



Guilherme Fabricio Aosani

**CONSTRUÇÃO DE UM DISPOSITIVO PARA USINAGEM
ELETROQUÍMICA**

Horizontina

2014

Guilherme Fabricio Aosani

**CONSTRUÇÃO DE UM DISPOSITIVO PARA USINAGEM
ELETROQUÍMICA**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina.

ORIENTADOR: Richard Thomas Lermen, Dr.

Horizontina

2014

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:

“Construção de um Dispositivo para Usinagem Eletroquímica”

Elaborada por:

Guilherme Fabricio Aosani

como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

**Aprovado em: 04/11/2014
Pela Comissão Examinadora**

**Prof. Dr. Richard Thomas Lermen
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador**

**Prof. Me. Anderson Dal Molin
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Prof. Me. Valtair de Jesus Alves
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Horizontina
2014**

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ser concluído sem a ajuda de diversas pessoas, as quais presto minha sincera homenagem: À minha família que me apoiou durante esta caminhada. Aos professores que nos ajudaram durante a graduação, em especial ao professor Richard T. Lermen, pela orientação, oportunidade e dedicação durante a realização do trabalho. À Faculdade Horizontina - FAHOR por permitir a fabricação, montagem e realização dos testes práticos. Aos colegas, amigos e familiares que me acompanharam e auxiliaram na realização deste trabalho.

“Se fui capaz de ver mais longe, é porque me apoiei em ombros de gigantes”.
(Isaac Newton)

RESUMO

O trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um dispositivo para Usinagem Eletroquímica (“*Electrochemical Machining*” - *ECM*). Este dispositivo é constituído principalmente em um ânodo e um cátodo submersos em um eletrólito com aplicação de corrente elétrica no processo. Os testes experimentais consistem em três materiais diferentes, o ferro fundido nodular (FOFO), Docol 1000 DP e aço inoxidável (AISI 304), com correntes de 50 A e 100 A. Os resultados mostram que aplicar mais corrente elétrica no processo aumenta a capacidade de remoção de material, porém, aplicar corrente elétrica menor resulta em um melhor acabamento. Pode-se concluir que o processo é eficiente, devido aos materiais utilizados como corpo de prova serem realmente usinados pelo processo eletroquímico.

Palavras-chave: Usinagem eletroquímica. Parâmetros de usinagem. Diferentes materiais.

ABSTRACT

The work aims to develop a device for Electrochemical Machining ("*Electrochemical Machining*" - *ECM*). This device consists mainly of an anode and a cathode immersed in an electrolyte with application of electric current in the process. Experimental tests consist of three different materials, ductile iron (FOFO), Docol 1000 DP and stainless steel (AISI 304) with currents of 50 A and 100 A. The results show that apply more electric current in the process increases material removal, however, apply smaller electrical current results in a better finish. It can be concluded that the process is efficient due to the materials used as the test specimen are actually machined by the electrochemical process.

Keywords: Electrochemical machining. Machining parameters. Different materials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Princípio da usinagem eletroquímica.	14
Figura 2 - Princípio da usinagem eletroquímica.	16
Figura 3 - Princípio de usinagem eletroquímica.	17
Figura 4 - Componentes do dispositivo de usinagem eletroquímica.....	23
Figura 5 – (a) Fonte de Potência e (b) Bomba de sucção	24
Figura 6 - Ferramenta (cátodo) de cobre utilizada nos testes experimentais	25
Figura 7 - Corpos de prova para os testes de usinagem eletroquímica. (A) teste 1, (B) teste 2, (C) teste 3, (D) teste 4, (E) teste 5 e (F) teste 6.....	26
Figura 8 - Vista geral do dispositivo de Usinagem Eletroquímica construído.	27
Figura 9 - Ferro Fundido Nodular – Comparação dos corpos de prova A e B.	29
Figura 10 - Docol 1000 DP – Comparação dos corpos de prova C e D.	30
Figura 11 - AISI 304 – Comparação dos corpos de prova E e F.	31
Figura 12 - (a) Eletrólito limpo antes da usinagem eletroquímica e (b) depois de um experimento.	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros dos testes experimentais.	26
Tabela 2 - Massa retirada com a usinagem eletroquímica nos corpos de prova A e B.....	28
Tabela 3 - Massa retirada com a usinagem eletroquímica nos corpos de prova C e D.	29
Tabela 4 - Massa retirada com a usinagem eletroquímica nos corpos de prova E e F.....	31

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. JUSTIFICATIVA.....	12
1.2. OBJETIVOS.....	12
2. REVISÃO DA LITERATURA	13
2.1. ELETRÓLISE, A BASE DA USINAGEM ELETROQUÍMICA	13
2.2. PRINCÍPIOS BÁSICOS DE FUNCIONAMENTO DA USINAGEM ELETROQUÍMICA.....	14
2.3. A USINAGEM ELETROQUÍMICA.....	16
2.4. IMPORTÂNCIA DO ELETRÓLITO	17
2.5. CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE USINAGEM ELETROQUÍMICA.....	18
2.5.1 Taxa de remoção de material.....	18
2.5.2 Precisão.....	19
2.5.3 Acabamento da superfície.....	19
2.6. PARÂMETROS OPERACIONAIS	19
2.7. APLICABILIDADE DO PROCESSO DE USINAGEM ELETROQUÍMICA	21
3. METODOLOGIA.....	23
3.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	23
3.2. MÉTODO EXPERIMENTAL	25
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	27
4.1. FUNCIONAMENTO DO DISPOSITIVO DE USINAGEM ELETROQUÍMICA.....	27
4.2. RESULTADOS DOS TESTES EXPERIMENTAIS.....	28
4.2.1 Usinagem realizada com Ferro Fundido Nodular	28
4.2.2 Usinagem realizada com aço Docol 1000 DP	29
4.2.3 Usinagem realizada com Aço Inoxidável AISI 304.....	31
4.3. ANÁLISES GERAIS	32
5. CONCLUSÕES	34
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35

1. INTRODUÇÃO

O processo de usinagem eletroquímica teve seus primeiros desenvolvimentos significativos na década de 1950. Este processo foi investigado como um método para formação de ligas de alta resistência. A partir de 1990 a tecnologia passou a ser empregada mais largamente na indústria, no setor automotivo, petrolífero, indústria e engenharia médica, bem como empresas aeroespaciais. O processo é usado tanto para desbaste quanto para a obtenção de superfícies lisas, furos, perfis de forma complexa, e remoção de trincas de fadiga em estruturas de aço.

A usinagem eletroquímica tem como grande campo de aplicação a usinagem dos materiais de alta resistência e ligas resistentes ao calor. A grande vantagem do processo é a usinagem de materiais independentemente de suas características físicas, tais como: dureza, tenacidade, fragilidade e a alta qualidade das superfícies usinadas devido ao arrancamento de átomo por átomo do material da peça, através de reações eletroquímicas, sem geração significativa de calor.

Tendo em vista, a lógica de que para usinar metais extremamente duros é preciso ferramentas de corte ainda mais duras, com isso torna-se cada vez mais difícil aplicar os processos de corte mecânico tradicionais e por isso, a aplicação do processo de usinagem eletroquímica é necessário.

A usinagem eletroquímica é baseada no princípio da eletrólise de Faraday. Esse processo não tradicional de usinagem ocorre por dissolução anódica na peça, ou seja, a remoção de material é feita através de reações eletroquímicas com uma fonte de energia de alta potência para fornecer corrente elétrica de alta densidade. É constituído por três principais partes: o ânodo, cátodo e eletrólito. O ânodo é a peça a ser usinada (polo positivo). O cátodo ou ferramenta (polo negativo) em forma da peça que se quer produzir. O eletrólito é uma solução de água e sal que flui em alta pressão, entre o ânodo e o cátodo, e é responsável pela condução de eletricidade que completa o circuito entre o ânodo e o cátodo, lembrando que a peça e a ferramenta precisam ser condutoras de eletricidade, sendo assim é possível usinar qualquer metal.

1.1. JUSTIFICATIVA

O trabalho se justifica em desenvolver um dispositivo capaz de realizar a usinagem eletroquímica, e através dele usinar corpos de prova mostrando de forma prática que o processo realmente funciona.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é o desenvolvimento de um dispositivo para usinagem eletroquímica, e através deste, usinar corpos de prova para análises. Sendo que, para atingir o objetivo geral foram necessários atingir os seguintes objetivos específicos:

- Buscar referencial teórico para entendimento e construção de um dispositivo de usinagem eletroquímica;
- Construir o dispositivo de usinagem eletroquímica;
- Analisar a influência da corrente elétrica usada durante o processo de usinagem eletroquímica para três diferentes tipos de materiais.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura traz uma descrição dos principais conceitos para o desenvolvimento do presente trabalho, tais como: a base da usinagem eletroquímica, os princípios básicos de funcionamento, características do processo e parâmetros que influenciam no processo.

2.1. ELETRÓLISE, A BASE DA USINAGEM ELETROQUÍMICA

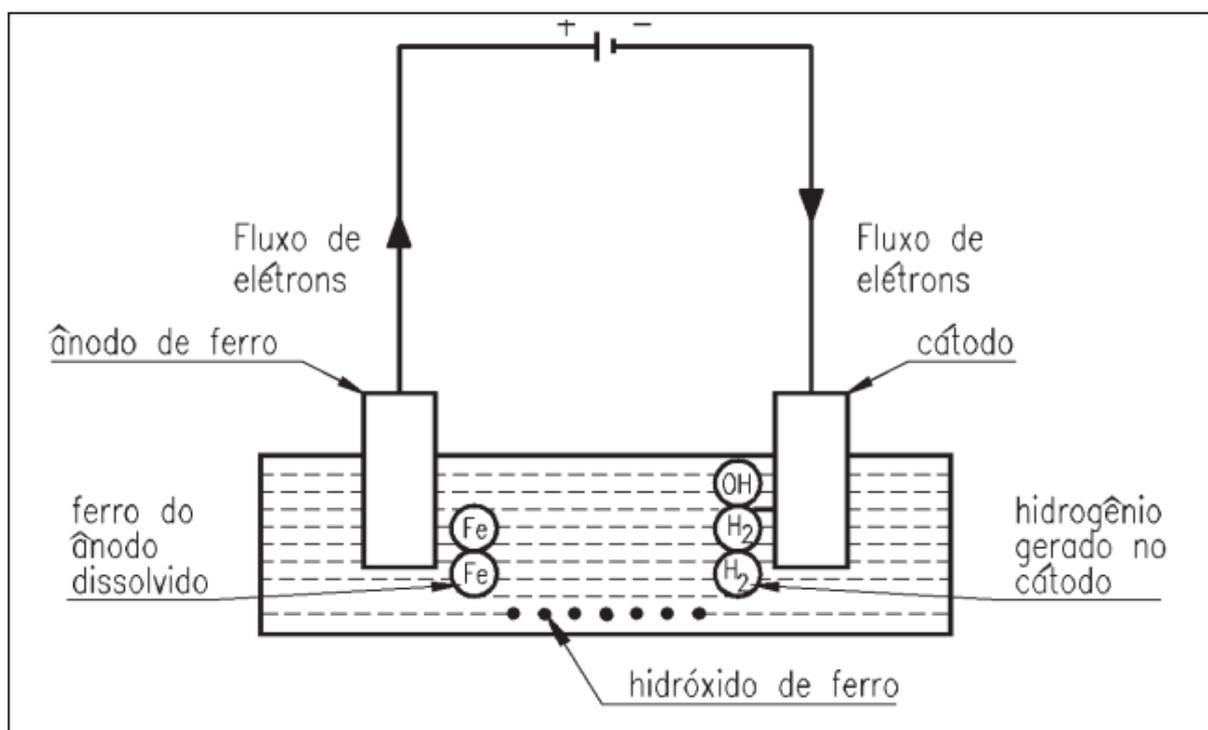
A palavra eletrólise vem da língua grega, em que “*ele*tro” quer dizer corrente elétrica e “*lise*” significa quebra. A eletrólise é uma reação não espontânea de decomposição de uma substância, por meio de corrente elétrica. A eletrólise ocorre quando uma corrente elétrica é passada entre dois materiais condutores mergulhados em uma solução aquosa. Uma aplicação da eletrólise é a deposição eletrolítica, processo no qual camadas de metal são depositadas sobre a superfície de um outro metal polarizado positivamente (MCGEOUGH, 1988).

O polimento de metais é um exemplo de operação que também pode ser por dissolução eletrolítica. Só que nesse caso, o metal a ser polido é polarizado negativamente numa célula eletrolítica, trata-se de um processo de dissolução anódica. As irregularidades da sua superfície são dissolvidas, e com sua remoção a superfície fica lisa e polida. Esse processo funciona em baixa velocidade ou parado. O processo de usinagem eletroquímica é semelhante ao de polimento eletrolítico, embora as finalidades sejam bem diferentes, no polimento eletrolítico a finalidade é obter um excelente estado de superfície. Enquanto na usinagem eletroquímica, o objetivo é a remoção de material, segundo um perfil apresentado por uma ferramenta (cátodo). Na usinagem eletroquímica, as velocidades de remoção de material exigidas são muito maiores que as necessárias no processo de polimento. Esse problema é contornado trabalhando com densidades elevadas do eletrólito, sob baixas tensões e mantendo-se reduzida a distância (“*gap*”) (KOPELIOVICH, 2013).

2.2. PRINCÍPIOS BÁSICOS DE FUNCIONAMENTO DA USINAGEM ELETROQUÍMICA

O princípio de funcionamento é baseado na eletrólise, processo químico que ocorre quando uma corrente elétrica contínua é passada entre dois eletrodos mergulhados numa solução líquida condutora. A usinagem eletroquímica ocorre pelo processo eletroquímico de dissolução anódica controlada da peça (ânodo), com a ferramenta (cátodo) em uma célula eletrolítica, durante um processo de eletrólise, que é acelerado pela passagem forçada de corrente elétrica entre a peça e o eletrodo, conforme Figura 1 (KOPELIOVICH, 2013).

Figura 1 - Princípio da usinagem eletroquímica.

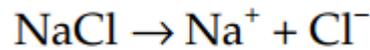


Fonte: Kopeliovich, 2013.

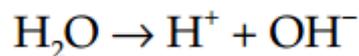
Para entender como a usinagem eletrolítica é usada para conformar metais, é importante saber o que acontece dentro de uma célula eletrolítica. Imagine uma cuba cheia de eletrólito (solução aquosa de cloreto de sódio) com dois eletrodos de ferro, mergulhados na solução, como mostra a Figura 1. Um dos eletrólitos é polarizado positivamente (ânodo), e o outro é polarizado negativamente (cátodo) (BANNARD, 1977).

Nos metais, a condução de corrente é assegurada pelos elétrons. Nos eletrólitos, ela é obtida por transferência de cargas dos íons.

Numa solução aquosa de cloreto de sódio (NaCl), os íons de sódio são positivos e os de cloro são negativos. A representação química é:

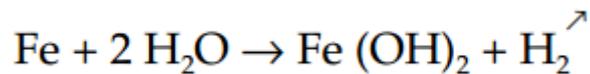


A própria água tende-se a dissociar:



A passagem de corrente através de um eletrólito é, portanto, acompanhada de transferência de matéria. Sob ação de uma diferença de potencial, o campo elétrico criado entre os dois eletrodos provoca movimento dos ânions (-) para o ânodo e migração dos cátions (+) para o cátodo.

Quando uma diferença de potencial é aplicada entre os dois eletrodos, muitas reações podem ocorrer entre o ânodo e o cátodo. Uma das reações mais prováveis é a dissolução do ferro, representada quimicamente como segue:



Em outras palavras, um átomo de ferro reage com duas moléculas de água, formando hidróxido de ferro II e liberando hidrogênio (H₂). O eletrólito permanece inalterado.

Apenas sua concentração aumenta, pelo progressivo desaparecimento da água. A retirada de material se dá átomo por átomo, segundo as leis de Faraday:

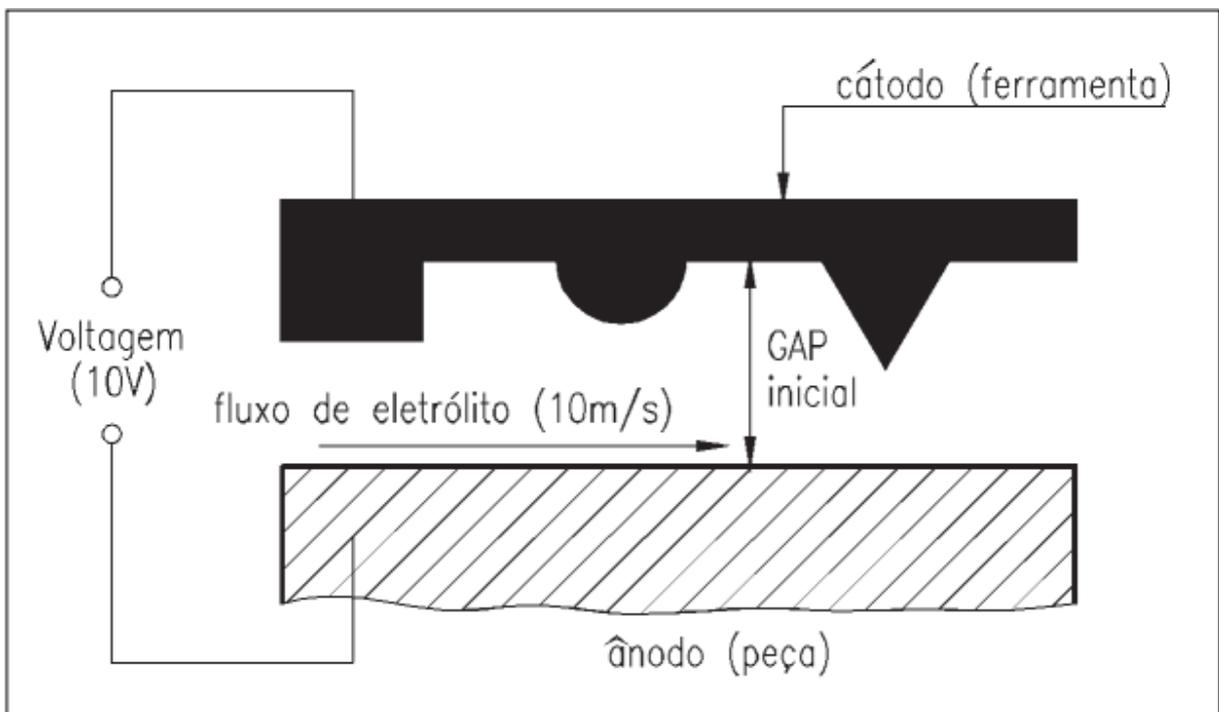
- A quantidade de matéria removida é proporcional a intensidade de corrente elétrica;
- As quantidades de diferentes substâncias retiradas ou depositadas por uma mesma intensidade de corrente são proporcionais a sua valência-grama. Valência é a capacidade de um átomo de formar ligações químicas, indica quantas ligações um átomo pode formar com outro átomo (USBERCO, 2002).

Para dissolver anodicamente um metal de valência 2, é necessário fornecer 2 elétrons por átomo de metal a remover. A quantidade máxima de metal que pode ser dissolvida não depende da natureza do eletrólito, nem da dureza ou outras características do metal, mas sim das seguintes grandezas físicas: densidade da corrente, tempo, massa atômica e valência do metal (KOPELIOVICH, 2013).

2.3. A USINAGEM ELETROQUÍMICA

A peça a ser usinada e a ferramenta constituem o ânodo e o cátodo, respectivamente, mergulhadas num eletrólito, que pode ser uma solução de cloreto de sódio. Uma diferença de potencial, geralmente de 10 volts, é aplicada entre os eletrodos. A Figura 2 mostra a peça e o eletrodo em representação esquemática.

Figura 2 - Princípio da usinagem eletroquímica.



Fonte: Kopeliovich, 2013.

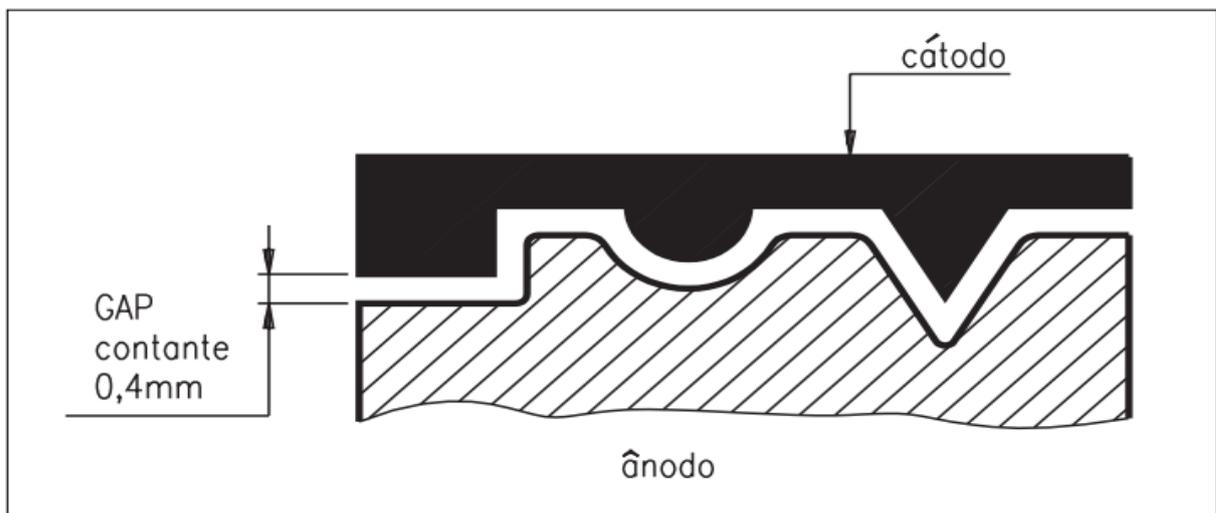
A peça é montada num acessório eletricamente isolada do tanque e outras partes da máquina, ligada ao terminal positivo (ânodo) da fonte de alimentação, e a ferramenta está ligada ao terminal negativo (cátodo). O eletrólito é bombeado numa velocidade aproximada de 3 a 30 m/s, através do espaço entre os eletrodos, para remover os resíduos da usinagem (óxidos), o calor e as bolhas de gás geradas na folga entre eletrodos (KOPELIOVICH, 2013).

A direção de avanço mais comumente utilizada é no sentido cátodo para o ânodo, ou seja, a ferramenta avança na direção da peça a uma velocidade constante, cerca de 1,25 mm/min. A distância entre o cátodo e ânodo é mantida

constante. E a forma final da peça adquirido pelo processo de usinagem eletroquímica é a forma da ferramenta (Figura 3) (KOPELIOVICH, 2013).

A medida que a usinagem prossegue, e com o movimento simultâneo do cátodo em direção ao ânodo, o espaço entre os eletrodos tenderá a apresentar um valor fixo. Sob essas condições, uma forma aproximadamente complementar aquela do cátodo será reproduzida no ânodo (Figura 3).

Figura 3 - Princípio de usinagem eletroquímica.



Fonte: Kopeliovich, 2013.

2.4. IMPORTÂNCIA DO ELETRÓLITO

O eletrólito usado, normalmente é uma salmoura (NaCl). A diferença de potencial (d.d.p.) 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. Na interface metal-eletrólito, ocorre a oxidação do ânodo com conseqüente transferência dos átomos do metal, na forma de íons, para o eletrólito. Para este sistema funcionar deve ser aplicado corrente elétrica, e a distância entre a peça e a ferramenta varia de centésimo a décimos de milímetros (BENEDICT, 1987)

O papel fundamental do eletrólito é permitir a passagem da corrente elétrica, para tornar possível a dissolução anódica durante toda a usinagem. A natureza do

eletrólito deve ser tal que não permita a formação de produtos insolúveis, que poderiam neutralizar o ânodo. As reações que ocorrem no cátodo também não podem ser menosprezadas, pois é necessário evitar qualquer depósito metálico que venha a alterar a forma do eletrodo-ferramenta e diminuir a exatidão de sua reprodução (KOPELIOVICH, 2013).

O eletrólito deve possuir alta condutibilidade, deve conservar suas características e deve poder ser regenerado facilmente. Um fator que merece atenção é que na usinagem eletroquímica pode ocorrer a formação de produtos tóxicos, dependendo do eletrólito utilizado.

Alguns tipos de eletrólito recomendados estão descritos a seguir:

- O cloreto de sódio (NaCl), na concentração de 20% - para ligas ferrosas (por exemplo aços e ferros fundidos e ligas de cobalto).
- Nitrato de sódio (NaNO₃) - para ligas ferrosas.
- Ácido clorídrico (HCl) - para as ligas de níquel.
- Uma mistura de cloreto de sódio (NaCl) e ácido sulfúrico (H₂SO₄) - para as ligas de níquel.
- Uma mistura de 10% de ácido fluorídrico (HF), ácido clorídrico a 10% (HCl), 10% de ácido nítrico (HNO₃) - para as ligas de titânio.
- O hidróxido de sódio (NaOH) - para carboneto de tungstênio (WC).

(KOPELIOVICH, 2013).

2.5. CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE USINAGEM ELETROQUÍMICA

2.5.1 Taxa de remoção de material

Segundo a primeira lei da eletrólise ou lei de Faraday, a massa da substância eletrolisada em qualquer dos elementos é diretamente proporcional à quantidade de carga elétrica que atravessa a solução. Ou seja, quanto maior for a corrente elétrica passada entre ânodo e cátodo, maior será o volume de material removido.

A taxa de remoção de material é determinada pela corrente que passa entre a peça e a ferramenta, e a medida que a ferramenta se aproxima da peça, a distância do percurso da corrente diminui e a amplitude da corrente aumenta. Esse processo continua até que a corrente seja suficiente para eliminar o metal a uma taxa que

corresponde à taxa de avanço da ferramenta. Um corte estável é feito com um espaçamento fixo entre a peça e a ferramenta, denominado como a distância de equilíbrio da usinagem (“gap”). Se a taxa de alimentação da ferramenta é reduzida, o avanço da ferramenta será momentaneamente atrasado, aumentando a abertura e, assim, resultando numa redução da corrente. Isto acontece até que uma distância seja estabelecida novamente (MEHER, 2009).

2.5.2 Precisão

Sob condições ideais e com ferramentas projetadas corretamente, a usinagem eletroquímica é capaz de manter a tolerância na ordem de menos 0,02 – 0,04 milímetros. Repetitividade do processo de usinagem eletroquímica também é muito bom, isto é principalmente, devido ao fato de que o desgaste da ferramenta é praticamente inexistente. Como regra geral, quanto mais complexa for a forma da peça, mais difícil será manter tolerâncias apertadas e maior é a atenção necessária para o desenvolvimento da forma da ferramenta apropriada (MEHER 2009).

2.5.3 Acabamento da superfície

A usinagem eletroquímica sob certas condições pode produzir acabamentos de superfície da ordem de 0,4 μm . Este resultado pode ser obtido pelo corte frontal ou a rotação da ferramenta ou da peça. As variáveis importantes que afetam o acabamento da superfície são: taxa de alimentação, medida de distância (gap), a composição do eletrólito, viscosidade, temperatura e fluxo. Qualquer defeito na ferramenta irá fazer com que a usinagem transmita o defeito na superfície da peça (MEHER, 2009).

2.6. PARÂMETROS OPERACIONAIS

Os parâmetros de operação que estão sob o controle do operador e que influenciam na capacidade do processo de usinagem eletroquímica podem ser descritos como:

- a) Taxa de alimentação: uma elevada taxa de alimentação resulta em maior taxa de remoção de metal. Ela diminui a distância de equilíbrio de usinagem

- ("gap"), resultando em melhoria no acabamento superficial e controle de tolerância (MEHER, 2009).
- b) D.d.p: baixa diferença de potencial diminui a distância de equilíbrio de usinagem ("gap") e resulta em melhor acabamento superficial e controle de tolerância (MEHER, 2009).
- c) Fornecimento de energia: A natureza da fonte de energia aplicada pode ser de dois tipos, tais como CC (retificador de onda completa) e pulso CC. Um retificador de onda completa CC fornece tensão contínua, onde a eficiência de corrente depende muito mais da densidade de corrente. A eficiência diminui gradualmente quando a densidade de corrente é reduzida, enquanto que na tensão de pulso (duração de 1 ms e intervalo de 10 ms), a redução é muito mais rápida. Com a diminuição da densidade de corrente a forma da peça fica mais precisa. Neste trabalho foi considerado o processo ECM trabalhando com corrente contínua, mas também existe processo ECM que trabalha com oscilações na corrente elétrica, denominado "*Pulse Electrochemical Machining* (PECM)". (MEHER, 2009).
- d) Tipo de eletrólito, concentração e fluxo: o eletrólito da usinagem eletroquímica é geralmente classificado em duas categorias: a passividade do eletrólito contendo ânions oxidantes, nitrato de sódio e clorato de sódio, etc., e a não passividade do eletrólito contendo ânions relativamente agressivos, tais como o cloreto de sódio. A passividade dos eletrólitos é conhecida por dar maior precisão de usinagem, devido, à sua capacidade de formar filmes de óxido e evoluir oxigênio na região da corrente de fuga. Na revisão de pesquisas anteriores, na maior parte das investigações, pesquisadores recomendam soluções de NaClO₃, NaNO₃ e NaCl com diferentes concentrações de usinagem eletroquímica (ECM). O valor de pH da solução do eletrólito é escolhido para assegurar uma boa dissolução do material da peça de trabalho durante o processo de usinagem eletroquímica sem a ferramenta ser atacada (MEHER, 2009).
- e) Tamanho, forma e material da ferramenta: A ferramenta deve coincidir com a forma desejada da peça de trabalho, dependendo do material e do perfil a ser produzido. Materiais para ferramentas usadas em usinagem eletroquímica devem ter: boa condutividade térmica e elétrica, possuir resistência à corrosão, deve ser altamente usável e deve ser

suficientemente rígida para suportar a pressão eletrolítica sem vibração (MEHER, 2009).

No processo o eletrólito é composto de uma solução aquosa que consiste em 5 a 20 % do volume da cuba em cloreto de sódio (NaCl) ou nitrato de sódio (NaNO₃). Para que o processo ocorra de maneira desejada, é necessário mensurar e controlar diversas grandezas, tais como: pH, pressão, temperatura, velocidade do fluxo do eletrólito, tensão de trabalho e tempo de usinagem (KOPELIOVICH, 2013).

Faixa de parâmetros comumente utilizados:

- Fonte de tensão: corrente contínua (Entre 5 Volts e 30 Volts).
- Corrente elétrica: 3 a 40.000 A.
- Condutividade do eletrólito: 100 a 350 mS.
- Temperatura do eletrólito: 24 a 65 °C.
- Fluxo de eletrólito: 1 l/min para cada 100 A de corrente elétrica.
- Pressão de eletrólito: 3 a 20 bar.
- pH: para uma solução de NaNO₃ é comum manter o pH igual a 7, necessitando de um agente externo para o controle. Quando a solução é de NaCl isso não é necessário.
- Tempo de usinagem: 5 até 40 s, em trabalhos de rebarbação.
- Velocidade do fluxo do eletrólito: entre 2 a 10 m/s.

(KENNAMETAL, 2004)

2.7. APLICABILIDADE DO PROCESSO DE USINAGEM ELETROQUÍMICA

Normalmente, esse processo é mais utilizado nas indústrias metal mecânicas quando elas desejam produzir em massa, sendo aplicado em materiais extremamente duros ou materiais que são difíceis de usinar com o emprego de métodos convencionais por ação mecânica. Esse método de usinagem pode cortar os materiais em forma de pequenos ângulos, com contornos intrincados ou cavidades em metais mais exóticos, como aluminetos de titânio, níquel, cobalto e outras ligas de metal (BRANCO, 2010).

O processo ECM é mais usado para produzir formas complexas, como as pás de turbina com bom acabamento superficial em materiais mais duros. Também é amplamente utilizado em processos de rebarbação. Na rebarbação, a técnica de

usinagem eletroquímica remove o metal excedente e embota bordas afiadas. Esse processo é rápido e, muitas vezes, mais conveniente do que os métodos convencionais de rebarbação, que são feitos de forma manual ou com uso de processos de usinagem tradicionais (BRANCO, 2010).

Segundo Kennametal (2004), o processo de usinagem eletroquímica é capaz de criar: arredondamentos das arestas definidos, mapeamento da geometria do cátodo na peça, polimento com características otimizadas da superfície, remoção das rebarbas na saída do furo e nos furos de intersecção. E também traz benefícios como: remoção do material em locais precisamente definidos sem cargas mecânicas ou térmicas na peça, desbaste ou acabamento em um único passe, adequado para rebarbação de locais difíceis de alcançar e metais endurecidos e difíceis de serem usinados, o material é dissolvido não cortado (sem rebarbas secundárias).

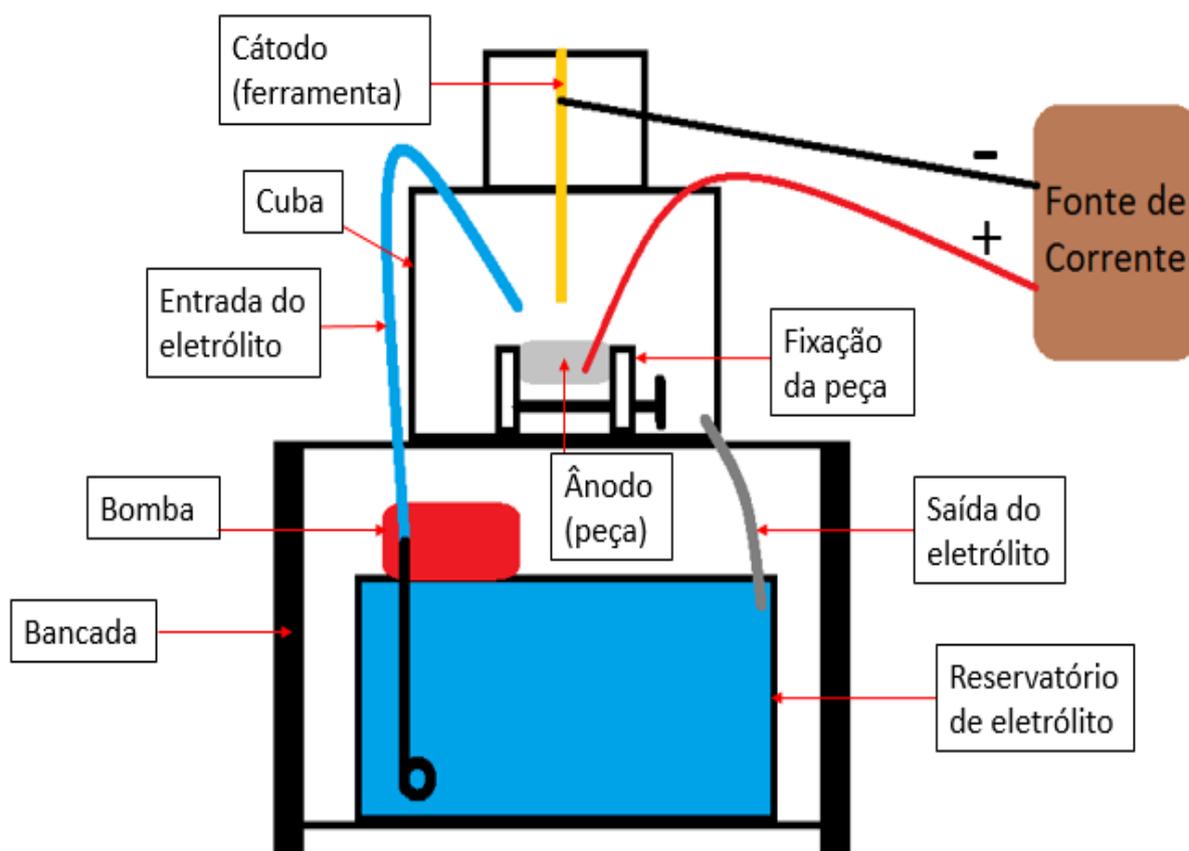
3. METODOLOGIA

A metodologia foi dividida em duas etapas, a primeira descreve o método e os materiais necessários para o desenvolvimento do dispositivo de usinagem eletroquímica, e a segunda etapa descreve como foram realizados os testes experimentais com o mesmo.

3.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Os materiais básicos necessários para fabricação do dispositivo foram: uma bancada, uma cuba, um eletrólito, uma fonte de alimentação e uma bomba de sucção. A Figura 4 mostra um desenho esquemático das partes que constituem o dispositivo de usinagem eletroquímica utilizado.

Figura 4 - Componentes do dispositivo de usinagem eletroquímica.



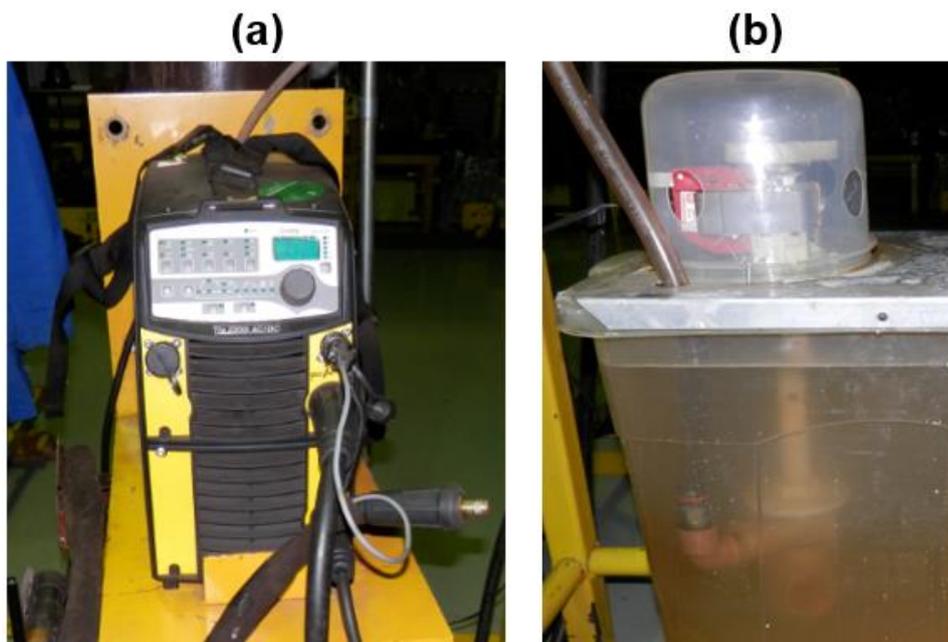
Foi utilizado uma bancada para suportar a cuba e o reservatório do eletrólito. A cuba foi construída de vidro, pois deve ser isolante elétrico para segurança no manuseio do dispositivo.

O eletrólito escolhido foi o NaCl, devido ao seu baixo custo e boa condutividade elétrica, além do fato de ser uma solução de simples fabricação e manuseio. A região de usinagem deve ser abastecida com um fluxo contínuo de eletrólito para intensificar a transferência das cargas elétricas, e para remover os óxidos, calor e bolhas de gás geradas no espaço entre os eletrodos.

O processo foi realizado através de aplicação de corrente contínua entre ânodo e cátodo, mergulhados em uma solução aquosa condutora. E para aplicação desta corrente foi utilizado uma fonte de potência modelo Tig 2200i (Figura 5 (a)), capaz de fornecer até 200 A de corrente.

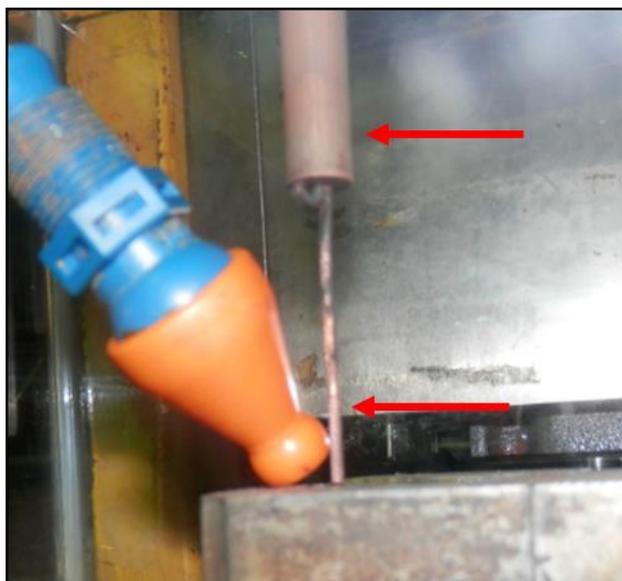
O fluxo do eletrólito foi obtido por uma bomba de sucção (Figura 5 (b)). A qual faz a sucção do eletrólito do reservatório para a região de usinagem através de uma mangueira flexível, para facilitar o direcionamento do eletrólito na região de usinagem, e outra mangueira para retirar o eletrólito sujo e retornar ao reservatório, dessa forma o eletrólito é reutilizado em um ciclo constante.

Figura 5 – (a) Fonte de Potência e (b) Bomba de sucção



A ferramenta (cátodo) utilizada foi um fio de cobre com 2,5 mm de diâmetro, conforme a Figura 6, foi embutido um fio de cobre de 2,5 mm através de um furo na ponta de uma barra cilíndrica maciça.

Figura 6 - Ferramenta (cátodo) de cobre utilizada nos testes experimentais



3.2. MÉTODO EXPERIMENTAL

Após término e testes iniciais de funcionamento do dispositivo de usinagem eletroquímica, foi possível realizar os experimentos práticos com os corpos de prova. Todos os experimentos realizados foram feitos com um eletrodo (cátodo) de cobre de 2,5 mm, com um gap inicial e sem avanço de 0,4 mm, abastecido constantemente com um eletrólito de NaCl com uma concentração de 35% (limite de saturação do sal na água), para tornar esta solução com alta condutividade elétrica.

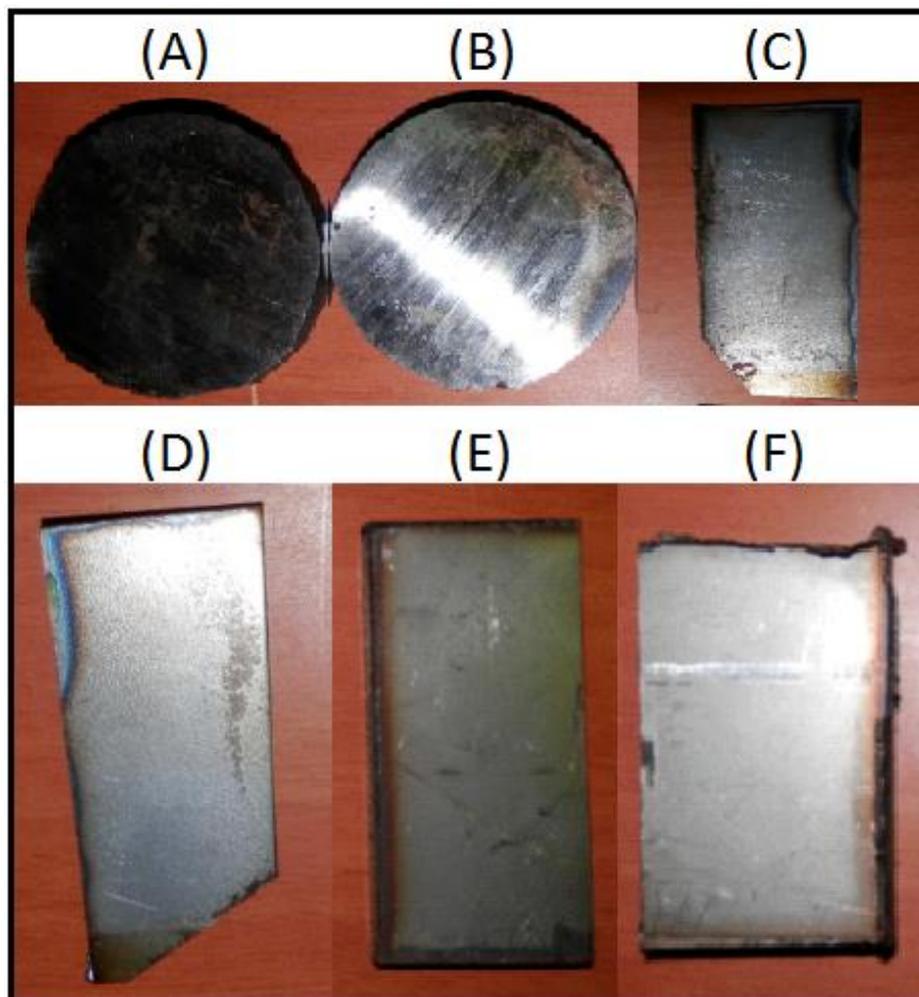
Os experimentos realizados foram: variar a corrente elétrica aplicada em 50 A e 100 A na usinagem eletroquímica dos corpos de prova de metais duros diferentes, por 10 minutos cada. Assim, sendo possível verificar o acabamento e a quantidade de material removido, através da pesagem dos corpos de prova antes e depois da usinagem. Os corpos de prova escolhidos e utilizados foram o Ferro Fundido Nodular, o Docol 1000 DP e o Aço Inoxidável (“AISI 304”), devido a serem materiais bastante duros, e de difícil usinabilidade por forma convencional de remoção mecânica, descritos na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Parâmetros dos testes experimentais.

Teste	Material	Corrente	Tempo	Concentração NaCl
1	Ferro Fundido Nodular	50 A	10 min	35%
2	Docol 1000	50 A	10 min	35%
3	AISI 304	50 A	10 min	35%
4	Ferro Fundido Nodular	100 A	10 min	35%
5	Docol 1000	100 A	10 min	35%
6	AISI 304	100 A	10 min	35%

Os corpos de provas foram nomeados para facilitar a organização dos mesmos nos resultados de acordo com a Figura 7 a seguir. Também para mostrar a imagem de como eram os corpos de prova antes da usinagem eletroquímica.

Figura 7 - Corpos de prova para os testes de usinagem eletroquímica. (A) teste 1, (B) teste 2, (C) teste 3, (D) teste 4, (E) teste 5 e (F) teste 6.



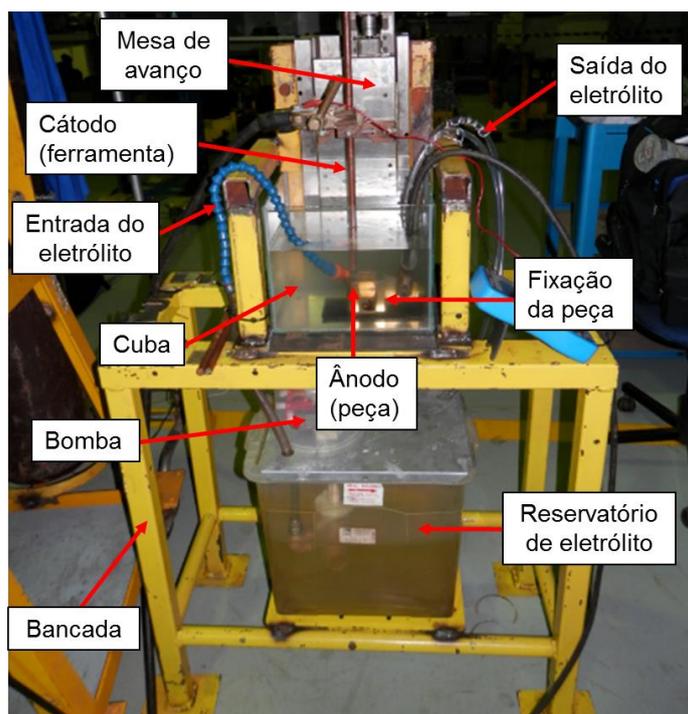
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O objetivo geral do trabalho de construir um dispositivo capaz de realizar a usinagem eletroquímica foi alcançado. Com o dispositivo foi possível a realização dos testes experimentais. A apresentação e análise dos resultados foi dividida em três partes: a primeira parte apresenta o dispositivo de usinagem eletroquímica construído, a segunda os resultados dos testes experimentais com o dispositivo e a terceira análises gerais.

4.1. FUNCIONAMENTO DO DISPOSITIVO DE USINAGEM ELETROQUÍMICA

A Figura 8 mostra uma vista geral do projeto completo, e também pode ser verificado a forma real dos componentes do dispositivo construído. Dentro da cuba o ânodo foi ligado ao polo negativo da fonte de potência e o cátodo no polo positivo, isolados da bancada para não entrar em curto elétrico e dar segurança na utilização do dispositivo. É transmitido corrente contínua forçada através do fluxo constante de eletrólito entre o espaço dos eletrodos, dessa forma ocorrendo a dissolução anódica removendo as partículas de metal.

Figura 8 - Vista geral do dispositivo de Usinagem Eletroquímica construído.



4.2. RESULTADOS DOS TESTES EXPERIMENTAIS

Os testes realizados com materiais foram analisados, mostrando os resultados obtidos com a alteração da corrente elétrica no processo. Os corpos de prova de mesmo material foram agrupados e analisados separadamente.

4.2.1 Usinagem realizada com Ferro Fundido Nodular

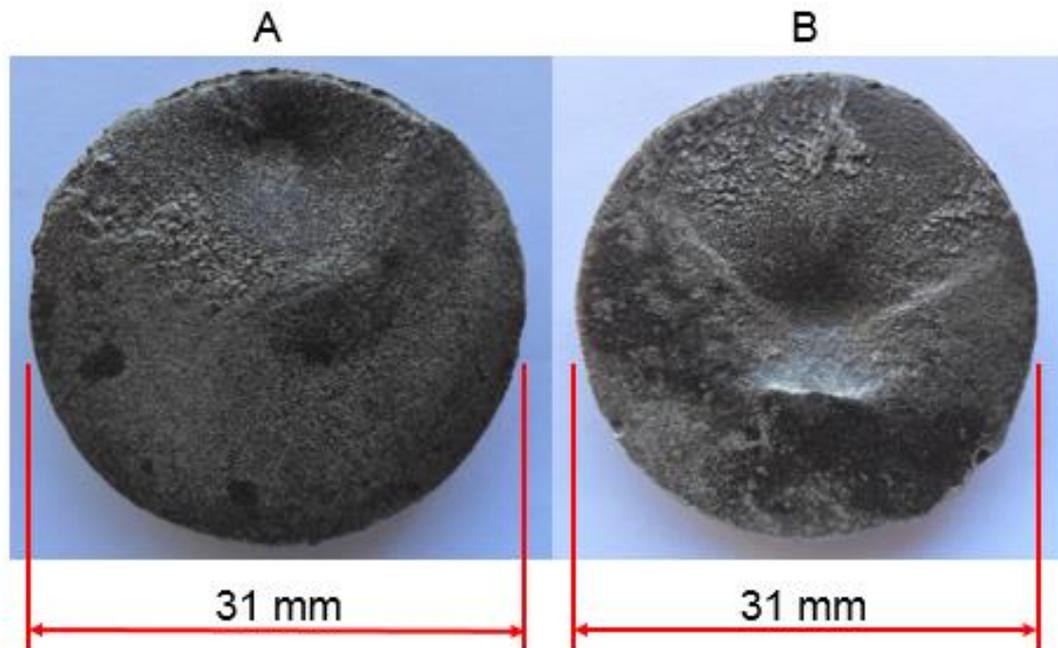
Conforme metodologia experimental o primeiro teste realizado foi usinar o corpo de prova A por 10 minutos, com uma corrente de 50 A e espaçamento (“gap”) de 0,4 mm inicial e sem avanço, com fluxo constante do eletrólito com uma concentração de 35% (NaCl). Já a usinagem do corpo de prova B foi alterado somente a corrente para 100 A, mantendo inalterado outros parâmetros e com a mesma ferramenta. Os corpos de prova foram pesados antes e depois da usinagem, e os resultados são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Massa retirada com a usinagem eletroquímica nos corpos de prova A e B.

Ferro Fundido Nodular	Corrente	Peso Bruto	Peso Usinado	Perdas
A	50 A	24 g	21 g	12,5 %
B	100 A	26 g	22 g	15,4 %

O corpo de prova A mostrado na Figura 9, usinado com 50 A tinha inicialmente o peso de 24 g, e após usinada ficou com 21 g, perdeu 12,5 % do peso bruto. Já o corpo de prova B também mostrado na Figura 9 usinado com 100 A, tinha inicialmente o peso de 26 g e após usinado ficou com 22 g, perdeu 15,4 % do peso total. A massa retirada com a corrente de 100 A foi maior do que com 50 A, comprovando que quanto maior a corrente aplicada, maior é a capacidade de remoção de material.

Figura 9 - Ferro Fundido Nodular – Comparação dos corpos de prova A e B.



Em relação ao acabamento dos corpos de prova A e B, foi possível identificar que: o corpo de prova A usinado com a corrente menor de 50 A, teve um acabamento melhor que o corpo de prova B, a região usinada ficou com o perfil mais parecido com a geometria da ferramenta, comprovando que quanto menos corrente aplicada melhor é o acabamento, mas como consequência menor a retirada de material.

4.2.2 Usinagem realizada com aço Docol 1000 DP

O resultado do teste realizado com o corpo de prova C, e o resultado do teste realizado com o corpo de prova D, são apresentados na Tabela 3.

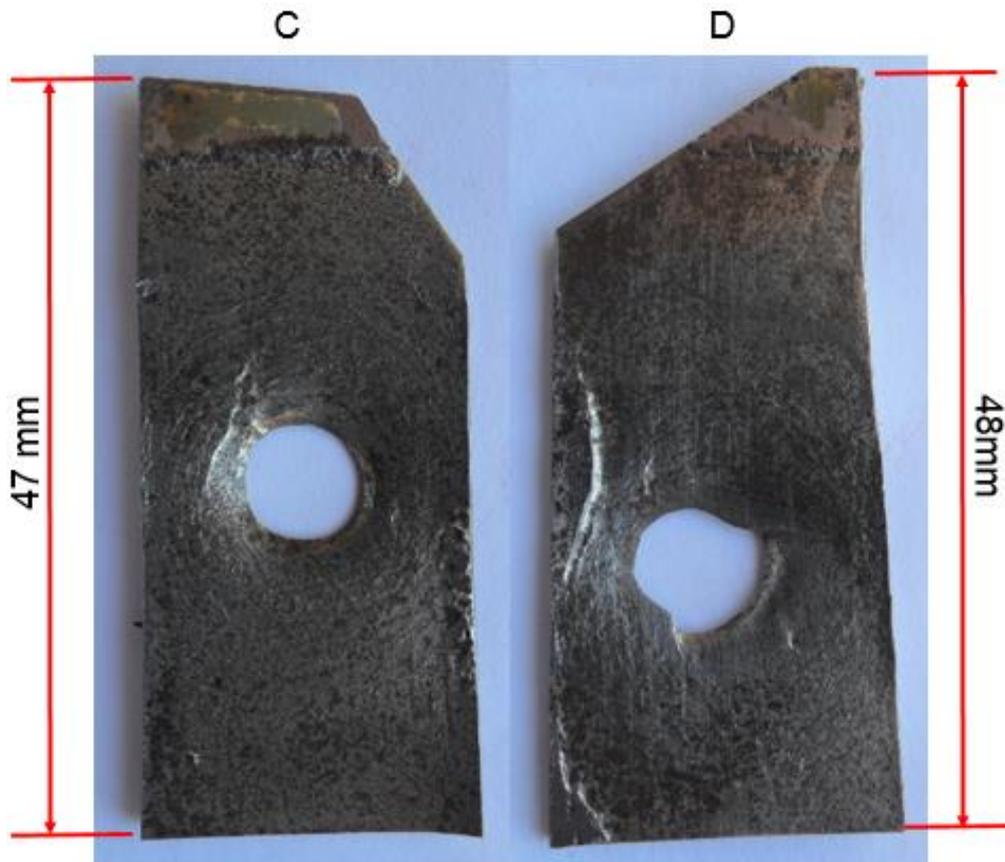
Tabela 3 - Massa retirada com a usinagem eletroquímica nos corpos de prova C e D.

Docol 1000 DP	Corrente	Peso Bruto	Peso Usinado	Perdas
C	50 A	12 g	9 g	25 %
D	100 A	11 g	7 g	36,4 %

O corpo de prova C mostrado na Figura 10, usinado com uma corrente de 50 A tinha inicialmente o peso de 12 g e após usinado ficou com 9 g, perdeu 25 % do

peso inicial. Já o corpo de prova D também mostrado na Figura 10, usinado com 100 A tinha inicialmente 11 g e após usinado ficou com 7 g, perdeu 36,4 % do peso bruto. A massa retirada com a corrente de 100 A também foi maior do que com 50 A.

Figura 10 - Docol 1000 DP – Comparação dos corpos de prova C e D.



O acabamento do corpo de prova C usinado com 50 A também apresentou um acabamento melhor ao corpo de prova D usinado com 100 A, a região usinada ficou com o perfil mais parecido com a geometria da ferramenta, porém tirou menos material. Os corpos de prova C e D tinham apenas 1,2 mm de espessura, devido a isso os mesmos vieram a furar durante a usinagem, com ambas as correntes. No corpo de prova C resultou em um furo bem arredondado, ao contrário do corpo de prova D que resultou em um furo mais deformado devido a aplicação da maior corrente, além disso, as bordas dos furos ficaram arredondadas, mostrando que este processo realmente não deixa rebarbas, conforme referencial teórico a usinagem eletroquímica também é utilizada para rebarbação.

4.2.3 Usinagem realizada com Aço Inoxidável AISI 304

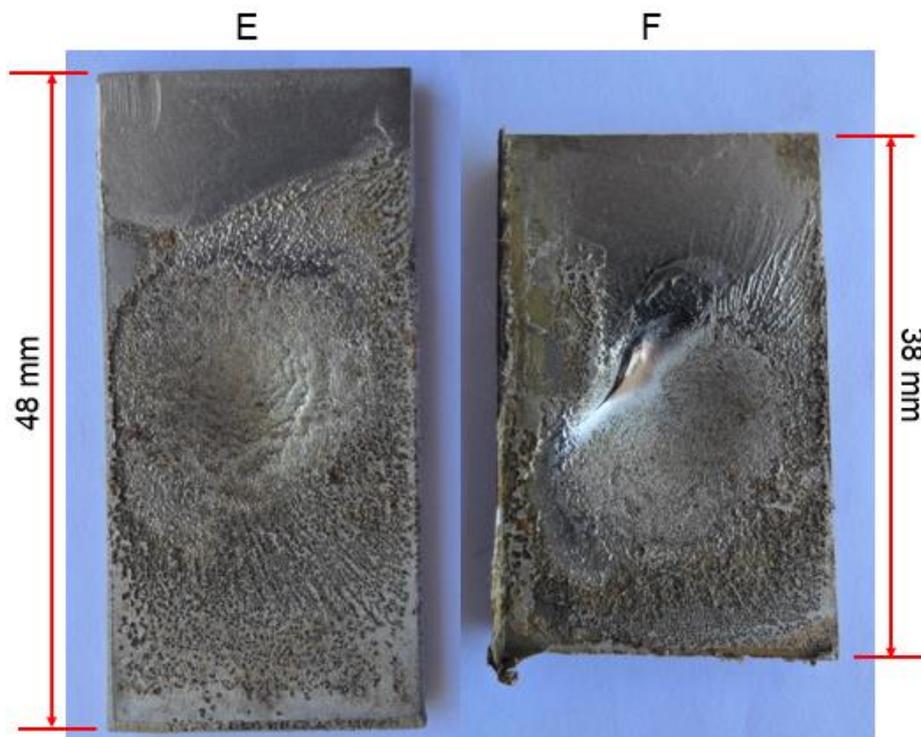
O resultado do teste realizado com o corpo de prova E, e o resultado do teste realizado com o corpo de prova F, são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Massa retirada com a usinagem eletroquímica nos corpos de prova E e F.

AISI 304	Corrente	Peso Bruto	Peso Usinado	Perdas
E	50 A	26 g	23 g	11,6 %
F	100 A	22 g	18 g	18,2 %

O corpo de prova E mostrado na Figura 11, usinado com uma corrente de 50 A tinha inicialmente o peso de 26 g e após usinado ficou com 23 g, perdeu 11,6 % do peso bruto. Já o corpo de prova F também mostrado na Figura 11, usinado com 100 A tinha inicialmente 22 g e após usinado ficou com 18 g, perdeu 18,2 % do peso bruto. Da mesma forma que os testes anteriores, os corpos de prova usinados com corrente de 50 A tiveram uma redução de massa menor, e os corpos que foram usinados com corrente de 100 A tiveram uma redução na massa maior.

Figura 11 - AISI 304 – Comparação dos corpos de prova E e F.



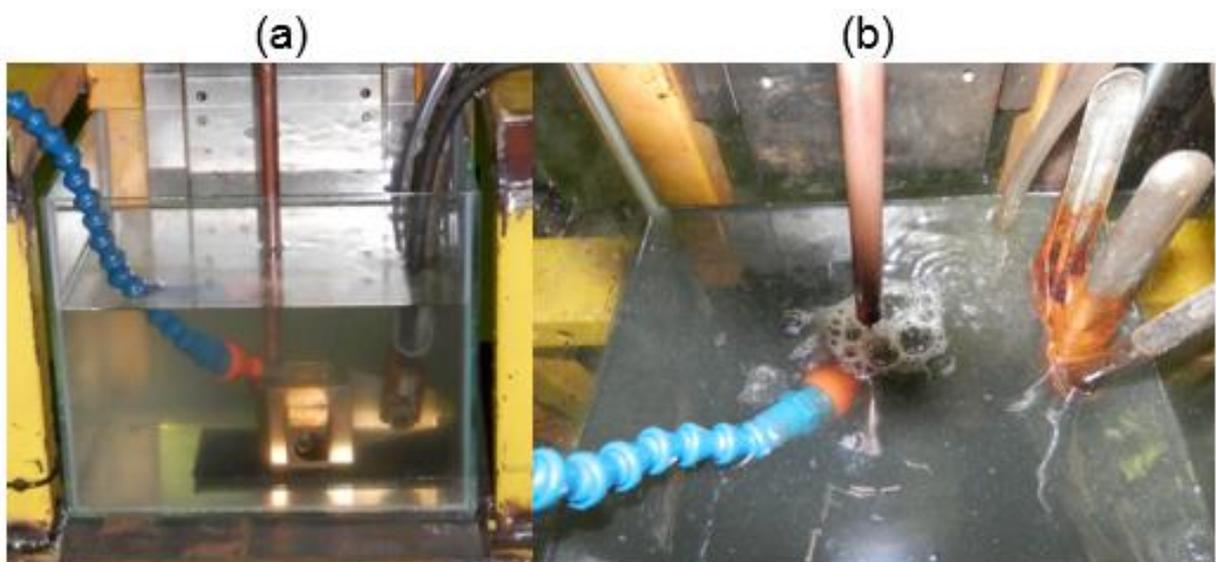
O acabamento do corpo de prova E usinado com 50 A também apresentou um acabamento melhor ao corpo de prova D usinado com 100 A, a região usinada ficou com o perfil mais parecido com a geometria da ferramenta, porém tirou menos material.

De modo geral, foi possível identificar entre todos os corpos de prova usinados, que se desejar retirar mais material se aplica mais corrente elétrica, porém, se desejar melhor acabamento, ou seja, a forma final da peça deve ser aplicada uma corrente elétrica menor.

4.3 ANÁLISES GERAIS

Antes do início de cada teste o eletrólito estava completamente limpo (Figura 12 (a)) e terminou com o eletrólito contaminado, conforme pode ser observado na figura 12 (b). Pode ser verificado que durante o processo da eletrólise ao redor da ferramenta geram bolhas (Figura 12 (b)), e que as partículas do aço removidos dos corpos de prova contaminaram cada vez mais o eletrólito.

Figura 12 - (a) Eletrólito limpo antes da usinagem eletroquímica e (b) depois de um experimento.



O dispositivo não possui um sistema de filtro para garantir que o eletrólito fosse alimentado limpo na região de usinagem, mas isso não interferiu na usinagem dos corpos de prova.

É necessário desenvolver um sistema de filtragem que seja eficiente, mas esse não era o foco do trabalho e ficará como sugestão para trabalhos futuros. A maior dificuldade foi manter o eletrólito dentro da cuba limpo, a mangueira de saída do retorno para o reservatório não foi suficiente.

5. CONCLUSÕES

Através do referencial teórico e da metodologia desenvolvida no trabalho foi possível alcançar o objetivo geral de construção de um dispositivo para usinagem eletroquímica. Fui capaz de associar materiais necessários, que no final formou o dispositivo construído. O dispositivo foi construído e com ele realizado os experimentos práticos com corpos de prova de três diferentes materiais. Com a aplicação de correntes elétricas diferentes, foi possível identificar por meio da análise dos corpos de prova, que a aplicação da menor corrente na usinagem eletroquímica resultou em um acabamento melhor na peça em relação a corrente maior, pois a forma final da região usinada na peça ficou mais parecida com a geometria da ferramenta. Em contrapartida, a corrente elétrica maior aumentou o volume de massa removida.

Pensando em trabalhos futuros, como já foi mencionado nos resultados seria interessante para o dispositivo de usinagem eletroquímica construído, um sistema de filtragem do eletrólito por motivos já relatados.

Além disso, outra sugestão seria fazer um sistema de avanço do cátodo com controle de precisão de distância entre os eletrodos, podendo com isso, adequar a corrente elétrica aplicada em função do avanço.

Também seria interessante fazer experiências mais detalhadas, como por exemplo, analisar a massa retirada de corpos de provas idênticos, com a mesma geometria, trazendo resultados mais exatos, podendo dessa forma afirmar as conclusões levantadas através dos testes realizados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BANNARD, J. (1977). Electrochemical machining . Department of metallurgy and materials, University of Nottingham, UK. Disponível em: < <http://link.springer.com/article/10.1007/BF00615526>>

Acesso em: 22 nov. 2014.

BENEDICT, G. F., 1987, Nontraditional Manufacturing Processes-Electrochemical Machining, Marcel Dekker, New York and Basel, pp.125 – 172.

BRANCO, R., 2010. *Usinagem eletroquímica na indústria metal mecânica*. Fonte: Manutenção e Suprimentos: <http://www.manutencao.esuprimentos.com.br>.

Acesso em: out. 2014

KENNAMETAL. ECM Deburring, 2004. Disponível em: <<http://www.kennametal.com>>.

Acesso em: 30 jun. 2014

KOPELIOVICH, D. Electrochemical machining. Disponível em: <http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=electrochemical_machining>. Acesso em: 3 abr. 2014.

McGEOUGH, J.A., 1988; Advanced Methods of Machining, Chapman and Hall, London, pp. 55 - 88.

MEHER, A. K. (2009). ECM process characteristics. Department of Mechanical Engineering. National Institute of Technology, Rourkela.

USBERCO, J. S. (2002). *Química volume único*. São Paulo: Saraiva.