

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

GUSTAVO HENRIQUE GUIMARÃES SILVA

**MAPEAMENTO DO EFEITO DAS VARIÁVEIS DE TENSÃO E TEMPO
DE TRABALHO NO PROCESSO DE USINAGEM ELETROQUÍMICA
DA LIGA TI-6AL-4V**

UBERLÂNDIA

2018

GUSTAVO HENRIQUE GUIMARÃES SILVA

**MAPEAMENTO DO EFEITO DAS VARIÁVEIS DE TENSÃO E TEMPO
DE TRABALHO NO PROCESSO DE USINAGEM ELETROQUÍMICA
DA LIGA TI-6AL-4V**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Bacharelado
em Engenharia Mecânica da Faculdade
de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia,
como requisito parcial para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia
Mecânica.**

UBERLÂNDIA

2018

GUSTAVO HENRIQUE GUIMARÃES SILVA

**MAPEAMENTO DO EFEITO DAS VARIÁVEIS DE TENSÃO E TEMPO
DE TRABALHO NO PROCESSO DE USINAGEM ELETROQUÍMICA
DA LIGA TI-6AL-4V**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Aprovado em 21 de março de 2018.

BANCA EXAMINADORA

PROF. Alberto Arnaldo Raslan
FACULDADE DE ENGENHARIA
MECÂNICA
ORIENTADOR

PROF.
FACULDADE DE ENGENHARIA
MECÂNICA

PROF.
FACULDADE DE ENGENHARIA
MECÂNICA

A minha família, razão de minha existência. A todos que colaboraram com a construção deste trabalho diretamente ou indiretamente. A Deus.

Agradeço ao meu orientador, Professor Alberto Arnaldo Raslan, pelas orientações durante o trabalho, ao Mestrando Túlio pelo auxílio durante os experimentos, ao técnico do laboratório Multiusuário da UFU, Magaiver, pelas imagens e medições realizadas com o MEV e a todos que contribuíram diretamente ou indiretamente com a construção deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta conceitos do processo de usinagem eletroquímica (*Electrochemical Machining - ECM*) e analisa a viabilidade da aplicação do mesmo em ligas de Titânio. Para validação das informações apresentadas foram realizados testes práticos de usinagem onde as características do processo apresentadas pela bibliografia base foram postas à prova. Os ensaios de usinagem foram realizados em uma célula eletrolítica, onde foram variados parâmetros fundamentais do processo como diferença de potencial e tempo de usinagem, obtendo-se resultados que comprovaram a aplicabilidade e eficácia do processo para a liga de Titânio analisada.

Palavras-Chaves: Usinagem eletroquímica; usinagem não convencional; ECM; Usinagem de Ligas de Titânio.

ABSTRACT

This paper presents concepts of the Electrochemical Machining process and evaluates its feasibility in Titanium Alloys. For validation of the presented information's, machining experiments were carried out to confront the bibliography. The machining tests were done in an electrolytic cell, where parameters settings like electric voltage and machining time could be changed, getting results who attested the process effectiveness and applicability on the analyzed Titanium Alloy.

Keywords: Electrochemical Machining; non-conventional machining; Titanium Alloys machining.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Propriedades mecânicas da liga Ti-6Al-4V.	18
Figura 2: Propriedades físicas da liga Ti-6Al-4V.	18
Figura 3: Fonte, modulador de sinais e pulsador de sinais utilizados.	21
Figura 4: Desenho técnico da bomba utilizada.	22
Figura 5: Quadro com os resultados obtidos com cada combinação de parâmetros.	23
Figura 6: Topografia obtida na primeira amostra com 25V e 90s.	35
Figura 7: Topografia obtida na segunda amostra com 25V e 90s.	36
Figura 8: Imagem inclinada da primeira amostra.	37
Figura 9: Imagem inclinada da segunda amostra.	38
Figura 10: Imagem inclinada da terceira amostra.	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados obtidos nas 3 amostras analisadas.....	37
---	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1. ELETRÓLISE	15
2.2. CÉLULA ELETROLÍTICA	15
2.3. A IMPORTÂNCIA DO ELETRÓLITO	16
2.4. LIGAS DE TITÂNIO	17
2.4. BIOMATERIAIS EM IMPLANTODONTIA	19
3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	19
3.1. RECURSOS REQUERIDOS	19
4. RESULTADOS.....	23
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	40
7. REFERÊNCIAS	42

1. INTRODUÇÃO

Durante o último século os materiais utilizados em aplicações de engenharia tiveram um avanço enorme devido às necessidades de boas propriedades mecânicas, térmicas, elétricas e químicas nas mais variadas aplicações, entretanto, o desenvolvimento de novos materiais implica no desenvolvimento de novos processos de fabricação para os mesmos.

Os pesquisadores buscam sempre o desenvolvimento de materiais de maior dureza, resistência mecânica, à corrosão, à fadiga e uma série de outras características. O resultado disso é o surgimento de materiais mais frágeis, desafiando os fabricantes de máquinas e equipamentos de usinagem, pois a lista dos processos que seriam aplicáveis para a usinagem de tais materiais começa a ficar cada mais restrita, uma vez que a usinagem por remoção mecânica de material se torna muito mais difícil. Esta dificuldade de atender à demanda pela usinagem convencional abre precedentes para a aplicação de processos de usinagem não convencionais. Estes processos são denominados desta maneira pois a energia dispendida será aplicada em sua forma mais direta, sem a necessidade, na grande maioria das vezes, de uma ferramenta de corte (Rodríguez, Rubio, Abrão, 2001).

O processo de Usinagem Eletroquímica (ECM - Electrochemical machining) foi desenvolvido inicialmente para a usinagem destas ligas metálicas de alta resistência mecânica, embora qualquer metal possa ser usinado por este processo. A usinagem eletroquímica é um processo eletrolítico e sua base é o fenômeno da eletrólise, cujas leis foram estabelecidas por Faraday em 1833.

No processo ECM a remoção de metal é obtida através da dissolução eletroquímica de uma peça com polaridade negativa, que por sua vez é parte de uma célula eletrolítica. Metais de qualquer dureza podem ser usinados usando o método ECM e a taxa de usinagem não depende de sua dureza. O eletrodo usado no processo (ferramenta usada como modelo) não se desgasta e, portanto, metais macios podem ser usados como ferramentas para usinar peças de dureza muito superiores a ela, ao contrário dos métodos convencionais de usinagem.

1.2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

O objetivo geral deste trabalho é a realização de uma pesquisa detalhada sobre a aplicação do processo de Usinagem Eletroquímica (ECM) em ligas de Ti-6Al-4V, no que diz respeito ao mecanismo de usinagem, funcionamento dos equipamento constituintes do processo, características específicas e aplicações na microusinagem de implantes odontológicos, além de realizar tarefas secundárias, como:

- Montagem de uma célula eletrolítica na qual seja possível a aplicação prática do processo, de modo a validar os estudos realizados e os dados obtidos da bibliografia através da usinagem de corpos de prova;
- Usinagem de amostras de Ti-6Al-4V, para posterior análise do efeito da variação dos parâmetros de usinagem sobre as características da superfície usinada.

Apesar das inúmeras vantagens apresentadas pelo processo de usinagem eletroquímica, este método é ainda muito pouco aplicado na indústria nacional, se comparado com alguns métodos não convencionais como a eletroerosão, por exemplo. Isto talvez se deva ao fato de que a ECM não está tão disseminada nos meios acadêmicos como outros processos de usinagem (convencional ou não).

As pesquisas sobre o processo de usinagem eletroquímica para fins acadêmicos, ainda que demonstrem apenas o princípio de funcionamento, podem atuar na divulgação do processo ao demonstrar suas vantagens e limitações quanto à usinagem convencional. Criando assim um campo de pesquisa no qual possam surgir métodos de aplicação e desenvolvimento de processos e equipamento capazes de atuar em escala industrial.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

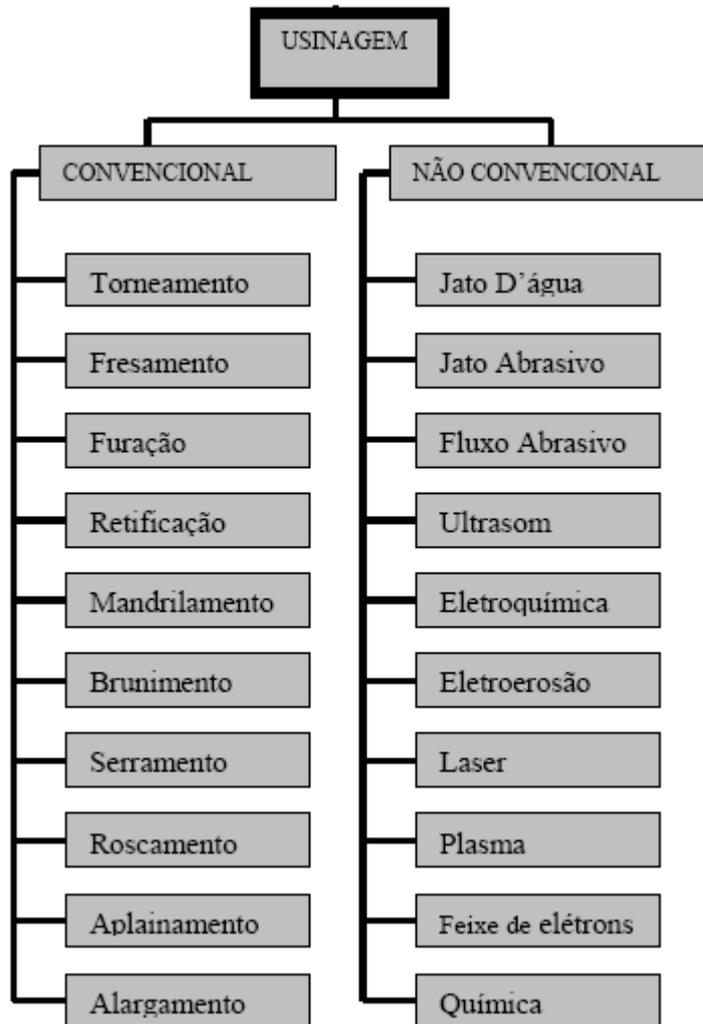
Conforme relatam estudos da University of Nebraska–Lincoln, os primeiros desenvolvimentos significativos da tecnologia ECM ocorreram nos anos 1950, quando a Anocut Engineering Company estabeleceu a técnica de usinagem de metal anódico como uma técnica de usinagem comercialmente possível. A partir de 1990 o processo ECM já surge na indústria como meio de usinagem utilizado em diversos setores da indústria, como por exemplo o setor automotivo, petrolífero, engenharia biomédica e empresas aeroespaciais, que atualmente é a principal aplicação do processo.

Segundo Kozak (1992), as características principais do processo de usinagem eletroquímica são:

- A taxa de remoção de material não depende da dureza ou das propriedades mecânicas do metal a ser usinado porque o material é removido por dissolução anódica e não por meios mecânicos. Materiais eletricamente condutivos podem ser usinados a taxas de até 84 mm³/minuto.
- A precisão do processo ECM é dependente de forma e dimensões da peça usinada, mas estará aproximadamente entre 0,05 mm a 0,3 mm no uso de corrente contínua e de 0,02 mm a 0,05 mm no uso de corrente pulsante;
- A rugosidade superficial obtida é decrescente de acordo com a taxa de remoção de material. Os resultados alcançados ficam aproximadamente entre 100 e 250 µm;
- A usinagem eletroquímica não gera tensões residuais no material da peça;
- O consumo de energia do processo ECM é relativamente elevado e fica entre 200 a 600 J/mm³, dependendo da tensão e das propriedades eletroquímicas do material da peça usinada;
- Eliminação da deflexão da ferramenta nos casos em que características da peça requerem agudos ângulos de abordagem da ferramenta, ou em situações que exigem elevadas razões comprimento/diâmetro de cortes.

Isso ocorre porque na ECM a ferramenta não entra em contato físico direto com a peça e, como resultado, não há forças que podem retirar a ferramenta da posição a ser usinada.

Figura 1: Quadro demonstrativo dos diferentes tipos de usinagem.



Fonte: José Cássio Tavares – Retifica, UNIP-SP (2017)

2.1. ELETRÓLISE

Segundo SARDELLA (1999), a eletrólise é uma reação não espontânea de decomposição de uma substância, por meio de corrente elétrica. A eletrólise é um processo eletroquímico, caracterizado pela ocorrência de reações de oxirredução em uma solução condutora quando se estabelece uma diferença de potencial elétrico entre dois eletrodos mergulhados nessa solução.

2.2. CÉLULA ELETROLÍTICA

A célula eletrolítica, para o estudo do processo ECM, pode ser definida como o meio no qual ocorrerão as reações de oxidação e redução dos elementos químicos. Esta célula será composta de um sistema de eletrodos submersos em um eletrólito e abastecidos eletricamente por uma fonte externa.

2.3. A IMPORTÂNCIA DO ELETRÓLITO

Na usinagem eletroquímica o objetivo fundamental do eletrólito é completar o circuito elétrico, permitindo a passagem de corrente entre o cátodo e o ânodo, desta forma, quanto melhor condutor for o eletrólito mais efetivo será o processo. Concomitantemente, o eletrólito também desempenha funções de arrefecimento e limpeza da região de usinagem. PANDEY E SHAN (1985) atribuem ao eletrólito três funções fundamentais:

- Completar o circuito elétrico entre ânodo e cátodo;
- Promover a remoção de resíduos oriundos do processo para fora da região de usinagem;
- Dissipar o calor gerado pelas reações químicas e descargas elétricas ocorridas.

Devido a seu baixo custo, boa condutividade elétrica e o fato de ser estável em uma ampla faixa de pH (de 4 a 13), o cloreto de sódio é o eletrólito mais utilizado na usinagem por descarga eletroquímica. Entretanto, este eletrólito apresenta algumas desvantagens, como o fato de ser altamente corrosivo e gerar grandes quantidade de borra durante o processo, além da sua condutividade elétrica variar com a temperatura (McGeough, 1988).

Outro eletrólito muito utilizado é o nitrato de sódio. A grande vantagem do nitrato de sódio é o fato de ser menos corrosivo, porém, é mais caro que o cloreto de sódio e, em muitos casos, gera uma camada apassivadora na superfície da peça que reduz a eficiência de passagem de corrente elétrica. Sua ação eletroquímica é menor do que a do cloreto de sódio, entretanto, sua utilização produz superfícies com melhor acabamento. Isso se deve à maior resistividade elétrica que a solução de nitrato de sódio apresenta em relação ao cloreto de sódio para os mesmos valores de concentração.

A concentração do eletrólito é um fator de extrema importância, pois dela depende a eficiência da condução da corrente elétrica do cátodo para o ânodo. Um eletrólito com concentração maior oferece menor resistência à condução de corrente elétrica, porém, um

eletrólito com concentração muito alta pode cristalizar sais fora da solução e como a distância entre a ferramenta e a peça é muito pequena, estes sais podem obstruir o fluxo de eletrólito na área a ser usinada.

De acordo com Barr e Oliver (1968), para eletrólitos a base de nitrato de sódio a resistência elétrica diminui com o aumento da concentração até valores de aproximadamente 200 g/dm³. Acima desse valor a resistividade elétrica volta a aumentar.

Segundo Pandey e Shan (1985), um aumento da temperatura do eletrólito pode causar uma redução no valor da tensão para uma mesma densidade de corrente. Além disso, a solubilidade dos produtos da reação também aumenta com a temperatura. O aquecimento do eletrólito depende da velocidade com que o mesmo passa entre a peça e ferramenta, isto é, quanto menor a velocidade do eletrólito, maior será a elevação de temperatura do mesmo.

Velocidades muito baixas de eletrólito podem não retirar os resíduos do processo, causando seu acúmulo entre a peça e a ferramenta, o que pode provocar curto-circuito, danificando tanto a peça como a ferramenta (Clark e McGeough, 1977), entretanto, velocidades muito elevadas podem gerar cavitação, o que também não é desejável.

2.4. LIGAS DE TITÂNIO

A liga de Titânio mais encontrada e usada é a Ti-6Al-4V (6% de Alumínio e 4% de Vanádio) devido às suas excelentes propriedades mecânicas (CRAIG; POWERS, 2002). Essa condição se deve à formação de duas fases, alfa e beta, à temperatura ambiente, ao contrário do que ocorre com o titânio comercialmente puro. Esta melhoria das propriedades se deve ao fato do alumínio ser um estabilizador da fase alfa e o vanádio um estabilizador da fase beta, fazendo com que a liga apresente, na temperatura ambiente, ambas as fases (PARR; GARDNER; TOTH, 1985).

Inúmeros estudos demonstram o excelente desempenho mecânico desta liga quando comparada ao titânio puro e a ligas experimentais. Em relação ao titânio puro, a liga Ti-6Al-4V apresenta quase o dobro de resistência à tração e da dureza (KIKUCHI et al., 2003; AOKI et al., 2004).

Abaixo tem-se uma figura com as propriedades da liga Ti-6Al-4V (também chamada de ASTM Grau 5) retirada do site da ASM (Aerospace Specification Metals Inc.)

Figura 2: Propriedades mecânicas da liga Ti-6Al-4V.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	<u>4.43 g/cc</u>	0.16 lb/in ³	
Mechanical Properties			
Hardness, Brinell	334	334	Estimated from Rockwell C.
Hardness, Knoop	363	363	Estimated from Rockwell C.
Hardness, Rockwell C	36	36	
Hardness, Vickers	349	349	Estimated from Rockwell C.
Tensile Strength, Ultimate	<u>950 MPa</u>	138000 psi	
Tensile Strength, Yield	<u>880 MPa</u>	128000 psi	
Elongation at Break	<u>14 %</u>	14 %	
Reduction of Area	<u>36 %</u>	36 %	
Modulus of Elasticity	<u>113.8 GPa</u>	16500 ksi	
Compressive Yield Strength	<u>970 MPa</u>	141000 psi	
Notched Tensile Strength	<u>1450 MPa</u>	210000 psi	K _t (stress concentration factor) = 6.7
Ultimate Bearing Strength	<u>1860 MPa</u>	270000 psi	e/D = 2
Bearing Yield Strength	<u>1480 MPa</u>	215000 psi	e/D = 2
Poisson's Ratio	0.342	0.342	
Charpy Impact	<u>17 J</u>	12.5 ft-lb	V-notch
Fatigue Strength	<u>240 MPa</u>	34800 psi	at 1E+7 cycles. K _t (stress concentration factor) = 3.3
Fatigue Strength	<u>510 MPa</u>	74000 psi	Unnotched 10,000,000 Cycles
Fracture Toughness	<u>75 MPa-m^{1/2}</u>	68.3 ksi-in ^{1/2}	
Shear Modulus	<u>44 GPa</u>	6380 ksi	
Shear Strength	<u>550 MPa</u>	79800 psi	Ultimate shear strength

Fonte: ASM (Aerospace Specification Metals Inc. – 2017 – Modificada)

Figura 3: Propriedades físicas da liga Ti-6Al-4V.

Electrical Properties			
Electrical Resistivity	<u>0.000178 ohm-cm</u>	0.000178 ohm-cm	
Magnetic Permeability	1.00005	1.00005	at 1.6kA/m
Magnetic Susceptibility	3.3e-006	3.3e-006	cgs/g
Thermal Properties			
CTE, linear 20°C	<u>8.6 µm/m-°C</u>	4.78 µin/in-°F	20-100°C
CTE, linear 250°C	<u>9.2 µm/m-°C</u>	5.11 µin/in-°F	Average over the range 20-315°C
CTE, linear 500°C	<u>9.7 µm/m-°C</u>	5.39 µin/in-°F	Average over the range 20-650°C
Specific Heat Capacity	<u>0.5263 J/g-°C</u>	0.126 BTU/lb-°F	
Thermal Conductivity	<u>6.7 W/m-K</u>	46.5 BTU-in/hr-ft ² -°F	
Melting Point	1604 - 1660 °C	2920 - 3020 °F	
Solidus	<u>1604 °C</u>	2920 °F	
Liquidus	<u>1660 °C</u>	3020 °F	
Beta Transus	<u>980 °C</u>	1800 °F	

Fonte: ASM (Aerospace Specification Metals Inc. – 2017 – Modificada)

2.4. BIOMATERIAIS EM IMPLANTODONTIA

No ano de 1986, pesquisadores da Sociedade Europeia de Biomateriais elaboraram um documento definindo o conceito de biomaterial como sendo “todo material não-viável usado em aparato médico, desenvolvido para interagir com sistemas biológicos”. Basicamente, existem 4 grupos diferentes de biomateriais: os metais e as ligas metálicas; os cerâmicos; os polímeros sintéticos e, por último, os materiais naturais.

Vários metais e ligas metálicas foram testados ao longo dos anos na elaboração de implantes dentários. Ligas como Cromo-Cobalto-Molibdênio, Ferro-Cromo-Níquel, aço inoxidável entre outras, e metais como ouro, platina e prata foram testados como possíveis alternativas para Implantodontia. Entretanto, em sua maioria, estas ligas apresentavam como resultado a médio-longo prazo grande reabsorção óssea, o que gerou índices de sucesso clínico muito pobres. No grupo dos metais e ligas metálicas, até o presente momento, somente o titânio comercialmente puro e a liga de Titânio-Alumínio-Vanádio (Ti6Al4V) apresentam respaldo científico descrito na literatura odontológica comprovando seu sucesso clínico para uso em implantes odontológicos.

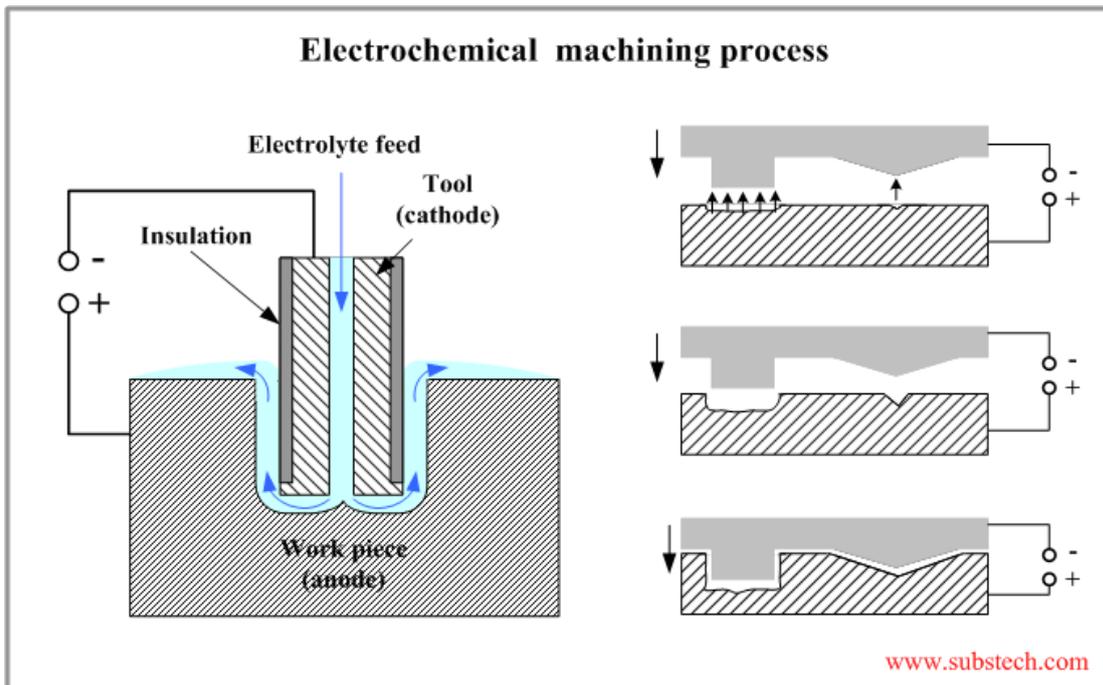
3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1. RECURSOS REQUERIDOS

Para a validação prática dos métodos de usinagem eletroquímica não é necessária essencialmente a utilização de uma máquina específica para este fim, pode-se montar uma célula eletrolítica que reproduza as características essenciais da máquina, na qual os experimentos podem ser executados. Os recursos requeridos são, basicamente:

- Fonte de alimentação capaz de fornecer altos valores de tensão elétrica;
- Sistema de abastecimento de eletrólito;
- Cuba ou tanque de trabalho, de material não condutor;

Figura 4: Imagem demonstrativa do processo de usinagem eletroquímica.

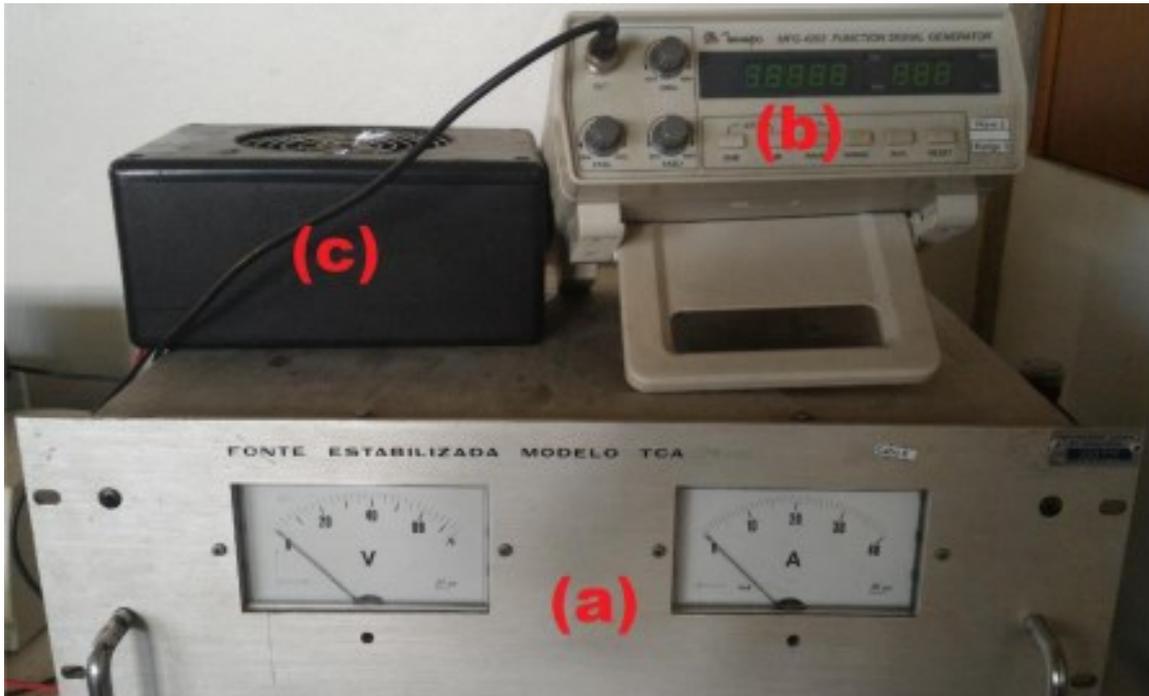


Fonte: Substech (2017)

A fonte de energia, por sua vez, é um dos principais elementos requeridos para o bom funcionamento do sistema pois, segundo Faraday, a massa da substância eletrolisada em qualquer elemento do sistema é diretamente proporcional à quantidade de carga elétrica que atravessa a solução, ou seja, quanto maior for a corrente elétrica que atravessa entre os corpos, maior será a taxa de remoção de material (ou de reações químicas) resultante entre eles.

A revisão bibliográfica realizada indica experimentos e rotinas industriais de trabalho submetidas a correntes de até 40.000 A, necessárias para que se consigam alcançar taxas de usinagem de até 15mm³/min. No entanto, considerando o fato de que os procedimentos de usinagem a serem realizados neste trabalho objetivam basicamente a validação do processo de usinagem eletroquímica e a verificação dos resultados obtidos a partir da alteração de parâmetros controlados do processo, definiu-se pela utilização de uma fonte de energia de menor potência.

Figura 5: Fonte, modulador de sinais e pulsador de sinais utilizados.



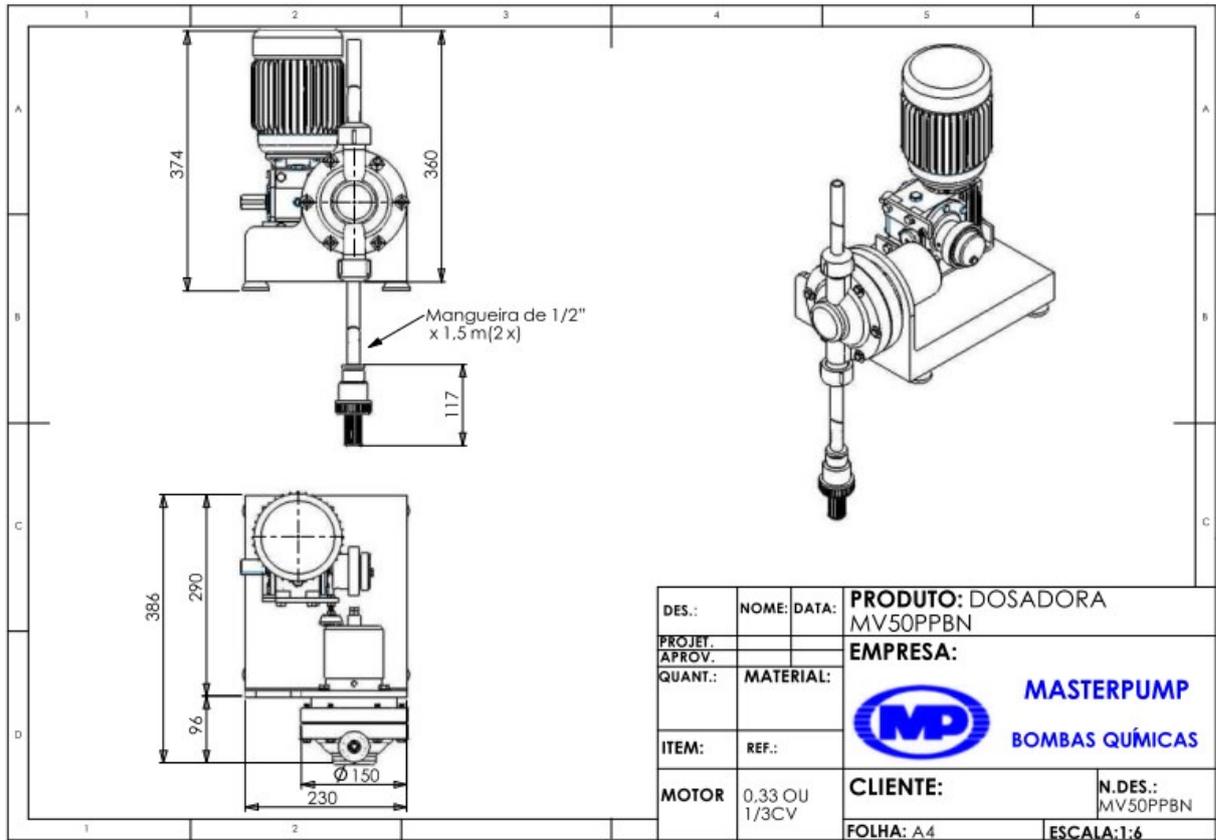
Fonte: Laboratório de Tribologia e Materiais-UFU (2017)

A fonte utilizada foi uma fonte da marca TECTROL™ modelo TCA-75-40 (a), com capacidade de fornecer uma tensão de até 75V e corrente de 40A. Foi utilizado também um modulador de sinal do fabricante MINIPA™ modelo MFG-4202 (b) e um circuito genérico que realiza a pulsação do sinal de tensão (c).

Para completar o circuito elétrico, foi utilizada uma solução de NaCl com concentração média em massa de 20%. O termo adequado é “concentração média” uma vez que, quando a usinagem ocorre, as moléculas de NaCl e H₂O se decompõem, alterando consequentemente a concentração do eletrólito, além de que, com o decorrer do processo, o metal removido da peça também é incorporado à solução.

Para os testes realizados, o sistema que realizava o abastecimento do eletrólito foi constituído por uma bomba dosadora da marca MASTERPUMP™ modelo MV50PPBN com pressão de até 6,0 bar e vazão de 3 a 300l/h. Abaixo, tem-se um desenho esquemático do sistema de abastecimento, contemplando a bomba dosadora e seu respectivo motor elétrico.

Figura 6: Desenho técnico da bomba utilizada.

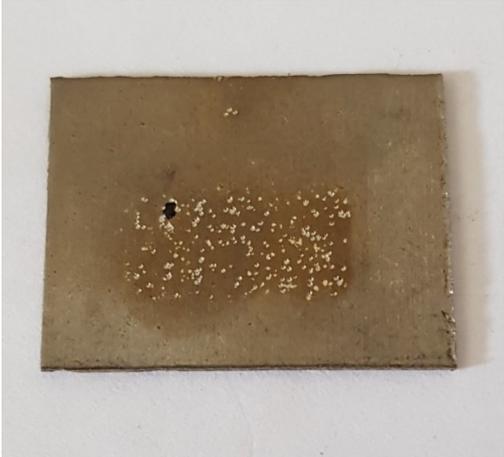


Fonte: MasterPump Bombas Químicas™ (2017)

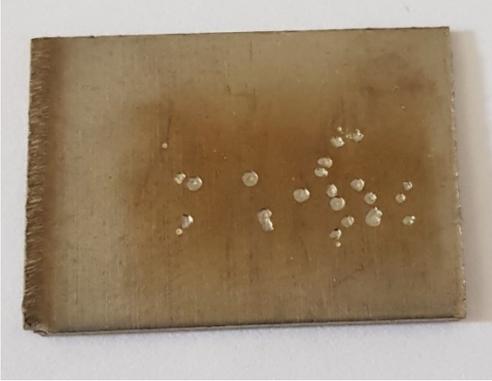
4. RESULTADOS

De modo a verificar a eficiência e a repetibilidade do processo, além de analisar como as variáveis (d.d.p. e tempo de usinagem) influenciam as características da cavidade formada, o quadro abaixo apresenta as cavidades obtidas com cada combinação de parâmetros:

Figura 7: Quadro com os resultados obtidos com cada combinação de parâmetros.

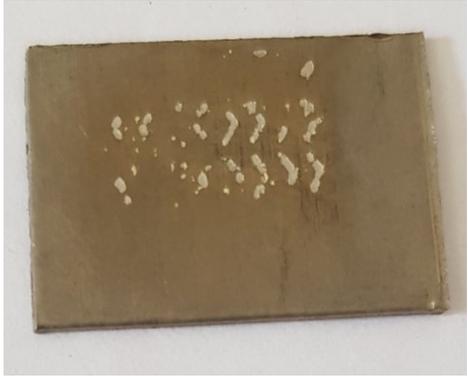
Tensão (V)	Tempo de usinagem (s)	Resultado obtido
15	30	
15	30	

15	30	
15	60	
15	60	

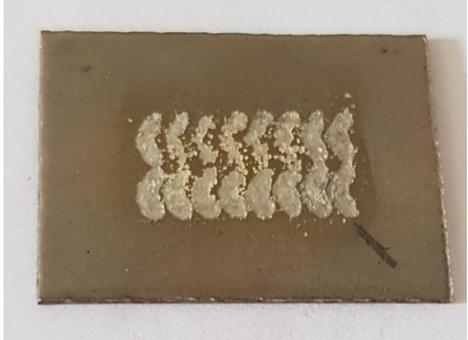
<p>15</p>	<p>60</p>	
<p>15</p>	<p>90</p>	
<p>15</p>	<p>90</p>	

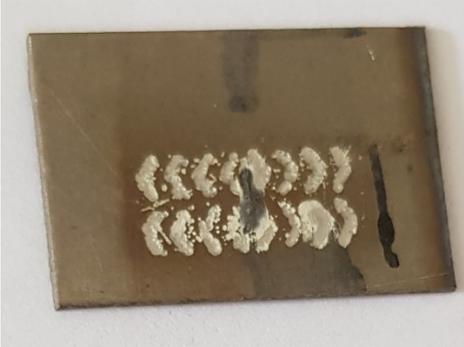
20	30	
20	30	
20	30	

<p>20</p>	<p>60</p>	
<p>20</p>	<p>60</p>	
<p>20</p>	<p>90</p>	

<p>20</p>	<p>90</p>	
<p>20</p>	<p>90</p>	
<p>25</p>	<p>30</p>	

25	30	
25	30	
25	60	

25	60	
25	90	
25	90	

<p>25</p>	<p>90</p>	
<p>30</p>	<p>30</p>	
<p>30</p>	<p>30</p>	

<p>30</p>	<p>60</p>	
<p>30</p>	<p>60</p>	
<p>30</p>	<p>60</p>	

30	90	
30	90	
30	90	

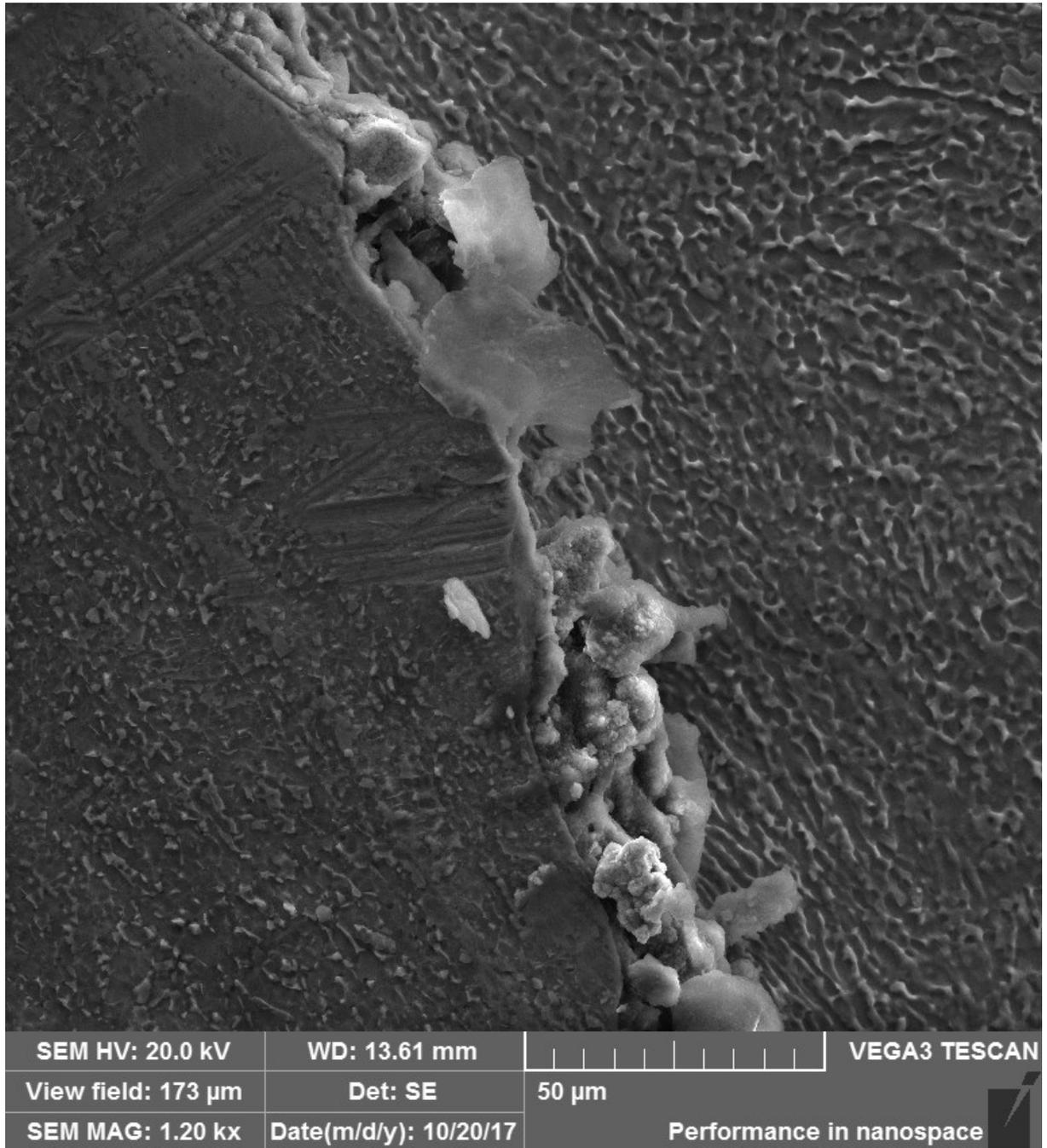
Fonte: Gustavo Henrique Guimarães Silva (2017)

Analisando visualmente as amostras obtidas com a variação dos parâmetros (tensão e tempo de usinagem), pode-se perceber que a única combinação de parâmetros que produziu resultados satisfatórios e com boa repetibilidade nas 3 amostras foi a de 25V de tensão e 90s de tempo de usinagem. Este valor de tensão se apresenta muito superior aos parâmetros utilizados na usinagem do Aço Carbono, tal fenômeno pode ser explicado pelas diferentes

propriedades elétricas, físicas e químicas dos 2 materiais, além da existência de uma camada apassivadora muito resistente na liga de Titânio, supõe-se que essa camada pode inclusive ter afetado a eficiência do processo a baixas tensões. De modo a medir a profundidade das cavidades geradas e analisar a topografia da superfície, foram utilizadas imagens obtidas com um MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura).

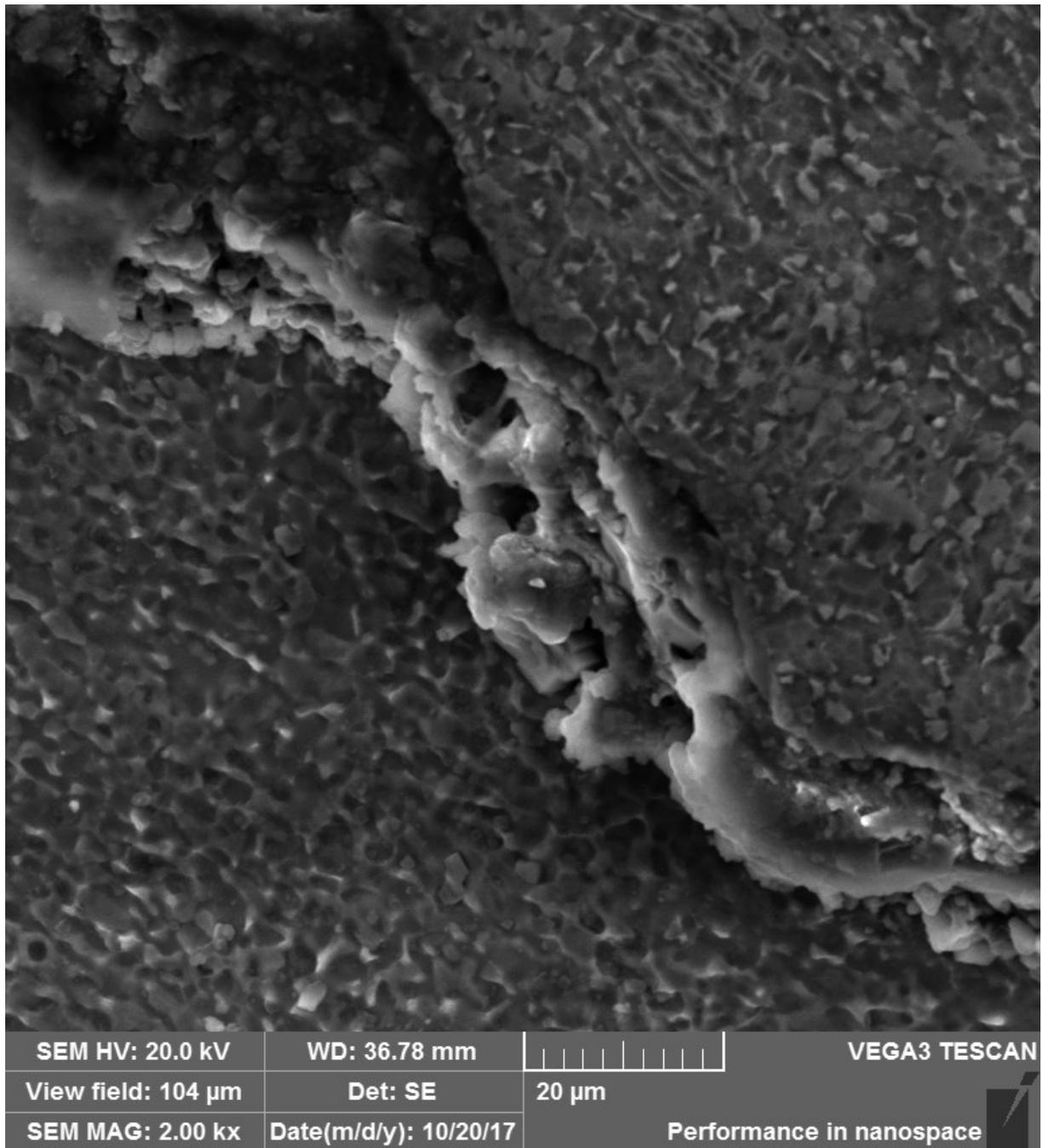
Abaixo, apresentam-se imagens de alta resolução das superfícies das 3 amostras analisadas com o MEV:

Figura 8: Topografia obtida na primeira amostra com 25V e 90s.



Fonte: Laboratório Multiusuário-UFU.

Figura 9: Topografia obtida na segunda amostra com 25V e 90s.

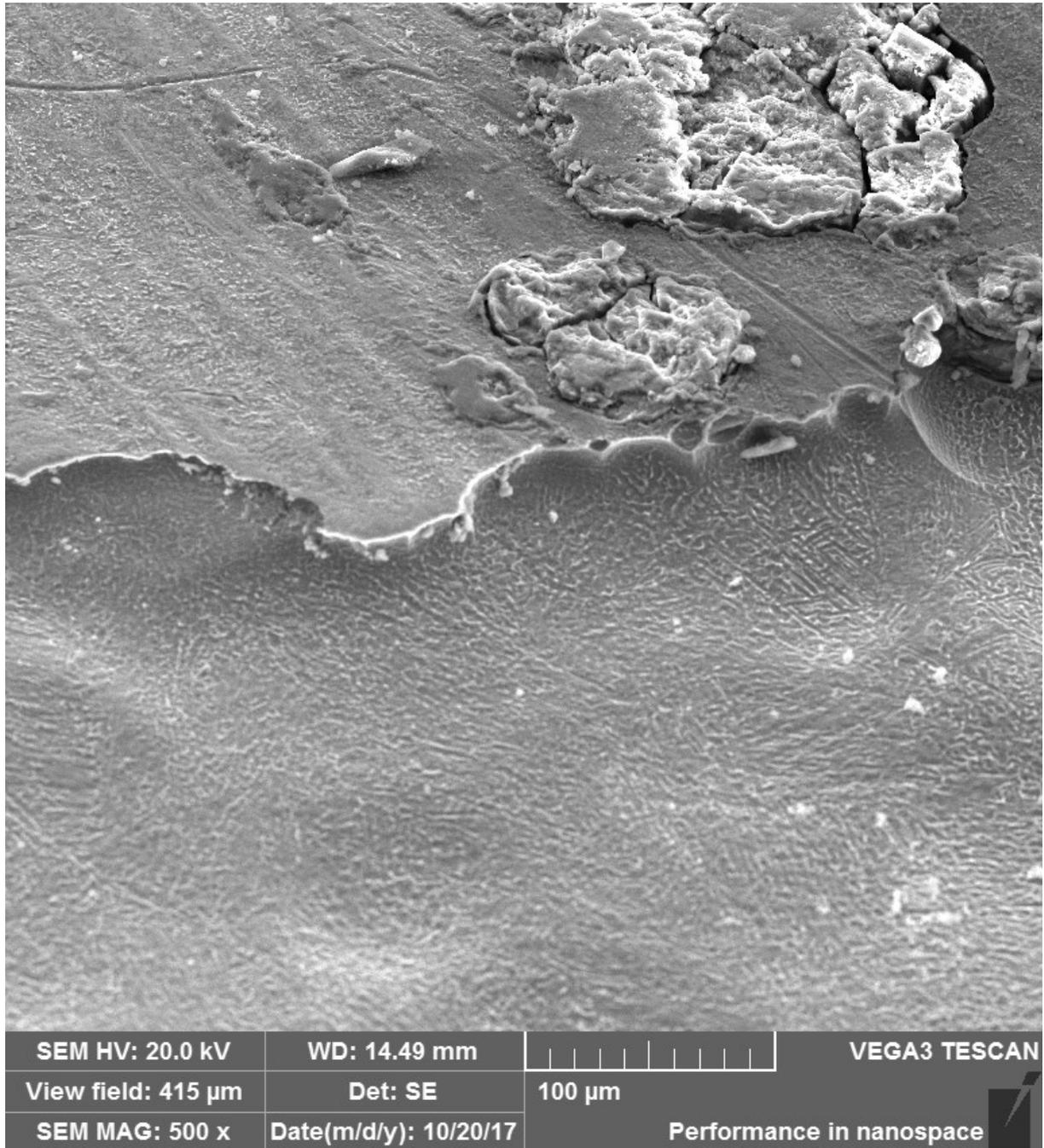


Fonte: Laboratório Multiusuário-UFU.

Para determinar a profundidade obtida na usinagem de cada amostra, deve-se obter uma imagem inclinada da superfície, assim, conhecendo a ampliação utilizada no MEV no momento da obtenção da imagem e a inclinação da amostra, calcula-se indiretamente a profundidade obtida na usinagem.

A imagem inclinada da primeira amostra foi obtida com uma ampliação de 500x, uma inclinação da mesma de 48° e é apresentada abaixo:

Figura 10: Imagem inclinada da primeira amostra.

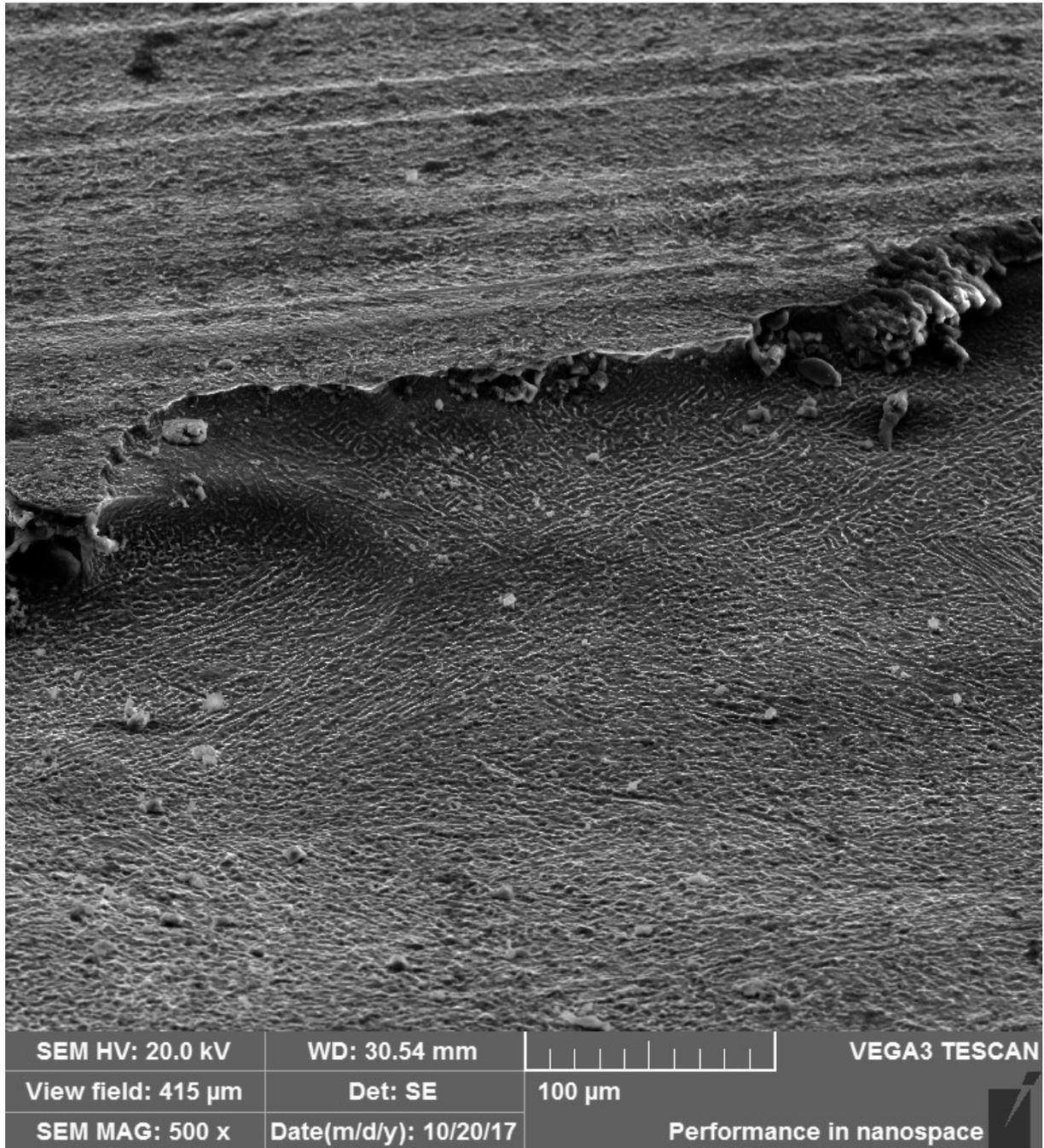


Fonte: Laboratório Multiusuário-UFU.

A profundidade inclinada da primeira amostra foi de $60\mu\text{m}$, logo, sua profundidade real é de $60 \cdot \cos 48^\circ = 40,2 \mu\text{m}$.

A imagem inclinada da segunda amostra foi obtida com uma ampliação de $500x$, uma inclinação da mesma de 60° e é apresentada abaixo:

Figura 11: Imagem inclinada da segunda amostra.

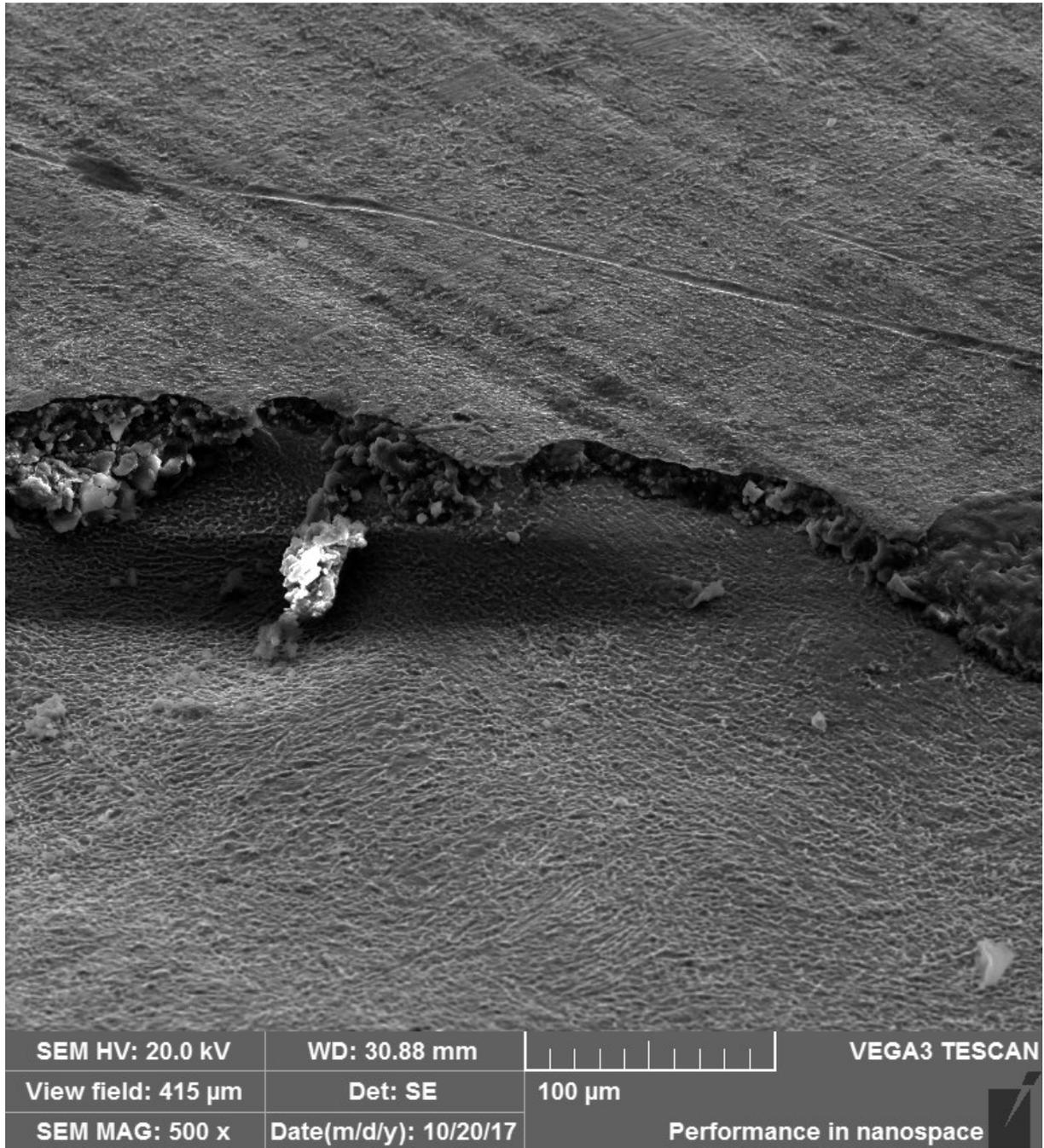


Fonte: Laboratório Multiusuário-UFU.

A profundidade inclinada da segunda amostra foi de $85\mu\text{m}$, logo, sua profundidade real é de $85 \cdot \cos 60^\circ = 42,5 \mu\text{m}$.

A imagem inclinada da terceira amostra foi obtida com uma ampliação de $500x$, uma inclinação da mesma de 60° e é apresentada abaixo:

Figura 12: Imagem inclinada da terceira amostra.



Fonte: Laboratório Multiusuário-UFU.

A profundidade inclinada da terceira amostra foi de $88\mu\text{m}$, logo, sua profundidade real é de $88 \cdot \cos 60^\circ = 44\mu\text{m}$.

Abaixo, tem-se uma tabela com os resultados obtidos nas 3 amostras analisadas com o MEV:

Tabela 1: Resultados obtidos nas 3 amostras analisadas.

Amostra	Ângulo de inclinação	Profundidade inclinada	Profundidade real
1	48°	60µm	40,2 µm
2	60°	85µm	42,5 µm
3	60°	88µm	44,0 µm

Analisando os resultados obtidos nos experimentos, pode-se afirmar que os mesmos lograram êxito em determinar variáveis de processo que apresentem boa reprodutibilidade das características obtidas. A combinação de uma tensão de alimentação de 25V com um tempo de usinagem de 90s gerou 3 cavidades com profundidades aproximadas, apresentando um desvio máximo de 3,8µm entre elas. O conjunto de amostras geradas com essas características apresentou média de 42,23µm e desvio padrão de 1,56µm.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crescente exigência de melhores propriedades mecânicas nos projetos de engenharia contemporâneos exige o aperfeiçoamento dos materiais constituintes dos mesmos, sendo o Titânio amplamente utilizado devido à sua ótima relação Resistência Mecânica / Peso específico (880 Mpa de limite de escoamento e 4430 kg/m³ na liga Ti-6Al-4V contra 350Mpa e 7870 kg/m³ do aço SAE 1020).

Entretanto, a alta dureza das Ligas de Titânio, apesar de benéfica aos projetos, dificulta a usinagem do metal utilizando processos convencionais de remoção de material. Dessa forma, verifica-se que o desenvolvimento de novas técnicas com o objetivo de melhorar o processo de usinagem de precisão das Ligas de Titânio é de extrema importância para a evolução da indústria moderna.

A Usinagem Eletroquímica representa uma alternativa para o trabalho de ligas extremamente duras, uma vez que o processo não sofre influência das propriedades mecânicas

do material usinado. Entretanto, por se tratar de um processo que não é de ampla utilização na cadeia produtiva convencional, as variáveis ótimas para garantir resultados com boa reprodutibilidade não são de conhecimento comum, justificando o desenvolvimento deste trabalho.

Analisando os resultados obtidos nos experimentos, verifica-se que o processo de usinagem eletroquímica, se realizado de maneira correta e com os parâmetros adequados, pode ser utilizado para a microusinagem de implantes dentários construídos com Ligas de Titânio.

Para uma futura evolução da pesquisa sobre o assunto, pode-se realizar um novo estudo analisando o comportamento das variáveis dentro de um intervalo próximo aos valores ótimos encontrados neste trabalho, de modo a refinar o processo e atingir resultados com cavidades ainda mais semelhantes. Além de tensão e tempo de usinagem, a solução eletrolítica também pode ser substituída para que a influência da mesma sobre o processo seja analisada. De modo a avaliar a eficiência do método, novos experimentos podem ser realizados com mais amostras, alterando a geometria da cavidade gerada para uma mais simples, substituindo a máscara por uma com furos circulares, por exemplo.

7. REFERÊNCIAS

BARR, A.E. and OLIVER, D.A., 1968, **L'usinage Electrochimique**, MacDonald et Co.

Craig RG, Powers JM. **Restorative dentals materials**. 11ed. St. Loius: Mosby; 2002.

Parr GR, Gardner LK, Toth RW. **Titanium: the mistery metal of implant dentistry. Dental material aspects**. J Prosthet Dent 1985;54(3):410-14.

Aoki T, Okafor ICI, Watanabe I, Hattori M, Oda Y, Okabe T. **Mechanical properties of cast Ti-6Al-4V-XCu alloys**. J Oral Reha 2004;31(11):1109-14.

CLARK, W.G. and McGEOUGH, J.A., 1977, **Temperature Distribution Along the gap in electrochemical machining**, Journal of Applied Electrochemistry, Vol. 7, pp. 277–286.

PANDEY, P.C. and SHAN, H.S., 1985, **Modern Machining Processes**, Tata McGrawHill.

UNIVERSITY OF NEBRASKA-LINCOLN MATERIALS. **Electrochemical Machining**.

Disponível em: <<http://www.unl.edu/nmrc/ecm>> Acesso em 19 jul. 17.

Aerospace Specification Metals Inc. **Titanium Ti-6Al-4V (Grade 5) Alloy**. Disponível em: <<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=mtp641>> Acesso em 21 jul. 17.

RODRÍGUEZ, A.J.D., RUBIO, J.C.C., ABRÃO, A.M., UFMG, 2001, **Desenvolvimento e avaliação de um equipamento para retificação por descarga eletroquímica de insertos de carboneto de tungstênio**.

SARDELLA, Antonio; **Curso Completo de Química**. São Paulo: Editora Ática, 2ª Edição 1999.

R. Boyer, G. Welsch, and E. W. Collings, 1994, **Materials Properties Handbook: Titanium Alloys**, eds. ASM International, Materials Park, OH.

ASM International, **Metals Handbook, Vol.2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**, 10th Ed. 1990.

ADELL, R. et al, 1981, **A 15-year study of osseointegrated implants in the treatment of the edentulous jaw**. International Journal of Oral Surgery, v. 10, p. 387-416.