Jakeline Guimarães Parreira. - 2011.
102 f. : il.
- Orientadora: Henara Lillian Costa.
Co-orientador: Carlos Alberto Gallo.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.
1. Usinagem eletroquímica - Teses. 2. Desgaste mecânico - Teses. 3. Tribologia - Teses. I. Costa, Henara Lillian. II. Gallo, Carlos Alberto. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621.9

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela dádiva da vida e por, em muitos momentos aflitivos, proporcionar-me a paz e a serenidade para enfrentar os obstáculos e superar os desafios.

Aos meus familiares e pessoas queridas de meu convívio pessoal.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este Curso.

Aos colegas Rogério Felício e Ernane que espontaneamente tanto contribuíram com idéias e ações para a obtenção de resultados utilizados neste trabalho. Aos alunos de iniciação científica João Paulo Fonseca e Letícia Ferreira pela dedicação e disponibilidade. Aos professores do núcleo de tribologia e materiais da FEMEC – UFU e em especial ao professor Alberto Arnaldo Raslan que contribuiu de forma indispensável durante todo o decorrer das atividades experimentais com disponibilização de estrutura de espaço físico e com grande contribuição intelectual.

À Henara Lillian Costa, orientadora e portadora da idéia que desencadeou este trabalho e ao co-orientador Carlos Alberto Gallo que viabilizou a aplicação da técnica estudada com suas contribuições principalmente nos campos da eletrônica.

Aos funcionários e colaboradores do Laboratório de Tribologia e Materiais, em especial a Eunice e Ângela.

A CAPES e a Fapemig pelo apoio financeiro.

PARREIRA, J. G. **Texturização Superficial Eletroquímica sem Mascaramento com Finalidades Tribológicas**. 2011. 89 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

A texturização superficial pode ser utilizada para melhorar o desempenho tribológico de contatos mecânicos, em particular em regimes lubrificados. O presente trabalho tem o objetivo de aprimorar uma metodologia alternativa para a texturização de superfícies baseada em princípios de usinagem eletroquímica. A dissolução eletroquímica alia rapidez, reprodutibilidade e elevado custo-benefício, que são extremamente importantes quando se visa a aplicação da microtexturização em escala industrial. O não mascaramento da área a ser texturizada otimiza a técnica, dispensando um tratamento prévio e posterior de cada superfície. Uma técnica também não convencional de usinagem, a eletroerosão, foi utilizada para a microfuração da tampa da ferramenta a ser usada na microtexturização. O padrão de microfuração da ferramenta é copiado à peça pela ação da dissolução eletroquímica. O aprimoramento da técnica de texturização eletroquímica foi acompanhado pelo projeto de um circuito eletrônico com sistema de aquisição de dados, de uma célula eletroquímica e pelo dimensionamento de um sistema para bombeamento e fluxo de eletrólito, que permitiram uma melhora no acabamento superficial das peças microtexturizadas, além do desenvolvimento de ferramentas que viabilizaram a confecção de diferentes padrões de microtexturização. Na célula de texturização eletroquímica, o material da ferramenta foi o aço inoxidável ferrítico AISI 430 e o da peça foi o aço carbono 1010. O eletrólito escolhido para promover o contato elétrico entre os eletrodos foi o NaCl. Durante a texturização eletroquímica foram avaliados parâmetros importantes como o distanciamento entre eletrodos, a tensão aplicada e o tempo total de texturização, sendo que os melhores resultados foram obtidos para um distanciamento de 100 μm , uma tensão de 30 a 40 V e um tempo de texturização entre 20 e 60 s. Foram texturizados ainda padrões com formatos de ponto, traço-ponto e “V”, obtendo-se bons resultados. Um teste tribológico mostrou uma redução do atrito e uma diminuição do desgaste de uma superfície texturizada lubrificada com MoS_2 , quando comparada com uma superfície lisa.

Palavras Chave: Texturização de Superfícies. Dissolução Eletroquímica. Texturização Eletroquímica. Atrito. Desgaste.

PARREIRA, J. G., **Maskless Electrochemical Texturing Surfaces for Tribological Purposes**. 2011. 89 f. M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

Surface texturing can be used to improve the tribological performance of mechanical contacts, in particular in the case of lubricated systems. The purpose of this work is to improve an alternative method for surface texturing based on electrochemical machining. Electrochemical dissolution combines high speed, good reproducibility and high cost-benefit ratio, which are important factors when an industrial application of surface texturing is pursued. Since the area to be textured is not required to be masked, the technique is optimized, without the need of a pre or post treatment of each surface. Another non-conventional machining technique, Electrical Discharge Machining (EDM), was used to drill microholes in the cover of the tool that will be used in the microtexturing operations. The pattern of microholes in the tool is copied onto the workpiece through the action of electrochemical dissolution. The improvement of the electrochemical texturing technique was achieved with the design of an electronic circuit with a data acquisition system and of an electrochemical cell and with the specification of the electrolyte pumping system, which improved the surface finish of the textured workpiece, as well as with the development of tools that made possible the confection of different microtexture patterns. In the electrochemical cell, the tool material was AISI 230 ferritic stainless steel and the workpiece material was carbon steel AISI 1010o. Sodium Chloride was chosen as the electrolyte tool makes the electrical contact between the electrodes. During the electrochemical texturing tests, the effect of important parameters such as the gap between electrodes, the applied voltage and the total texturing time were evaluated, and the best values found were a gap of 100 μm , a voltage between 30V and 40V and a texturing time between 20s and 60s. Different texturing patterns were obtained with good results, including dots, trace-dots and chevrons. A tribological test showed a reduction in friction and wear of a textured surface lubricated with MoS_2 , when compared with a smooth surface.

Keywords: SurfaceTexturing. Electrochemical Dissolution. Electrochemical Texturing. Friction. Wear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Estrutura da dupla camada elétrica de um sólido com carga negativa.....	12
Figura 2.2 – Simbologia para a pilha utilizada na medida do potencial padrão de eletrodo do sistema Zn/Zn^{2+} , utilizando o eletrodo padrão de hidrogênio. (MARCONATO; BIDÓIA, 2003).....	14
Figura 2.3 – Efeito da polarização na distribuição de potencial em uma célula eletrolítica (DE BARR; OLIVER, 1968).	18
Figura 2.4 – Esquema da influência da forma das curvas de polarização na velocidade de dissolução (GENTIL, 2007).	19
Figura 2.5 – Processo de dissociação eletroquímica do aço. (LANNA, 1999)	22
Figura 2.6 – Condutividade específica em função da concentração e da temperatura para o eletrólito de NaCl (MCGEOUGH, 1974)	24
Figura 2.7 – Curva corrente vs. tensão típica para uma célula eletrolítica (POTTER, 1956).	25
Figura 2.8 – Esquematização do processo de transferência de padrões. (NOURAEI; ROY, 2008).....	29
Figura 2.9 – Densidade de corrente através do anodo versus posição normalizada no catodo (NOURAEI; ROY, 2008).	29
Figura 2.10 – Comparação do perfil simulado e experimental da evolução na forma da cavidade no regime de dissolução ativa do metal (NOURAEI; ROY, 2008).....	30
Figura 2.11 – Simulação dos perfis gerados (NOURAEI; ROY, 2008).....	31
Figura 2.12 – Esquema do equipamento confeccionado. (COSTA; HUTCHINGS, 2009).	32
Figura 2.13 – Esquema do processo para texturização em ambos os lados do anodo. (ZHU et al, 2009).....	32
Figura 2.14 – Sistema proposto para microusinagem eletroquímica das cavidades no anodo. (SHUANGQING et al, 2010)	33
Figura 2.15 – A forma de seção transversal de uma única cavidade. (SHUANGQING et al., 2010).....	33
Figura 2.16 – Coeficiente de atrito de superfícies polidas e microtexturizadas com aplicação de diferentes velocidades (a) e cargas (b). (WAN; DANG-SHENG, 2008).....	36

Figura 2.17 – Resultados relativos às séries 1: anel padrão revestido em cromo; 2: anel revestido em cromo e texturizado; 3: anel não revestido e texturizado. (a) Níveis de emissão de fumaça versus a velocidade do motor e (b) Consumo de combustível versus a velocidade do motor. (ETSION; SHER 2009).....	37
Figura 2.18 – (1) A dependência da força de atrito em relação ao tempo para superfície brunida MoS_2 em aço e (2) com o lubrificante sobre a camada de CdZnSe . (RAPOPORT et al., 2009)	38
Figura 2.19 – Micrografia da superfície com filme de MoS_2 (a) e do filme de MoS_2 em camada de CdZnSe . (RAPOPORT et al., 2009).....	38
Figura 3.1 – Esquema do aparato desenvolvido.....	40
Figura 3.2 – Esquema da montagem da célula eletrolítica.	43
Figura 3.3 – Modelos de padrões de furação na ferramenta	45
Figura 3.4 – Circuito para obtenção de sinais de corrente pulsada.	50
Figura 3.5 – Forma de onda gerada pelo aparato projetado.....	51
Figura 4.1 – Testes preliminares para confecção dos padrões na máquina de eletroerosão.	54
Figura 4.2 – Detalhe da caixa adaptada à máquina de eletroerosão.	54
Figura 4.3 – Dispositivo de fixação do eletrodo ferramenta na máquina de EDM.	55
Figura 4.4 – Usinagem para redução da espessura central da tampa da ferramenta.	56
Figura 4.5 – (a) Tampa da ferramenta contendo o padrão de furação com 100 furos circulares e (b) Microscopia ótica de um dos 100 furos obtidos.....	56
Figura 4.6 – Micrografia da ferramenta com padrão de furação em traço-ponto.....	57
Figura 4.7 – Detalhe do dispositivo de fixação dos eletrodos de eletroerosão.....	57
Figura 4.8 – Detalhe da tampa da ferramenta com furação em “V”.	58
Figura 5.1 – Micrografia da superfície de uma amostra após o polimento fino.	64
Figura 5.2 – Interferometria da superfície polida da amostra.....	65
Figura 5.3 – Efeito do espaçamento entre os eletrodos no diâmetro dos bolsos.	67
Figura 5.4 – Efeito do espaçamento entre os eletrodos na profundidade dos bolsos.	67
Figura 5.5 – Efeito da tensão no diâmetro dos bolsos	70
Figura 5.6 – Efeito da tensão na profundidade dos bolsos.	70
Figura 5.7 – Gráficos de tensão sobre a resistência adquiridos para as seguintes aplicações de tensão sobre a célula: (a) 10V, (b) 20 V, (c) 30 V, (d) 40 V, (e) 50 V.	72
Figura 5.8 – Exemplo de eficiência de corrente para eletrólito passivador (NaNO_3) e não passivador (NaCl). (ALTENA, 2000).....	73
Figura 5.9 – Efeito do tempo de texturização no diâmetro dos bolsos.....	75
Figura 5.10 - Efeito do tempo de texturização na profundidade dos bolsos.....	75

Figura 5.11 – Perfil de voltagem ao longo de uma texturização com tempo de duração total de 120 segundos, sendo: (a) 30s, (b) 60s, (c) 90s, (d)120s.....	77
Figura 5.12 – Interferometria e micrografia eletrônica de varredura para o resultado da tranferencia de padrão de pontos regularmente espaçados.....	77
Figura 5.13 – Perfil interferométrico da textura obtida em padrão circular.....	77
Figura 5.14 – Interferometria da superfície da amostra texturizada com padrão em traço-ponto.....	78
Figura 5.15 – Perfil interferométrico da textura obtida em padrão circular.....	78
Figura 5.16 – Interferometria e micrografia eletrônica de varredura para o resultado da tranferencia de padrão de “V” regularmente espaçados.....	79
Figura 5.17 – Perfil interferométrico da textura obtida em padrão “V”.....	79
Figura 5.18 – Mapa triboscópico para comparação do coeficiente de atrito.....	80
Figura 5.19 – Micrografia da amostra ensaiada tribologicamente: (a) região texturizada e (b) região não texturizada.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Principais limitações das técnicas de texturização a Laser, Fotoquímica e Eletroquímica (s).	9
Tabela 2.1 – Alguns valores de potencial padrão de eletrodo.(NUNES, 1990)	15
Tabela 2.2 – Parâmetros para MUEQ. (BHATTACHARYYA et al., 2005).....	26
Tabela 3.1 – Alguns produtos e concentrações que podem ser dosados	44
Tabela 4.1 – Parâmetros de máquina ajustados na máquina de EDM. (ENGEMAQ)	52
Tabela 4.2 – Resumo dos testes de texturização efetuados.....	62
Tabela 5.1 – Interferometrias dos ensaios de variação de distanciamento entre eletrodos.	66
Tabela 5.2 – Resultados dos testes de avaliação do efeito do distanciamento entre eletrodos.	66
Tabela 5.3 – Interferometrias dos ensaios de variação de tensão.	69
Tabela 5.4 – Resultados dos testes de avaliação do efeito do distanciamento entre eletrodos.	69
Tabela 5.5 – Cálculos para obtenção da densidade de corrente	72
Tabela 5.6 – Interferometrias dos ensaios de variação do tempo de texturização.	74
Tabela 5.7 – Resultados dos testes de avaliação do tempo de texturização.	74

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔG – variação da energia livre de Gibbs

η – sobrepotencial

ρ_a - densidade do metal do anodo

A – área superficial

A_t – área da seção transversal

D – diâmetro

DT – porcentagem do tempo de duração da faísca

E – potencial observado

E^0 – potencial padrão

F – constante de Faraday

h – comprimento

I – corrente

I_d – densidade de corrente

K – equivalente eletroquímico

M – metal

M^{n+} – íon metálico

n – número de elétrons

n_c – número de cavidades

p – constante de proporcionalidade

PVI – acoplador Ótico

Q – transistor Bipolar

R – resistência

T_0 – tempo de potencial zero entre pulsos

T_{on} – tempo de pulso

T_{off} – tempo de pausa

T_p – tempo de pulso

TS – parâmetro que determina a quantidade de corrente na eletroerosão

U_1A / U_1B – portas Lógicas Inversoras

V – fonte de tensão

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	1
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II	6
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 Texturização de superfícies.....	6
2.2 Fundamentos de Eletroquímica.....	10
2.2.1 Oxidação-Redução	10
2.2.2 Potencial de Eletrodo.....	11
2.2.3 Pilhas e Células Eletroquímicas	16
2.2.4. Polarização	16
2.3 Usinagem Eletroquímica	20
2.4 Texturização Eletroquímica	27
2.5. Texturização Superficial com Finalidades Tribológicas.....	34
CAPÍTULO III	39
DESENVOLVIMENTO DO APARATO EXPERIMENTAL	39
3.1 Célula Eletroquímica	41
3.1.1 Ferramenta	41
3.1.2 Cuba de Acrílico e Grampos de Pressão.....	42
3.1.3 Bombeamento de eletrólito	43
3.2 Confecção dos Padrões de Furação na Tampa da Ferramenta	44
3.2.1 Perfuração com Micro Brocas.....	45
3.2.2 Perfuração a Laser	46
3.2.3 Perfuração por Eletroerosão	46
3.2.4. Camada isolante	48
3.3 Circuito eletrônico para obtenção de corrente pulsada.....	49
CAPÍTULO IV.....	52
PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	52

4.1. Ensaio de eletroerosão para furação da ferramenta	52
4.2 Preparação de Amostras	58
4.3 Testes de Texturização	59
4.3.1 Variação do espaçamento entre os eletrodos.....	60
4.3.2 Variação da tensão aplicada sobre os eletrodos	60
4.3.3 Variação do tempo total de texturização.....	61
4.3.4 Variação do padrão de textura.....	61
4.4 Testes Tribológicos	62
CAPÍTULO V.....	64
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	64
5.1 Amostras Pré-Texturização	64
5.2 Efeito do espaçamento entre os eletrodos.....	65
5.3 Efeito da Tensão	68
5.3.1 Avaliação da corrente.	71
5.4 Efeito do Tempo de Texturização.....	73
5.4.1 Avaliação do potencial da célula eletrolítica ao longo do ensaio.	76
5.5 Utilização de Diferentes Padrões de Textura.....	77
5.6 Resultados Tribológicos	79
CAPÍTULO VI.....	82
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	82
CAPÍTULO VII.....	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A modificação da topografia superficial, gerando micro texturas com geometrias regulares, conhecida por microtexturização superficial, tem potencial de utilização em várias áreas da engenharia, oferecendo vantagens tais como: a melhora do aspecto estético de superfícies, a melhora da adesividade entre superfícies, a geração de superfícies superhidrofóbicas, a geração de superfícies com grande capacidade de absorção luminosa, uma melhor troca de calor na peça, etc. (COSTA, 2005). Em particular, a utilização de técnicas de texturização de superfícies com a finalidade de melhorar o desempenho tribológico de componentes mecânicos tem se intensificado na última década.

Importantes nichos industriais estão sendo apontados para a aplicação da técnica, como por exemplo, a indústria automobilística (RYK; ETSION, 2006) (ETSION, 2009), o setor de próteses ou implantes corporais (GAO et al., 2010), a indústria de mancais e de conformação mecânica (ASPINWALL et al., 1992).

Na indústria automobilística, o aumento da eficiência de um motor automotivo pode ser alcançado pela melhora de sua lubrificação e pela redução do atrito interno, uma vez que 30 a 40% do combustível gasto com transporte é utilizado para vencer o atrito nos anéis de pistão e nas engrenagens (PRIEST; TAYLOR, 2000). A texturização superficial desses componentes pode melhorar o desempenho de motores de combustão interna, o que por consequência vem a reduzir a emissão de poluentes na atmosfera, que é uma forte exigência na atualidade (RYK et al., 2002).

As texturas confeccionadas podem atuar, em condições de desgaste a seco (DUBRUJEAUD et al., 1994) (BECKER; LUDEMA, 1999) (VOLCHOK et al., 2002), alojando os resíduos de desgaste do contato, o que leva a uma diminuição do atrito e do desgaste em sistemas mecânicos de contato. Em deslizamento lubrificado, os bolsos podem atuar tanto removendo os resíduos quanto como micro reservatórios para lubrificantes (COSTA; HUTCHINGS, 2009) (RAPOPORT et al., 2009), influenciando os mecanismos de

lubrificação, e/ou gerando um aumento da pressão hidrodinâmica no contato e, portanto da capacidade de carga do componente (COSTA; HUTCHINGS, 2006a) (BLATTER et al., 1999).

Ensaio tribológicos de superfícies texturizadas mostram aumento da capacidade de carga em superfícies lubrificadas sob regime hidrodinâmico e melhora da lubrificação (COSTA; HUTCHINGS, 2008) quando comparadas com superfícies lisas. Testes realizados com componentes texturizados evidenciaram uma redução no atrito de até 40% quando comparado a elementos não texturizados. Análise quanto a área texturizada revelaram uma densidade ótima de 40 a 50% nos bolsos. (RAPOPORT et al., 2007)

Várias técnicas podem ser aplicadas para se criar micro texturas em superfícies (BRUZZONE et al., 2008). A mais utilizada é a texturização a laser (ETSION, 2009) (VILHENA et al., 2009). Outra técnica considerada como padrão industrial de transferência de texturas complexas para um substrato é a fotolitografia (MADOU, 2002).

A maioria das técnicas, apesar de serem eficientes na obtenção de cavidades com formatos e espaçamentos regulares, se mostram inviáveis para reprodução em escala industrial por serem caras e lentas. A texturização a laser, por exemplo, demanda altos gastos em energia, o equipamento é sofisticado com altos custos de manutenção, e o tempo demandado para confecção de texturas é grande, já que cada bolso é confeccionado um a um (ETSION, 2005). Além disso, a superfície produzida fora dos bolsos fica irregular devido à movimentação do material fundido para as laterais, e essas zonas termicamente afetadas e conseqüentemente duras necessitam de um processo adicional para a sua remoção (Costa 2005). Na texturização química por fotolitografia (VISHNITSKY, 1987) (MADOU, 2002) (NELSON; SCHWARTZ, 2005) remoção localizada de material ocorre quimicamente em locais não protegidos por uma máscara fotolitográfica, que deve ser previamente aplicada e posteriormente destruída a cada superfície a ser texturizada. Portanto, ela demanda tratamentos pré e pós texturização, o que causa lentidão e onerosidade ao processo.

Nos últimos cinco anos, começaram a surgir publicações utilizando princípios de usinagem eletroquímica na texturização de superfícies, dispensando a necessidade de mascaramento prévio dos substratos e com a possibilidade de texturizar grandes áreas compostas de inúmeras micro cavidades de uma só vez com tempos bastante reduzidos, tornando o processo mais competitivo para ser utilizado em escala industrial (SCHONENBERGER; ROY, 2005).

O processo de usinagem eletroquímica consiste em uma dissolução anódica que ocorre dentro de uma célula eletrolítica. A peça a ser usinada (ânodo) é conectada ao pólo positivo de uma fonte de tensão, e a ferramenta (cátodo) ao pólo negativo. Na superfície da

peça, o metal é oxidado transformando-se em íons metálicos, de modo que a forma da ferramenta é copiada na peça (DE BARR; OLIVER, 1968).

Na microtexturização eletroquímica sem mascaramento do substrato, o padrão a ser transferido é confeccionado na ferramenta e não na peça. Isso exclui a necessidade de preparação do substrato no sentido de obter alguma seletividade na superfície exposta, como ocorre na fotolitografia. Exclui também a necessidade de confecção individual de cada bolso através da utilização de um sistema de posicionamento micrométrico, como ocorre na tecnologia a laser. Na realidade, a etapa lenta deste processo é a confecção da ferramenta (anodo), que deverá conter o padrão micrométrico a ser transferido à superfície. Porém, esta etapa é realizada uma única vez, já que por ser anódica o seu desgaste deverá ser desprezível e, portanto uma única ferramenta pode ser usada para texturizar inúmeras peças.

O princípio de dissolução eletroquímica, portanto, vem a ser utilizado para texturização de superfícies, já que se mostra em conformidade com as necessidades apontadas, além de ser simples e não requerer o uso de equipamentos altamente sofisticados ou mão-de-obra tão especializada. Esse método de texturização é ainda muito vantajoso principalmente pela possibilidade de obter texturas de dimensões de centenas de micrometros em formas variadas, com elevadas taxas de remoção de material, baixa rugosidade superficial e sem danos estruturais na peça, o que é muito difícil de produzir com métodos convencionais.

Em publicações anteriores na área de texturização eletroquímica sem mascaramento, tem-se divulgado resultados com os padrões e suas dimensões transferidos da ferramenta para o substrato com boa fidelidade.

Schonenberger (2005) mostrou a transferência de padrões de textura utilizando um princípio oposto ao utilizado na fotolitografia, utilizando o mascaramento na ferramenta e não nas peças. O autor levantou problemas que podem ser ocasionados pela não renovação de eletrólito, o que levou à utilização de um espaçamento entre os eletrodos.

Roy (2007) destacou a importância no desenvolvimento de técnicas de fabricação para reprodução em escala industrial utilizando métodos de não mascaramento prévio, demonstrando a transferência de padrões na ordem micrométrica.

Em 2008, Nouraei e Roy (2008) fizeram simulações para o entendimento do processo eletroquímico e das variáveis necessárias a serem estudadas na transferência de padrões, como voltagem e densidade de corrente. Exploraram ainda o processo de transição da eletrodissolução ativa para a passiva na formação dos padrões no substrato, obtendo profundidade máxima das cavidades durante a dissolução ativa.

Costa e Hutchings (2008) desenvolveram um processo chamado de texturização eletroquímica sem mascaramento prévio (MECT – Maskless Electrochemical Texturing), em que o isolante vem acima da camada condutora e um eletrólito flui através de pequenas perfurações nesta ferramenta, a qual define o padrão a ser transferido. Mostraram ainda que uma combinação de pequenas separações entre os eletrodos e bom fluxo de eletrólito resulta em aumento da taxa de remoção de material, com uma eficiência que chegou a alcançar valores maiores que 90%. Essa alta eficiência e o tempo de texturização curto indicaram um grande potencial de utilização do método em aplicações industriais.

Di Zhu (2009) propôs um método em que uma placa isolante com padrões a serem transferidos é revestida com filme metálico de cobre, e é pressionada contra o substrato a ser texturizado, portanto não havendo um espaçamento (*gap*) para fluxo de eletrólito. Foram feitas análises da conformação e profundidade das cavidades em relação à espessura do isolante e à densidade de corrente aplicada. O autor ainda sugere a possibilidade de o método proposto ser usado para produzir texturas em ambos os lados do anodo e realiza testes para comprovar a redução do coeficiente de atrito utilizando as superfícies texturizadas.

Shuangqing Qian e Di Zhu (2010) continuaram o trabalho anterior testando metodologias com e sem um espaçamento entre os eletrodos para fluxo de eletrólito e avaliando outros parâmetros relevantes, como a densidade de corrente aplicada e a profundidade dos bolsos. Superfícies de anéis de pistão foram texturizadas e foi avaliada a redução do coeficiente de atrito no 'contato lubrificado'.

Neste trabalho, objetiva-se aprimorar a técnica desenvolvida por Costa e Hutchings (2008), para que a mesma possa ser utilizada com maior eficiência e versatilidade. Para tanto, este trabalho envolveu o projeto técnico e a implementação de um aparato experimental dentro do LTM/UFU, além do estudo experimental de diversos parâmetros de usinagem, tais como voltagem, corrente, tempos de usinagem, distância ferramenta-peça e padrão de textura. Com o intuito de verificar a potencialidade da técnica na melhora do comportamento tribológico de superfícies, foram realizados ensaios de deslizamento envolvendo lubrificação sólida com bissulfeto de molibdênio.

Foi ainda utilizado um método alternativo para a produção das ferramentas de texturização, a eletroerosão. Um equipamento de eletroerosão convencional foi ajustado para usinagem de furações micrométricas na tampa da ferramenta a ser utilizada na texturização eletroquímica.

O trabalho está estruturado em 6 capítulos. O segundo capítulo trará uma revisão bibliográfica abordando os principais tópicos que envolvem a texturização de superfícies de maneira geral, bem como princípios fundamentais da eletroquímica, o estado da arte da

texturização eletroquímica, que é a técnica para texturização utilizada neste trabalho. O capítulo três descreve detalhadamente o desenvolvimento do aparato experimental de texturização eletroquímica confeccionado neste trabalho, etapa necessária para a posterior execução dos procedimentos experimentais, os quais são mostrados no quarto capítulo. Os resultados de todos os procedimentos são expostos e discutidos no capítulo cinco. O capítulo seis mostra as conclusões que podem ser verificadas através deste trabalho assim como as considerações finais, apontando algumas possibilidades para continuação deste trabalho.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo principal desse estudo é a montagem experimental e o aperfeiçoamento de uma metodologia bastante promissora para melhorar o desempenho tribológico de superfícies através da sua microtexturização.

A texturização superficial proposta neste trabalho é efetuada por remoção de material através da dissolução anódica, baseada nos princípios de eletroquímica.

A revisão bibliográfica apresentada neste capítulo inicialmente explora brevemente os diferentes métodos de texturização superficial disponíveis. Em seguida, o método de texturização eletroquímica sem mascaramento é apresentado. Na sequência, os fundamentos teóricos mais relevantes da eletroquímica em geral e da usinagem eletroquímica em particular são abordados. Finalmente, os efeitos da texturização superficial sobre o comportamento tribológico de superfícies são revisados.

2.1 Texturização de superfícies

A texturização é a modificação do aspecto morfológico de uma superfície, podendo ser utilizada em escala macro ou micrométrica, dependendo das finalidades.

A microtexturização utiliza-se de métodos de modificação da topografia das superfícies criando padrões de microcavidades regularmente espaçadas.

Várias técnicas já são disponíveis para criar texturas em uma superfície com tamanho micrométrico e eventualmente nanométrico (MICHEL et al., 2001) (MADOU, 2002) (POOLE Jr.).

O principal método de microtexturização utilizado hoje em aplicações de engenharia é a texturização a laser (DUMITRU et al., 2000) (ZIMMER et al., 2000) (BRIZMER et al., 2003) (WAKUDA et al., 2003) (CHOI et al., 2004) (VILHENA, 2009). Outra metodologia

bastante utilizada na microfabricação é a fotolitografia (VISHNITSKY, 1987) (MADOU, 2002) (NELSON; SCHWARTZ, 2005).

A texturização a laser envolve a remoção localizada de material por um feixe de laser, em que a energia altamente concentrada funde pequenas regiões de modo controlado. A refletividade da superfície, a condutividade térmica, os calores específico e latente de fusão do material são propriedades importantes do processo, de forma que quanto menor forem melhor será a eficiência do processo (BENEDICT, 1987). Diferentes técnicas podem ser utilizadas para a localização da remoção de material, como a interrupção do feixe de laser por um feixe rotativo ranhurado (DEFOURNY; JODOGNE, 1992), o uso de laser pulsado movimentado por uma unidade CNC (DUMITRU et al., 2000) ou a projeção de um feixe de seção transversal larga através de uma máscara (WAKUDA et al., 2003). Porém, a texturização a laser possui várias limitações que levam à lentidão do processo. O mecanismo de ablação de material leva à formação de protuberâncias nas laterais dos bolsos, que são originadas pelo material fundido que é ejetado (BENNEDICT, 1987). Estas protuberâncias são geralmente muito duras devido ao calor envolvido no processo, de forma que precisam ser removidas por uma operação mecânica posterior com o intuito de evitar que sejam removidos durante o deslizamento inicial e levem à ocorrência de desgaste abrasivo. Os bolsos também são produzidos individualmente ou de forma serial e não em única operação (DUMITRU et al., 2000). Muitos componentes que poderiam ter seu desempenho melhorado por microtexturização são baratos, como é o caso de cilindros de veículos automotivos, e sendo assim, requerem processos de texturização menos onerosos.

A fotolitografia seguida de ataque químico é considerada como o método padrão de transferência de texturas complexas em aplicação industrial. (VISHNITSKY, 1987) (MADOU, 2002) (NELSON; SCHWARTZ 2005). A metodologia consiste em submeter certas regiões da superfície à ação de uma solução agressiva (geralmente um ácido), que será atacada quimicamente, o que implica que as outras regiões devem ser protegidas deste ataque. Isso é feito colocando-se uma máscara sobre a peça, feita de material inerte à substância corrosiva, com as formas e dimensões desejadas. Esse mascaramento da superfície torna o processo lento, já que é necessário preparar cada superfície, depositar a máscara, contendo o padrão desejado, efetuar o ataque químico e finalmente remover a máscara. Além disso, o processo requer todo o ambiente extremamente limpo, pois o bom resultado depende de uma camada homogênea, de espessura uniforme e sem defeitos. Para a utilização em microtexturização, o mascaramento é normalmente feito com resinas fotossensíveis, e é conhecido como fotolitografia. O processo de texturização completo é conhecido como texturização fotoquímica. A fotolitografia oferece boa resolução, possibilidade de redução

fotográfica em grande escala e versatilidade do padrão a ser transferido. A resina fotossensível deve ser gotejada na superfície da peça, que em seguida gira a altas rotações para o seu espalhamento uniforme. Em seguida a resina deve ser submetida a radiação ultravioleta através de uma outra máscara contendo um padrão transparente e preto, de forma que a radiação só passa através das regiões transparentes da máscara. Em seguida passa-se pela revelação da resina, gerando na peça uma máscara de resina fotossensível, de modo que nas regiões da peça não protegidas pela resina o metal irá se dissolver.

Além das técnicas de texturização a laser e de texturização fotoquímica, várias outras técnicas de texturização podem ser utilizadas. Em trabalho recente, Costa et al. (2010) identificaram possíveis métodos de texturização, que foram classificados de acordo com o seu princípio físico. Alguns destes métodos já são utilizados na indústria ou em laboratório, enquanto outros são técnicas inovadoras. Os autores identificaram quatro classes de métodos de texturização: i) técnicas que envolvem remoção localizada de material, ii) técnicas que envolvem adição localizada de material; iii) técnicas que envolvem movimentação de material de uma região da superfície para outra e iv) técnicas que envolvem a geração de regiões de diferentes durezas na superfície da peça, que durante a sua utilização irão se desgastar de forma diferenciada, gerando uma textura superficial. No total, foram identificados 39 possíveis métodos de texturização, o que mostra o grande potencial de inovação na área. Inovação e criatividade são apontadas como fatores fundamentais para o sucesso da utilização da texturização superficial em grandes escalas industriais, já que o custo tem sido o principal fator limitante para a utilização da texturização superficial para melhorar o seu comportamento tribológico.

Dentre estas técnicas, uma das mais promissoras é a texturização eletroquímica. Esta utiliza ataque ou usinagem eletroquímica com revestimento prévio da superfície (mascaramento). A confecção de texturas por via eletroquímica se baseia no princípio da usinagem eletroquímica, em que é aplicada uma corrente na ferramenta e na peça, transformando-os em catodo e anodo respectivamente, e a condução dessa corrente entre as partes é promovida através de uma solução eletrolítica. Na superfície do anodo, o metal é dissolvido na forma de íons em solução formando as texturas por remoção seletiva de material. Neste processo com mascaramento, as mascaras são adicionadas aos substratos por fotolitografia utilizando material que seja isolante elétrico e depois do ataque estas são removidas. Este mascaramento é necessário para encobrir certas áreas para que o ataque seja seletivo. Com essa seleção, as linhas de corrente do ataque eletroquímico são direcionadas para as áreas descobertas. Porém há certa divergência, a não ser que a ferramenta e a peça (substrato) estejam virtualmente encostadas. A diferença desse método com o de fotolitografia com ataque químico é que a dissolução ocorre por meio de uma

solução eletrolítica com aplicação de corrente e não por ataque com solução química. O procedimento eletroquímico é comumente mais rápido e melhor controlado que o químico, além de permitir a utilização de produtos químicos muito menos nocivos ao operador e ao meio ambiente. Porém, devido ao fato de requerer mascaramento prévio de todas as peças a serem texturizadas, ainda há lentidão.

Um novo método baseado nos princípios de usinagem eletroquímica, e que envolve a transferência de padrões entre superfícies, é a texturização eletroquímica sem o mascaramento de superfícies.

A técnica a ser utilizada neste trabalho envolve a texturização sem a necessidade desse mascaramento prévio das superfícies, o que vem facilitar bastante a aplicação da técnica em escala industrial, devido à grande redução de custo e aumento de velocidade de texturização. A técnica consiste em posicionar o isolamento elétrico, que localiza a ação de dissolução eletroquímica, na superfície da ferramenta e não na peça. Como não há dissolução no catodo, somente uma única operação de mascaramento será necessária na superfície da ferramenta, que poderá então ser usada para texturizar inúmeras peças. Portanto, como o padrão a ser transferido estará na ferramenta, este pode ser único e não é destruído durante a usinagem. Essa proposta reduz o tempo e o custo requerido no processo, já que não há a necessidade de marcar e retirar a marcação de cada substrato. A sua grande limitação é que a texturização superficial por dissolução eletroquímica só pode ser aplicada para superfícies condutoras.

A Tab. 1.1 mostra um resumo das principais limitações de cada técnica abordada.

Tabela 1.1 – Principais limitações das técnicas de texturização a Laser, Fotoquímica e Eletroquímica (s).

	Laser	Fotoquímica	Eletroquímica com máscara	Eletroquímica sem máscara
Pré-tratamento				
Pós tratamento				
Lentidão				
Custo				
Restrições de materiais				
Ferramenta complexa				

2.2 Fundamentos de Eletroquímica

Como a metodologia de texturização na qual se baseará este trabalho envolve a dissolução eletroquímica, é importante o estudo de alguns fundamentos que norteiam este ramo.

Eletroquímica é a ciência que trata das relações entre química e eletricidade, descrevendo os fenômenos que ocorrem na interface de um condutor elétrico, o eletrodo, e um condutor iônico, o eletrólito.

Dois processos complementares ocorrem durante a reação eletroquímica: a transferência de carga elétrica na interface eletrodo/eletrólito e o transporte de massa das espécies redox (oxidação-redução) dentro do eletrólito, que pode ocorrer por difusão, convecção ou migração.

Para se entender todo o processo é necessário entendimento de seus principais conceitos.

2.2.1 Oxidação-Redução

A oxidação-redução vem diretamente ligada à corrosão, principalmente na área de materiais. O fenômeno de corrosão é mais comumente relacionado à deterioração nos metais que ocorre pela dissolução do material, com ou sem a formação de produtos sólidos (óxidos, sulfetos, hidróxidos). A deterioração também pode ocorrer pela reação em atmosferas a altas temperaturas formando camadas de óxidos, esse fenômeno se chama oxidação. A corrosão é um fenômeno de interface que afeta materiais orgânicos e principalmente materiais inorgânicos, manifestando-se através de reações químicas irreversíveis em que ocorrem reações de oxidação e de redução entre o metal e um agente oxidante. Ambos são processos eletroquímicos.

Este trabalho interessa-se pelo fenômeno de dissolução eletroquímica, que pode ocorrer em grande parte dos processos de corrosão, mas não pela corrosão em si, que é um fenômeno de interesse industrial.

Na reação de oxidação ocorre a perda de elétrons, enquanto a reação de redução consiste em ganhar elétrons. A oxidação pode ocorrer em três circunstâncias: quando se adiciona oxigênio à substância, quando uma substância perde hidrogênio ou quando a substância perde elétrons. A Redução, por sua vez, é o inverso e ocorre também de três maneiras: quando uma substância perde oxigênio, quando ganha hidrogênio ou quando ganha elétrons. (GENTIL, 2007)

A oxidação e a redução ocorrem juntas na mesma reação química, reação redox ou óxido-redução. Óxido-redução são reações que transferem elétrons entre substâncias

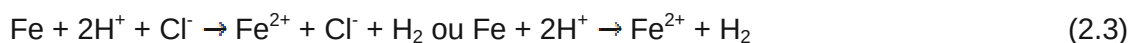
fazendo com que o número de oxidação (nox) de uma substância aumente enquanto o nox de outra substância diminui. Então, a substância que perde elétrons e sofre oxidação é designada agente redutor, enquanto a substância que ganha elétrons e sofre redução é designada agente oxidante. A reação geral ocorre conforme a Eq. (2.1).



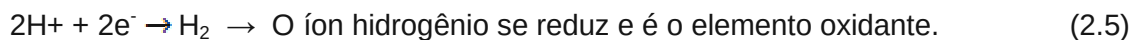
Um exemplo é a corrosão do ferro no ácido clorídrico, Eq. (2.2):



Em meio aquoso, o ácido clorídrico e o cloreto de ferro estão na forma iônica, conforme Eq. (2.3):



A reação global é composta por duas reações parciais, a reação parcial de oxidação ou anódica, Eq. (2.4) e a reação parcial de redução ou catódica, Eq. (2.5), que seguem:



Nas reações parciais pode se observar a transferência de elétrons da região anódica para a catódica, ou seja, a transferência de cargas entre um condutor eletrônico, eletrodo, e um condutor iônico, eletrólito. Esse tipo de fenômeno é chamado de reação eletroquímica, que envolve a corrosão por meio da dissolução eletroquímica de materiais metálicos em meios úmidos condutores. (WOLLINEC, 2003)

2.2.2 Potencial de Eletrodo

O potencial de eletrodo mostra a tendência de uma reação de ocorrer no eletrodo (metal imerso em um eletrólito).

Quando um metal é imerso em uma solução (eletrólito), a diferença de potencial químico entre o metal e a solução faz com que íons metálicos se dissolvam ou íons da solução penetrem no metal. Isso gera, em consequência, uma diferença de potencial elétrico entre a fase sólida (eletrodo) e a fase líquida (eletrólito). Com isso, tem-se ao mesmo tempo,

uma diferença de potencial de natureza química e elétrica, chamada de diferença de potencial eletroquímica (GEMELLI, 2001).

Nos sistemas de eletrodos as reações se iniciam rapidamente com a formação de íons dentro da solução e a permanência dos elétrons dentro do metal. Estes elétrons carregam eletricamente o metal e criam um campo elétrico dentro da solução, que faz com que os íons que são carregados positivamente tendam a ficar retidos na vizinhança da interface metal-solução. Após uma fração de segundo estabelece-se uma situação de equilíbrio ou estado estacionário, caracterizada pela formação da chamada dupla camada (WOLYNEC, 2003). Essa dupla camada elétrica na interface metal/solução é responsável por manter a diferença de potencial entre as duas fases, de maneira que as duas reações continuem a ocorrer normalmente com os potenciais iniciais, apesar de estarem em equilíbrio. A estrutura da dupla-camada é indicada na Fig. 2.1.

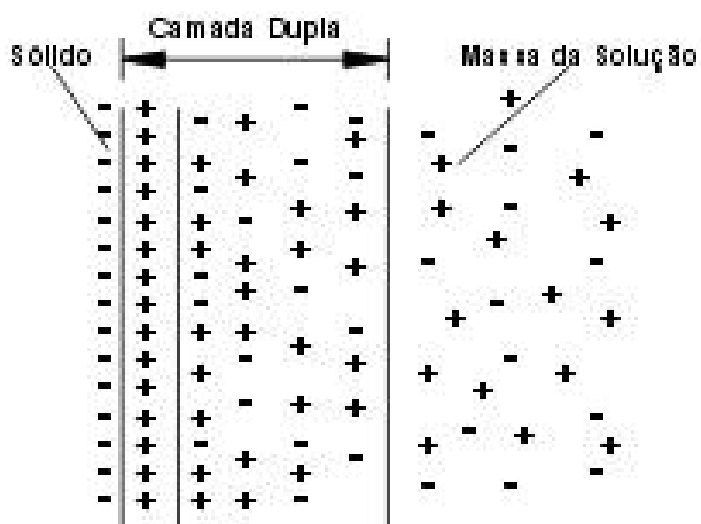


Figura 2.1 – Estrutura da dupla camada elétrica de um sólido com carga negativa.

A dupla camada elétrica é o arranjo ordenado de cargas elétricas na interface metal-solução, em que o íon solvatado fica envolvido pelas moléculas polares do solvente e afastado do metal. A carga elétrica fica desta maneira, separada, e todos os átomos reactantes na superfície do metal devem passar através da dupla camada para se tornarem íons corroídos.

À diferença de potencial da dupla camada chama-se de Potencial Eletroquímico. A medida do potencial eletroquímico de um eletrodo pode fornecer várias informações importantes sobre as características de um sistema metal/solução, como a tendência à

dissolução do metal, o tipo de polarização a que o metal está sujeito, a condutividade da solução, etc.

Walther Hermann Nernst deduziu a equação que permite calcular a diferença de potencial existente entre um metal e a solução de seus íons, que é hoje conhecida como equação de Nernst, Eq. (2.6).

$$E = E^{\circ} - (RT/nF) \ln (a \text{ estado reduzido}/a \text{ estado oxidado}) \quad (2.6)$$

E = potencial observado

E° = potencial padrão (V)

T = temperatura (298 K)

n = n° de elétrons envolvidos

F = Cte de Faraday (96.500 Coulomb)

a = atividade

R = Cte dos gases perfeitos ($8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$).

A equação de Nernst indica que a diferença de potencial depende da natureza do metal utilizado, da concentração de seus íons em solução e da temperatura. Entretanto, a medida desse potencial é praticamente impossível de ser feita sem que se crie uma nova interface metal/solução, o que causará uma modificação do valor real do potencial eletroquímico que se deseja medir. (MARCONATO; BIDÓIA 2003)

Com base nessa realidade, foi desenvolvida uma maneira artificial para se determinar o potencial eletroquímico de um eletrodo, usando-se outro eletrodo como referência. Assim, o valor do potencial medido com relação a outro eletrodo tomado como referência é chamado de potencial de eletrodo, força eletromotriz, potencial de oxido-redução ou potencial de redox. O valor do potencial de eletrodo representa uma diferença de potencial relativa entre um metal e a solução com a qual ele está em contato. Sendo assim, é adotado um eletrodo padrão ou de referência para medição do potencial de um metal, e esses valores são então determinados e dispostos em tabelas.

Para determinação do potencial de eletrodo é necessário construir uma pilha (união de dois sistemas eletrodo de maneira que eles funcionem como um único sistema) entre o eletrodo padrão do hidrogênio e o eletrodo que se deseja medir o seu potencial. Um exemplo pode ser observado pela medição do potencial de eletrodo do zinco na Fig. 2.2, em que a simbologia apresentada para a pilha representada segue a Eq. (2.7):



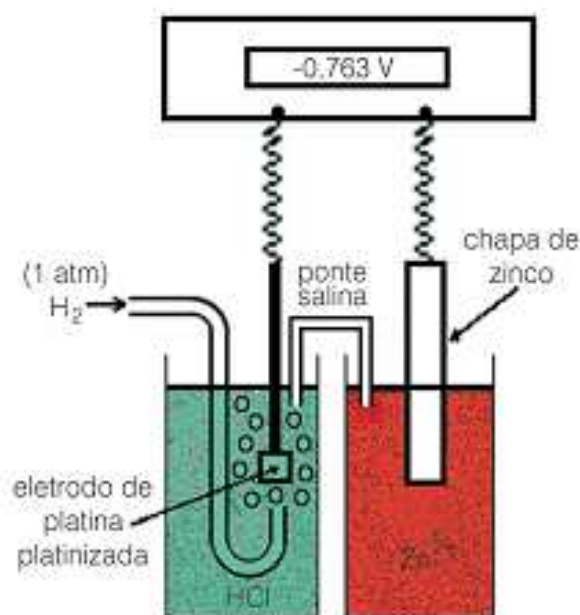


Figura 2.2 – Simbologia para a pilha utilizada na medida do potencial padrão de eletrodo do sistema Zn/Zn^{2+} , utilizando o eletrodo padrão de hidrogênio. (MARCONATO; BIDÓIA, 2003)

Como a diferença de potencial entre os eletrodos de Zinco e Hidrogênio é maior que a diferença de potencial interna de cada um desses eletrodos, após alguns minutos, prevalecerá uma movimentação de corrente de um eletrodo para o outro. Por isso, após o estabelecimento de um equilíbrio na pilha e intercalando-se um voltímetro na ligação externa, determina-se a diferença de potencial entre os dois eletrodos da pilha, ou seja: Potencial da pilha = Potencial do Zinco – Potencial do Hidrogênio = - 0,763 V.

O eletrodo padrão de hidrogênio é fixado como potencial zero, então a diferença de potencial da pilha é igual ao potencial do zinco ($E_{\text{pilha}} = E^{\circ}(\text{Zn}/\text{Zn}^{2+}) = -0,763 \text{ V}$). (MARCONATO; BIDÓIA, 2003)

Um eletrodo é denominado anodo quando nele ocorre uma reação de oxidação e nele há tendência de: aumentar o número de elétrons livres na fase metálica, aumentar a concentração dos íons do metal na solução em torno dele, aumentar o número de íons em estado de oxidação mais elevado na solução em torno dele e diminuir a massa do eletrodo. Quando ocorre a reação de redução num eletrodo ele é chamado de catodo, que tem tendência de: diminuir o número de elétrons livres na fase metálica, diminuir a concentração dos íons do metal na solução em torno dele, aumentar o número de íons em estado de oxidação menos elevado na solução em torno dele e aumentar a massa do eletrodo (deposição). (WOLLINEC, 2003)

Um valor de potencial de eletrodo padrão somente indica que haverá maior liberação de energia quando o metal for oxidado, mas não a velocidade em que ocorre (cinética da reação). O potencial e o equilíbrio da equação variam com a concentração - Princípio de Le Chatelier.

Para determinar os potenciais para concentrações diferentes, usa-se a equação de Nernst que já foi mostrada anteriormente (Eq. 2.6).

As reações eletroquímicas podem ocorrer ou não de forma espontânea e a quantidade máxima que se pode obter de uma reação química sob forma de energia elétrica é igual à variação da energia livre da reação. Termodinamicamente, o potencial de oxidação de um eletrodo está relacionado com a variação da energia livre de Gibbs do sistema (ΔG), que segue a Eq. (2.8): (WOLLINEC, 2003)

$$\Delta G \text{ (j/mol)} = - nFE \quad \text{ou} \quad \Delta G \text{ (cal/mol)} = - nFE/4,18 \quad (2.8)$$

Então para: $E^\circ < 0 \rightarrow \Delta G^\circ > 0$: Reação não-espontânea

$E^\circ > 0 \rightarrow \Delta G^\circ < 0$: Reação espontânea

Através da tabela de potenciais, como a apresentada na Tab.2.1 (NUNES, 1990), podemos saber de um dado par metálico, qual deles sofre oxidação e qual sofre redução. Quanto mais afastadas estiverem as formas oxidadas e reduzidas, maior é a probabilidade de ocorrer a reação.

Tabela 2.1 – Alguns valores de potencial padrão de eletrodo. (NUNES, 1990)

Reação do eletrodo	Potencial padrão, E° / V
$\text{Mg}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Mg}$	-2,372
$\text{Al}^{3+} + 3e^- \rightleftharpoons \text{Al}$	-1,662
$\text{Ti}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Ti}$	-1,630
$\text{Zn}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Zn}$	-0,762
$\text{Cr}^{3+} + 3e^- \rightleftharpoons \text{Cr}$	-0,744
$\text{Fe}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Fe}$	-0,447
$\text{Ni}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Ni}$	-0,257
$\text{Pb}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Pb}$	-0,126
$2\text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons \text{H}_2$	0
$\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Cu}$	0,342
$\text{Ag}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{Ag}$	0,800
$\text{Pd}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Pd}$	0,951
$\text{Au}^{3+} + 3e^- \rightleftharpoons \text{Au}$	1,498

2.2.3 Pilhas e Células Eletroquímicas

A pilha comum ou pilha galvânica é um dispositivo que utiliza reações de óxido-redução para converter energia química em energia elétrica em que a reação química utilizada será sempre espontânea. É possível operar no sentido inverso e aproveitar energia elétrica para provocar reação redox não espontânea.

A dissolução eletroquímica ocorre em meio aquoso e se caracteriza pela formação de uma pilha ou célula de dissolução eletroquímica na superfície do material. Para que haja a dissolução existem algumas condições para que a célula de dissolução eletroquímica seja estabelecida, como: deve existir um eletrólito; deve existir uma diferença de potencial; deve existir oxigênio; podem existir agentes agressivos. Se qualquer um destes elementos for retirado, ou a entrada de oxigênio for impedida o processo é paralisado.

2.2.4. Polarização

Todo metal imerso em uma solução contendo seus próprio íons, na ausência de reações que interfiram, possui um potencial E dado pela equação de Nernst. Se uma corrente elétrica circular por esse eletrodo, o potencial variará, e o novo valor de potencial E' dependerá da corrente aplicada. A diferença entre os dois potenciais ($\eta = E' - E$) é o sobrepotencial. Então o sobrepotencial é a diferença entre os valores de equilíbrio e de trabalho do potencial (McGeough, 1974).

Se o sobrepotencial for negativo ($E' < E$), uma corrente catódica se estabelecerá provocando uma reação de redução e vice-versa.

A polarização ocorre quando o potencial de equilíbrio é alterado por alguma fonte e a velocidade ou densidade de corrente não é mais a mesma nos dois sentidos (oxidação e redução). A sobretensão é uma medição da polarização (WOLYNEC, 2003).

Polarização é a modificação do potencial de um eletrodo devido a variações de concentração, sobre voltagem de um gás ou variação de resistência ôhmica (MCGEOUGH, 1974). Nesse fenômeno verifica-se que, ao circular corrente, os potenciais de eletrodo não se mantêm iguais aos seus valores originais, mas variam em função da corrente circulante. Os fenômenos de polarização promovem a aproximação dos potenciais das áreas anódicas e catódicas e produzem aumento na resistência ôhmica do circuito, limitando a velocidade do processo corrosivo.

O primeiro tipo de fenômeno de polarização está associado com a lentidão com a qual os íons difundem-se dos ou para os eletrodos. Os íons são descarregados nos eletrodos, de forma que outros íons precisam difundir-se para o eletrodo para substituí-los.

No ânodo, os íons são produzidos quando o metal se dissolve, mas porque eles difundem-se lentamente, sua concentração aumenta na superfície do eletrodo. Esta alta concentração tende a reduzir a taxa de dissolução. Para manter a taxa de reação constante, uma corrente deve ser forçada através da célula, aumentando a diferença de potencial entre o eletrodo e a solução. Este efeito é conhecido por polarização de concentração. Se o movimento dos íons entre a solução e a superfície do eletrodo é aumentada, a polarização de concentração diminui. Isto pode ser conseguido, por exemplo, agitando-se o eletrólito vigorosamente ou aumentando-se sua temperatura.

Um segundo tipo de polarização está associado com a própria formação de um íon. Quando a corrente é zero, existe um estado de equilíbrio dinâmico, porque os íons estão continuamente sendo descarregados no eletrodo, mas outros íons estão sendo formados com a mesma taxa. Para conseguir-se favorecer a reação em uma direção, é necessário o fornecimento de energia, através de uma diferença de potencial entre o eletrodo e a solução. Este efeito é conhecido como polarização de ativação. Seu valor depende da composição química do eletrodo, do estado da superfície, da densidade de corrente, da temperatura, da pressão e da concentração de íons na solução.

Outro tipo é a polarização de resistência ou ôhmica, geralmente considerada como a queda de potencial através da fina camada de eletrólito ou filme na superfície do eletrodo, e ocorre devido à precipitação de compostos que se tornam insolúveis com a elevação do pH no entorno das áreas catódicas. A movimentação de elétrons e íons através deste revestimento fica restringida, fazendo-se necessária uma diferença de potencial maior para que a mesma corrente possa fluir. Eventualmente, tal filme superficial pode anular completamente a dissolução da superfície. Sua magnitude depende principalmente da corrente que flui na célula e da natureza e condutividade do eletrólito.

Quando dois metais diferentes são ligados e mergulhados em um eletrólito, estabelece-se uma diferença de potencial entre os eletrodos resultantes. Fechando-se o circuito externo, observa-se uma diminuição dessa diferença de potencial com o tempo. O potencial do anodo se aproxima ao do catodo, e o do catodo se aproxima ao anodo. Tem-se o que se chama polarização dos eletrodos.

Levando-se esses efeitos em consideração, é possível descrever a diferença de potencial através de uma célula eletrolítica como sendo composta de cinco partes, mostradas esquematicamente na Fig. 2.3, um potencial de descarga do ânodo, um sobre potencial de ativação e concentração devido à polarização do ânodo, a diferença de potencial necessária para conduzir corrente através dos eletrodos, um potencial de descarga no cátodo e um sobre potencial de concentração e ativação devido à polarização do cátodo (DE BARR; OLIVER, 1968).

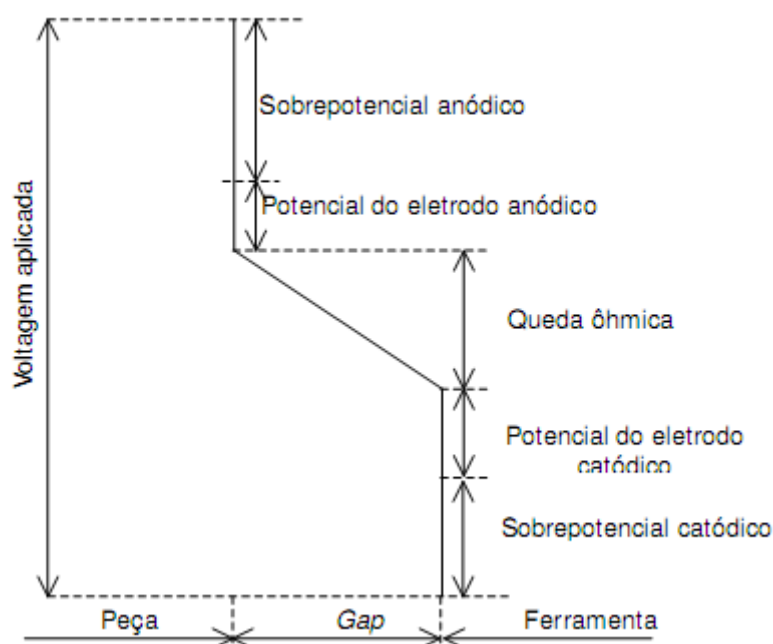


Figura 2.3 – Efeito da polarização na distribuição de potencial em uma célula eletrolítica (DE BARR; OLIVER, 1968).

Caso não houvesse o efeito do fenômeno da polarização, a corrente entre anodos e catodos seria muito mais elevada, em semelhança a um quase curto circuito. Isto se daria porque as resistências elétricas do metal e do eletrólito são muito baixas, restando apenas as resistências de contato dos eletrodos. Os fenômenos de polarização promovem a aproximação dos potenciais das áreas anódicas e catódicas e produzem aumento na resistência ôhmica do circuito, limitando a velocidade do processo corrosivo. (DE BARR; OLIVER, 1968).

A extensão da polarização não depende somente da natureza do metal e do eletrólito, mas também da área exposta do eletrodo. Se a área anódica for muito pequena, poderá ocorrer considerável polarização anódica acompanhando a dissolução, mesmo que as medidas de polarização indiquem uma polarização anódica pequena para uma dada densidade de corrente calculada com base na área total do eletrodo. Assim a relação área anodo / área catodo é importante na determinação da velocidade de dissolução eletroquímica. (GENTIL, 2007).

Na Fig. 2.4, encontram-se curvas de polarização e a influência de suas formas na velocidade de dissolução. Na figura (a), a polarização ocorre predominantemente nas áreas anódicas. Na figura (b), a polarização ocorre predominantemente nas áreas catódicas. Na figura (c), a polarização ocorre, em extensão apreciável, tanto no anodo quanto no catodo, tendo-se então um controle misto.

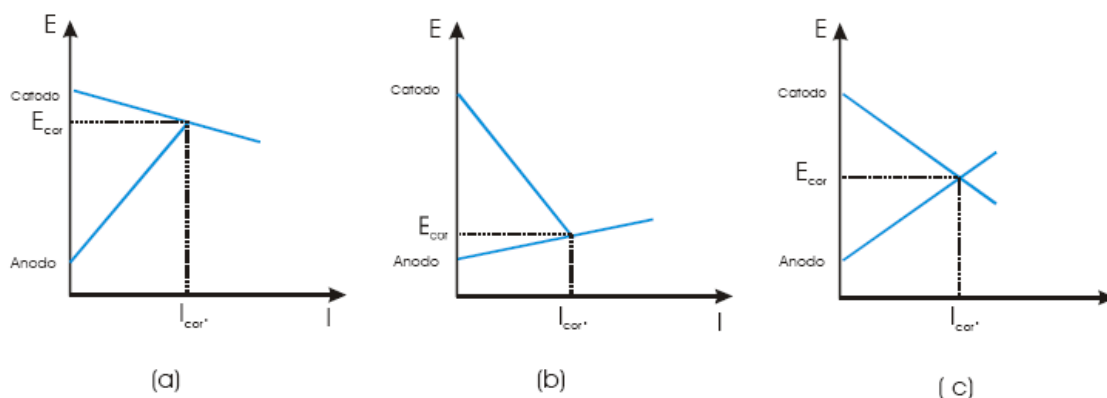


Figura 2.4 – Esquema da influência da forma das curvas de polarização na velocidade de dissolução (GENTIL, 2007).

De modo geral tem-se um controle misto das reações de dissolução.

As modificações no potencial de eletrodo resultantes da polarização provocam mudança no valor deste potencial alterando o ponto de equilíbrio, fazendo com que o potencial anódico desloque no sentido catódico e vice-versa.

Curvas de polarização são freqüentemente derivadas de experimentos com zero ou baixa velocidade eletrolítica e baixa densidade de corrente. Um aumento na velocidade do eletrólito causa pequena modificação na forma da curva de polarização. A determinação experimental da curva de polarização de certo material, num dado eletrólito, pode ser feita por dois métodos distintos.

O método galvanostático, método mais simples, e também o mais antigo, que é caracterizado pelo fato de ter como variável de controle a intensidade da corrente que circula no sistema, a qual é variada por meio de uma resistência.

O Método Potenciostático apresenta como variante o método potenciocinético. Este método é caracterizado pelo fato de ter como variável de controle o potencial e não a intensidade da corrente, como no modo galvanostático. A célula de polarização é semelhante à anterior, porém a aparelhagem requerida é diferente. Para variar o potencial aplicado ao corpo de prova em estudo é necessário um potenciostato, que é um aparelho bem mais complexo. Por meio do potenciostato varia, no sentido anódico ou no catódico, o potencial do metal em relação ao eletrodo de referência. Para cada valor do potencial imposto, o sistema demanda certa corrente que é suprida pelo próprio potenciostato.

A curva de polarização catódica que se obtém por este método é semelhante à obtida pelo método galvanostático, porém a curva anódica para metais que apresentam a transição ativa/passivo tem aspecto completamente diferente. Curvas deste tipo não poderiam ser obtidas pelo método galvanostático.

Passivação é a modificação do potencial de um eletrodo no sentido de menor atividade (mais catódico ou mais nobre) devido à formação de uma película de produto de dissolução. Esta película é denominada película passivante. (GENTIL, 2003)

Os metais e ligas metálicas que se passivam são os formadores de películas protetoras, podendo ser citado o cromo, níquel, titânio, aço inoxidável, que se passivam na grande maioria dos meios corrosivos, especialmente na atmosfera; o chumbo que se passiva na presença de ácido sulfúrico; o ferro que se passiva na presença de ácido nítrico concentrado e não se passiva na presença de ácido nítrico diluído.

A maioria dos metais e ligas passiva-se na presença de meios básicos, com exceção dos metais anfóteros (Al, Zn, Pb, Sn e Sb). (GENTIL, 2003)

2.3 Usinagem Eletroquímica

O processo de usinagem eletroquímica consiste na remoção de material por dissolução anódica. A base do processo é a eletrólise, que é uma reação não espontânea de decomposição de uma substância, acelerada pela passagem de corrente elétrica entre a ferramenta (catodo) e a peça (anodo). O contato elétrico entre a ferramenta e a peça é mantido através da circulação de um líquido eletrólito na superfície de usinagem. Destacam-se como vantagens do processo a usinagem de materiais de alta dureza, geometrias complexas em uma única passada, a isenção de zonas termicamente afetadas e inexistência de forças de corte. Essa técnica vem sendo realizada desde o final de 1950 e as principais utilizações desse método incluem conformação de ferramentas, dispositivos complexos e perfurações.

Ao contrário dos processos tradicionais, na usinagem eletroquímica não existe contato físico entre a peça e a ferramenta, já que a remoção do material ocorre por eletrólise. Por isso, a usinagem eletroquímica é considerada como um processo de usinagem a frio e muito utilizado em substituição aos processos tradicionais de usinagem quando se trata de usinar materiais de difícil usinabilidade.

Para o funcionamento do processo, além da peça e da ferramenta, são necessários: uma fonte de potência de baixa tensão e de alta corrente elétrica, um eletrólito e um circuito eletrolítico composto de tubulações, bombas e sistema de armazenamento, além de uma cuba eletrolítica, que é o local onde ocorre a usinagem. (MCGEOUGH, 1974) (BENEDICT, 1987) (MALAQUIAS, 2000).

Durante o processo de usinagem eletroquímica, os dois eletrodos, ferramenta e peça, são submergidos em um eletrólito e conectados aos pólos positivo (ânodo-peça) e

negativo (cátodo-ferramenta) da fonte de potência. A diferença de potencial (ddp) existente entre a peça e a ferramenta faz com que uma corrente elétrica circule, sendo que o eletrólito fecha o circuito entre a peça (ânodo) e a ferramenta (cátodo). A passagem de corrente através do eletrólito é acompanhada de uma transferência de massa, os cátions se movimentam em direção ao cátodo, e os ânions em direção ao ânodo (MCGEOUGH, 1974) (BENEDICT, 1987). Na interface metal-eletrólito ocorre a oxidação do ânodo com conseqüente transferência ou remoção dos átomos do metal, na forma de íons, para o eletrólito e os óxidos formados podem ser removidos pelo fluxo. Para este sistema funcionar, a corrente elétrica deve ser da ordem de ampères, e a distância entre a peça e a ferramenta varia de centésimo a décimos de milímetros.

Enquanto não houver aproximação suficiente, não ocorrerá remoção de material porque não haverá passagem de corrente entre os eletrodos e o eletrólito. Na usinagem eletroquímica, as velocidades de remoção de material exigidas são geralmente grandes e isso pode ser obtido trabalhando-se com densidade elevada de eletrólito, sob baixas tensões e com reduzida distância (*gap*) entre os eletrodos.

Na superfície da peça, o metal é oxidado a íons metálicos, e o perfil da ferramenta determina a forma da peça após a usinagem eletroquímica (DE BARR; OLIVER, 1968).

A taxa de dissolução nas regiões anódicas bem próximas à ferramenta é mais alta, pois a queda ôhmica na solução é mais baixa e assim a forma da ferramenta é replicada.

A retirada de material se dá átomo a átomo, segundo as leis de Faraday para eletrólise, que se resumem nos itens:

- a quantidade de matéria removida ou depositada é diretamente proporcional à intensidade de corrente elétrica.
- as quantidades de diferentes substâncias retiradas ou depositadas por uma mesma intensidade de corrente são proporcionais ao seu peso químico equivalente ou à sua valência-gama.

Devido ao fato de estar passando corrente entre dois pólos onde existe uma diferença de potencial entre eles, muitas reações podem ocorrer no catodo e no anodo, dependendo dos materiais da peça e dos eletrodos. Como se sabe, da eletroquímica básica, os íons positivos encaminham-se para o pólo negativo (catodo) e os íons negativos para o pólo positivo (anodo). Esses íons dependem da solução eletrolítica utilizada.

No caso da salmoura comum ($\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$) os íons produzidos são H^+ , Na^+ , Cl^- e OH^- . No catodo, onde se tem o eletrodo ferramenta, o íon H^+ recebe elétrons gerando o gás H_2 . No anodo se encontra a peça metálica composta por um metal M qualquer, sendo que este metal, genericamente, cede n elétrons tornando-se um íon positivo. Este íon positivo irá reagir com o cátion mais eletronegativo presente, que neste caso é o OH^- , pois este é mais

eletronegativo que o íon Cl^- . Essas reações são representadas na forma das Eqs (2.9), (2.10), (2.11):



As reações eletroquímicas para o caso da dissolução do ferro ocorrem segundo as Eqs (2.12), (2.13), (2.14).



No catodo há a geração de gás hidrogênio e de hidróxidos:



Os íons metálicos combinam com os íons de hidroxila precipitando hidróxido de ferro:



Através dessa combinação metal-eletrólito, a eletrólise envolve a dissolução do ferro do anodo e geração de hidrogênio do catodo e nenhuma outra reação toma lugar nos eletrodos. (MCGEOUGH, 1974)

A Fig. 2.5 ilustra processo eletroquímico.

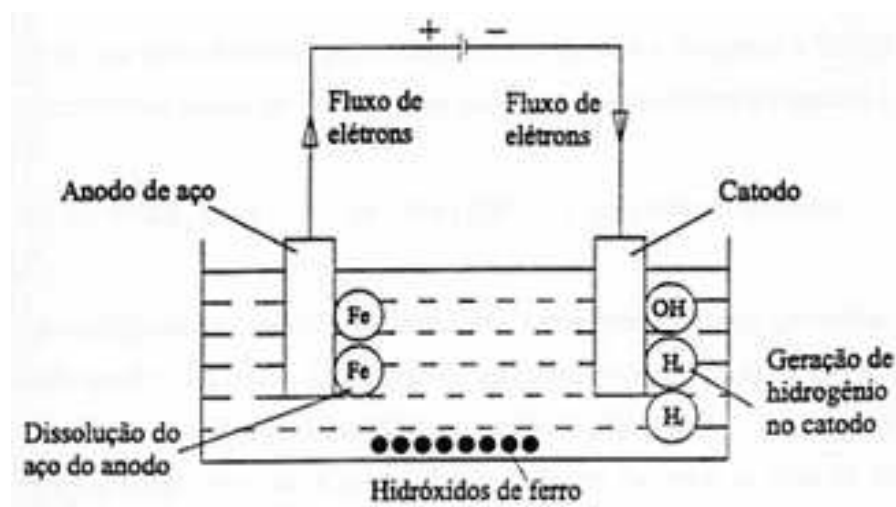


Figura 2.5 – Processo de dissociação eletroquímica do aço. (LANNA, 1999)

Para que ocorra a dissolução do metal, deve haver o fluxo ou remoção dos elétrons para que a reação não tenda ao equilíbrio.

Desde que o metal do anodo dissolva eletroquimicamente, sua taxa de usinagem depende somente do peso atômico e da valência dos íons produzidos, da corrente aplicada e do tempo de aplicação. Portanto, a taxa de dissolução não é influenciada pela dureza ou outras características do metal. No catodo, se somente o gás hidrogênio estiver envolvido, as feições permanecerão inalteradas.

Para se obter a taxa volumétrica de remoção ou dissolução do metal, tem-se a Eq. (2.15), onde ρ_a é a densidade do metal do anodo.

$$v = At * I / z * F * \rho_a \quad (2.15)$$

A corrente usada no processo é determinada por análise de características da célula, como condutividade do eletrólito e largura entre os eletrodos. Esses parâmetros são relacionados com a corrente através da lei de Ohm, que fala que a corrente I fluindo em um condutor é diretamente proporcional à voltagem aplicada, $V = IR$, e R é a resistência (MCGEOUGH, 1974).

Essa resistência é aplicada ao condutor, mas também pode ser aplicada ao eletrólito. No condutor, ela é dada pela Eq. (2.16):

$$R = h * p / At \quad (2.16)$$

A resistência é proporcional a comprimento (h) e inversamente proporcional à área da seção transversal (At), e p é a constante de proporcionalidade.

Em um processo típico de usinagem eletroquímica, alta densidade de corrente (200 - 800 A/cm²) em baixa voltagem (10 - 30 V) passa através de um pequeno espaçamento (0,025 – 0,75 mm) entre o eletrodo e o material de trabalho. O eletrólito é normalmente forçado a fluir através do espaço entre os eletrodos com alta velocidade, comumente maior que 5 m/s, de forma a remover os produtos de dissolução, calor e bolhas de gás gerados durante a usinagem (ALTENA, 2000).

Cada parte que forma o aparato para usinagem eletroquímica deve ser analisada, até mesmo para se conseguir uma melhor interação no processo.

O eletrólito deve ser convenientemente escolhido e não somente pela sua condutividade, até mesmo porque outros parâmetros podem influenciá-lo, como a temperatura e a concentração. Como a mobilidade iônica aumenta com a temperatura, a

condutividade elétrica do eletrólito deve ter uma dependência similar. É também esperada alguma variação na condutividade com a concentração (MCGEOUGH, 1974).

A Fig. 2.6 mostra a variação da condutividade específica com a concentração e a temperatura para a solução de NaCl como eletrólito. Pode ser observado que a condutividade aumenta com a temperatura e a concentração até o limite de solubilidade do sal.

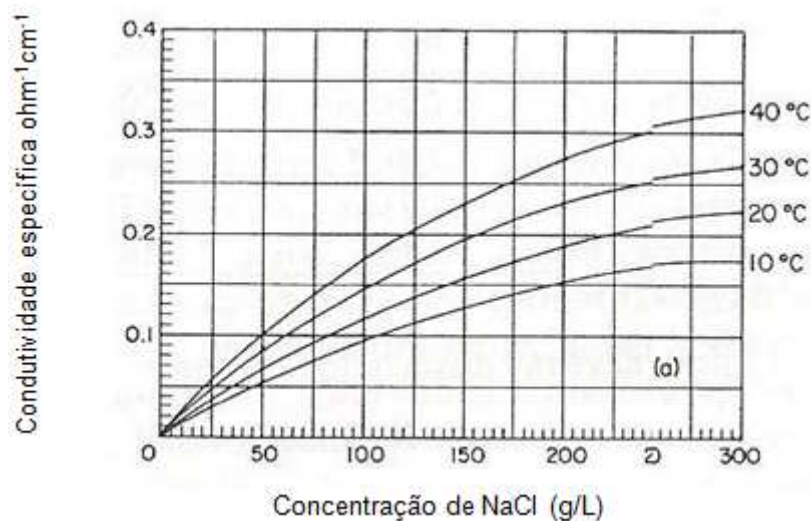


Figura 2.6 – Condutividade específica em função da concentração e da temperatura para o eletrólito de NaCl (MCGEOUGH, 1974)

A micro-usinagem eletroquímica vem sendo usada extensivamente na fabricação de peças em escalas milimétricas e micrométricas onde a usinagem mecânica não pode ser usada. Na microusinagem eletroquímica usa-se uma alta densidade de corrente. A fonte de potência fornece corrente elétrica (pulsada) de alta intensidade e baixa tensão, que é conectada nos eletrodos. O eletrólito tem a função de promover condução elétrica entre a peça e a ferramenta, o que provocará a dissolução do metal da peça.

O espaçamento entre os eletrodos é essencial para não haver contato mecânico, geração de calor e para haver escape do eletrólito e conseqüente remoção de produtos de dissolução indesejáveis.

A remoção do material acontece quando a fonte fornece corrente para os eletrodos na presença do eletrólito, alimentado pela bomba, fazendo com que a dissociação dos íons ocorra com grande intensidade, arrancando o material da peça. A taxa de remoção de material depende da capacidade da fonte de potência, do material da peça, das características do eletrólito, do distanciamento entre eletrodos, entre outros fatores.

Esses parâmetros de corrente, fluxo de eletrólito, espaçamento entre os eletrodos (gás), taxa de dissolução do material, aspecto da superfície usinada, devem ser analisados experimentalmente. Para isso, deve ser construído um aparato e este deve ser aperfeiçoado conforme os resultados obtidos, além disso, formas complexas podem ser testadas na usinagem para a texturização da peça.

Uma fonte de corrente através da célula deve vencer a diferença de potencial associada com a reação no eletrodo. Quando o potencial externo aplicado através da célula não for suficiente para vencer essa diferença de potencial, nenhum fluxo de corrente significativo irá atravessar a célula.

Uma curva corrente versus tensão típica para uma célula eletrolítica é mostrada na Fig. 2.7. D1 é conhecida por voltagem de decomposição e é o potencial de descarga dos íons mais facilmente descarregáveis. Quando se aumenta gradativamente uma força eletromotriz (f.e.m.) externa, os potenciais dos eletrodos variam até que os potenciais de descarga dos íons mais facilmente descarregáveis sejam atingidos. Aumentado-se a f.e.m. ainda mais, o potencial de descarga de outros íons pode ser atingido, de forma que reações adicionais nos eletrodos tornem-se possíveis, sendo que D2, D3, etc. correspondem a sucessivas voltagens de decomposição (POTTER, 1956).

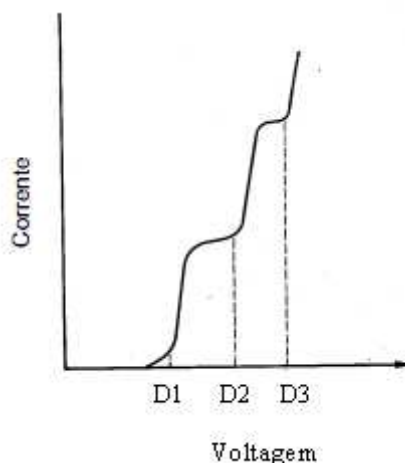


Figura 2.7 – Curva corrente vs. tensão típica para uma célula eletrolítica (POTTER, 1956).

No entanto, geralmente a voltagem medida na célula eletrolítica será maior que o potencial de descarga teórico, porque ocorre polarização no eletrodo. Esta tensão extra necessária é conhecida por sobrepotencial (DE BARR; OLIVER, 1968) (MCGEOUGH, 1974). O sobrepotencial está relacionado com os tipos de polarização e estes foram detalhados anteriormente no item 2.2.4.

Segundo Bhattacharyya et al. (2005), os parâmetros de projeto em sistemas de microusinagem eletroquímica estão mostrados na Tab. 2.2. Para o uso na texturização de

superfícies utilizando padrões na ferramenta, esses parâmetros costumam se diferenciar um pouco.

Costa e Hutchings (2008) mostraram resultados eficientes utilizando alguns dos valores expostos na Tab. 2.3.

Tabela 2.2 – Parâmetros para MUEQ. (BHATTACHARYYA et al., 2005)

<i>Características de usinagem</i>	Micro-Usinagem Eletroquímica	<i>Características de usinagem</i>	Micro-Usinagem Eletroquímica
Tensão	<10 V	Concentração do eletrólito	<20 g/l
Corrente	< 1 A	Tamanho da ferramenta	Micro
Densidade de Corrente	75-100 A/cm ²	Altura entre a ferramenta e a peça	5-50 µm
Fonte de tensão (DC)	Pulsada	Taxa de remoção de material	5 µm/min
Frequência	kHz - MHz	Sobrecorte lateral	<10 µm
Fluxo de eletrólito	<3 m/s	Acurácia	±0,02-0,1 mm
Tipo de eletrólito	Sal natural ou solução ácida / alcalina diluída	Acabamento superficial	Excelente, 0,05-0,4 µm
Temperatura do eletrólito	37-50 °C	Problemas com depósito de resíduos / toxicidade	Pequeno a moderado

Tabela 2.3 – Tabela de parâmetros para utilizados por Costa e Hutchings para microtexturização utilizando usinagem eletroquímica (Costa; Hutchings, 2008).

Características da MUEQ	Parâmetros utilizados
Tensão	Até 30 V
Corrente	Até 3 A
Concentração do eletrólito	250 g/L
Fluxo de eletrólito	Até 12 ml/s
Distância entre a ferramenta e a peça	500 µm

Como já foi citado anteriormente, o processo de microusinagem eletroquímica envolve o bombeamento de eletrólito através do distanciamento entre eletrodos por três razões principais: (i) para remover o eletrólito contaminado; (ii) para minimizar a polarização e (iii) para restringir o aumento de temperatura no eletrólito. Se o fluxo de eletrólito é insuficiente, existe um grande risco de ocorrerem fagulhas entre a ferramenta e a peça, porque não haverá nenhuma solução para transportar os elétrons dissociados da peça e então nenhuma usinagem ocorrerá. O *gap* de usinagem será cada vez menor, até que ferramenta e peça tornem-se próximas o suficiente para que haja fagulhamento entre elas (DE BARR; OLIVER 1968) (ALTENA, 2000).

Um avanço que vem sendo amplamente utilizado na MUEQ é o uso de corrente pulsada ao invés de corrente contínua. Este processo modificado é chamado de usinagem eletroquímica pulsada. Um gerador de pulsos é usado para fornecer a diferença de potencial entre o ânodo e o cátodo. Este sinal é composto de um rápido tempo de pulso (t_p), geralmente entre 0.1 e 5 ms, e de um tempo de potencial zero entre os pulsos (t_o). Durante t_p , ocorre a dissolução anódica da peça. Durante t_o , a célula eletrolítica descansa, e os produtos da dissolução anódica, tais como material removido e calor, são retirados do *gap*, para que a célula volte às suas condições iniciais. O uso de corrente pulsada permite o uso de maiores densidades de corrente sem a necessidade de aumentar-se o fluxo de eletrólito, melhorando o acabamento superficial (KOZAK et al., 1991) (ZHOU et al., 1998).

2.4 Texturização Eletroquímica

Um método alternativo de microusinagem, que demanda baixo custo, tempo e de grande reprodutibilidade, está sendo desenvolvido para texturizar superfícies utilizando padrões nas ferramentas os quais são transferidos à peça através dos princípios eletroquímicos.

Na microusinagem eletroquímica sem mascaramento do substrato, a utilização do padrão na ferramenta exclui a necessidade de um sistema de deslocamento e posicionamento micrométrico, já que este é feito somente previamente para a fabricação da ferramenta. Exclui-se também uma preparação do substrato no sentido de obter alguma seletividade na superfície exposta. Sendo assim, a ferramenta fica fixa e a peça é texturizada e trocada por outra peça a sofrer o mesmo processo.

Em publicações anteriores na área de microusinagem eletroquímica sem mascaramento, tem-se divulgado resultados de feições obtidas da ordem de décimos e até

centésimos de mm e os padrões e suas feições são transferidos com fidelidade da ferramenta para o substrato.

Cochran (2001) Macleod et al. (2003) publicaram algumas patentes referentes a texturização de superfícies sem mascaramento prévio. Entretanto, os autores afirmam que o isolamento elétrico não pode estar acima da superfície condutora da ferramenta (COCHRAN, 2001) (MACLEOD ET AL., 2003).

Nelson e Schwartz (2005) desenvolveram um processo chamado de impressão eletroquímica, em que há a necessidade de haver uma deposição prévia de uma máscara na peça a ser texturizada e que depois é removido (NELSON; SCHWARTZ, 2005).

Schonenberger e Roy (2005) focaram seus trabalhos na texturização de cobre e Roy depois destacou a necessidade de trabalhos futuros em outros materiais (Roy 2007). Estes demonstraram que, usando um espaçamento entre os eletrodos de 200 μm a 500 μm , feições na ferramenta com escala de 50 a 200 μm podem ser transferidas com sucesso (SCHONENBERGER; ROY, 2005).

Em 2008, Nouraei e Roy (2008) ainda trabalharam com substratos de cobre e eletrólitos a base de sulfato de cobre, mas fizeram simulações para o entendimento do processo eletroquímico e das variáveis necessárias a serem estudadas para a transferência de padrões, como voltagem e densidade de corrente. Exploraram ainda o processo de transição da eletrodissolução ativa para a passiva na formação dos padrões no substrato, e obtiveram que a profundidade máxima obtida nas cavidades ocorre durante a dissolução ativa. Essa profundidade é diminuída quando a dissolução se torna passiva, mas as formas das cavidades produzidas se tornam retangulares. Alguns dos resultados obtidos nas simulações deste trabalho são mostrados a seguir. O trabalho é baseado na transferência de padrões por ataque seletivo em diferentes áreas do substrato, como pode ser visto na Fig. 2.8, que mostra as linhas de corrente saindo do catodo para o anodo e seguindo preferencialmente o caminho mais curto e que oferece menor resistência, onde há a dissolução mais intensa e a obtenção das cavidades. A figura ainda mostra que haverá corrente e dissolução de metal do anodo nas áreas adjacentes, porém ocorrendo em menor intensidade, já que um caminho maior oferece maior resistência.

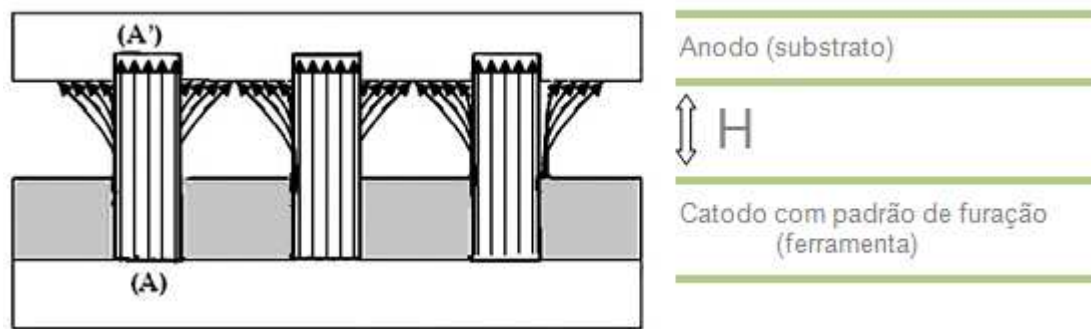


Figura 2.8 – Esquematização do processo de transferência de padrões. (NOURAEI; ROY, 2008)

Nas simulações, são feitas análises avaliando a dissolução ativa e a transição para dissolução ativa, avaliando quando (tempo, voltagem, densidade de corrente) ocorre a formação das camadas passivadoras.

São feitas também análises de distribuição de corrente e potencial que confirmam altas taxas de dissolução nas áreas anódicas expostas às áreas não isoladas do catodo e baixas taxas de dissolução nas áreas expostas opostas às partes isoladas do catodo. A Fig. 2.9 mostra simulação da mudança temporal na densidade de corrente nessas duas áreas do anodo, onde ocorre dissolução ativa a uma densidade de corrente $J = 100 \text{ mA}$ e nota-se uma curva senoidal.

A Fig.2.10 compara o perfil simulado I e o experimental II, seguindo a mesma trajetória senoidal na cavidade.

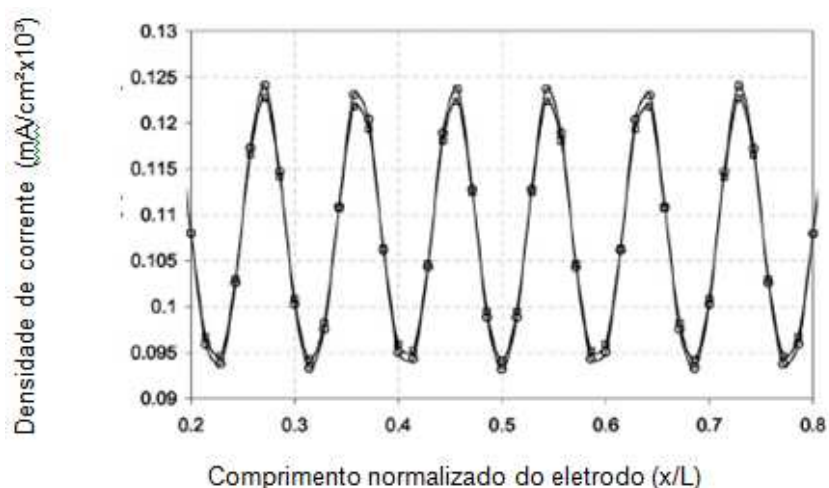


Figura 2.9 – Densidade de corrente através do anodo versus posição normalizada no catodo (NOURAEI; ROY, 2008).

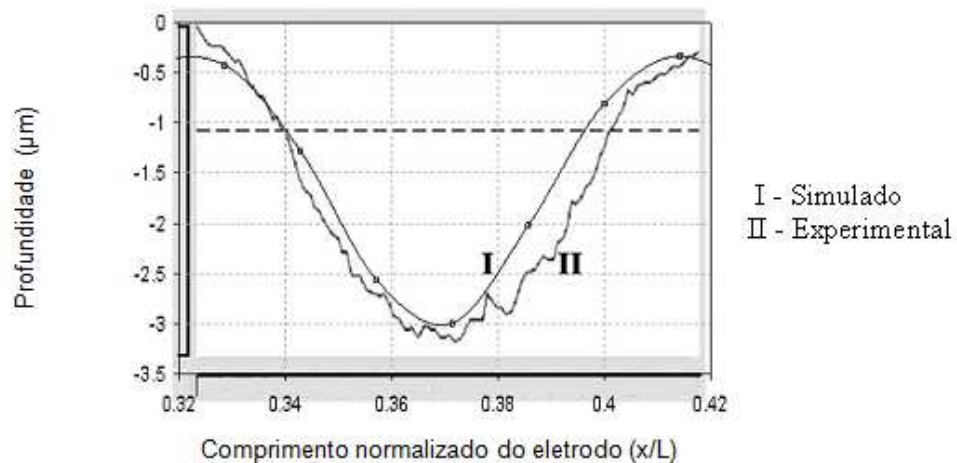


Figura 2.10 – Comparação do perfil simulado e experimental da evolução na forma da cavidade no regime de dissolução ativa do metal (NOURAEI; ROY, 2008).

Avaliando o regime de dissolução passiva, que ocorre com o aumento da densidade de corrente, os autores mostram que inicialmente a camada de óxido se forma no fundo da cavidade de forma senoidal, isso porque a densidade de corrente e o sobrepotencial da superfície é maior nesse ponto. Depois, a camada do filme oferece resistência que faz diminuir a densidade de corrente e o filme começa a se formar também nas laterais gerando feições mais retangulares. A Fig. 2.11 mostra uma simulação da evolução da forma da cavidade produzida utilizando densidade de corrente de 150 mA. A curva I mostra o perfil senoidal obtido após 90 s de dissolução ativa e a profundidade obtida é a melhor nesse ponto. A transição do formato senoidal para o retangular é mostrada na curva II, quando o filme óxido é formado e nota-se redução na profundidade da cavidade. Com o aumento do tempo, a camada passivadora começa a se espalhar e a partir da curva III a mudança da forma senoidal para retangular é mais bem evidenciada em regime de dissolução passiva. O autor ainda faz uma conclusão acerca de condições necessárias para se atingir uma boa profundidade das cavidades obtidas, que seria quando a razão entre o tamanho da feição do molde e o espaçamento entre os eletrodos fosse cerca de 1:3.

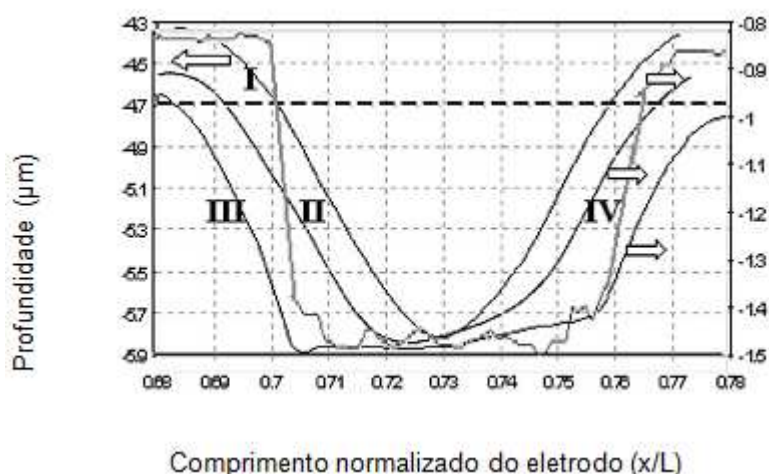


Figura 2.11 – Simulação dos perfis gerados (NOURAEI; ROY, 2008).

Costa e Hutchings (2008) desenvolveram um processo chamado de texturização eletroquímica sem mascaramento prévio, em que o isolante vem acima da camada condutora e um eletrólito flui através de pequenas perfurações nesta ferramenta, a qual define o padrão a ser transferido. Todo o aparato desenvolvido é relativamente simples, como pode ser visto no esquema da Fig. 2.12, e com a utilização de um *gap* entre os eletrodos se conseguiu um bom fluxo de eletrólito que resultou em limpeza efetiva da ferramenta e da peça, evitando a deposição de produtos de reação. Esse trabalho focou-se na microtexturização de aço através dos princípios da microusinagem eletroquímica. O processo desenvolvido foi caracterizado em termos dos efeitos da corrente pulsada, fluxo de eletrólito, eficiência de corrente, remoção de material e aspecto da superfície texturizada. A partir das análises realizadas os autores concluíram que uma combinação de pequenas separações entre os eletrodos e grande fluxo de eletrólito resulta em aumento da taxa de remoção de material, chegando-se a alcançar uma eficiência maior que 90%. Essa alta eficiência e o tempo de texturização curto viabilizariam método para aplicação industrial. Para estudos posteriores foi sugerida a investigação de ferramentas com formas mais complexas a serem transferidas.

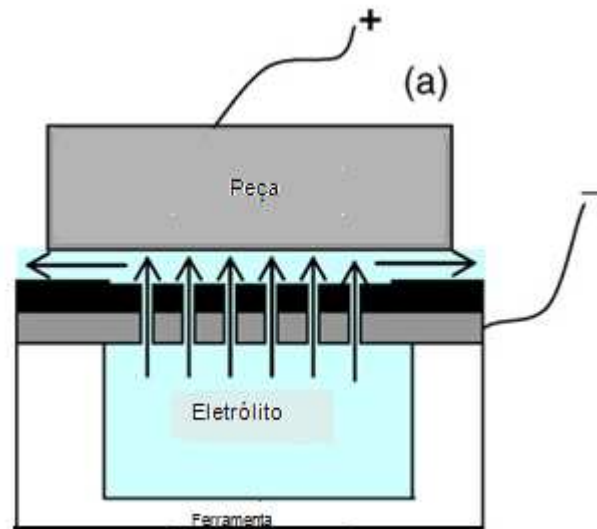


Figura 2.12 – Esquema do equipamento confeccionado. (COSTA; HUTCHINGS, 2009)

Zhu et al. (2009) propôs um método em que uma placa isolante com padrões a serem transferidos é revestida com filme metálico de cobre, e é pressionada contra a superfície metálica (cromo e aço) a ser texturizada, portanto não havendo um *gap* para fluxo de eletrolito. Seus principais resultados se referem a análises da forma e profundidade das cavidades em relação à espessura do isolante e à densidade de corrente aplicada. O autor ainda sugeriu a possibilidade de o método proposto ser usado para produzir texturas em ambos os lados do anodo, como esquematizado na Fig. 2.13.

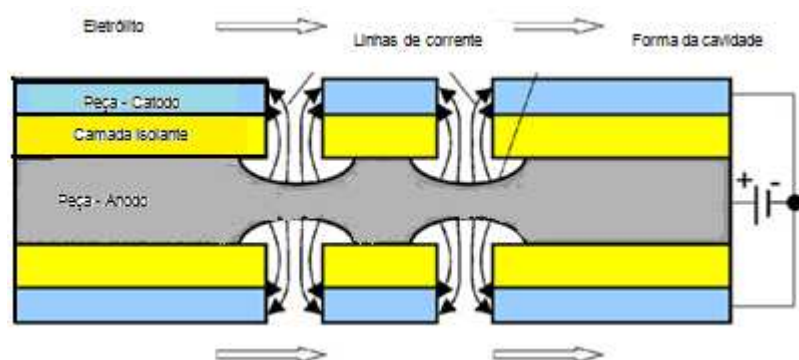


Figura 2.13 – Esquema do processo para texturização em ambos os lados do anodo. (ZHU et al, 2009)

Após a texturização, o autor realizou testes para comprovar a redução do coeficiente de atrito utilizando as superfícies texturizadas. O autor também avalia a influência das cavidades dos bolsos em relação à alteração no coeficiente de atrito, e mostra que profundidades intermediárias apresentam menor coeficiente de atrito.

Shuangqing et al. (2010) utilizaram a microusinagem eletroquímica para gerar micro cavidades em superfícies recobertas com cromo duro. Neste estudo, a camada isolante foi unida diretamente ao catodo, propiciando assim a usinagem localizada de uma série de microporos com diâmetros na ordem de centenas de micrometros e profundidade de alguns micrometros. Neste estudo o espaçamento entre os eletrodos é dado somente pela camada de isolamento. O esquema proposto é mostrado na Fig. 2.14. O autor utilizou o NaNO_3 como eletrólito e avaliou tempos de usinagem bastante curtos, menores até que 10 s. A Fig. 2.15 mostra o perfil de um bolso gerado. Os autores avaliaram neste estudo, entre outras coisas, o efeito da espessura na camada isolante sobre a distribuição da densidade de corrente.

Foi analisado também o efeito do tempo de texturização e da densidade de corrente sobre o diâmetro e profundidade dos bolsos, mostrando que estes parâmetros podem ser manipulados para que se produza a textura conforme dimensões requeridas.

Foram realizados experimentos tribológicos nas superfícies texturizadas, que mostraram clara redução no coeficiente de atrito.

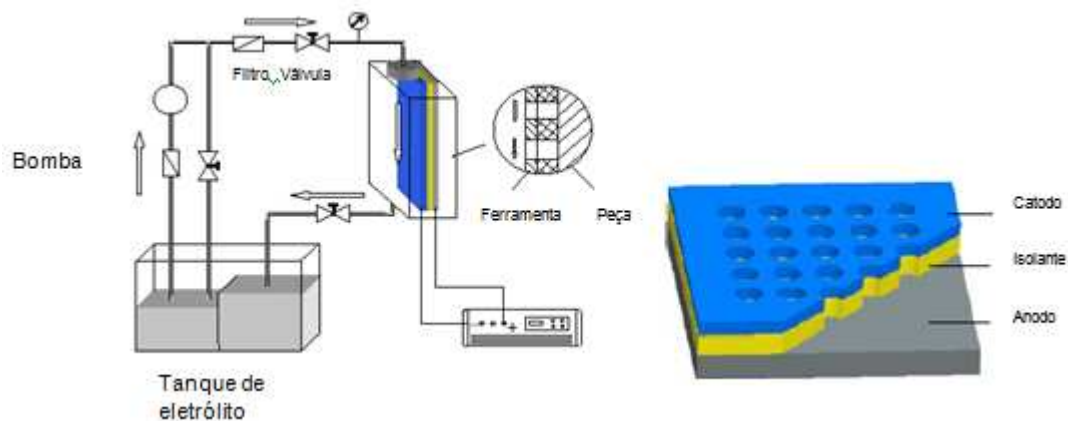


Figura 2.14 – Sistema proposto para microusinagem eletroquímica das cavidades no anodo. (SHUANGQING et al, 2010)

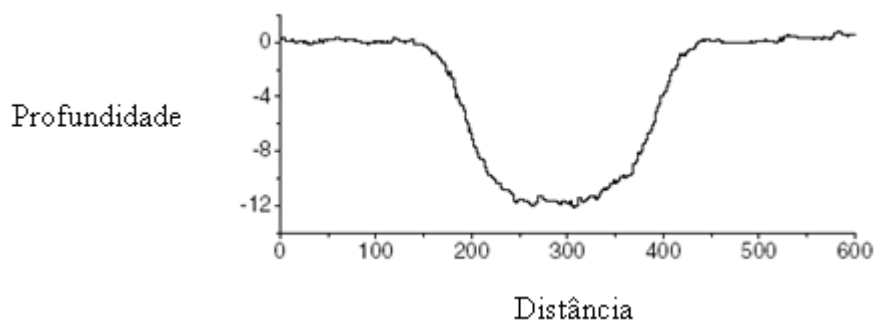


Figura 2.15 – A forma de seção transversal de uma única cavidade. (SHUANGQING et al., 2010)

2.5. Texturização Superficial com Finalidades Tribológicas

A texturização superficial poder ser utilizada para alterar diferentes propriedades superficiais, uma das suas aplicações mais promissoras é a melhora do comportamento tribológico.

Três principais efeitos parecem contribuir para melhorar o desempenho tribológico de superfícies texturizadas. O primeiro é o aprisionamento de partículas de desgaste dentro dos bolsos que compõem a textura, evitando a sua permanência entre as duas superfícies deslizantes, o que poderia causar desgaste abrasivo. O segundo é o aumento da capacidade de retenção de lubrificante dentro do contato, em contraste com superfícies muito lisas. O terceiro é um possível aumento da pressão hidrodinâmica do lubrificante devido às cunhas convergentes formadas pelos bolsos que compõem a textura (COSTA, 2005).

Um estudo experimental bastante abrangente foi conduzido para desenvolver um modelo qualitativo do desgaste em cilindros de motores de combustão interna. Uma de suas conclusões foi que os vales presentes na topografia das superfícies brunidas mecanicamente foram preenchidos com os resíduos de desgaste, se tornado menos profundos, o que é uma clara evidência do papel destes vales em aprisionar partículas de desgaste. (BECKER; LUDEMA, 1999)

A texturização superficial também aumentou a vida em ensaios do tipo 'fretting' em algumas condições, apesar de ter reduzido em outras (VOLCHOK; HALPERIN; ETSION, 2002). Os autores consideraram que o comportamento somente melhorou quando o efeito benéfico gerado pela remoção das partículas de desgaste foi superior ao efeito negativo associado com a geração de numerosos pontos de concentração de tensões na superfície. Resultados semelhantes foram obtidos por Pettersson e Jacobson (2003) em ensaios de deslizamento a seco de superfícies texturizadas e revestidas com DLC e TiN.

Os bolsos que compõem a microtextura também podem funcionar como reservatórios de lubrificante em situações com fornecimento insuficiente de lubrificante. Resultados experimentais têm provado que este efeito tem levado a melhoras significativas na performance de superfícies texturizadas, quando comparado com os efeitos de remoção de partículas de desgaste e de aumento da pressão hidrodinâmica.

Testes de rolamento-deslizamento foram utilizados para analisar o efeito de irregularidades superficiais no atrito e no desgaste de rolamentos de rolos (HORNG; LIN; LEE, 1994) sob regime de lubrificação EHL. Observou-se que quando a os padrões de

textura foram orientados paralelamente à direção de deslizamento, o coeficiente de atrito e o desgaste foram reduzidos. Tal efeito foi associado ao fato da textura funcionar como reservatórios de lubrificante. Porém, padrões de textura paralelos à direção de deslizamento aumentaram o atrito e o desgaste, porque o lubrificante foi removido do contato devido à sua canalização para fora do contato durante o deslizamento. Estes resultados foram confirmados por Costa e Hutchings (2006a) ao medirem o coeficiente de atrito em ensaios de estiramento lubrificado utilizando moldes texturizados com sulcos tanto perpendiculares quanto paralelos à direção de deslizamento

Testes pino-sobre-disco compararam superfícies convencionais de engenharia e superfícies contendo platôs e vales, obtidas por brunimento (JENG, 1996). Em condições de lubrificação envolvendo lubrificação mista ou limite, o coeficiente de atrito foi menor para as superfícies brunidas, o que foi associado ao lubrificante armazenado nos vales que compõem a topografia superficial.

Blatter et al. (1999) compararam coeficientes de atrito entre uma superfície de safira texturizada e uma esfera de aço com o atrito para uma superfície de safira lisa. Somente texturas contendo sulcos bastante finos ($3\text{ }\mu\text{m}$) apresentaram atrito menor que as superfícies lisas, que funcionaram como reservatórios de lubrificante. Em texturas contendo motivos mais largos, o atrito não foi reduzido, o que foi atribuído ao fato das arestas dos motivos provocarem desgaste abrasivo na superfície das esferas.

Ryk e Etsion (2006) texturizaram superfícies de anéis de pistão, obtendo uma redução de 25 % no coeficiente de atrito quando comparado com anéis não texturizados. Porém a mesma redução do atrito não foi conseguida nos testes preliminares para aplicação real em motores.

Basnyat et al. (2008) produziram padrões de texturas em superfícies revestidas para avaliar a performance tribológica e principalmente a atuação das microcavidades como reservatório de lubrificantes. Os testes para comparação do atrito e desgaste de superfícies de contato com e sem texturização foram realizados com lubrificação sólida de sulfeto de molibdênio. Os autores concluíram que há uma redução significativa nos coeficiente de atrito e desgaste a partir dos resultados dos experimentos realizados com superfícies texturizadas, justamente devido a atuação dos bolsos como reservatórios do lubrificante.

Wan e Dang-Sheng (2008) avaliaram o desempenho de superfícies em aço texturizadas. Experimentos tribológicos do tipo pino-disco foram realizados para várias cargas e velocidades, e estes mostraram que o efeito hidrodinâmico causado pelos micro poros aumenta a carga máxima suportada pela superfície. A Fig. 2.16 mostra os coeficientes de atrito de amostras microtexturizadas e polidas atuando em contato com o disco a diferentes aplicações velocidades e cargas.

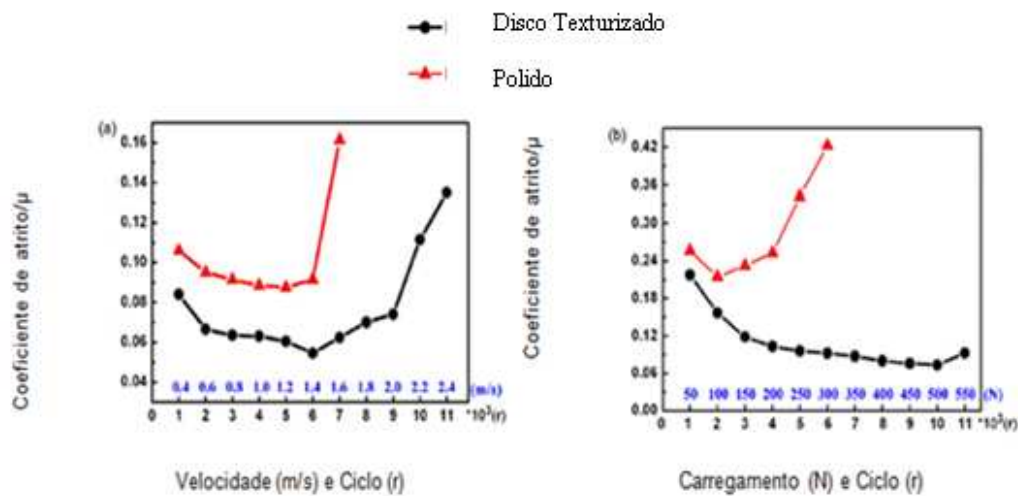


Figura 2.16 – Coeficiente de atrito de superfícies polidas e microtexturizadas com aplicação de diferentes velocidades (a) e cargas (b). (WAN; DANG-SHENG, 2008)

Etsion e Sher (2009) fizeram um estudo mais aplicado utilizando a microtexturização de superfícies. Os autores avaliaram o efeito da utilização de anéis de pistão parcialmente texturizados sobre o consumo de combustível e a composição dos gases de exaustão em motores de ignição por compressão. Uma comparação foi feita entre anéis de referencia não texturizados e anéis com texturização superficial a laser e foi encontrado que a utilização de anéis de pistão parcialmente texturizados apresentaram como resultado uma redução superior a 4% no consumo de combustível, porém nenhuma mudança na composição de gases de exaustão foi observada. A Fig. 2.17 mostra uma das series de resultados obtidos utilizando três tipos de amostras que envolvem ou não revestimento com cromo e aplicam ou não a texturização superficial.

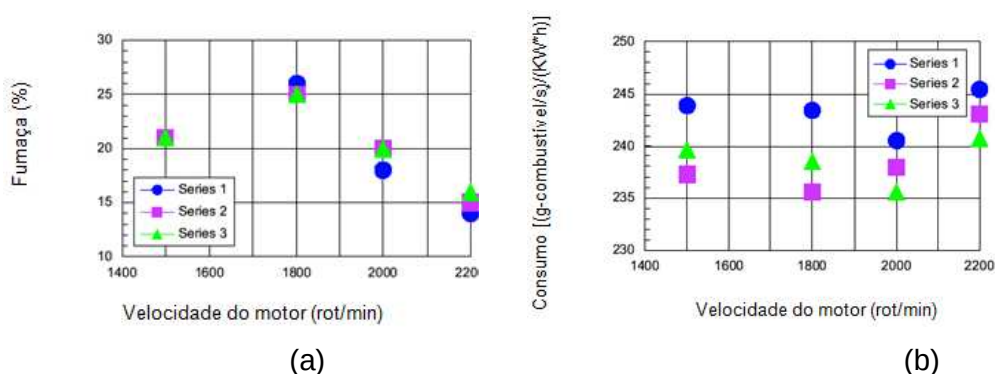


Figura 2.17 – Resultados relativos às séries 1: anel padrão revestido em cromo; 2: anel revestido em cromo e texturizado; 3: anel não revestido e texturizado. (a) Níveis de emissão

de fumaça versus a velocidade do motor e (b) Consumo de combustível versus a velocidade do motor. (ETSION; SHER 2009)

Rapoport et al. (2009) estudaram lubrificação sólida em superfícies texturizadas a laser a fim de avaliar os efeitos tribológicos. Para melhorar a adesão entre o aço e o lubrificante sólido (MoS_2), um filme superficial composto por nanopartículas foi brunido sobre a superfície antes do espalhamento do lubrificante sólido sobre ela. O objetivo do trabalho foi estudar nanopartículas capazes de melhorar a adesão do lubrificante sólido e reduzir o desgaste de superfícies texturizadas e lubrificadas com MoS_2 . A partir da avaliação do coeficiente de atrito foram selecionadas as nanopartículas que ofereceriam uma maior adesão, sendo que o PbSe e CdZnSe apresentaram os melhores resultados (maior coeficiente de atrito). Porém o CdZnSe foi o indicado por apresentar maior estabilidade ao desgaste devido à formação de uma película mais lisa. Além disso, foi avaliado a adesibilidade entre o CdZnSe e o MoS_2 , que se mostrou satisfatória. O ensaio tribológico consistiu num teste que avaliou a dependência da força de atrito em relação ao tempo para substratos de aço texturizados lubrificadas (MoS_2) com e sem a adição do filme adesivo, tendo os resultados apresentados na Fig. 2.18. A Fig. 2.19 mostra as superfícies brunidas com MoS_2 (a) e MoS_2 sobre a camada de CdZnSe . Esta imagem mostra um filme bem mais denso na superfície de MoS_2 sob CdZnSe , onde praticamente todos os sulcos da superfície original foram preenchidos pela lubrificante de maneira uniforme, o que não ocorreu no teste sem a subcamada de CdZnSe . O aumento do tempo de vida sob desgaste foi explicado pela alta adesão e densidade do filme de MoS_2 brunido em uma subcamada de CdZnSe .

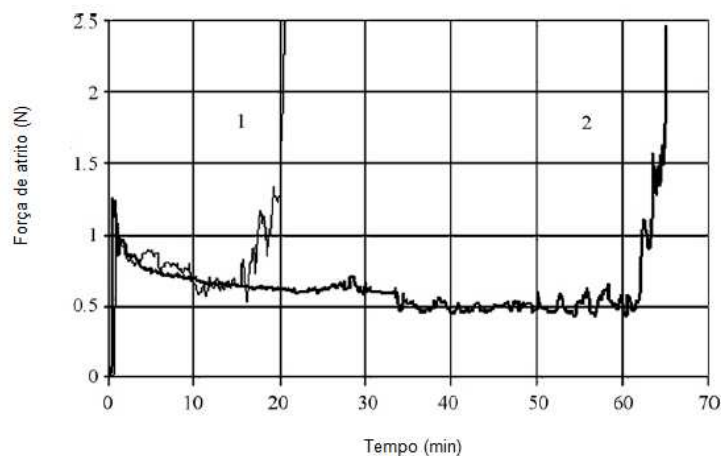


Figura 2.18 – (1) A dependência da força de atrito em relação ao tempo para superfície brunida MoS_2 em aço e (2) com o lubrificante sobre a camada de CdZnSe . (RAPOPORT et al., 2009)

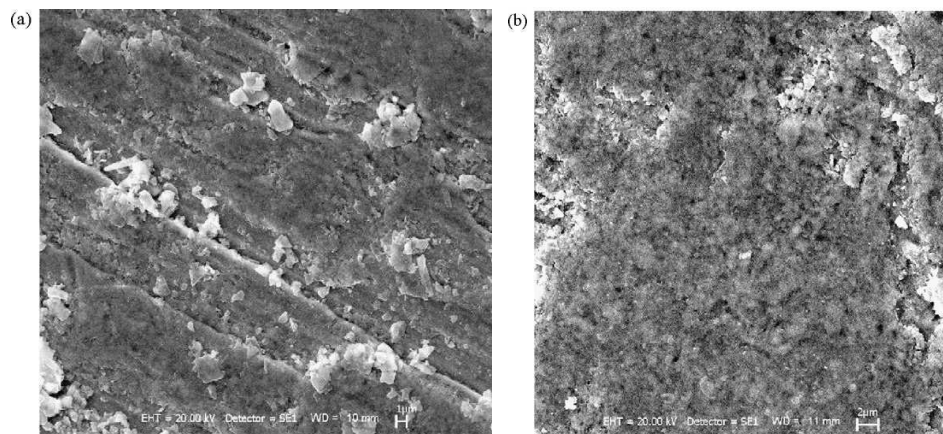


Figura 2.19 – Micrografia da superfície com filme de MoS_2 (a) e do filme de MoS_2 em camada de CdZnSe . (RAPOPORT et al., 2009)

Chouquet et al. (2010) estudaram o comportamento tribológico sobre deslizamento lubrificado para superfícies revestidas com DLC e texturizadas utilizando técnicas que misturam a litografia e o laser. Os autores citam que as microcavidades geradas artificialmente atuam como reservatórios de lubrificantes, armadilhas para alojar fragmentos de desgaste e ainda promovem aumento a nível local da capacidade de carga devido ao efeito hidrodinâmico. Mais precisamente o trabalho mostra que o coeficiente de atrito pode ser significativamente reduzido utilizando superfícies texturizadas principalmente quando em baixas velocidades de deslizamento. Foi apontado ainda que a microtexturização superficial pode não somente melhorar o desempenho de motores, o que vem sendo largamente estudado atualmente na área, mas também reduzir a quantidade de lubrificante utilizado.

CAPÍTULO III

DESENVOLVIMENTO DO APARATO EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão apresentados o desenvolvimento e os resultados relativos ao projeto e à confecção do aparato experimental utilizado nos ensaios de microtexturização de superfícies por via eletroquímica.

O equipamento deve ser capaz de promover a texturização eletroquímica de superfícies sem a necessidade de seu mascaramento prévio. A microtexturização ocorrerá através de uma usinagem seletiva da superfície das amostras, a ser determinada pelo padrão presente na ferramenta.

A Fig. 3.1 mostra um esquema geral de todo o aparato experimental desenvolvido neste trabalho. Uma fonte DC (1) de alta potência fornece a tensão e a corrente necessárias para a usinagem eletroquímica. O pólo negativo desta fonte é ligado à ferramenta (2) e o pólo positivo à peça a ser texturizada (3). Um circuito eletrônico (4) especialmente projetado para este fim proporciona a pulsagem da corrente que passa pela célula eletrolítica. O projeto deste circuito considerou os parâmetros requeridos para uma boa dissolução eletroquímica (Costa e Hutchings, 2005). Uma bomba (5) foi especificada e adaptada para bombear o eletrólito (6) através de microfuros na tampa da ferramenta (7), que circula pelo *gap* (8) entre a peça e ferramenta. O capítulo a seguir irá descrever em detalhes o desenvolvimento de cada componente envolvido no processo de texturização eletroquímica desenvolvido.

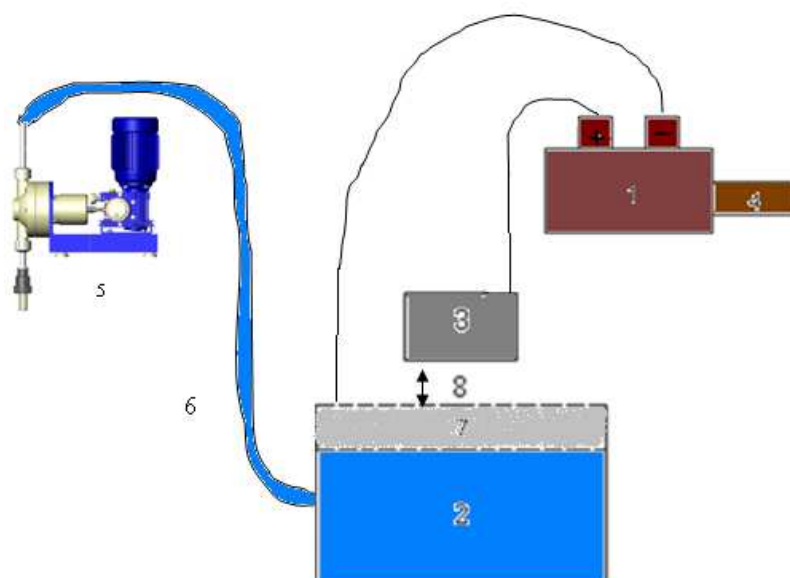


Figura 3.1 – Esquema do aparato desenvolvido.

A célula eletroquímica foi projetada de forma a propiciar aplicação e dissipação de corrente do catodo para o anodo com isolamento das outras partes, variação do espaçamento entre os eletrodos, utilização de corrente pulsada. Bom fluxo de eletrólito, facilidade na troca das peças a serem texturizadas, substituição da ferramenta quando um novo padrão de textura for desejado e uma vedação que suporte a pressão promovida pelo bombeamento do eletrólito através de orifícios micrométricos da ferramenta.

Foram levantadas algumas metodologias disponíveis para a confecção dos padrões de furação na ferramenta, que constituirão o padrão de textura a ser transferido para a peça. Após este levantamento, uma técnica foi selecionada e a metodologia para sua utilização foi definida. Na escolha dos padrões a serem aplicados na furação das ferramentas, procurou-se utilizar outros tipos de geometrias além das cavidades circulares tradicionalmente utilizados em microtexturização.

Para que a transferência de padrões ocorra sem a necessidade de utilização de uma máscara em cada substrato, a ferramenta deve possuir uma camada isolante texturizada. Foi desenvolvida uma metodologia para aplicação desta camada isolante sobre a superfície perfurada da ferramenta.

Com o objetivo de aprimorar a metodologia de texturização superficial por dissolução eletroquímica sem mascaramento, foi projetada uma célula eletroquímica que teve como referência principal o equipamento proposto por Costa e Hutchings 2008, que motivou esse trabalho.

Uma etapa muito importante no desenvolvimento do equipamento para a aplicação da técnica de texturização foi à confecção da tampa da ferramenta. As metodologias avaliadas e a opção utilizada serão descritas neste capítulo.

O circuito eletrônico construído para alimentar a célula eletroquímica será detalhado no item 3.3. Após a construção e os testes de verificação do aparato experimental, foram realizados os procedimentos experimentais para produção e avaliação de amostras microtexturizadas, que estão detalhados no capítulo IV.

3.1 Célula Eletroquímica

A célula eletroquímica engloba o conjunto da ferramenta, a cuba de acrílico com grampos de pressão e a bomba de alimentação de eletrólito. Um circuito eletrônico alimentará essa célula e fornecerá tensão e corrente adequada para promover a texturização por via eletroquímica.

As seções a seguir descrevem detalhadamente cada um destes pontos

3.1.1 Ferramenta

Todas as partes da ferramenta nas quais não deve ocorrer condução elétrica foram confeccionadas de material isolante (nylon e poliestireno), para que não houvesse dispersão da corrente a ser aplicada quando a célula estivesse em funcionamento. Essas peças em material isolante também minimizam o risco de choque elétrico ao operador.

A ferramenta foi projetada de forma a permitir a montagem e desmontagem de peças para que, em um único equipamento, pudessem ser utilizadas diferentes condições de trabalho, como a substituição da tampa da ferramenta, que pode ter padrões de furação e composição diferentes e a troca dos espaçadores entre a tampa da ferramenta e a peça, o que permite espaçamentos de espessuras variadas.

A base da ferramenta foi construída em nylon. A cavidade interna é necessária para a armazenagem de eletrólito, que é forçado através dos padrões de perfuração existentes na tampa da ferramenta. O furo passante em uma das laterais da base foi projetado de forma a se fazer a conexão com uma mangueira através da qual é bombeado o eletrólito.

O bloco do topo da ferramenta, também de nylon, fecha e veda o conjunto. Foram confeccionados parafusos de nylon para suportar a pressão interna do eletrólito, fornecida pelo bombeamento. Entre a base e a tampa foi usada uma junta de vedação para minimizar a possibilidade de vazamento de eletrólito pelas laterais quando a célula estiver em

funcionamento. Anéis de vedação também foram utilizados junto aos parafusos com a mesma finalidade.

A tampa da ferramenta contém microfuros que constituem o padrão de textura a ser transferido para a peça. Para que haja a passagem de corrente elétrica ela deve ser fabricada de material condutor. Neste trabalho foi escolhido o aço inox ferrítico 420, pela sua resistência à corrosão.

As regiões da tampa da ferramenta que não possuem as perfurações padronizadas devem ser revestidas com material isolante. Inicialmente, pretendia-se colar uma placa isolante sobre a tampa de inox e perfurar o compósito aço inox + placa isolante ao mesmo tempo para que ambas contivessem exatamente o mesmo padrão. Porém, esta alternativa mostrou-se muito complicada do ponto de vista técnico e foi abandonada. A técnica alternativa desenvolvida para este fim é descrita no item 3.2.

Chapas de apoio foram confeccionadas para fornecer o espaçamento (*gap*) entre a peça a ser texturizada e a ferramenta, que ficam dispostas acima da tampa e logo abaixo da peça. Estas são compostas de material isolante para não haver curto-circuito quando o contato elétrico for estabelecido nos eletrodos. A corrente elétrica é conduzida pelo eletrólito, que atravessa a ferramenta e atinge a peça passando pelo pequeno distanciamento entre elas promovido pelos espaçadores. Nas dimensões fornecidas pelo desenho tem-se a espessura da chapa de apoio de 500 μm , mas foram confeccionados posteriormente outros espaçadores com espessuras diferentes, conforme será mostrado nos procedimentos experimentais.

A peça a ser texturizada, que será posicionada sobre a chapa de apoio, é pressionada por grampos de pressão de comando vertical de forma evitar a movimentação do conjunto quando a bomba de eletrólito for acionada.

Um parafuso de inox foi feito para promover o contato elétrico no catodo (ferramenta) que é ligada à fonte de tensão. Este parafuso é rosqueado no furo do bloco de nylon e encosta-se a um ponto não isolado da ferramenta. Em sua cabeça está conectado o fio de tensão, que é o pólo negativo. Outro parafuso é rosqueado à peça a ser texturizada, onde é conectado o pólo positivo da fonte, transformando-a no anodo.

3.1.2 Cuba de Acrílico e Grampos de Pressão

Uma cuba de acrílico foi projetada para conter e promover o escoamento do efluente de eletrólito. A ferramenta é posicionada dentro dessa caixa de acrílico.

Grampos de pressão foram fixados em dois dos calços desta cuba de forma a estabilizar a ferramenta em seu interior e pressionar a peça a ser texturizada contra a tampa da ferramenta, evitando a movimentação das mesmas devido à pressão exercida pelo

eletrólito. A Fig. 3.2 mostra como estes grampos foram dispostos e o esquema da célula eletroquímica em funcionamento dentro da cuba de acrílico com bombeamento de eletrólito.

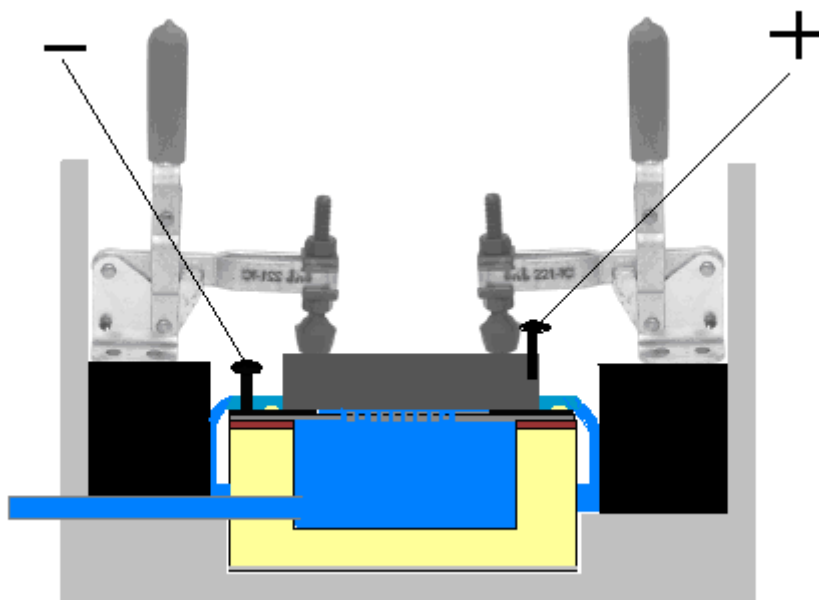


Figura 3.2 – Esquema da montagem da célula eletrolítica.

3.1.3 Bombeamento de eletrólito

A disponibilização e fluxo de eletrólito dentro da célula de micro texturização eletroquímica foi feita através de uma bomba dosadora de diafragma.

Essa bomba é projetada para utilização em estações de tratamento de água e instalações industriais para dosagem de produtos químicos em solução, em sistemas de pressões até 50 mca (500 KPa).

Trabalhos prévios (COSTA; HUTCHINGS, 2008) mostram que uma bomba peristáltica com pressão estática de até 150 KPa é suficiente para a finalidade proposta, mas sugerem que maiores pressões deveriam permitir o uso de espaçamentos menores, o que poderia aumentar a eficiência do processo.

A bomba adquirida é composta de motor elétrico monofásico, acoplado a um redutor de velocidade, que quando acionado faz girar um excêntrico. Ele pressiona o eixo do cabeçote e com este movimento é executado a sucção e o recalque da solução química para o interior.

No manual da bomba encontra-se a relação de eletrólitos que podem ser bombeados e as concentrações máximas adequadas, que são mostradas na Tab.3.1.

Tabela 3.1 – Alguns produtos e concentrações que podem ser dosados

PRODUTO	%	PRODUTO	%
Ácido Acético	40	Ácido fosfórico	20
Ácido Nítrico	10	Ácido muriático	15
Amônia e compostos	15	Bicromato de Sódio	20
Bisulfito de Sódio	15	Calgon	20
Carbonato de Sódio	15	Cloreto férrico	30
Fluoreto de Sódio	15	Hipoclorito de Cálcio	2
Hipoclorito de Sódio	12	Polifosfatos	20
Polieletrólitos	1	Solução de Salmoura	20
Soda Cáustica	15	Sulfato de Alumínio	10
Sulfato de Cobre	18	Sulfato Férrico	15

O sal selecionado para a realização deste trabalho foi de NaCl, que forma um eletrólito forte e é facilmente encontrado e estudado.

A solução utilizada foi feita adicionando 200 gramas por litro de NaCl a água destilada, formando uma solução iônica, que, portanto conduz corrente elétrica.

A concentração do eletrólito é um parâmetro a ser avaliado nos princípios de usinagem eletroquímica. Resultados mais precisos são geralmente apresentados quando utilizadas concentrações mais baixas de eletrólito, o que, portanto não é justificado nos trabalhos da área. O que citado é que uma concentração mais baixa do eletrólito leva a um aumento no consumo de energia, já que o sistema irá requer uma aplicação maior de tensão para se ter a dissolução eletroquímica (ALTENA, 2000).

3.2 Confecção dos Padrões de Furação na Tampa da Ferramenta

A tampa da ferramenta será ligada ao pólo negativo da fonte de tensão e atuará, portanto, como catodo. Seguindo os princípios de usinagem eletroquímica, a peça (anodo) adquirirá a forma da ferramenta (catodo). Sendo assim, a etapa de confecção dos padrões de furação na ferramenta é de suma importância, pois a textura gerada na peça seguirá este padrão.

Um dos objetivos deste trabalho é o de verificar a possibilidade de transferir padrões de diferentes formatos de textura através de técnicas eletroquímicas. As texturas propostas são pontos, traço-ponto e V, conforme esboço mostrado na Fig. 3.3.

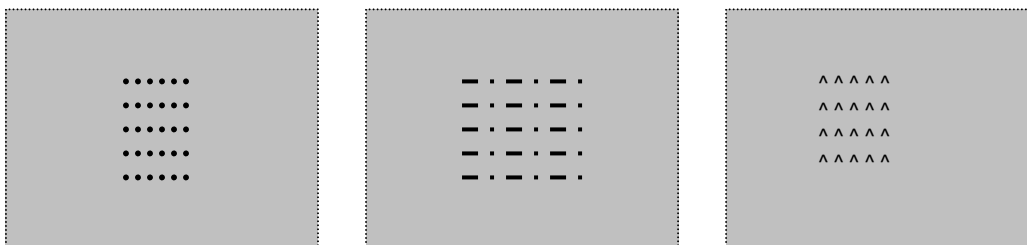


Figura 3.3 – Modelos de padrões de furação na ferramenta

O padrão carregado pela ferramenta deve ser de ordem micrométrica e extremamente preciso tanto nas dimensões de furação quanto no distanciamento padronizado entre as formas. Sendo assim, é necessário que a ferramenta utilizada na perfuração seja de diâmetro ou espessura bastante reduzida e que haja uma mesa para movimentação precisa da mesma.

Como a tampa da ferramenta deve ser isolada nas partes não perfuradas e precisamente no contorno dos padrões, a idéia é identificar uma técnica que seja capaz ou de perfurar no mesmo momento o metal (tampa da ferramenta) e o revestimento isolante ou que forneça um acabamento adequado na superfície dos furos para que uma camada isolante possa ser aplicada e perfurada em seguida. A justificativa para se requerer a usinagem simultânea do condutor e do isolante é que seria impraticável obter o mesmo posicionamento micrométrico dos furos, caso a usinagem seja realizada em separado.

Foram levantadas algumas técnicas para a confecção destes padrões, e esta etapa demandou esforços significativos para se chegar a um bom resultado. As técnicas consideradas foram perfuração por micro brocas, perfuração por laser e perfuração por eletroerosão.

3.2.1 Perfuração com Micro Brocas

A primeira técnica considerada foi a perfuração através de micro-brocas. Esse método foi inicialmente considerado devido ao fato de se prever a possibilidade de perfurar a tampa da ferramenta de aço inox colada à camada isolante de poliestireno furo a furo em única operação.

Dentre as ferramentas comercialmente disponíveis para furação, pode-se encontrar representação no Brasil de brocas de até 150 μm de diâmetro. A fabricação destas

ferramentas, no entanto, exige grande exatidão dimensional e geométrica (COELHO; ARAI, 2006). Ainda assim, o principal problema é conseguir trabalhar com essas ferramentas que acabam sendo mais frágeis e para uma usinagem exata o sistema deve oferecer movimentações precisas e mínima vibração.

Micro-brocas de 150 a 200 μm de diâmetro chegaram a ser adquiridas. Porém a sua utilização foi posteriormente descartada devido ao fato de não se ter disponível um sistema adequado de mínima vibração que viabilizasse a obtenção de padrões regulares. Além disso, as brocas se mostram bastante frágeis e qualquer alteração na pressão de manipulação da broca leva à fratura da mesma. Outro fato importante que levou a não utilização efetiva desta técnica é a necessidade de se obter furações de diferentes formatos, o que não pode ser obtido somente com o uso destas brocas.

3.2.2 Perfuração a Laser

A técnica de perfuração a laser foi uma alternativa avaliada para a furação da tampa da ferramenta, já que é uma tecnologia não convencional de usinagem muito utilizada quando se requer precisão em corte e furação de materiais de pequena espessura.

No método a laser a energia altamente concentrada funde e evapora pequenas regiões do material de modo controlado. Os materiais usinados podem ser condutores ou não.

Apesar de este trabalho ter sugerido anteriormente que a ablação por laser não seja uma técnica viável para texturização de superfícies em larga escala devido à relativa lentidão do processo e de produzir superfícies normalmente rugosas com zonas termicamente afetadas, esta seria uma boa técnica para se produzir o padrão de perfuração na tampa da ferramenta devido à sua alta precisão e possibilidade de se obter furos extremamente pequenos (da ordem de 5 μm , por exemplo).

Porém, a técnica acabou não sendo utilizada também para a produção do padrão na tampa da ferramenta principalmente por não ser eficiente na usinagem simultânea de materiais diferentes (a tampa e a camada de isolamento). A energia necessária para fundir e furar o metal é muito maior que a adequada para perfurar um plástico, por exemplo, assim o material mais sensível acaba se deformando por excesso de calor.

3.2.3 Perfuração por Eletroerosão

Uma alternativa levantada para a confecção dos padrões na tampa da ferramenta é a eletroerosão. Apesar dessa técnica somente ser aplicável para materiais condutores e, portanto também não poder usinar o metal e o isolante ao mesmo tempo, ela foi a escolhida por fornecer um acabamento superficial adequado para posterior aplicação de um material

isolante e pela possibilidade de furação de formatos variados utilizando ferramentas baratas, confeccionadas de forma alternativa explorando os recursos disponíveis e a criatividade. A partir dessa decisão, será adotada outra maneira para se aplicar posteriormente e perfurar a camada de isolamento sobre a tampa perfurada da ferramenta.

O processo de fabricação por descargas elétricas (*Electrical Discharge Machining – EDM*), popularmente conhecidas como eletroerosão, destaca-se entre os processos não-convencionais, devido à sua aplicação na confecção de peças em material com elevada dureza sem contato direto entre ferramenta e peça, que ficam submersas em um fluido dielétrico, durante a execução do corte, bem como a confecção de peças de formas complexas e dimensões reduzidas. (MCGEOUGH, 1988).

Na eletroerosão o material é removido pelo calor produzido pelo fluxo de eletricidade entre eletrodos, ferramenta e peça. O material nos pontos mais próximos da superfície dos eletrodos, onde a faísca inicia e termina, aquece a ponto de vaporizar-se. Com isso, uma quantidade de material é arrancada das superfícies e arrastada para fora da fenda de trabalho pelo líquido dielétrico, o qual é responsável por refrigerar o sistema e também isolá-lo durante certo tempo para depois agir como condutor ao atingir certa tensão que propiciará a usinagem. A fenda de trabalho promove o distanciamento mínimo entre os eletrodos e é a região de menor resistência elétrica, onde ocorrem as descargas elétricas, formando as centelhas que promovem a remoção de material através da erosão produzida pelo choque de íons e elétrons que circulam no fluido dielétrico. Peça e ferramenta sofrem o efeito da erosão, porém, menos metal é retirado do eletrodo positivo, o anodo, que geralmente é a ferramenta. (MCGEOUGH, 1988)

O processo de usinagem por eletroerosão não sofre influência da dureza do material da peça, que precisa ser apenas condutor de eletricidade. Para usinar peças de forma variadas, a ferramenta tem o formato do negativo da cavidade que deseja-se obter na peça. A automação das máquinas de eletroerosão é uma grande vantagem, pois promove um controle rigoroso da ação da ferramenta de usinagem sobre a peça usinada através de um mecanismo que reage rapidamente a pequenas variações de intensidade de corrente. (FULLER, 1989).

Dois períodos de tempos são de fundamental importância para o perfeito funcionamento do processo, o tempo de descarga, chamado de T_{on} e o tempo de intervalo T_{off} . A duração desses períodos é da ordem de μs . No tempo T_{on} , a voltagem entre peça e ferramenta forma o canal em que os elétrons e íons circulam livremente, entre os eletrodos. No instante em que a voltagem é desligada, automaticamente, pelo sistema de funcionamento da máquina, o canal de plasma desfaz-se e neste instante a corrente passa através do fluido entre peça e ferramenta e os elétrons e íons se chocam contra as

superfícies da peça e da ferramenta. Logo em seguida, começa o tempo T_{off} , durante o qual as partículas dos materiais que foram arrancadas pela descarga são arrastadas pelo fluido dielétrico (MCGEOUGH, 1988).

A máquina de eletroerosão do Laboratório de Tribologia e Materiais é um equipamento para usinagem convencional e, portanto não adequado para microusinagem. Porém, após vários testes, foi possível adequá-lo e encontrar parâmetros e ferramentas que possibilitaram a micro usinagem ou micro furação, conforme a metodologia descrita no Capítulo 4.

3.2.4. Camada isolante

Como já foi descrito, é essencial que acima da tampa da ferramenta que carrega o padrão a ser transferido haja uma camada isolante que promova a seleção na transferência dos padrões durante a texturização eletroquímica.

A princípio a camada isolante seria formada pela placa isolante de poliestireno conforme projeto mostrado na figura 3.2. Porém, devido à dificuldade de se perfurar a tampa da ferramenta e a camada isolante ao mesmo tempo ou com a mesma fidelidade de padrões, foram pesquisadas alternativas para se promover o isolamento nas áreas não perfuradas em uma das faces da tampa da ferramenta.

Foram testados colas a base de silicone, esmaltes sintéticos e tintas, e a opção adotada foi a utilização de uma tinta em aerossol formulada com resinas acrílicas de secagem rápida e apropriada para aplicação em superfícies metálicas.

A tinta foi aplicada em duas camadas para se obter um melhor acabamento final. A espessura final da camada de tinta foi medida por interferometria ótica como sendo de 10 μm . Com a aplicação dessa tinta, as áreas perfuradas por eletroerosão ficam parcialmente obstruídas e a desobstrução ou a perfuração da camada de isolamento foi realizada manualmente com o próprio eletrodo utilizado na confecção de cada padrão na tampa da ferramenta. Após a furação por eletroerosão, o eletrodo é passado através dos furos pelo lado não isolado da tampa da ferramenta, removendo a camada de tinta que os obstruíam. Adicionalmente, quaisquer resquícios de tinta que possam remanescer no interior dos furos ou em seus contornos também serão expulsos quando o fluxo de eletrólito é acionado. Uma pequena área na extremidade da face isolada da tampa da ferramenta foi protegida, de forma a haver um ponto condutivo para o contato com o parafuso externo que liga a corrente catódica do circuito.

3.3 Circuito eletrônico para obtenção de corrente pulsada

A aplicação de corrente pulsada em processos de microusinagem ou microtexturização por dissolução eletroquímica tem sido utilizada em lugar da corrente contínua (DATTA, 1981). Neste trabalho, portanto, foi construído um circuito composto por uma fonte de tensão, um gerador de função, um osciloscópio, um pulsador de corrente na forma de circuito impresso e outros dispositivos eletrônicos, para gerar uma fonte de corrente alternada de forma quadrada, a qual foi motivada por estudos prévios e tida como a mais adequada para o processo (COSTA; HUTCHINGS, 2008). A corrente pulsada e quadrada é interessante neste estudo porque no intervalo entre os pulsos o eletrólito continuará fluindo sem que haja usinagem. Sendo assim, nesse período haverá uma renovação do eletrólito acompanhada pela limpeza da superfície e o transporte de calor e produtos de corrosão para fora do circuito.

O circuito impresso confeccionado é composto por circuitos eletrônicos discretos. Este modo de construção faz com que o circuito possa ser facilmente modificado, além de apresentar grande robustez, uma vez que o mesmo apresenta uma quantidade mínima de componentes para sua adequada operação. O circuito é alimentado por uma fonte de corrente contínua de alta capacidade de fornecimento de corrente elétricas e possui o controle da chave semicondutora que libera ou não a passagem de corrente pelo circuito utilizando um gerador de sinais, que por sua vez irá controlar a operação liga/desliga da fonte de tensão. O principal componente deste circuito é um transistor tipo MOSFET (acrônimo de Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, ou transistor de efeito de campo de semicondutor de óxido metálico). Foi utilizado o MOSFET NTP 75N06 da Texas Instruments devido à sua capacidade de operação de corrente elétrica e ao seu nível de tensão de isolamento.

Para a proteção do dispositivo de controle (gerador de função), utilizou-se o acoplador óptico PVI1050, procedimento adotado para que o circuito de controle tenha isolamento elétrica do circuito de potência, de modo que um eventual curto circuito em um dos lados passa a não ser percebido pelo outro, neutralizando assim danos devido a operação inadequada. Para corrigir distorções do sinal provocadas pelo acoplador óptico e pelo transistor elevador de potência, utiliza-se um circuito integrado CD4049UBM de portas lógicas inversoras (utilizam-se duas portas em série para garantir as características do sinal de entrada do circuito impresso). A Figura 3.4 ilustra o esquema do aparato projetado e em seguida são descritos os seus principais componentes.

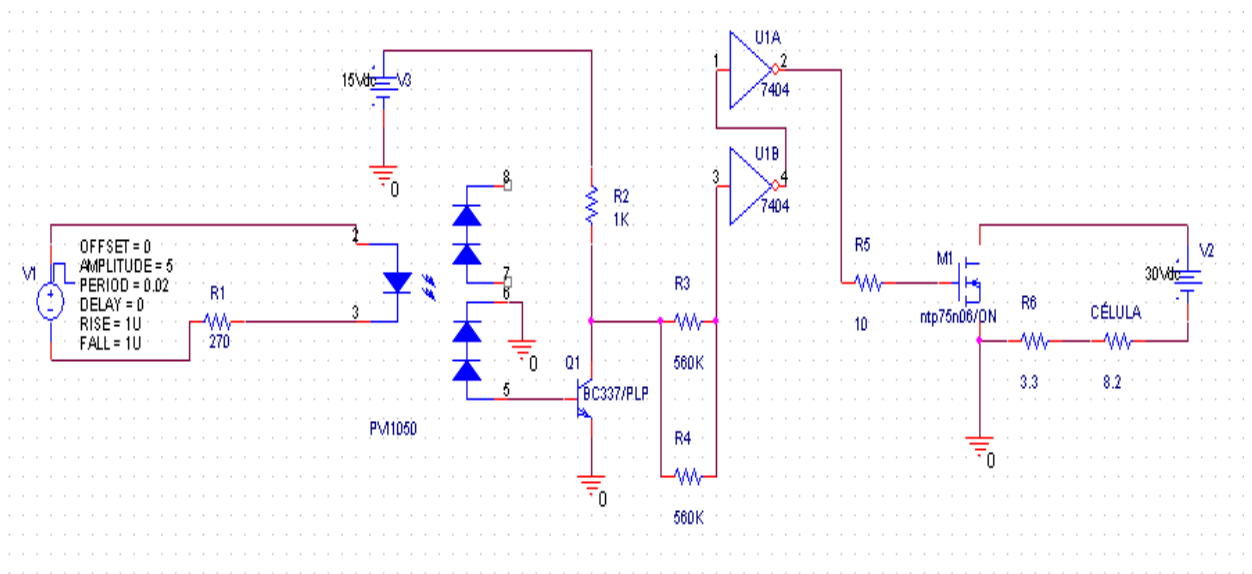


Figura 3.4 – Circuito para obtenção de sinais de corrente pulsada.

Descrição dos componentes:

- PVI 1050 – Acoplador Óptico; tem a função de proteger o sistema de controle (gerador de função) de qualquer falha, como sobretensão, sobrecorrente ou curto-circuito, no restante do circuito.
- Q_1 (BC337) – Transistor Bipolar de Junção (PNP); tem a função de elevar a tensão do sinal, fornecendo potência necessária para a ativação do circuito integrado de portas lógicas.
- M_1 (NTP 75N06) – MosFet; dispositivo semicondutor que opera como chave e tem como função controlar a atuação da fonte de tensão do sistema (V_2) de acordo com os ajustes do controle, como frequência e razão cíclica.
- U_1A / U_1B – Portas Lógicas Inversoras; têm a função de corrigir a distorção do sinal, provocado pelo optoacoplador (PVI 1050) e pelo BJT (Q_1).
- V_1 – Fonte de Tensão Pulsante (Gerador de função); entrada do circuito de gatilho; define as características do controle (frequência e razão cíclica).
- V_2 – Fonte de Tensão do sistema a ser controlado; energiza a célula de usinagem eletroquímica de acordo com o sinal do gate do Mosfet. Essa fonte fornece uma tensão máxima de 50 V.
- V_3 – Fonte de Tensão (15V) de potência para o circuito de gatilho; fornece potência para o funcionamento do circuito integrado de portas lógicas inversoras.

- R_1 – Resistência limitadora de corrente do sinal de entrada, no valor de $270\ \Omega$;
- R_2 – Resistência limitadora de corrente do sinal de potência do circuito de gatilho, no valor de $1\ \text{K}\Omega$;
- R_3 / R_4 – Associação em paralelo para controlar a corrente de entrada nas portas lógicas inversoras, no valor de $560\ \text{K}\Omega$ cada;
- R_5 – Resistência limitadora de corrente para a entrada do gate do Mosfet, no valor de $10\ \Omega$;
- R_6 – Resistência do sistema, no valor de $8.2\ \Omega$;
- Célula – Célula de texturização eletroquímica; o valor da sua resistência é arbitrário, função da quantidade de eletrólito e da vazão.

O circuito do esquema foi montado e calibrado para uma razão cíclica de 15%. A forma de onda gerada é mostrada com o auxílio de um osciloscópio, conforme exemplificado na Fig. 3.5.

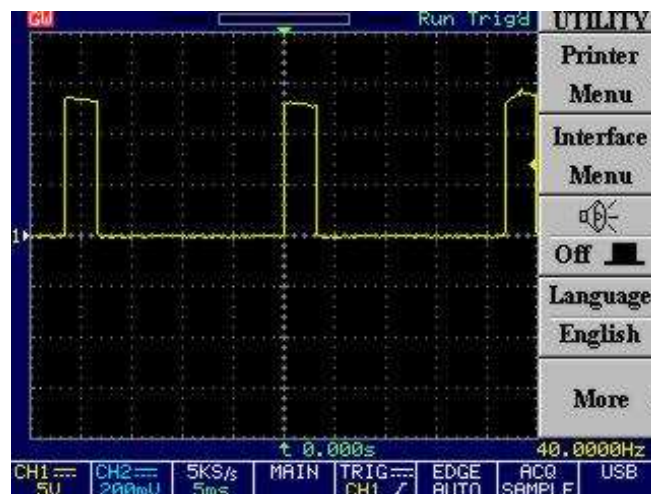


Figura 3.5 – Forma de onda gerada pelo aparato projetado.

O osciloscópio é ligado na saída do circuito para verificar a saída do sinal obtido durante a texturização eletroquímica. Assim, é possível visualizar o ciclo e os valores de tensão e corrente que passam através da célula eletroquímica. O sinal do osciloscópio foi adquirido em um computador através da interface USB e a utilização do software do fabricante.

A resistência R_6 de $8,2\ \text{ohms}$ é conectada em série com a célula eletroquímica sendo utilizada para monitorar a corrente que passa através da mesma.

CAPÍTULO IV

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

4.1. Ensaio de eletroerosão para furação da ferramenta

Uma máquina convencional de eletroerosão foi adaptada e configurada para os ensaios de furação em escala micrométrica. A Tab. 4.1 apresenta os parâmetros de usinagem que foram ajustados na máquina para o processo de eletroerosão dos furos na tampa da ferramenta.

Tabela 4.1 – Parâmetros de máquina ajustados na máquina de EDM. (ENGEMAQ)

Parâmetro	Unidade	Regime de Trabalho
		Acabamento
Polaridade da Ferramenta (tungstênio/aço)		+
Tensão	V	100
Corrente	A	1,5
T_{on}	μs	20
TS		0,5
DT	%	50
Tempo de erosão	s	3
Afastamento periódico da ferramenta	mm	0,5
Intervalo entre erosão e afastamento	s	0

O regime de trabalho escolhido na máquina de eletroerosão para realização dos furos foi de acabamento, regime este que provoca pouco desgaste do eletrodo ferramenta.

A polaridade indica a posição dos eletrodos, se anodo ou catodo, em relação às descargas elétricas, propiciando uma maior retirada de material de uma das superfícies, geralmente, do eletrodo peça, já que o eletrodo ferramenta deve sofrer o menor desgaste possível. A polaridade pode ser invertida na máquina.

A tensão para ionização foi mantida constante, de acordo com os parâmetros estabelecidos pelo manual do fabricante da máquina.

A corrente de descarga consumida no processo, tem influência direta na qualidade e no rendimento da operação, com isto, uma qualidade melhor implica em corrente baixa e pouca quantidade de material removido com um tempo maior de usinagem, no caso da máquina utilizada no experimento, esse valor da corrente depende do parâmetro TS, regulado na máquina, ela vale 3 vezes TS. Logo, para o regime de acabamento, trabalhando com $TS = 0,5$ gerou uma corrente de 1,5 A.

O tempo total de duração do pulso (T_{on}) no regime de acabamento foi de 20 micro segundos.

DT está relacionado com o tempo de pausa. No caso da máquina usada no experimento o mesmo é dado em porcentagem relacionada com o tempo T_{on} . A Eq. (4.1) determina seu valor.

$$DT = \frac{T_{on}}{(T_{on} + T_{off})} \cdot 100 \quad (4.1)$$

onde:

T_{on} = tempo de pulso [μs]

T_{off} = tempo de pausa [μs].

No caso inicial da confecção dos 100 furos circulares, foi adotado um distanciamento entre centros de furo de 0,75 mm, efetuado através do dispositivo CNC da máquina de eletroerosão que movimenta o eletrodo. Este distanciamento foi especificado após testes preliminares de forma a obter um espaçamento efetivo entre as bordas dos furos de 0,50 mm.

O diâmetro dos furos produzidos são maiores que o diâmetro do eletrodo utilizado devido à usinagem que ocorre nas laterais dos furos pela lateral do eletrodo (*overcutting*). Em média esse aumento foi de 90%, produzindo furos de cerca de 0,210 mm. Por consequência do aumento do diâmetro dos furos, há uma diminuição no distanciamento entre as bordas, que fornece o espaçamento efetivo.

Testes preliminares foram realizados utilizando como eletrodo um fio de cobre de 0,15 mm e a chapa de inox ferrítico AISI 430 (tampa da ferramenta) de 0,50 mm de espessura, conforme Fig. 4.1 Neste primeiro ensaio os furos gerados foram bem irregulares em relação à dimensão e ao acabamento. Isso ocorreu devido ao desgaste e à falta de rigidez do eletrodo e também pela usinagem nas laterais do furo, o que ocorre naturalmente no mecanismo de eletroerosão.

Após os primeiros ensaios, foram realizadas algumas modificações para melhorar a precisão na erosão. A primeira melhoria foi a utilização de uma caixa (Fig. 4.2) para diminuir a turbulência do fluido dielétrico sobre o eletrodo, de forma a minimizar sua movimentação e conseqüentemente sua deformação, o que pode causar variações no posicionamento dos furos.



Figura 4.1 – Testes preliminares para confecção dos padrões na máquina de eletroerosão.



Figura 4.2 – Detalhe da caixa adaptada à máquina de eletroerosão.

A segunda modificação foi a construção de um dispositivo (utilizado em lugar do mandril), mostrado na Fig. 4.3, para fixação adequada do eletrodo, o que ao mesmo tempo minimiza sua movimentação. Foi também encontrado outro eletrodo com diâmetro menor e, um fio de tungstênio de 0,110 mm.

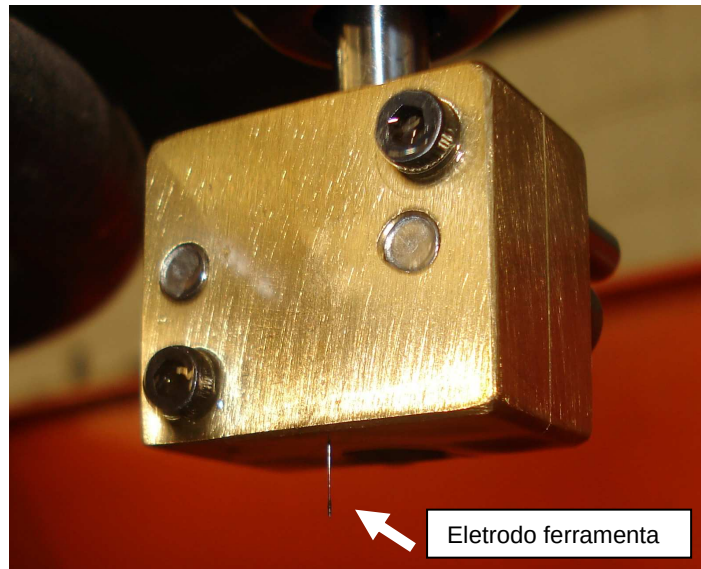


Figura 4.3 – Dispositivo de fixação do eletrodo ferramenta na máquina de EDM.

Na tentativa de se reduzir o tamanho dos furos produzidos, adotou-se mais uma melhoria, que foi a diminuição da espessura da tampa da ferramenta na área em que seria efetuado o padrão de microfuração por eletroerosão. Isso reduziu a espessura nessa área de 0,500 mm para 0,300 mm, o que acarreta uma redução no tempo de usinagem dos furos e conseqüentemente uma diminuição na usinagem lateral. Os furos produzidos tiveram seu diâmetro médio reduzido de 0,210 mm para 0,190 mm. A ferramenta de eletroerosão utilizada neste procedimento é mostrada na Fig. 4.4.

Para o padrão de furação contendo furos circulares, a tampa da ferramenta a ser usada na texturização eletroquímica produzida por eletroerosão contendo 100 furos e o aspecto individual de um furo são mostrados na Fig. 4.5.

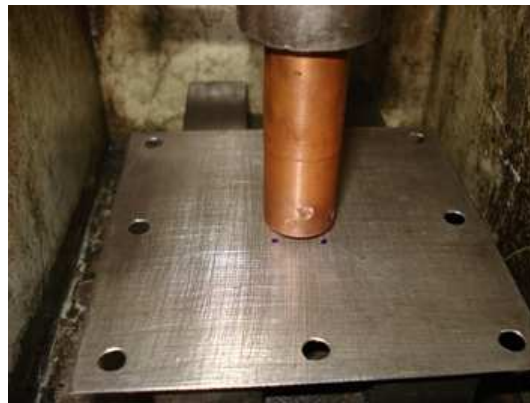


Figura 4.4 – Usinagem para redução da espessura central da tampa da ferramenta.

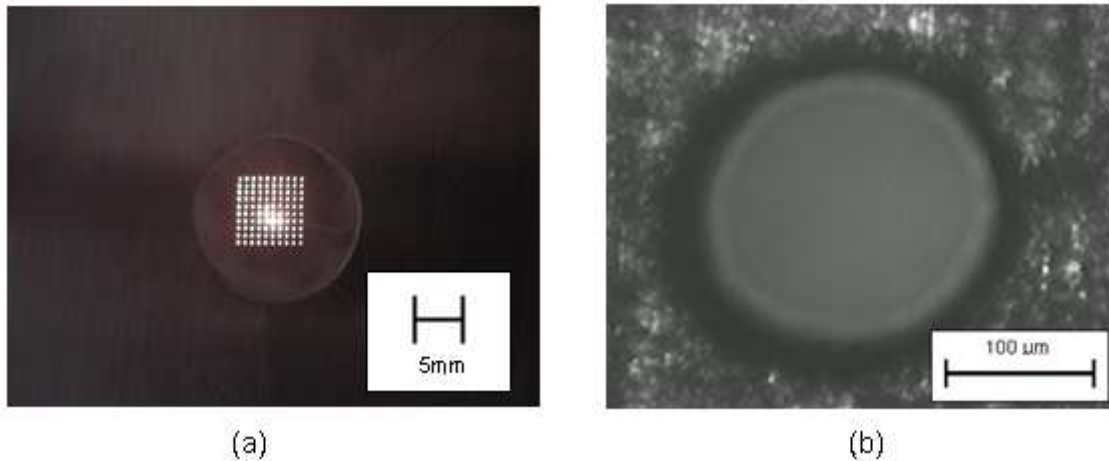


Figura 4.5 – (a) Tampa da ferramenta contendo o padrão de furação com 100 furos circulares e (b) Microscopia ótica de um dos 100 furos obtidos.

Atuando com todas as modificações realizadas foram produzidos também por eletroerosão os padrões em traço-ponto e em V. Porém, obviamente, os eletrodos-ferramenta utilizados foram diferentes.

Para o padrão traço-ponto, os pontos e os traços foram usinados separadamente. Primeiro foram produzidos os pontos, utilizando o mesmo fio de tungstênio anterior. Para a obtenção dos traços, foi confeccionado um eletrodo a partir de uma folha de cobre com espessura de 0,100 mm cortada a uma largura de 0,300 mm. A Fig. 4.6 mostra uma imagem da furação obtida.

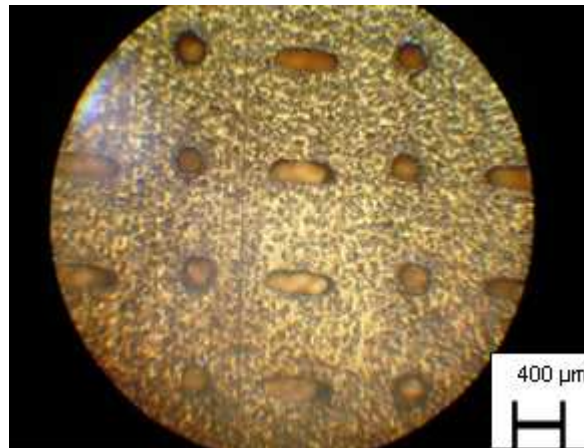


Figura 4.6 – Micrografia da ferramenta com padrão de furação em traço-ponto.

Na confecção da furação em “V”, utilizou-se também a folha de cobre, que passou por um processo de conformação até chegar ao formato desejado para ser utilizado como eletrodo. O molde em “V” teve a espessura da folha de cobre, 100 μm, e o comprimento médio das arestas de 600 μm. A fixação adequada deste eletrodo foi possível devido ao formato do dispositivo de fixação confeccionado, o qual foi mostrado na Fig. 4.3 e agora é apresentado no detalhe na Fig. 4.7.



Figura 4.7 – Detalhe do dispositivo de fixação dos eletrodos de eletroerosão.

O padrão de perfuração obtido através da eletroerosão teve as dimensões médias de 150 μm de espessura e 800 μm de comprimento de arestas. O resultado é mostrado na Fig. 4.8.

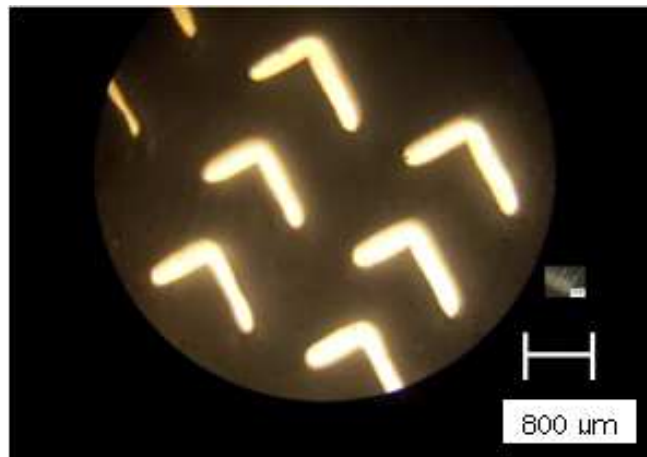


Figura 4.8 – Detalhe da tampa da ferramenta com furação em “V”.

4.2 Preparação de Amostras

As amostras texturizadas neste trabalho são de aço carbono ABNT 1010.

Inicialmente amostras foram cortadas com área aproximada de 10 mm² e espessura de cerca de 10 mm. Em seguida elas foram preparadas para que as superfícies das peças tivessem acabamento superficial adequado para receberem a posterior texturização eletroquímica

O primeiro passo foi a usinagem por eletroerosão de um furo de 4 mm de diâmetro, seguido por confecção de rosca para o encaixe de um parafuso para promover o contato elétrico (pólo positivo), em um dos cantos da amostra. A confecção das roscas foi realizada manualmente com o auxílio de um macho, um porta-macho e uma morça para fixar a amostra. As rebarbas foram retiradas com o uso de esmeril.

Em seguida as amostras passaram por um processo de retificação em uma retificadora plana para garantir a planicidade das faces das amostras.

Com todas as amostras devidamente retificadas o próximo passo realizado foi o lixamento em lixas d'água nas granulometrias 100, 120 e 150, respectivamente. Deu-se início então ao processo de polimento das amostras. As amostras passaram por quatro etapas de polimento, cada qual com um abrasivo diferente; 15μm, 9μm, 6μm e 3μm, respectivamente. Ao final do polimento foram obtidas amostras com superfície espelhada. A topografia superficial das amostras após esta preparação foi avaliada utilizando-se um interferômetro ótico da modelo UBM.

4.3 Testes de Texturização

Existem vários parâmetros que podem interferir no processo de texturização eletroquímica, tais como: a composição, a concentração e o fluxo de eletrólito; o distanciamento entre os eletrodos, a tensão e a densidade de corrente aplicadas; os tempos de trabalho, pausa e total da usinagem; entre outros.

Na execução deste trabalho, foram utilizados como pontos de partida alguns parâmetros determinados no trabalho desenvolvido por Costa e Hutchings (2009), como um espaçamento entre peça e ferramenta de 500 μm , uma tensão de aproximadamente de 30 volts e um tempo total de usinagem de 30 segundos.

A vazão de eletrólito (solução de NaCl em concentração de 200 g/l) conferida pela bomba foi fixada a um valor de 20 ml/s. Esta vazão foi superior à utilizada por Costa e Hutchings (2009), uma vez que quando eles tentaram utilizar espaçamentos muito pequenos a perda de carga resultante não permitiu uma vazão adequada de eletrólito, o que reduziu muito a eficiência do processo e o acabamento superficial final. Este trabalho, portanto, conseguiu utilizar pequenos espaçamentos com altas eficiências de usinagem e bom acabamento.

O taxa cíclica da onda quadrada, que confere o tempo de pulso e de descanso da célula, também foi mantido fixo, sendo que o tempo de trabalho equivale a 15% do tempo total de usinagem. Como cada ciclo tem um período de 20 ms, o tempo de pulso foi de 3 ms enquanto que o tempo de descanso foi de 17 ms. A frequência do ciclo foi de 50 Hz.

Após os testes iniciais utilizando os parâmetros acima para verificar o funcionamento adequado do aparato desenvolvido, alguns parâmetros foram variados na tentativa de otimizar o processo. Os parâmetros escolhidos para serem avaliados neste trabalho foram o espaçamento entre os eletrodos, a tensão aplicada e o tempo total de usinagem. Além da avaliação destes parâmetros foi também testada a transferência dos diferentes padrões de texturização, ou seja, contendo bolsos circulares, traço-ponto e em "V". Após cada ensaio de texturização, as amostras foram lavadas com água e algodão e em seguida secadas. A qualidade das texturas produzidas foi avaliada por interferometria ótica, microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura.

4.3.1 Variação do espaçamento entre os eletrodos

Estes testes foram realizados com o objetivo de avaliar o efeito do distanciamento entre os eletrodos sobre a eficiência da transferência do padrão de furação da ferramenta para a superfície da peça

Teoricamente, quando mais próximo estiverem os eletrodos, mais fiel será a transferência de padrões. Porém, para haver um fluxo de eletrólito adequado e todos os benefícios já citados que esta circulação de eletrólito pode causar, este espaçamento não pode ser pequeno demais. Estudos com técnicas similares utilizaram um espaçamento de 500 μm . (SCHONENBERGER; ROY, 2005) (COSTA; HUTCHINGS, 2008)

Foi utilizado um espaçamento inicial de 500 μm e nos ensaios posteriores a distância foi sendo reduzida. A variação no espaçamento entre os eletrodos foi obtida através da confecção e substituição de novas chapas de apoio, seguindo o modelo apresentado no anexo 1. A troca desses espaçadores pôde ser efetuada devido à configuração do equipamento utilizado (fig. 3.1) que permite a montagem e desmontagem com encaixe de peças no aparato.

Os espaçamentos avaliados foram de 500 μm , 250 μm , 200 μm , 100 μm e 50 μm .

4.3.2 Variação da tensão aplicada sobre os eletrodos

Um parâmetro importante na dissolução eletroquímica é a tensão. Neste processo utiliza-se uma fonte de energia de alta potência para fornecer corrente elétrica com alta intensidade, em que o pólo negativo da fonte é ligado à ferramenta e o positivo ligado à peça. Essa conexão e a condução de corrente por meio do eletrólito levam à movimentação e retirada de material do anodo.

Como a intensidade de corrente depende diretamente da tensão externa aplicada, foram realizados ensaios para avaliar o efeito da tensão sobre as feições dos padrões produzidos. Os ensaios foram realizados com tensões de 10V, 20V, 30V, 40V e 50V, que foram reguladas na fonte de tensão externa ligada ao circuito eletrônico para obtenção da corrente pulsada.

Neste experimento também foi escolhido os valores de tensão sobre uma resistência ligada em série à célula eletroquímica com o intuito de manipular os resultados para se obter valores de corrente e densidade de corrente. Essa resistência tem o valor de 8,2 Ω conforme mostrado no esquema do circuito, Fig. 3.5. Os valores de tensão foram visualizados através de um osciloscópio e transferidos por USB a um microcomputador.

4.3.3 Variação do tempo total de texturização

Um parâmetro importante para texturização superficial é o tempo necessário para que esta ocorra da maneira desejada. Outros autores avaliaram o tempo de duração durante os ensaios de transferência de padrões. (COSTA; HUTCHINGS, 2008) (NOURAEI; ROY, 2008)

A duração do processo eletroquímico de dissolução influencia diretamente na intensidade dos padrões transferidos e pode também afetar a morfologia da textura. Como foi definida previamente uma razão cíclica do processo de aplicação de corrente pulsada de 15% em tempo de trabalho e 85% de tempo de descanso da célula, quanto maior o tempo total de aplicação da tensão, maior é o tempo de trabalho da célula.

Os valores avaliados em segundos foram de 10, 20, 30, 60, 90 e 120 controlados por meio de um cronômetro.

Neste experimento foi colhido o perfil de tensão através da célula eletroquímica em vários pontos sobre um ensaio de duração de total de 120 s. A idéia aqui é avaliar o comportamento potencial efetivo durante a evolução de um teste de texturização por dissolução eletroquímica.

4.3.4 Variação do padrão de textura

Nesses ensaios foi avaliada a viabilidade da técnica para a transferência de padrões diferentes dos pontos tradicionalmente utilizados nos trabalhos de texturização superficial.

Os padrões testados foram pontos, traço-ponto e V. Esses testes foram realizados após a definição dos melhores valores para os parâmetros avaliados nos itens acima.

A Tab. 4.2 resume as condições experimentais utilizadas em cada um dos testes de texturização.

Tabela 4.2 – Resumo dos testes de texturização efetuados

Teste	Parâmetro avaliado	Condições variáveis	Condições fixas
1	Espaçamento entre eletrodos	500 μm , 250 μm , 200 μm , 100 μm e 50 μm .	Concentração = 200 g/L Vazão = 20 mL/s Tensão = 30 V Tempo = 30 s
2	Tensão aplicada	10V, 20V, 30V, 40V e 50V	Concentração = 200 g/L Vazão = 20 mL/s Espaçamento = 100 μm Tempo = 30 s
3	Tempo de texturização	10s, 20s, 30s, 60s, 90s e 120s	Concentração = 200 g/L Vazão = 20 mL/s Tensão = 30 V Espaçamento = 100 μm
4	Padrão de textura	Pontos, Traço-ponto e V.	Concentração = 200 g/L Vazão = 20 mL/s Tensão = 30 V Espaçamento = 100 μm Tempo = 30 s

4.4 Testes Tribológicos

Foi realizado um ensaio para comparar o desempenho tribológico entre regiões não texturizada e texturizada de uma superfície, avaliando a redução do coeficiente de atrito e do desgaste em ensaios de deslizamento lubrificado alternado.

O ensaio foi realizado em um tribômetro modelo Plint TE 67. Esse equipamento tem um excêntrico que transforma o movimento rotativo do ensaio de deslizamento em um movimento linear alternado. A frequência do movimento alternado foi de 2 Hertz.

Foi utilizada uma carga cilíndrica de 2,94 N. A geometria do ensaio foi cilindro-plano, o que garante uma área de contato retangular. Como contra-corpos, foram utilizados cilindros de rolamentos de diâmetro igual a 8 mm e altura de 18 mm. Utilizando-se as equações de Hertz, a tensão máxima de contato foi calculada como sendo $52,24 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ e a largura do contato a como sendo $1,99 \cdot 10^{-6} \text{ m}$. Foi utilizado um lubrificante sólido, o

bissulfeto de molibdênio, aplicado por espalhamento manual sobre a amostra antes dos ensaios. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente. No teste foi utilizada uma amplitude de movimento de 12 mm. O posicionamento do cilindro sobre a amostra foi tal que garantisse 6 mm de deslizamento sobre uma área texturizada e outros 6 mm sobre uma área não texturizada. O tempo de duração total do teste foi de 10 minutos.

O tribômetro utilizado foi adaptado para adquirir os dados em alta frequência, de forma a garantir que fosse possível diferenciarem-se os dados coletados relativos à região texturizada e à região não-texturizada. A frequência de aquisição utilizada foi de 48 kHz. A posição do contra-corpo sobre a amostra é monitorado por um LVDT. Um programa desenvolvido em LabView e Matlab coleta os dados e gera um mapa triboscópico do coeficiente de atrito. Neste mapa triboscópico, uma escala de cores representa a amplitude do coeficiente de atrito e os eixos coordenados representam a posição sobre a trilha de deslizamento (x) e o número de ciclos durante os quais o atrito foi medido (y).

A amostra utilizada no teste tribológico foi texturizada com o padrão contendo bolsos circulares regularmente espaçados.

Após o ensaio tribológico, a amostra passou por limpeza ultrassonora em acetona e a trilha de desgaste produzida foi avaliada por interferometria ótica, microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Amostras Pré-Texturização

As amostras antes de passarem pelo processo de texturização por usinagem eletroquímica proposto nesse trabalho tiveram suas superfícies preparadas conforme descrito no procedimento experimental.

Uma micrografia da superfície polida pode ser vista na Fig. 5.1. Na Fig. 5.2 é mostrada a interferometria da mesma superfície.

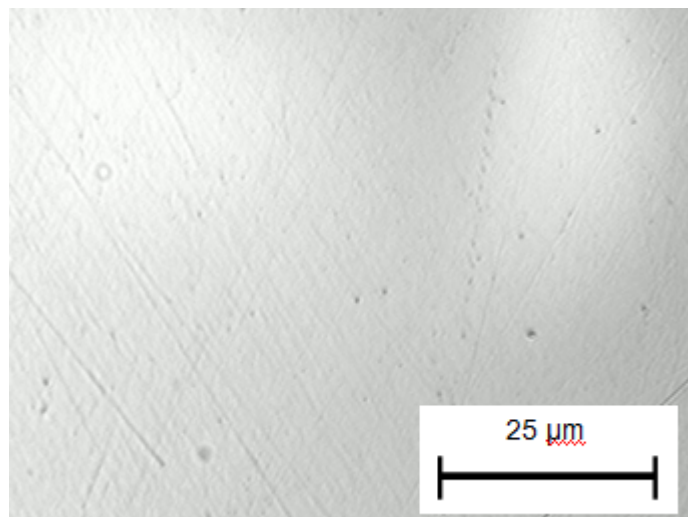


Figura 5.1 – Micrografia da superfície de uma amostra após o polimento fino.

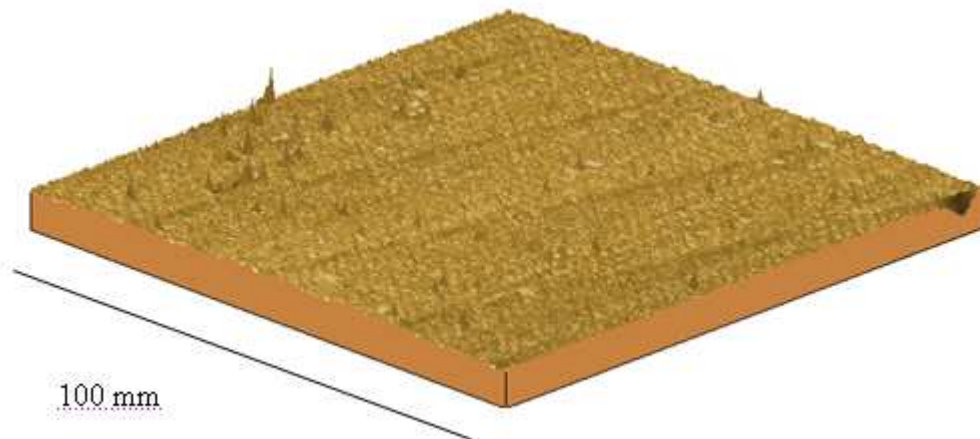


Figura 5.2 – Interferometria da superfície polida da amostra.

A partir do mapa interferométrico, a rugosidade final da amostra após polimento foi calculada como $0,0578 \mu\text{m}$ (S_a). Estes resultados mostram que as amostras preparadas para a texturização foram satisfatoriamente lixadas e polidas de forma a apresentar um acabamento superficial satisfatoriamente liso e uniforme, que não deverá intervir nos resultados de texturização.

5.2 Efeito do espaçamento entre os eletrodos

Os resultados apresentados nesta seção foram realizados com um tempo de usinagem de 30 s e uma tensão de 30 V, conforme apontado nos procedimentos experimentais. A Tab. 5.1 mostra o perfil dos bolsos e as imagens projetadas da superfície texturizada para cada condição dos ensaios que avaliaram o efeito do espaçamento entre os eletrodos sobre a transferência dos padrões. Na Tab. 5.2 estão apresentados os resultados médios de diâmetro e profundidade obtidos, bem como a avaliação da rugosidade da superfície produzida. Esses valores de diâmetro e profundidade foram obtidos por meio da extração do perfil da projeção interferométrica manipulados através software Mountains Map. As Figs. 5.3 e 5.4 mostram o efeito do espaçamento entre a ferramenta e a peça sobre o diâmetro e a profundidade das cavidades geradas, respectivamente.

Tabela 5.1 – Interferometrias dos ensaios de variação de distanciamento entre eletrodos.

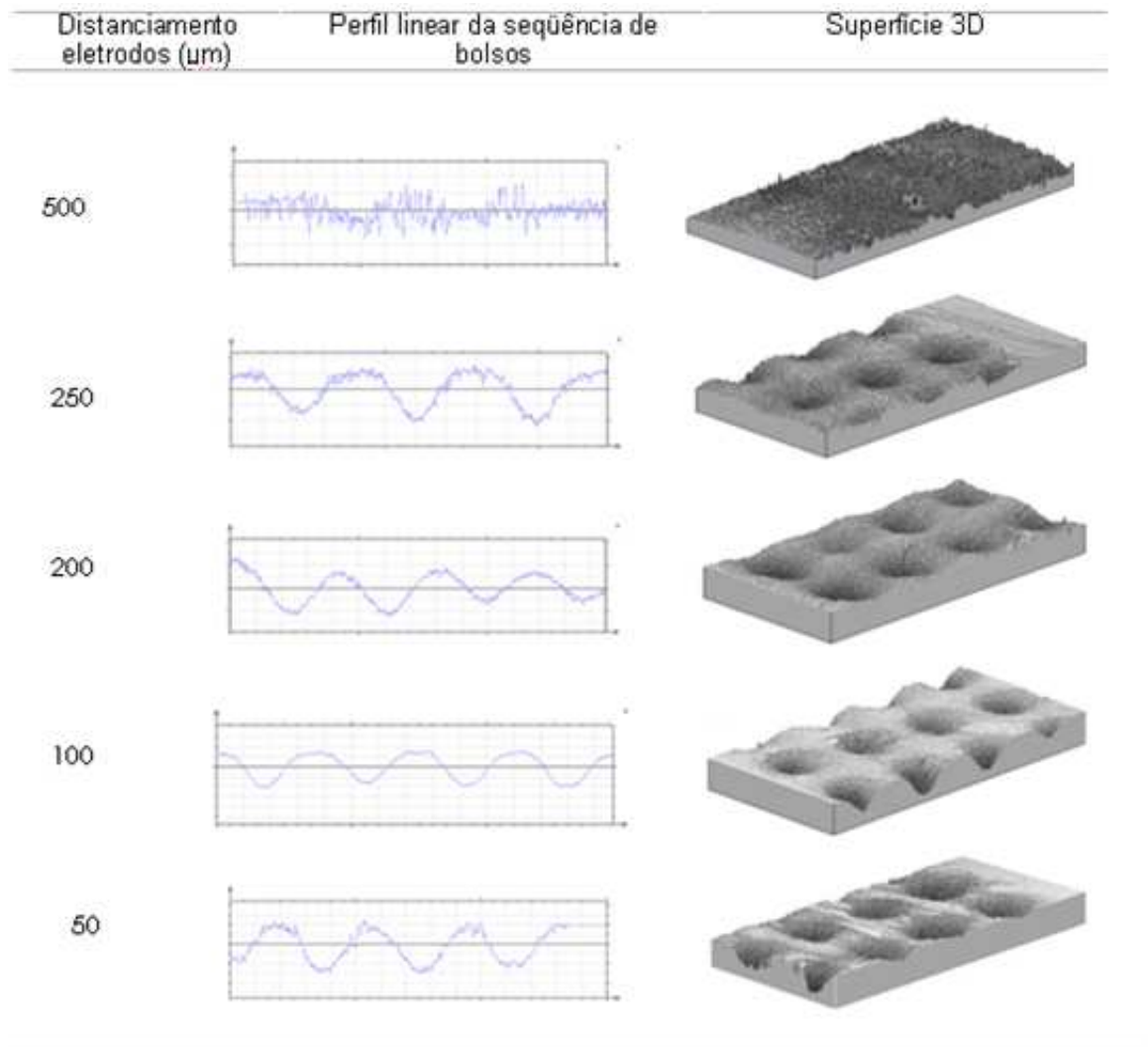


Tabela 5.2 – Resultados dos testes de avaliação do efeito do distanciamento entre eletrodos.

Distanciamento eletrodos (μm)	Diâmetro (μm)	Profundidade (μm)	Aspecto do bolso	Aspecto da superfície
500	0	0	-	Irregular--
250	450	15	Irregular-	Irregular-
200	450	20	Irregular	Irregular
100	450	35	Regular+	Regular
50	500	30	Regular	Regular+

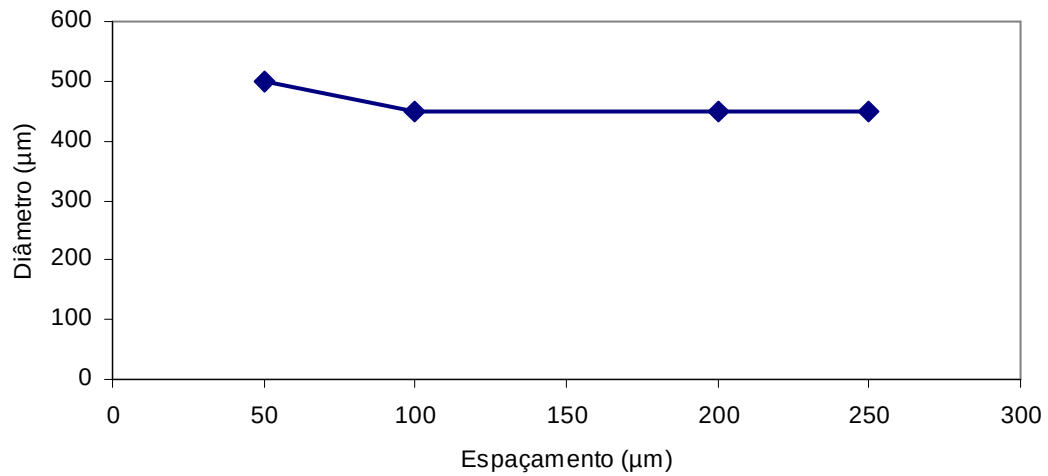


Figura 5.3 – Efeito do espaçamento entre os eletrodos no diâmetro dos bolsos.

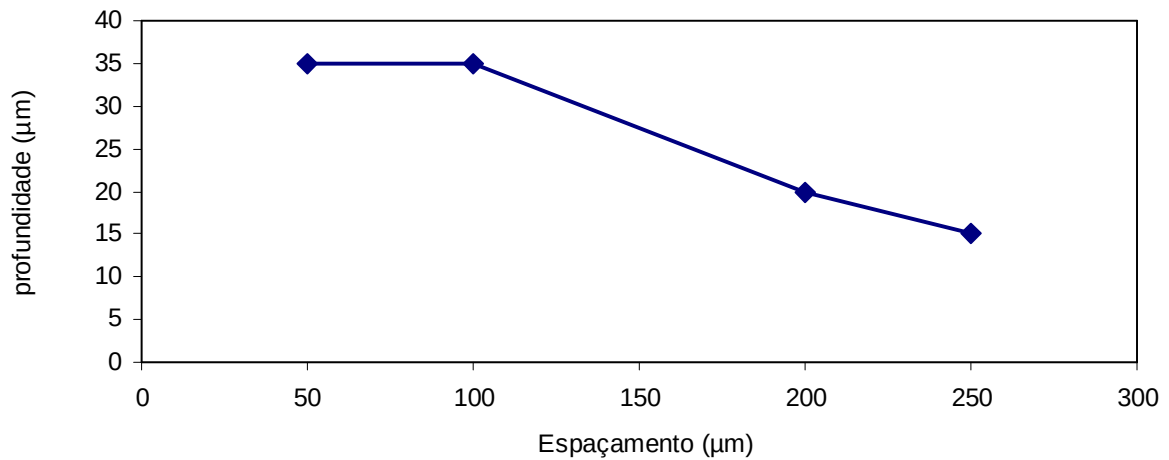


Figura 5.4 – Efeito do espaçamento entre os eletrodos na profundidade dos bolsos.

Para o espaçamento de 500 μm foi constatado que não houve transferência adequada dos padrões de textura, apesar de a superfície se mostrar atacada. Quando a distância entre a ferramenta e a peça é muito grande, aumenta-se muito a queda potencial ôhmico na coluna de eletrólito, aumentando-se o sobrepotencial e, portanto diminuindo-se a densidade de corrente (ALTENA, 2000). Para uma separação de 250 μm , os padrões são transferidos, mas os bolsos produzidos são irregulares e a superfície da amostra bastante rugosa fora dos bolsos. Comportamento semelhante repete-se para um espaçamento de 200 μm . Quando o espaçamento é reduzido para 100 μm , observa-se uma melhora

significativa no acabamento da superfície tanto fora como no interior dos bolsos. Ao tentar-se reduzir ainda mais o distanciamento entre os eletrodos para 50 μm a transferência de padrões também é boa. Porém, devido ao curto espaçamento entre a peça e a ferramenta, o fluxo de eletrólito torna-se insuficiente, devido a grande perda de carga que ocorre no fluido, o que leva a uma limpeza e conseqüentemente a um acabamento superficial inferiores tanto fora quanto dentro dos bolsos.

Como o distanciamento de 100 μm se mostrou o mais eficiente para a obtenção da textura na peça, este valor foi utilizado nos testes subseqüentes. É importante salientar que um espaçamento curto é possível devido ao uso da corrente pulsada, que permite, durante o curto intervalo de tempo de descanso, que ocorra apenas a limpeza da área promovendo remoção de calor, bolhas e produtos de corrosão.

Os gráficos das Figs. 5.3 e 5.4 mostram, excetuando os valores referentes ao espaçamento de 500 μm , que o distanciamento entre a ferramenta e a peça não exerce um grande efeito sobre o diâmetro dos bolsos gerados, mas um efeito maior é observado sobre a profundidade das cavidades produzidas. De fato era de se esperar que a profundidade das cavidades fosse maior quanto menor fosse o distanciamento entre os eletrodos, já que um espaço mais curto faz com que a divergência entre as linhas de corrente seja menor (SCHONENBERGER; ROY, 2005). Neste caso a dissolução ocorre de forma mais intensa ao fundo da cavidade e não tanto pelas laterais.

5.3 Efeito da Tensão

Os resultados apresentados nesta seção foram realizados com um tempo de usinagem de 30 s, descrito como ponto de partida nos procedimentos experimentais, e um espaçamento de 100 microns, obtido como o melhor resultado na avaliação do efeito do espaçamento entre os eletrodos.

A tensão aplicada sobre a célula fornece a corrente necessária para que ocorra a dissolução eletroquímica. A avaliação de seu efeito foi realizada ao longo de toda faixa disponível da fonte de potência, que vai de 0 a 50 V. O intervalo utilizado foi de 10 volts.

A Tab. 5.3 mostra o perfil de alguns bolsos e as imagens projetadas da superfície texturizada para cada condição de tensão aplicada sobre a célula eletroquímica. Na Tab. 5.4 é apresentado o resumo dos resultados avaliando a morfologia dos bolsos obtidos e o aspecto da superfície da amostra texturizada. As Figs. 5.5 e 5.6 mostram graficamente o efeito da tensão sobre o diâmetro e a profundidade dos bolsos obtidos, respectivamente.

Tabela 5.3 – Interferometrias dos ensaios de variação de tensão.

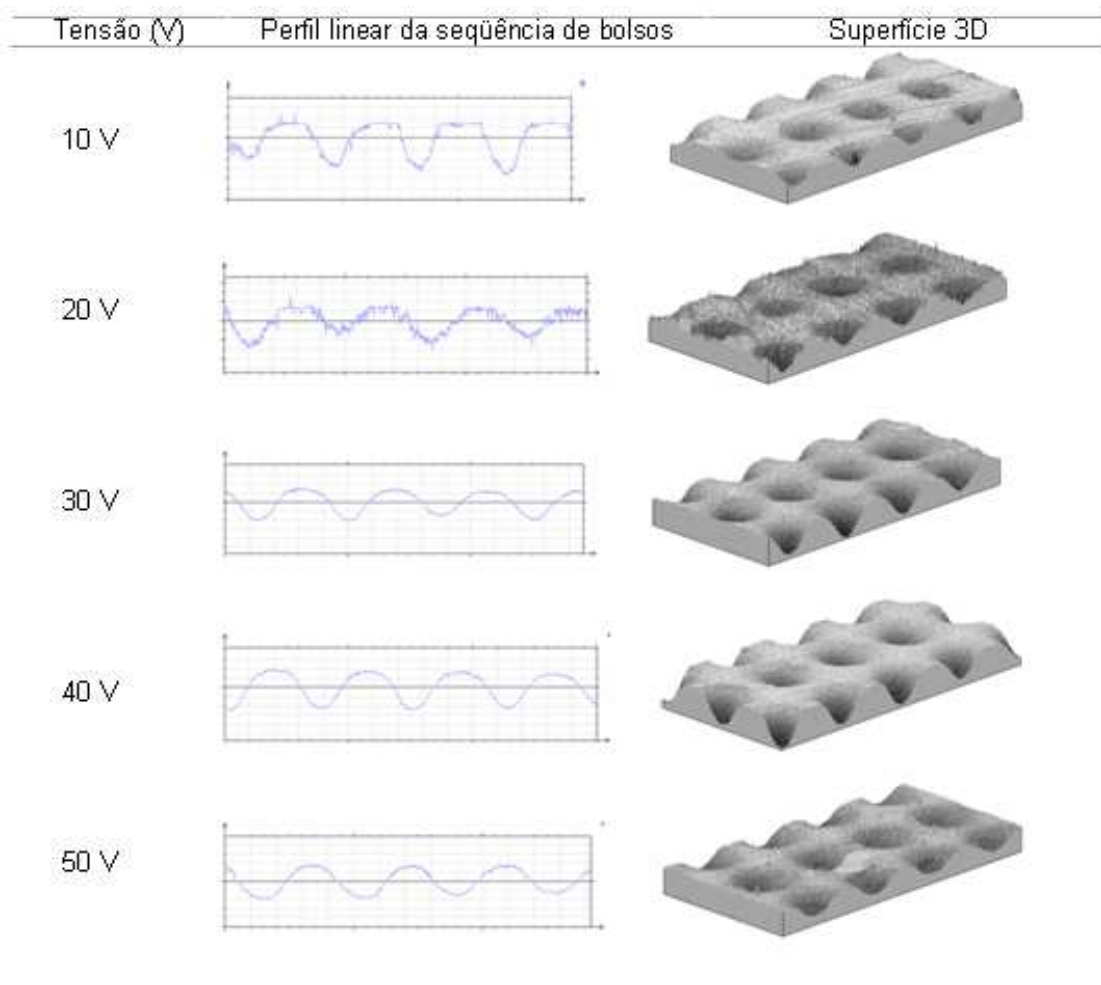


Tabela 5.4 – Resultados dos testes de avaliação do efeito do distanciamento entre eletrodos.

Tensão (V)	Diâmetro (μm)	Profundidade (μm)	Aspecto do bolso	Aspecto da superfície
10	400	20	Irregular	Regular
20	450	20	Irregular--	Irregular
30	450	35	Regular	Regular
40	450	40	Regular	+Regular
50	500	40	Regular	Irregular

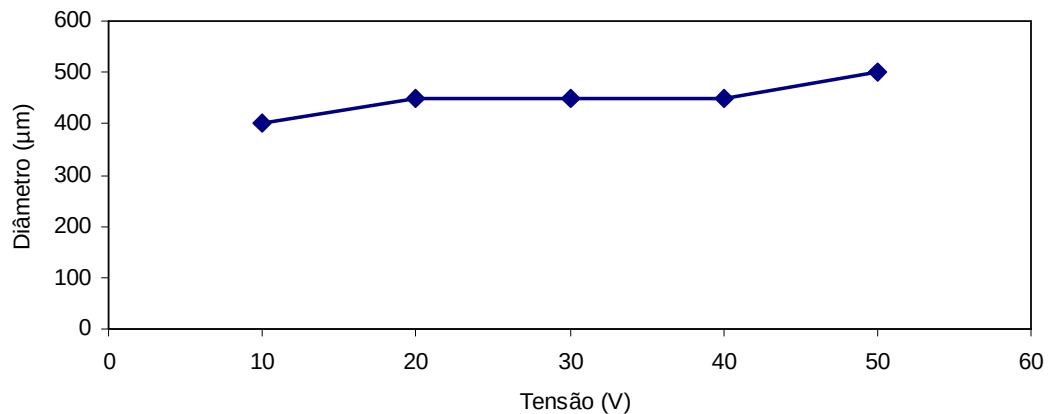


Figura 5.5 – Efeito da tensão no diâmetro dos bolsos

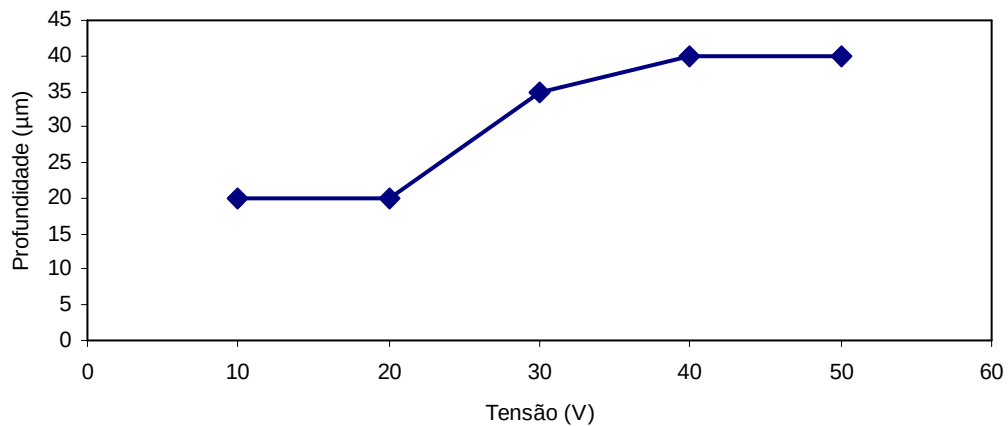


Figura 5.6 – Efeito da tensão na profundidade dos bolsos.

Analisando as interferometrias mostradas na Tab. 5.3 é importante notar que uma tensão aplicada sobre a célula de apenas 10 V já é suficiente para a transferência dos padrões. O interessante é que com essa tensão a superfície fora dos bolsos se mostra mais lisa que para as demais condições. Porém, o arrancamento de material no interior dos bolsos se mostrou bastante irregular.

Para uma tensão de 20 V, tanto a superfície externa quanto a interna aos bolsos é bem rugosa. Baixos valores de tensão promovem uma densidade de corrente também baixa, a qual pode ser insatisfatória para uma boa remoção de material. Esta remoção ocorre mais intensamente no interior dos bolsos, devido ao direcionamento do eletrólito, conforme esquematizado previamente na Fig. 2.9 (NOURAEI; ROY, 2008). Porém, alguma remoção de material acaba ocorrendo também na superfície entre os bolsos, causado pelas linhas de corrente também aí, mas com intensidade bem menor.

A partir de 30 V o aspecto geral das texturas torna-se bem mais uniforme e adequado. Sendo assim a tensão de 30 V se mostra a mínima necessária para se obter um acabamento adequado da superfície texturizada.

De uma forma geral, a tensão aplicada mostra um efeito bem discreto sobre o diâmetro dos bolsos gerados, conforme mostrado pela Tab. 5.4. O menor diâmetro de bolso é obtido para a tensão de 10 V, provavelmente devido ao fato de a tensão não ser suficiente para vencer o potencial da célula. Entre 20 e 40 V não há efeito da tensão sobre o diâmetro dos bolsos. Para 50 V, o diâmetro dos bolsos aumenta um pouco, provavelmente devido a uma localização menos eficiente da dissolução.

O efeito da tensão aplicada sobre a profundidade dos bolsos é um pouco mais evidente para tensões até 30 V. Porém, acima de 30 V a profundidade permanece relativamente constante, evidenciando que uma tensão de 30 V já é suficiente para promover dissolução adequada.

É importante notar que é possível controlar a profundidade dos bolsos obtidos através da variação da tensão aplicada, em concordância com os resultados obtidos por Shuangqing et al (2010).

5.3.1 Avaliação da corrente.

A corrente pôde ser aferida a partir do uso de uma resistência ligada em série com a célula eletroquímica e sobre a qual é aferida a voltagem efetiva através de um osciloscópio. Com base na lei de ohm, sobre a Eq. 5.1 é calculada a corrente, já que a resistência tem um valor fixo de 8,2 ohms.

$$I = V / R \quad (5.1)$$

A densidade de corrente, i_d , pode ser calculada pela Eq. 5.3. (Costa 2005), onde I é o pico de corrente calculado e A é a área superficial da textura a ser transferida. A área é calculada segundo a Eq. 5.2, em que nc é a quantidade de cavidades presentes na ferramenta (100), com diâmetro (D) destas igual a 0, 200 mm.

$$A = nc \times (\pi / 4) \times (D)^2 \quad (5.2)$$

$$i_d = I / A \quad (5.3)$$

Os gráficos coletados são mostrados a título de ilustração na Fig. 5.7, onde a tensão sobre a resistência foi medida de forma atenuada pela ponteira do osciloscópio. Desta forma, o resultado real deve ser multiplicado por dez.

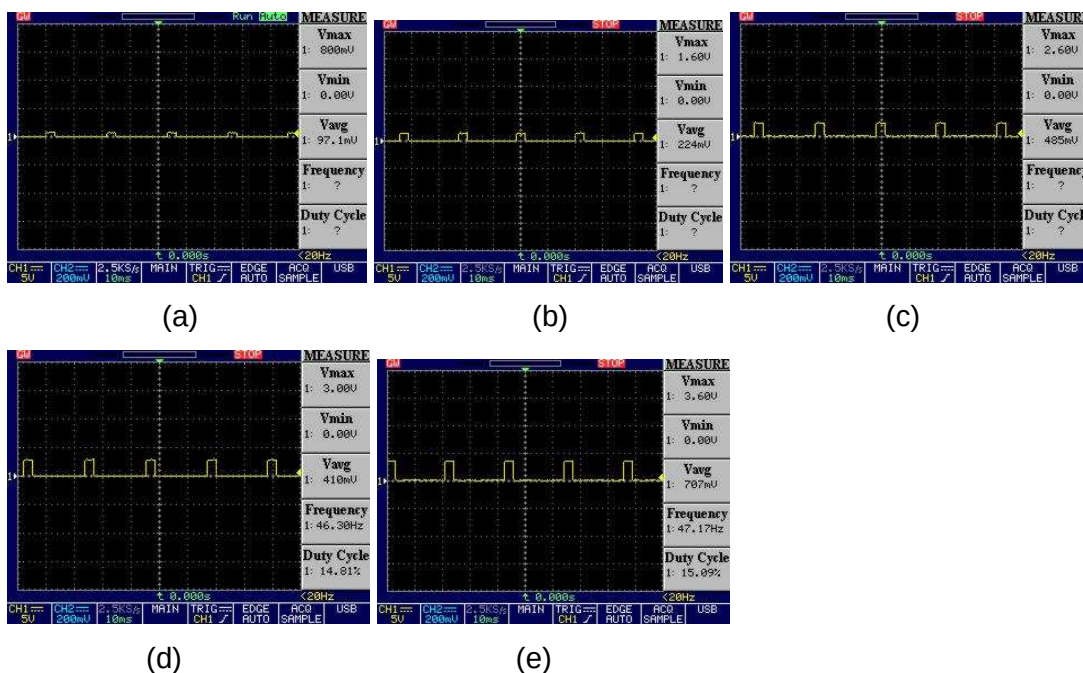


Figura 5.7 – Gráficos de tensão sobre a resistência adquiridos para as seguintes aplicações de tensão sobre a célula: (a) 10V, (b) 20 V, (c) 30 V, (d) 40 V, (e) 50 V.

A Tabela 5.5 mostra os dados obtidos e os valores calculados, dado que a área calculada pela Eq. 5.2 é constante e igual a 3,14 mm².

Tabela 5.5 – Cálculos para obtenção da densidade de corrente

Tensão sobre a célula (V)	Pico de tensão na resistência (V)	Corrente (A)	Densidade de corrente (A/mm ²)
10	8	0,975	0,311
20	16	1,951	0,621
30	26	3,171	1,010
40	30	3,658	1,165
50	36	4,390	1,399

Em um processo típico de usinagem eletroquímica em que são aplicadas tensões de 10 V a 30 V com um espaçamento entre eletrodos de 0,025 a 0,75 mm, as densidades de corrente geralmente giram em torno de 0,200 a 1,300 A/mm² (ALTENA, 2000).

Considerando-se que a densidade de corrente depende do tipo e da concentração do eletrólito, pode-se dizer que valores obtidos neste trabalho estão dentro da faixa identificada por Altena.

Apesar de a densidade de corrente se apresentar relativamente baixa em tensões aplicadas inferiores a 30 V, ela não exercerá influência sobre a eficiência de corrente. Isso ocorre devido ao eletrólito utilizado (NaCl) ser do tipo não passivador. Esse comportamento foi mostrado por Altena (ZIMMER, 2000) quando comparou o comportamento de um eletrólito passivador (NaNO₃) e um não passivador (NaCl), o que pode ser observado na figura 5.8.

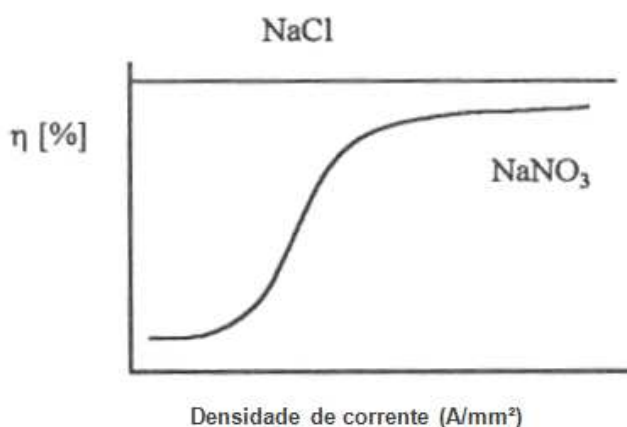


Figura 5.8 – Exemplo de eficiência de corrente para eletrólito passivador (NaNO₃) e não passivador (NaCl). (ALTENA, 2000)

5.4 Efeito do Tempo de Texturização

Os resultados apresentados nesta seção foram realizados com um espaçamento de 100 microns e uma tensão de 30 volts, encontrados nos ensaios anteriores como as melhores condições de texturização.

Na Tab. 5.6 é mostrado o perfil de alguns bolsos e as imagens projetadas da superfície texturizada para cada condição de tempo total de texturização avaliado. A Tab. 5.7 apresenta o resumo dos resultados avaliando a morfologia dos bolsos obtidos e o aspecto da superfície da amostra texturizada. As Figs. 5.9 e 5.10 mostram graficamente o efeito do tempo de duração do ensaio sobre o diâmetro e a profundidade dos bolsos obtidos, respectivamente.

Tabela 5.6 – Interferometrias dos ensaios de variação do tempo de texturização.

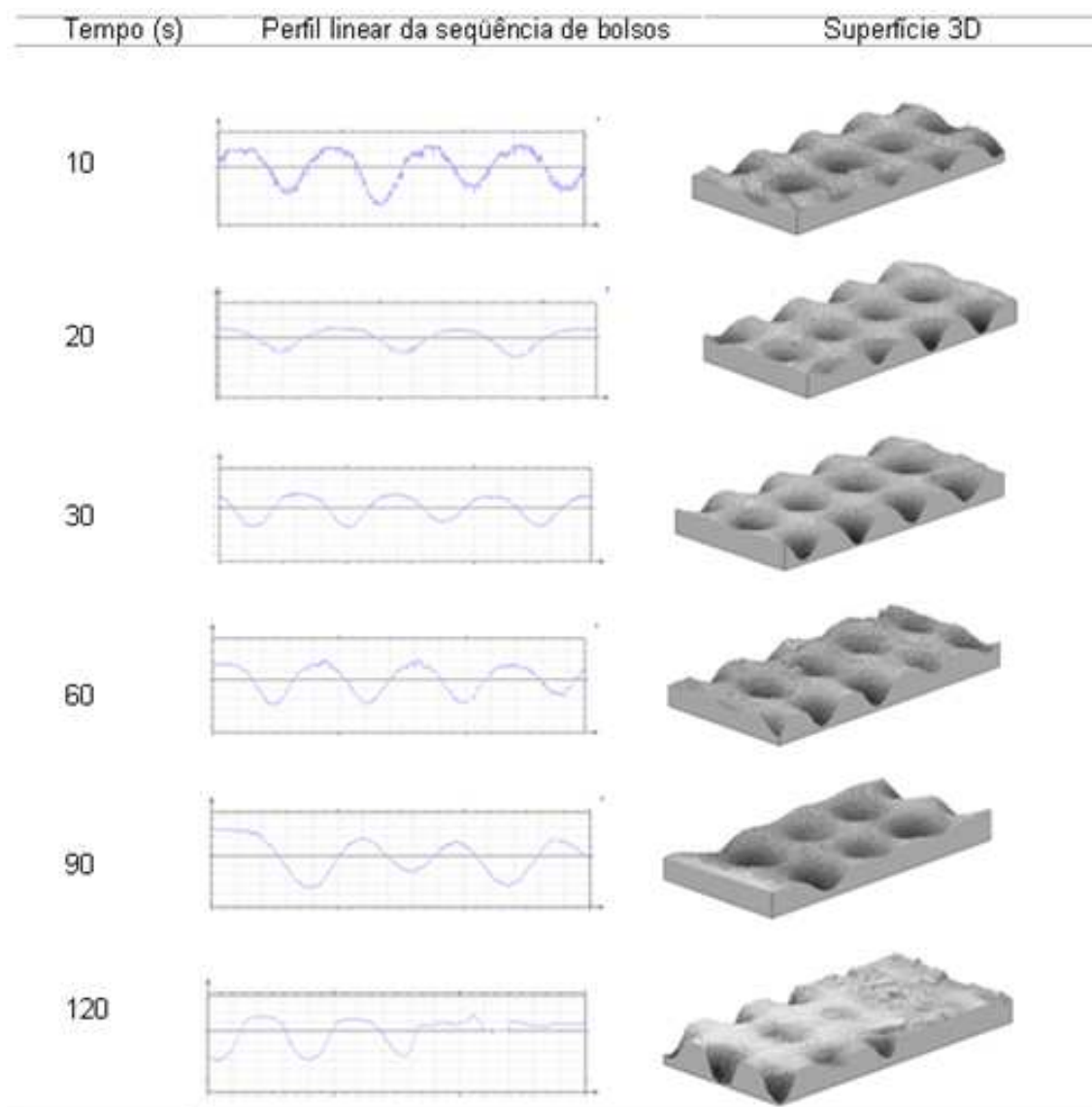


Tabela 5.7 – Resultados dos testes de avaliação do tempo de texturização.

Tempo (s)	Diâmetro (μm)	Profundidade (μm)	Aspecto do bolso	Aspecto da superfície
10	400	15	Irregular--	Regular
20	450	25	Irregular	Regular+
30	450	35	Regular+	Regular++
60	450	40	Regular+	Regular
90	600	50	Regular	Irregular-
120	600	80	Regular	Irregular

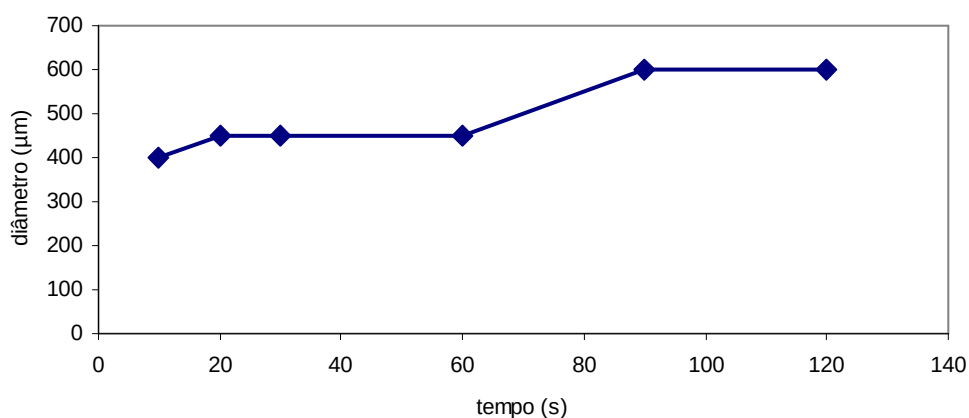


Figura 5.9 – Efeito do tempo de texturização no diâmetro dos bolsos.

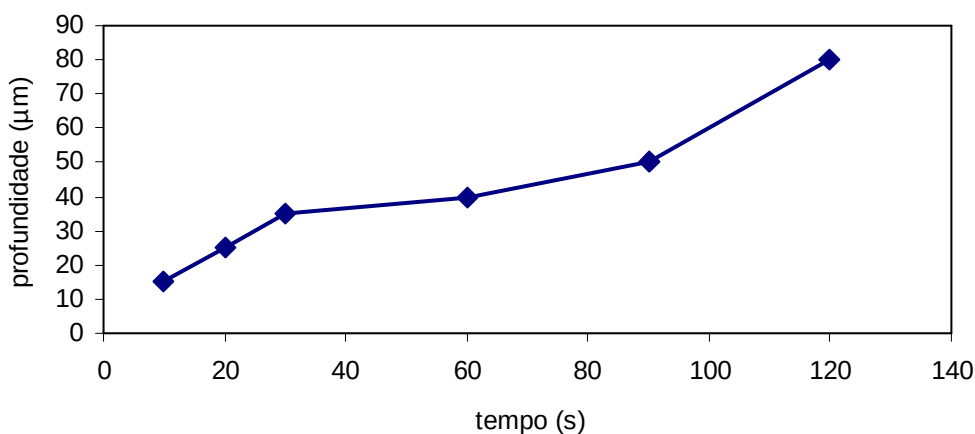


Figura 5.10 - Efeito do tempo de texturização na profundidade dos bolsos.

As interferometrias mostram que um tempo de apenas 10 segundos já é suficiente para promover a confecção dos bolsos, ou seja, a transferência de padrões. Porém um tempo tão curto não se mostra suficiente para promover uma dissolução regular e ou adequada limpeza das superfícies, já que estas se mostram bastante irregulares.

Com o incremento do tempo total de texturização eletroquímica, a transferência dos padrões é mais regular no que diz respeito ao acabamento. Os bolsos são também mais bem definidos, alcançando uma maior profundidade, o que pode ser observado nos testes com duração de 20 a 60 segundos.

Quando a duração do teste já é bem mais longa, de 90 e 120 segundos, observa-se que a transferência dos padrões não é constante e há o surgimento de alguns bolsos bastante profundos e outros não. Isso pode ter ocorrido devido à obstrução de alguns furos da tampa da ferramenta, já que a limpeza dos produtos de corrosão não é perfeita e o efeito dessa limpeza ineficiente é cumulativo ao longo do tempo. Além disso, com o passar do

tempo, pode haver a passivação de áreas no interior das cavidades atrapalhando a dissolução eletroquímica e, portanto a remoção de material. (NOURAEI e ROY 2008)

Os gráficos das Figs. 5.9 e 5.10 mostram que tanto o diâmetro, quanto a profundidade dos bolsos são notavelmente influenciados pelo tempo total de usinagem. Em geral a alteração no diâmetro ocorre numa escala bem maior que a profundidade.

O controle do tempo total de usinagem se mostra bastante importante na definição do diâmetro e profundidade dos bolsos gerados (Shuangqing et al 2010). O controle das dimensões dos bolsos é fundamental, uma vez que as mesmas influenciam significativamente o comportamento da superfície quanto à redução do coeficiente de atrito, conforme evidenciado na literatura (ZHU et al, 2009; Rapoport et al., 2007) e confirmado experimentalmente pelos resultados mostrados na seção 5.6.

5.4.1 Avaliação do potencial da célula eletrolítica ao longo do ensaio.

Ao longo de um teste com duração de 120 segundos foram adquiridos os sinais relativos aos perfis da tensão que atua efetivamente sobre a célula durante a texturização eletroquímica. A Fig. 5.11 mostra os gráficos extraídos do osciloscópio, onde são mostrados os valores referentes aos picos de voltagem nos tempos de 30, 60, 90 e 120 segundos.

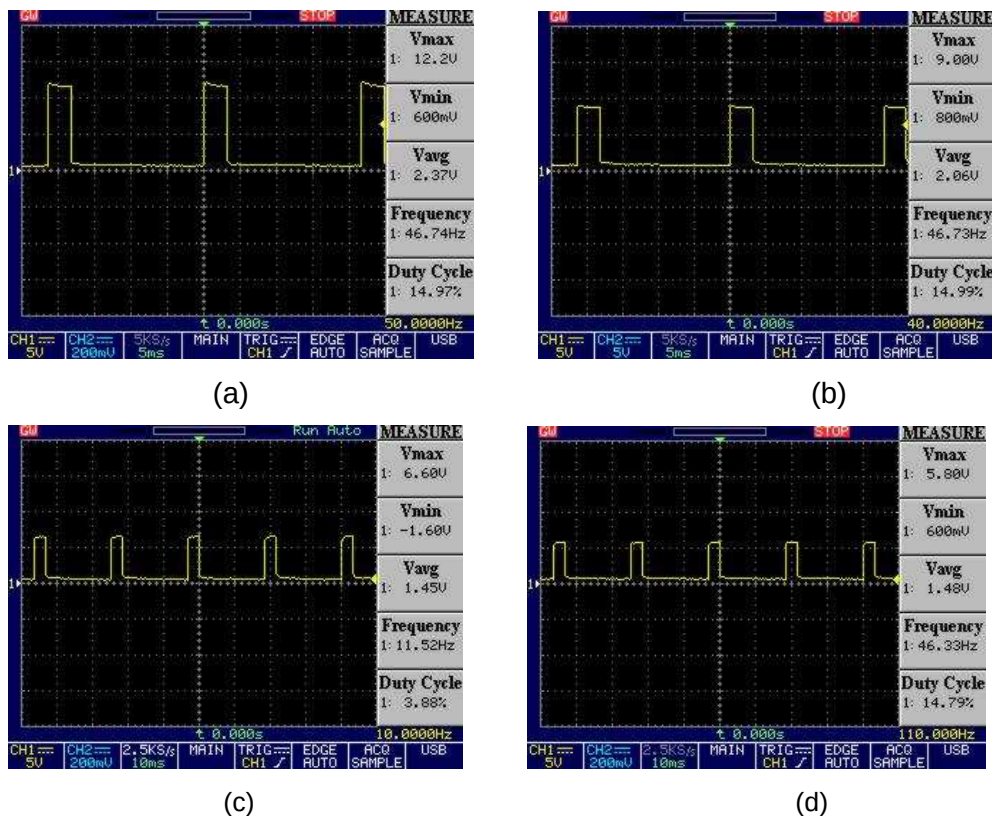


Figura 5.11 – Perfil de voltagem ao longo de uma texturização com tempo de duração total de 120 segundos, sendo: (a) 30s, (b) 60s, (c) 90s, (d)120s.

A medida que a usinagem prossegue, os produtos da corrosão vão se acumulando. Uma das funções do fluxo de eletrólito é removê-los, mas estes gráficos mostram que essa remoção não é perfeita. Isso causa um aumento da queda ôhmica (resistência), diminuindo a corrente que passa pela célula. Essa corrente é proporcional à tensão, a qual é mostrada nos gráficos acima, que se inicia com valores mais altos e reduz com o decorrer do teste.

5.5 Utilização de Diferentes Padrões de Textura

Foram realizados testes para avaliar a transferência de padrões, por meio da dissolução eletroquímica, com morfologias variadas. Todos os ensaios desta seção foram realizados com os parâmetros de espaçamento ferramenta-peça, tensão e tempo total de texturização fixos em respectivamente 100 microns, 30 volts e 30 segundos.

Na Fig. 5.12 são mostradas respectivamente imagens de interferometria e microscopia eletrônica de varredura da textura obtida com o padrão de furação em formato circular. O perfil de uma linha de pontos, em que na ordenada pode ser aferida a profundidade dos bolsos e na abscissa o diâmetro, é apresentado na Fig. 5.13.

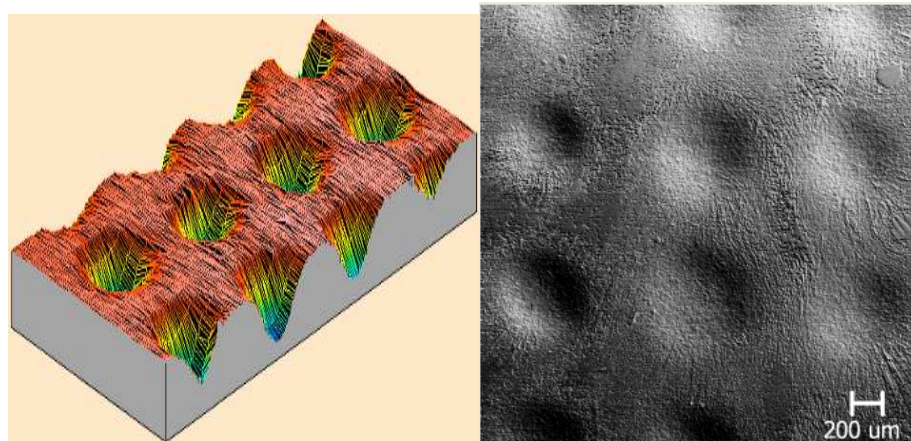


Figura 5.12 – Interferometria e micrografia eletrônica de varredura para o resultado da transferência de padrão de pontos regularmente espaçados.

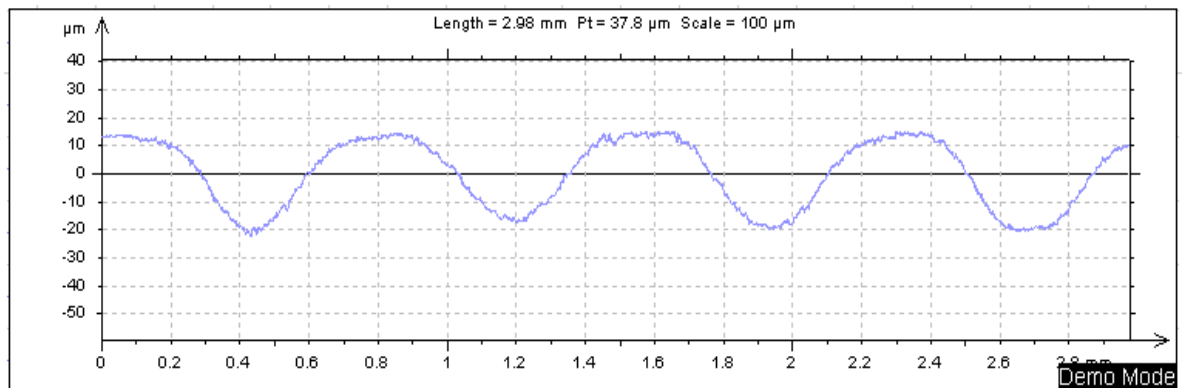


Figura 5.13 – Perfil interferométrico da textura obtida em padrão circular.

As Figs. 5.14 e 5.15 mostram os resultados de interferometria da textura obtida com padrão em formato de traço e ponto.

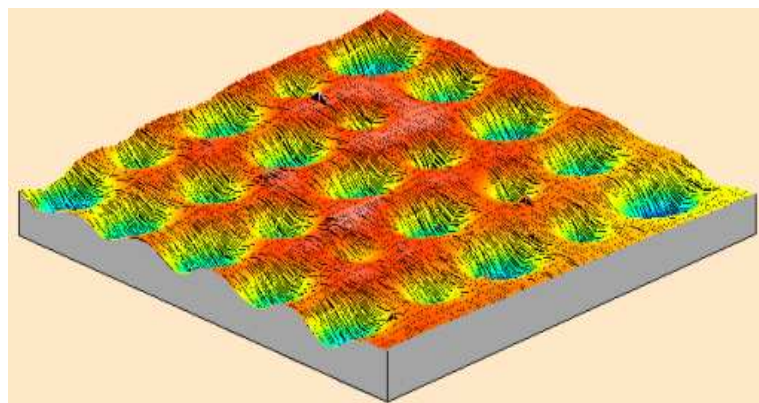


Figura 5.14 – Interferometria da superfície da amostra texturizada com padrão em traço-ponto.

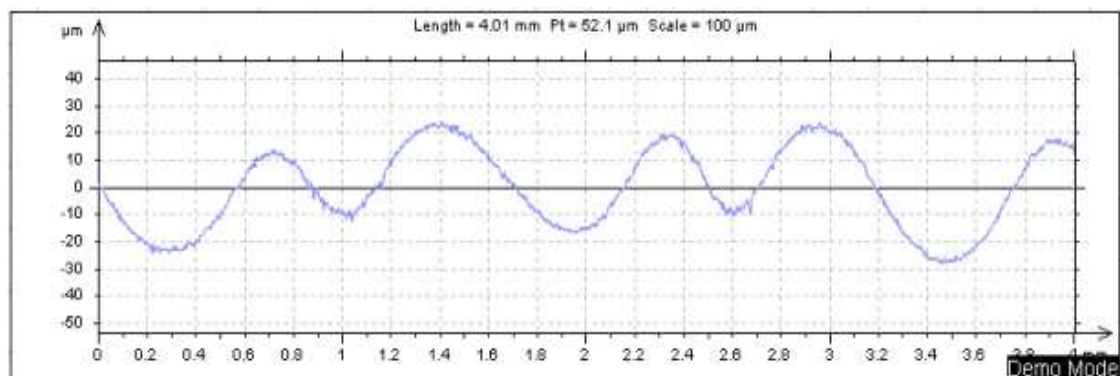


Figura 5.15 – Perfil interferométrico da textura obtida em padrão circular.

Na Fig. 5.16 são mostradas imagens de interferometria e microscopia eletrônica de varredura de varredura da textura obtidas com o padrão de furação em formato “V”. O perfil da imagem interferométrica, em que na ordenada pode ser aferida a profundidade dos bolsos e na abscissa o diâmetro, é apresentado na Fig. 5.17.

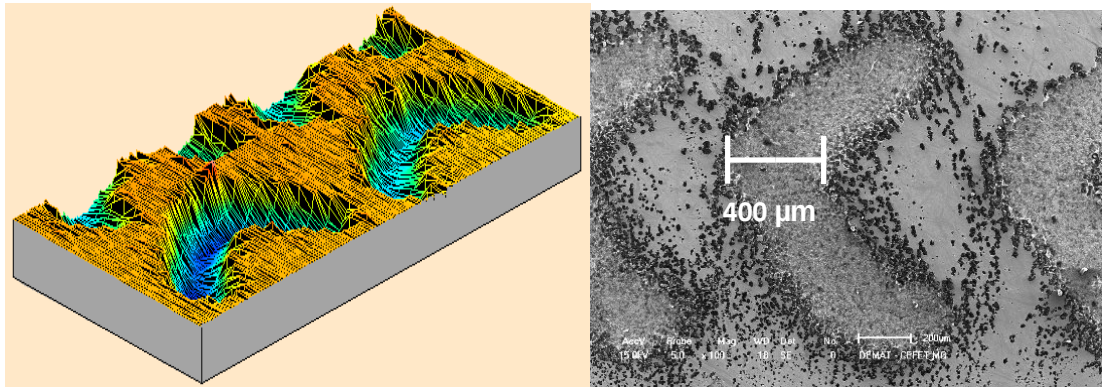


Figura 5.16 – Interferometria e micrografia eletrônica de varredura para o resultado da transferência de padrão de “V” regularmente espaçados.

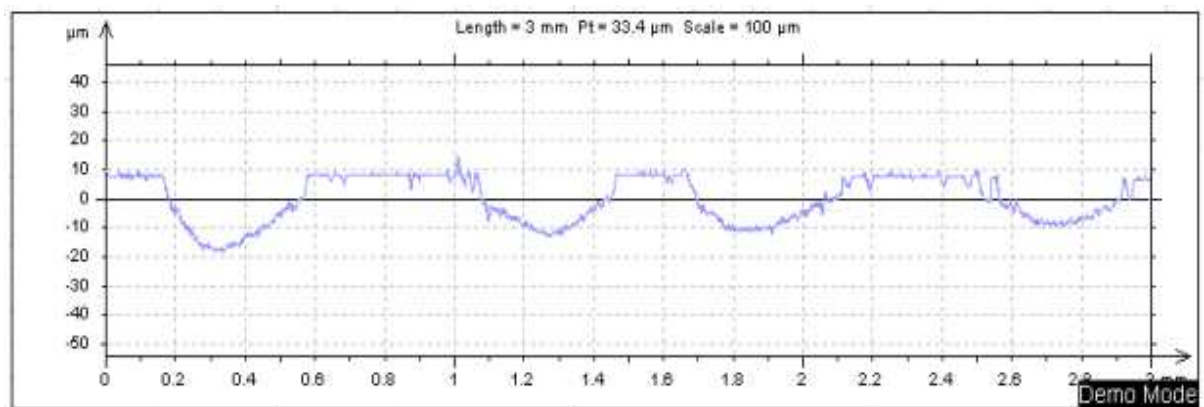


Figura 5.17 – Perfil interferométrico da textura obtida em padrão “V”.

Os resultados mostram que a texturização eletroquímica é capaz de transferir padrões de texturas com morfologias variadas e de maneira bastante simples. Como já mencionado anteriormente, a dificuldade da metodologia proposta está apenas na confecção do catodo (tampa da ferramenta) que servirá de molde para a transferência de padrões, porém este molde é feito uma única vez e pode ser utilizado inúmeras vezes.

Ponto negativo, observando-se as texturas em traço-ponto e “V”, é possível notar que a técnica não transfere perfeitamente formas que contém quinas. Os cantos ficam

claramente arredondados. Isso ocorre provavelmente devido à distribuição das linhas de corrente, como mostrado na Fig. 2.9 (NOURAEI; ROY, 2008).

5.6 Resultados Tribológicos

Com o intuito de mostrar o efeito tribológico na aplicação de superfícies texturizadas sob regime de lubrificação sólida, foi realizado um teste de deslizamento alternado conforme descrito no item 4.3. A amostra utilizada segue o padrão de pontos regularmente espaçados e é referente às Figs. 5.12 e 5.13.

Durante a realização do ensaio foi gerado um mapa triboscópico com o intuito de avaliar a modificação, se houver, do coeficiente de atrito na região texturizada e não texturizada. A Fig. 5.18 mostra esse mapa triboscópico para o ensaio realizado com amplitude de movimento de 12 milímetros, sendo aproximadamente 6 milímetros (6 mm a 0 mm no gráfico) sobre a área com textura e os outros 6 milímetros (0 mm a – 6 mm no gráfico) com ausência de textura.

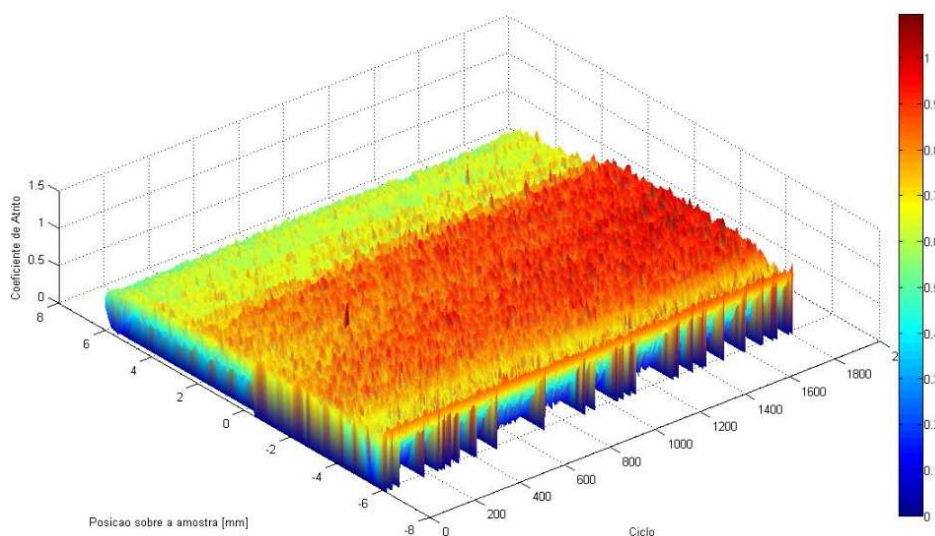


Figura 5.18 – Mapa triboscópico para comparação do coeficiente de atrito.

Através deste mapa triboscópico é possível apontar valores médios aproximados para o coeficiente de atrito nas áreas texturizada e polida. Para a área texturizada da amostra ensaiada o coeficiente é aproximadamente igual a 0,65 e sobre a área polida o coeficiente de atrito seria em torno de 0.85. Isso aparentemente mostra uma redução de 23,5% no atrito. Trabalhos recentes na área mostram taxas de redução semelhantes, em torno de 25%. (Ryk e Etsion, 2006)

A amostra tribologicamente ensaiada foi levada ao microscópio eletrônico de varredura onde foram extraídas as micrografias mostradas na Fig. 5.19.

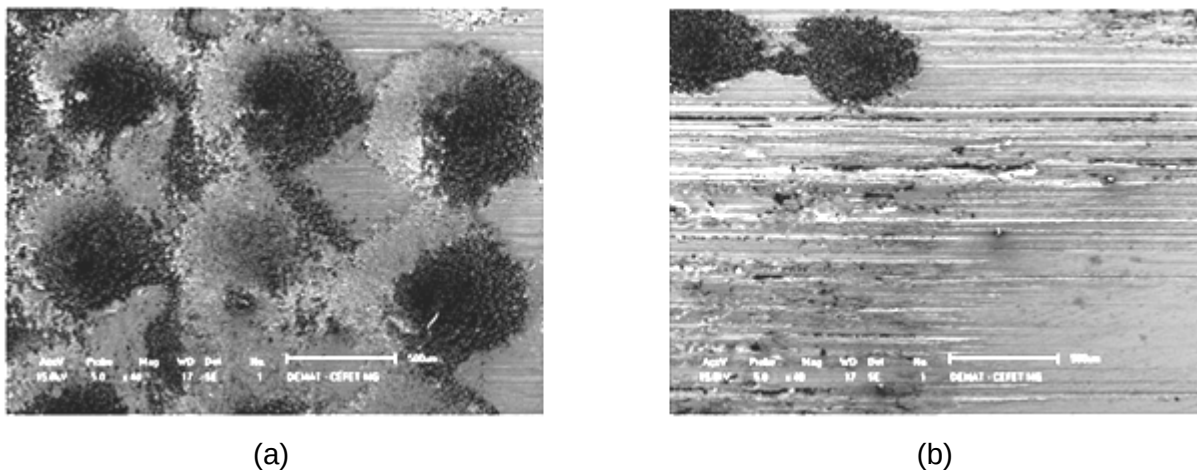


Figura 5.19 – Micrografia da amostra ensaiada tribologicamente: (a) região texturizada e (b) região não texturizada.

No mapa gerado (Fig. 5.18), é possível verificar a redução do coeficiente de atrito na área com aplicação de textura (posição sobre a amostra de 0 a +6 mm) em relação à região não texturizada (posição sobre a amostra de 0 a -6 mm). As cores mais intensas são relacionadas aos maiores valores de coeficiente de atrito, conforme mostrado na barra lateral da figura.

As micrografias mostram o desgaste ocorrido na superfície da amostra após o ensaio de deslizamento alternado sobre regime lubrificado. Na Fig. 5.18 (a), onde há a área texturizada, é possível observar algumas linhas suaves no intermédio entre os bolsos. Já na Fig. 5.18 (b), que mostra uma região sem textura e vizinha à região texturizada, as linhas de desgaste são mais intensas e há indícios de arrancamento de material. É evidente a redução do desgaste nas áreas texturizadas quando comparado com regiões sem textura. Sugere-se que os bolsos que compõem as texturas funcionaram como reservatório para o lubrificante sólido utilizado durante os ensaios (MoS_2), de forma a fornecer lubrificante sólido no contato deslizante durante o ensaio, reduzindo-se o contato metal-metal e assim reduzindo o atrito entre as superfícies e o seu desgaste.

O objetivo destes ensaios preliminares foi somente mostrar que há uma melhora significativa no desempenho tribológico sob lubrificação sólida de superfícies texturizadas, por meio da técnica proposta neste trabalho. Sugere-se que trabalhos futuros investiguem de forma sistemática o efeito da texturização eletroquímica sobre o comportamento tribológico de superfícies deslizantes.

Alguns autores também mostraram a redução de atrito utilizando superfícies texturizadas, porém utilizando outras técnicas de texturização e outras condições de testes tribológicos. (DE MELLO et al., 2007) (RAPOPORT et al., 2009) (CHOUQUET et al., 2010) Outros autores inclusive apresentaram valores para a redução do atrito quando comparado com superfícies não texturizadas, como 25 % e 40 %. (RYK; ETSION, 2006) (RAPOPORT et al., 2008)

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia alternativa para a texturização de superfícies baseada nos princípios da usinagem eletroquímica. Para viabilizar a aplicação da técnica foram projetados alguns sistemas, como um circuito eletrônico para o fornecimento de corrente pulsada, um sistema de fluxo de eletrólito e uma célula de microtexturização eletroquímica, além do desenvolvimento de uma metodologia para a confecção da ferramenta de texturização e seu isolamento.

O trabalho mostra estudos e resultados que apontam a técnica eletroquímica sem mascaramento como viável para aplicação industrial imediata em microtexturização de superfícies.

Ensaio de texturização utilizando a metodologia desenvolvida identificaram o efeito de vários parâmetros, em especial o distanciamento entre ferramenta e peça (distanciamento entre eletrodos), a voltagem aplicada, o tempo de texturização e a geometria do padrão a ser transferido.

Quanto ao efeito do distanciamento entre os eletrodos, concluiu-se que:

- Um distanciamento entre eletrodos de 500 μm foi excessivo e, portanto não permitiu a transferência do padrão da ferramenta para a peça durante a microtexturização eletroquímica.
- A diminuição do distanciamento entre a peça e a tampa da ferramenta leva a um melhor acabamento e a um aumento da profundidade dos bolsos obtidos.
- O distanciamento entre eletrodos para promover uma boa transferência de padrões deve ser o mínimo possível, suficiente apenas para permitir um fluxo adequado de eletrólito. Neste trabalho, um valor de 100 μm se mostrou adequado.

Quanto ao efeito da tensão aplicada sobre a célula, concluiu-se que:

- Uma tensão de apenas 10 V aplicada sobre a célula já é capaz de transferir o padrão de textura. Porém, uma tensão baixa acaba por promover uma densidade de corrente também baixa.
- Tensões um pouco maiores se mostraram mais adequadas para um bom acabamento da peça texturizada. Neste trabalho, o valor de tensão que levou aos melhores resultados foi o de 30 V.
- A tensão aplicada sobre a célula mostrou um efeito bastante discreto sobre o diâmetro dos bolsos.

Quanto ao efeito do tempo total de usinagem, concluiu-se que:

- Um tempo total de usinagem bastante curto, 10 s, já foi suficiente para se obter uma textura superficial definida. Porém tempos entre 20s e 60s promoveram um melhor acabamento da superfície e do interior dos bolsos.
- A aplicação de uma duração de teste superior a 90s durante a texturização eletroquímica se mostrou inadequada, devido provavelmente ao acúmulo de produtos de corrosão e à passivação das áreas usinadas, o que leva a um aumento da queda ôhmica (resistência), diminuindo a corrente que passa pela célula.

Quanto ao efeito morfologia do padrão a ser transferido da ferramenta para a peça, concluiu-se que:

- A confecção de padrões com morfologia variadas foi claramente possível de ser realizada por meio da texturização eletroquímica. Foram obtidos padrões de textura contendo: (i) bolsos circulares, (ii) canais interrompidos e bolsos circulares, numa configuração traço-ponto e (iii) canais interrompidos com formato em “V”.
- As extremidades dos canais sempre tenderam a ficar arredondadas devido à distribuição das linhas de corrente durante a dissolução.

O comportamento tribológico de uma superfície texturizada com bolsos circulares foi avaliada através de um ensaio de deslizamento alternado sob lubrificação sólida com MoS_2 , concluindo-se que:

- Houve uma clara redução do atrito e uma diminuição do desgaste da superfície texturizada quando comparado com uma superfície lisa.
- Sugere-se que os bolsos que compõem as texturas funcionaram como reservatório para o lubrificante sólido.

O trabalho desenvolvido alcançou os objetivos propostos de implementar e aperfeiçoar uma metodologia de texturização eletroquímica. Porém, acredita-se que a continuidade do desenvolvimento deste trabalho possa contribuir ainda mais para uma implementação industrial da método desenvolvida e para a sua aplicação na melhora da performance tribológica de superfícies deslizantes lubrificadas. Como principais possibilidades de continuidade futura do trabalho sugerem-se:

- Texturizar outros materiais condutores além do aço carbono.
- Utilização de outras técnicas para a confecção dos padrões na tampa da ferramenta de forma a se obter furações com dimensões menores que 200 μm . Em especial, sugere-se a microfuração por laser.
- Utilização de técnicas de furação da ferramenta que permitam outros padrões geométricos além dos obtidos com este trabalho.
- Investigação de uma técnica de microfuração da ferramenta capaz de perfurar a camada metálica e a camada isolante da tampa da ferramenta em uma só passada. Ao mesmo tempo essa técnica dever oferecer alta precisão.
- Investigar materiais para compor a camada isolante que não conduzam corrente elétrica e ao mesmo tempo forneçam uma camada com espessura de unidades ou dezenas de microns, resistência à oxidação e resistência mecânica.
- Conduzir uma ampla avaliação do comportamento tribológico das superfícies texturizadas produzidas. No caso de contatos sob lubrificação sólida, sugere-se em particular o levantamento do efeito da texturização sobre o tempo de vida da superfície antes que a lubrificação sólida falhe, uma vez que acredita-se que a textura contribua significativamente para armazenar lubrificante sólido.
- Conduzir uma ampla avaliação do comportamento tribológico das superfícies produzidas sob condições de lubrificação líquida.
- Avaliar o efeito da morfologia do padrão de texturização produzido no comportamento tribológico da superfície.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Altena, H. S. J. Precision ECM by process characteristics modelling. Glasgow Caledonian University: 155. 2000.
- Aspinwall, D. K. W., M. L. H.; Stout, K. J. ; Goh, T. H. A.; Zhao, F. L.; El-Menshawy, M. F. Electrical Discharge Texturing. Journal Mach. Tools Manufact: 183-193. 1992.
- Basnyat, P.; Luster, B.; Muratore, C.; Voevodin, A.A.;Haasch, R.; Zakeri, R.; Kohli P.; Aouadi, S.M. Surface Texturing for Adaptive Solid Subrication. Surface & Coatings Technology. 73 - 79. 2008.
- Becker, E. P.; Ludema, K. C. A Qualitative Empirical Model of Cylinder Bore Wear. Wear 225-229: 387-404. 1999.
- Benedict, G. F. Nontraditional Manufacturing Processes-Electrochemical Machining. New York and Basel. 1987.
- Bhattacharyya, B.; Malapati, M.; Munda, J. Experimental study on electrochemical micromachining. Jornal of Materials Processing Technology: 485 - 492. 2005.
- Blatter, A.; Maillat, M.; Pimenov, S. M.; Shafeev, G. A.; Simakin, A. V.; Loubnin, E. N. Lubricated Sliding Performance of Laser-Patterned Sapphire. Wear 232(2): 226-230. 1999.
- Brizmer, V.; Kligerman, Y.; et al. A laser surface textured parallel thrust bearing. Tribology Transactions 46(3): 397-403. 2003.
- Bruzzzone, A. A. G.; Costa, H.L. Advances in Engineered Surfaces for Functional Performance. Elsevier Editorial System(tm) for CIRP Annals. 2008.
- Choi, K. H.; Meijer, J.; Masuzawa, T.; Kim, D. Excimer Laser Machining for 3d Microstructure. Journal of Materials Processing Technology 149: 561-566. 2004.
- Chouquet, C.; Gavillet J.; Ducros C.; Sanchette F.; Effect of DLC surface texturing on friction an wear during lubricated sliding. Material Chemistry and Physics. 2010.

- Cochran, D. A. Apparatus and method for electrochemically etching grooves in an outer surface of a shaft. USPTO. United States, Seagate Technology. 2001.
- Coelho, R. T.; Arai, R. Processos de Usinagem para micro-componentes. USP. 2006.
- Costa, H. L. Modification of Surface Topography: Manufacturing Methods and Applications. Engineering Department. Cambridge, University of Cambridge: 240. 2005.
- Costa, H. L.; Hutchings I. M. The Behaviour of Textured Steel Surfaces under Plastic Deformation. Journal of Materials Processing Technology. 2006a.
- Costa, H. L.; Hutchings, I.M. Hydrodynamic lubrication of textured steel surfaces under reciprocating sliding conditions. Tribology International: 40:1227-1238. 2008.
- Costa, H. L.; Hutchings, I. M. Development of a Maskless Electrochemical Texturing Method. 2009.
- Costa, H.L; Parreira, J.P. et al. Alternative Methods for Surface Texturing. TriboBr-2010. 2010.
- Datta, M. L. Electrochemical Machining under pulsed current conditions. Electrochimica Acta: 899-907. 1981.
- De Barr, A. E. ; D. A. O. Electrochemical Machining. 1968.
- De Mello, J. D. B.; Costa, H. L. et al. Friction and wear behaviour of steam-oxidized sintered iron components coated with manganese phosphate. Wear 263: 842-848. 2007.
- Defourny, J.; Jodogne, P. Lasertex, a Concept of Roughness - from the Rolling-Mill to the Coated Sheet. Revue De Metallurgie-Cahiers D Informations Techniques 89(5): 439-446. 1992.
- Dumitru, G.; Romano, V. ; Weber, H. P.; Haefke, H.; Gerbig, Y.; Pfluger, E. Laser Microstructuring of Steel Surfaces for Tribological Applications. Appl. Phys. A 70: 485-487. 2000.
- ENGEMAQ. Manual de instalação, operação e manutenção da máquina EDM 440 NC. Agie Charmilles Ltda, 95p. 2002.
- Etsion, I. State of the art in laser surface texturing. Journal of Tribology-Transactions of the Asme 127(1): 248-253. 2005.
- Etsion I., S. E. Improving fuel efficiency with laser surface textured piston rings. Tribology International: 542– 547. 2009.
- Fuller, J. E. Electrical Discharge Machining, Metals Handbook. 9.ed. v.16, p.557-564. 1989.
- Gemelli, E. (2001). Corrosão de Materiais Metálicos e sua caracterização.
- Gentil, V. Corrosão. 4ªed. Rio de janeiro: Editora LTC. 2007.
- Gentil, V. Corrosão 5ªed. Rio de janeiro: Editora LTC. 2007.

- Horng, J. H.; Lin, J. F.; Lee. The Effect of Surface Irregularities on the Tribological Behaviour of Steel Rollers under Rolling-Sliding Contact. *ASME Journal of Tribology* 116(April): 209-218. 1994.
- Jeng, Y. R. Impact of Plateaued Surfaces on Tribological Performance. *Tribology Transactions* 39(2): 354-361. 1996.
- Kozak, J.; Rajurkar, K. P.; Ross, R. F. Computer-Simulation of Pulse Electrochemical Machining (Pecm). *Journal of Materials Processing Technology* 28(1-2): 149-157. 1991.
- Lanna, M. A. Desenvolvimento de um protótipo de usinagem eletroquímica. UFMG: 7-38. 1999.
- Leiming Gao, P.; Ian D.; Fisher, J.; Jin, Z. Effect of surface texturing on the elastohydrodynamic lubrication analysis of metal-on-metal hip implants. *Tribology International*. 2010.
- Li L. D. C.; Atkinson, J., Giedl-Wagner, R.; Helml, H. J. Sequential laser and EDM micro-drilling for next generation fuel injection nozzle manufacture. *Annals of the CIRP* 55/1:179 - 182. 2006.
- Macleod, D. J.; Kloeppel, K. D.; Clark, W. R.; Addy, R. A. Electrode Design for Electrochemical Machining of Grooves. USPTO. United States. 2003.
- Madou, M. J. Fundamentals of Microfabrication. Florida, CRC Press. 2002.
- Malaquias, E. Contribuição ao Estudo da Usinagem Eletroquímica do Aço Rápido ABNT M2. Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia. 2000.
- Marconato, J.C.; Bidóia, E. D. Potencial de eletrodo: Uma media arbitrária e Relativa. *Quimica nova escola* N°17, Maio 2003.
- McGeough, J. A. Principles of Electrochemical Machining. London: Chapman and Hall (1th): 255. 1974.
- McGeough, J. A. Advanced Methods of Machining. London: Chapman and Hall. 1988.
- Michel, B.; Bernard, A.; Bietsche, A.; Delamarche, E.; Geissler, M.; Juncker, D.; Kind, H.; Renault, J. P.; Rothuizen, H. Printing Meets Lithography: Soft Approaches to High-Resolution Patterning. *IBM J. Res. & Dev.* 45(3): 697-719. 2001.
- Nelson, J. B.; Schwartz, D.T.; Electrochemical printing: in situ characterization using an electrochemical quartz crystal microbalance *Journal of Micromechanics and Microengineering* 15 (12): 2479-2484. 2005.
- Nouraei, S.; Roy, S. Electrochemical process for micropattern transfer without photolithography: A modeling analysis. *Journal of the Electrochemical Society*: D97-D103. 2008.

- Nunes, L. P.; L., A.C.O. Pintura industrial na proteção anticorrosiva. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos. 1990.
- Pettersson, U.; Jacobson, S. Influence of Surface Texture on Boundary Lubricated Sliding Contacts. *Tribology International* 36: 857-864. 2003.
- Poole Jr., C. P. a. F. J. O. Introduction to Nanotechnology. 2003.
- Potter, E. C. Electrochemistry, Principles and Applications. London, Cleaver-Hume. 1956.
- Priest, M. T., C. M Automobile engine tribology - approaching the surface. *Wear*: 241(2): pp. 193-203. 2000.
- Rapoport, L.; Moshkovich, A. et al. Friction and wear of MoS₂ films on laser textured steel surfaces. *Surface & Coatings Technology* 202: 3332–3340. 2007.
- Rapoport, L.; Moshkovich, A., et al. Wear life and adhesion of solid lubricant films on laser-textured steel surfaces. *Wear* 267(5-8): 1203-1207. 2009.
- Roy, S. Fabrication of micro-and nano-structured materials using mask-less processes. *Journal of Physics D: Applied Physics*: R413 - R426. 2007.
- Ryk , G.; Etsion I. Testing piston rings with partial laser surface texturing for friction reduction. *Wear* 261: 792–796. 2006.
- Ryk , G.; Kligerman Y.; Etsion I. Experimental investigation of laser surface texturing for reciprocating automotive components. *Tribol. Trans* 45:444–449. 2002.
- Schonenberger, I.; Roy, S. Microscale pattern transfer without photolithography of substrates. *Electrochimica Acta*: 809-819. 2005.
- Shuangqing Qian, D. Z.; Ningsong Q.; Hansong Li; Dongsheng Y. Generating micro-dimples array on the hard chrome-coated surface by modified through mask electrochemical micromachining. *Int J Adv Manuf Technol*: 47:1121–1127. 2010.
- Vilhena, L. M.; Sedlac̆ek M.; Podgornik B.; Viz̆intin J.; Babnik A.; Moz̆ina J. Surface texturing by pulsed Nd:YAG laser. *Tribology International* 42 1496–1504. 2009.
- Vishnitsky, A. Electrochemical rifling of gun barrels. USPTO. United States, Cation Corporation. 1987.
- Volchok, A.; Halperin, G.; Etsion, I. The Effect of Surface Regular Microtopography on Fretting Life. *Wear* 253: 509-515. 2002.
- Wakuda, M.; Yamauchib, Y.; Kanzakib, S.; Yasuda, Y. Effect of Surface Texturing on Friction Reduction between Ceramic and Steel Materials under Lubricated Sliding Contact. *Wear* 254(3-4): 356-363. 2003.
- Wan, Y., Xiong, D. The effect of laser surface texturing on frictional performance of face seal. *Journal of materials processing technology* 96–100. 2008.
- Weller, E. S. Nontraditional Machining Processes, SME, 1984.
- Wolyneć, S. Técnicas Eletroquímicas em Corrosão, Edusp. 2003.

- Zhou, C.; Jennings, T. E.; J. Sun, J.; Gebhart, L. E.; Renz, R. P. Electrochemical Machining Using Modulated Reverse Electric Fields. USPTO. USA. 1998.
- Zhu, D. N. S. Q.; Li, H. S., Zeng, Y. B; Zeng, D. L.; Li, S.; Qian, Q. Electrochemical Micromachining of microstructures of micro hole and dimple array. Manufacturing Technology: 177-180. 2009.
- Zimmer, K.; Braun, A.; Bigl, F. Combination of Different Processing Methods for the Fabrication of 3d Polymer Structures by Excimer Laser Machining. Applied Surface Science 154-155: 601-604. 2000.