

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

DIEGO PAULO PENCZKOSKI

**INFLUÊNCIA DA CORRENTE NA ELETROEROSÃO POR
PENETRAÇÃO DE AÇOS INOX 304 UTILIZANDO ELETRODOS DE
COBRE ELETROLÍTICO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2015

DIEGO PAULO PENCZKOSKI

**INFLUÊNCIA DA CORRENTE NA ELETROEROSÃO POR
PENETRAÇÃO DE AÇOS INOX 304 UTILIZANDO ELETRODOS DE
COBRE ELETROLÍTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, da Coordenação de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Irapuan Santos

PONTA GROSSA

2015

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que me apoiaram, e principalmente aos que me deram força nos momentos difíceis.

Agradeço ao meu orientador Prof. Irapuan Santos, pelo apoio na realização deste e de tantos outros trabalhos e pela sempre paciente orientação.

Agradeço especialmente à minha família, pelo apoio e ajuda incondicional as minhas escolhas de vida.

A todos aqueles que participaram desta jornada e fizeram ser possível sua conclusão, obrigado.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Mecânica
Bacharelado em Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO

**INFLUÊNCIA DA CORRENTE NA ELETROEROSÃO POR PENETRAÇÃO DE
AÇOS INOX 304 UTILIZANDO ELETRODOS DE COBRE ELETROLÍTICO**

por

DIEGO PAULO PENCZKOSKI

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 27 de maio de 2015 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Me. Irapuan Santos
Orientador

Prof. Me. Pericles Secco Cancian
Membro Titular

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de Carvalho
Membro Titular

Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima
Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Laercio Javarez Junior
Coordenador do Curso

– O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso –

RESUMO

PENCZKOSKI, Diego Paulo. **Influência da corrente na eletroerosão por penetração de aços inox 304 utilizando eletrodos de cobre eletrolítico**. 2015. 42. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2015.

Este trabalho propõe a análise exploratória da influência da variação da corrente no processo de usinagem de eletroerosão por penetração de aços inoxidáveis 304, utilizando eletrodos de cobre eletrolítico com polaridade positiva, buscando-se estabelecer correlações entre os valores disponíveis na literatura para o emprego do procedimento em ligas de aço. Foi verificada um maior desgaste do eletrodo na usinagem de aço AISI 304 que para aços comuns com o aumento da corrente e também uma menor taxa de remoção.

Palavras-chave: Eletroerosão por penetração. Variação de parâmetros de usinagem. Usinagem de Aço Inoxidável AISI 304.

ABSTRACT

PENCZKOSKI, Diego Paulo. **Current variation influences on Electrical Discharge Machining of AISI 304 Stainless Steel using electrolytic copper electrode.** 2015. 42. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Federal Technology University - Parana. Ponta Grossa, 2015.

This work proposes an exploratory analysis of the current variation influence on the die-sinking EDM machining process of 304 stainless steel using electrolytic copper electrodes. It was establish correlations between the values available in the literature for the use of the procedure in alloy steel. It was verified increasing on electrode wear in the machining of AISI 304 steel when compared to common steels with increasing current and lower material removal rate.

Keywords: Die-sinking Electrical Discharge Machining. Machining parameters variation. AISI 304 Austenitic Stainless Steel Machining.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Medalha das Olimpíadas de Inverno 2014.....	10
Figura 2 – Representação do processo de eletroerosão.....	14
Figura 3 – Perfil de um pulso de eletroerosão.....	15
Figura 4 – Rugosidade média aritmética (R_a).....	18
Figura 5 – Rugosidade da máxima altura entre pico-vale (R_y).....	18
Figura 6 – Dimensões dos materiais ensaiados.....	23
Figura 7 – Equipamento de eletroerosão Engemaq EDM 440 NC.....	24
Figura 8 – Medição do paralelismo entre eletrodo e peça.....	25
Figura 9 – Setup dos parâmetros de ensaio.....	26
Figura 10 – Efeitos do aumento de corrente sobre o desgaste relativo.	28
Figura 11 – Efeitos do aumento de corrente sobre a taxa de remoção de material.	30
Figura 12 – Efeitos do aumento de corrente sobre a rugosidade R_a	31
Figura 13 – Efeitos do aumento de corrente sobre a rugosidade R_y	32
Figura 14 – Efeitos do aumento de corrente sobre a rugosidade R_z	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do aço AISI 304.....	19
Tabela 2 – Principais propriedades do eletrodo utilizado.....	20
Tabela 3 – Valores obtidos pelo fabricante em ensaios padrão.....	21
Tabela 4 – Parâmetros de ensaio utilizados em respectivas amostras.....	23
Tabela 5 – Parâmetros de usinagem fornecidos pelo fabricante.....	39
Tabela 6 – Pesagem dos materiais ensaiados.....	40
Tabela 7 – Resultados obtidos nos ensaios de eletroerosão.....	41
Tabela 8 – Resultados obtidos na medição de rugosidades.....	41
Tabela 9 – Resultados finais e incertezas.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS

DT	<i>Duty Time (%)</i>
i	Corrente (A)
MRR	Taxa de Remoção de Material (mm ³ /min)
r	Tempo de retração do eletrodo (s)
R _a	Rugosidade média Aritmética (μm)
R _y	Altura máxima de perfil (μm)
R _z	Altura de cinco pontos de rugosidade (μm)
t	Tempo de usinagem
t _{on}	Tempo de onda ligado (μs)
t _{off}	Tempo de onda desligado (μs)

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
EDM	<i>Electrical Discharge Machining</i>

LISTA DE ACRÔNIMOS

CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
gap	<i>Distância entre o eletrodo e a peça, medida em milímetros</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVO GERAL	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 HISTÓRICO	12
2.2 PRINCÍPIOS DO PROCESSO.....	13
2.3 PARÂMETROS DE INTERESSE.....	16
2.4 MATERIAIS EMPREGADOS	19
2.5 PARÂMETROS ANALISADOS	20
3 METODOLOGIA.....	22
3.1 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENSAIO	22
3.2 PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS	23
3.3 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS.....	24
3.4 COMPILAÇÃO DOS DADOS OBTIDOS.....	26
4 RESULTADOS	28
4.1 TAXA DE DESGASTE RELATIVO DO ELETRODO.....	28
4.2 TAXA DE REMOÇÃO DE MATERIAL	29
4.3 RUGOSIDADES	31
5 CONCLUSÃO.....	34
6 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	35
REFERÊNCIAS.....	36
ANEXOS	39
APÊNDICES	40

1 INTRODUÇÃO

Os processo de fabricação vem se destacando ao longo dos anos na produção de bens e serviços, do mais simples mecanismo de alavanca em uma maçaneta a mais complexa turbina em um avião comercial.

Os avanços tecnológicos têm proporcionado o desenvolvimento de diversos materiais inovadores, e com isso, o surgimento de processos de fabricação capazes de transformá-los e realizar facilmente geometrias complexas que antes somente poderiam ser obtidas por processos demorados e/ou dispendiosos.

Novas técnicas possibilitam que o método de fabricação escolhido seja uma questão de custo, disponibilidade ou até mesmo afinidade com o processo. A possibilidade que os diversos métodos de fabricação proporcionam pôde ser verificada recentemente nas medalhas das Olimpíadas de Inverno de Sochi 2014, conforme figura 1.



**Figura 1 – Medalha das Olimpíadas de Inverno 2014.
Fonte: Official Sochi 2014 Winter Olympics (2014)**

Cada medalha passou por diversos métodos de fabricação durante as 18 horas necessárias para sua confecção. Um dos métodos empregados foi a *eletroerosão a fio* da cavidade que receberia o policarbonato com as gravuras representando a diversidade cultural russa (Forbes, 2014).

A usinagem por eletroerosão, ou *electrical discharge machining* (EDM), é um processo de usinagem que remove o material pela erosão através de descargas elétricas. Diferente dos processos convencionais de usinagem, a remoção de material não ocorre por cisalhamento ou deformação, portanto a dureza, resistência

e tenacidade não possuem a mesma influência na remoção de material, como ocorre nos processos convencionais por geometria definida (GUITRAU, 1997).

Este processo possui grande aplicação na confecção de matrizes de estampos de corte, matrizes para moldes de injeção e matrizes para forjaria, assim como, na usinagem de ferramentas de metal duro com maior eficiência quando comparado aos processos convencionais de usinagem (MALHOTRA, et. al., 2008).

Como em todo processo de fabricação, conhecer o maior número de variáveis e possuir dados que possibilitem uma configuração inicial dos equipamentos é fundamental para adquirir maior agilidade e controle do produto final. Este trabalho propõe analisar a influência da variação da corrente no processo de eletroerosão por penetração, visando uma maior eficiência do mesmo, na fabricação de peças em aço inox ABNT/AISI 304, utilizando eletrodos de cobre eletrolítico.

Através da análise dos ensaios realizados, será possível comparar os resultados obtidos com a literatura, principalmente dos dados fornecidos pelo fabricante, e estabelecer padrões nos valores ensaiados com suas respectivas incertezas, para a taxa de desgaste do eletrodo (V_y), taxa de remoção de material (V_w) e as rugosidades superficiais (R_a , R_y e R_z).

1.1 OBJETIVO GERAL

Buscar a obtenção de parâmetros de controle de processo, através de uma análise exploratória dos resultados obtidos em ensaios de usinagem por eletroerosão de aços inox AISI 304 e sua influência no processo de eletroerosão.

Ainda, confrontar os valores obtidos durante os ensaios com as tabelas fornecidas pelo fabricante do equipamento, já que a mesma (tabela 6) não especifica o tipo de aço utilizado para a obtenção dos valores recomendados de usinagem. Verificar se o comportamento dos ensaios estão próximos aos fornecidos, e se justifica-se o fato da não especificação do material usinado, caso o comportamento esperado seja o mesmo para a maioria dos aços.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A eletroerosão é apresentada como um dos processos mais utilizados na fabricação de moldes para fundição e injeção, por ser capaz de gerar formas complexas tridimensionais somente pela energia térmica gerada pela fagulha na cavidade do material condutor, independentemente de sua dureza (AMORIM; WEINGAERTNER, 2002)

2.1 HISTÓRICO

Segundo Kumar, et. al. (2009), a erosão de materiais por fagulha elétrica se iniciou em 1770, com John Priestly. Porém, somente em 1943 que os irmãos Lazarenko exploraram as propriedades destrutivas de descargas elétricas para uso construtivo, anos depois em um equipamento com maior capacidade de controle sobre a área em que ocorriam as descargas elétricas.

As primeiras patentes americanas apareceram em 1952, em máquinas utilizando fontes do tipo resistência-capacitância, o que serviu como base para o desenvolvimento de modelos sucessores. Os computadores contribuíram, em meados de 1970, para o controle do processo através de comando numérico computadorizado (CNC), e a utilização da eletroerosão aumentou significativamente em 1980 com aplicações em micro usinagens (HOCHENG, et. al., 2008).

A eletroerosão é um processo de usinagem que vem se destacando no mercado desde sua introdução. Para Lee e Li (2001), ocorreram enormes avanços desde a introdução do tema a 50 anos, assim como as capacidades e aplicações na fabricação utilizando tecnologias mais velozes e precisas.

A partir de 2000, aumentou-se o interesse acadêmico e industrial no processo. Ao longo de 65 anos, da primeira aplicação industrial, os avanços são consideráveis mas ainda há dificuldades, como por exemplo, o aumento da quantidade de material removido em que ocorra menor desgaste do eletrodo e um melhor acabamento superficial possível (MALHOTRA, et. al., 2008).

A frequência de descargas elétricas ou a energia por descarga controlam a velocidade de remoção de material. A velocidade de remoção e a rugosidade da superfície aumentam com o aumento da densidade de corrente e diminuição da

frequência. O aumento da densidade de corrente implica, porém, num maior desgaste do eletrodo, comprometendo a tolerância dimensional da peça produzida. (ABBAS, et. al., 2007)

Expandindo-se de um pequeno nicho de fabricação de ferramentas de corte de precisão até necessidades aeroespaciais, médicas, assim como diversas possibilidades para materiais condutores. Ampliado pela automação de maquinário e robôs capazes de realizar operações mais vários eixos, o processo de eletroerosão adquiriu autonomia e 'seu lugar de direito' juntamente com os processos convencionais de usinagem. (ZHANG, et. al., 2014)

2.2 PRINCÍPIOS DO PROCESSO

A eletroerosão é um processo de fabricação para materiais que possuem como característica a condutividade elétrica. Segundo Gostimirovic, et. al. (2012), sua aplicação decorre da necessidade de se fabricar peças com geometria complexa e de dureza elevada, que outros processos teriam dificuldade em realizar.

De acordo com Kumar, et. al. (2008), o processo ocorre pela conversão da energia elétrica, através de descargas elétricas entre o eletrodo e a peça, em energia térmica. O mecanismo de descarga elétrica ocorre em um fluido, onde estão imersos o eletrodo e o material a ser usinado.

As descargas elétricas ocorrem quando a distância entre eletrodo e peça (*gap*) atinge uma distância suficiente para romper as propriedades resistivas do fluido, e permitir que a fagulhas elétricas deixem o eletrodo carregado (ânodo) e atinjam a peça (cátodo). A figura 2 apresenta uma representação do processo de eletroerosão.

Segundo Gostimirovic, et. al. (2012), a pequena seção transversal da descarga elétrica forma uma zona de plasma que atinge temperaturas de 40.000°C, enquanto a superfície usinada atinge 10.000°C. Essas temperaturas são responsáveis pelo aquecimento, fundição e evaporação do material atingido pela descarga elétrica na superfície erodida.

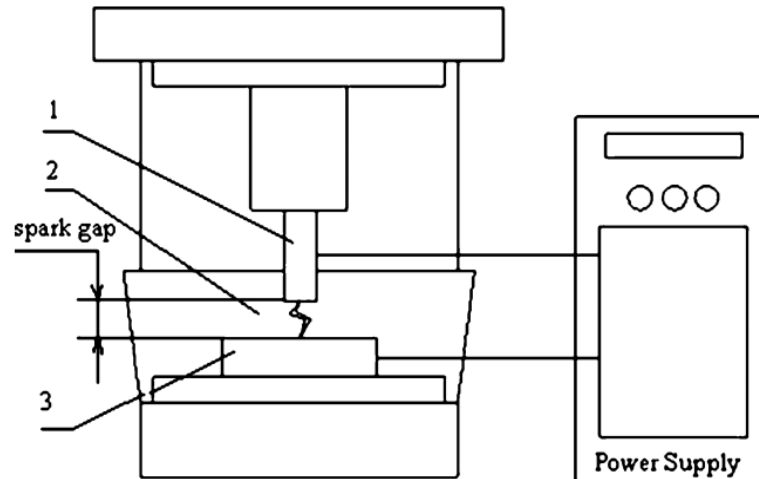


Figura 2 – Representação do processo de eletroerosão.
 1 - eletrodo, 2 - fluido dielétrico e 3 - peça.
 Fonte: KHAN, 2008

Após cada descarga, os capacitores são recarregados e verifica-se a sucessão de diversas descargas elétricas, a energia é concentrada em uma pequena seção transversal fundindo o material a ser usinado e provocando uma cavidade erodida pela descarga elétrica. (GUITRAU, 1997)

Muthuramalingan e Mohan (2014) discutiram o uso de fontes controladoras em comparação ao circuitos resistor-capacitor empregado pelos irmãos Lazarenko e sua importância, principalmente no acabamento superficial do produto final. Segundos eles, os controladores garantem uma maior uniformidade na distribuição dos pulsos de descargas elétricas.

Para o momento em que estão ocorrendo as descargas elétricas a literatura atribui o termo de T_{on} , em que a tensão aumenta até formar um canal ionizado entre o eletrodo e a peça, quebrando o dielétrico, e permitindo que a corrente flua do ânodo para o cátodo. Esse mecanismo sacrifica o ânodo, devido ao aquecimento pela energia empregada, causando o desgaste do eletrodo. (SANSONE, 2010)

Após a descarga ocorrer a tensão cai e o canal ionizado formado se desfaz, isso possibilita que as partículas de material fundido que estavam contidas no canal sejam retiradas forçadamente através de fluido, evitando estas de interferir na distância de *gap* e provocar curto-circuitos. (MUTHURAMALINGAM; MOHAN, 2014)

O controle dos mecanismos de geração dos pulsos de descarga tornaram-se possíveis com a introdução dos controladores de pulso, que desligam a corrente

quando ela atinge seu ponto máximo. O tempo em que o pulso é controlado, e não ocorrem descargas elétricas recebe o termo de T_{off} . (GUITRAU, 1997)

Kumar, et. al. (2009) demonstra que antes das descargas ocorrerem a voltagem aumenta num circuito aberto em torno de 100 V, até que o fluído dielétrico seja ionizado e a corrente comece a fluir, levando a uma queda na tensão para 35 V até que a corrente atinja seu valor máximo quando o controlador atua desligando a corrente e a tensão. Isso se caracteriza um ciclo, com um tempo de T_{on} e um tempo de T_{off} , como pode ser visualizado na figura 3.

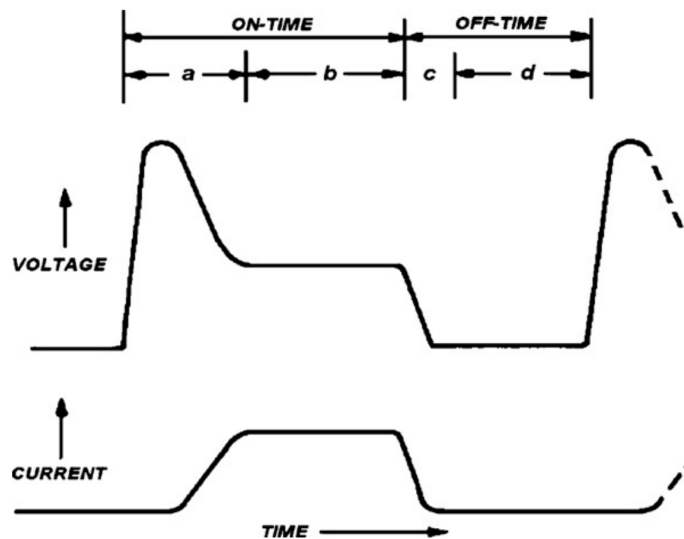


Figura 3 – Perfil de um pulso de eletroerosão.
Fonte: KUMAR, et. al., 2014

Este ciclo é empregado na literatura devido a sua influência no tempo de usinagem, sendo sua relação empregada nos estudos de análise de taxa de remoção e desgaste. Guitrau (1997) chama a relação entre os ciclos de onda ligada (T_{on}) e desligada (T_{off}) de *Duty Time*, conforme a equação 1:

$$DT = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \cdot 100 \quad (\text{eq. 1})$$

Alguns autores, como Santos (2010), indicam o emprego de um tempo de retração durante a eletroerosão, tempo em que o eletrodo se distancia da peça e permite uma melhor retirada das partículas fundidas da cavidade de eletroerosão.

2.3 PARÂMETROS DE INTERESSE

Arantes (2007) divide o estudo do resultado do processo de eletroerosão por penetração em função das alterações nos aspectos de textura superficial, referente a rugosidade superficial, e de integridade superficial, associada às mudanças microestruturais durante o processo.

Para o caso de aços austeníticos as mudanças microestruturais podem ser agravadas por se tratar de um aço que tende a sofrer maior influência de variações térmicas, como a têmpera para a eletroerosão destes aços, portanto o entendimento do processo e o controle de seus parâmetros é de fundamental importância para a obtenção da geometria, acabamento e propriedades do produto final.

Para a determinação da quantidade de material removido do eletrodo e do corpo de prova utilizou-se da relação entre o volume e a densidade. Seguindo os valores de densidades apresentados nas tabelas 1 e 2, pela equação 2 (GUITRAU, 1997):

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (\text{eq. 2})$$

Onde:

V = volume (mm³);

m = massa (g);

ρ = densidade (g/mm³).

A partir destes valores calculou-se o desgaste relativo, a taxa de desgaste do eletrodo (V_y), a relação da diferença dos volumes iniciais e finais do eletrodo de cobre eletrolítico e dos volumes iniciais e finais do corpo de prova de aço AISI 304, conforme a equação 3 (GUITRAU, 1997):

$$V_y = \frac{V_{ei} - V_{ef}}{V_{ci} - V_{cf}} \cdot 100 \quad (\text{eq. 3})$$

Onde:

V_y = taxa de desgaste relativo do eletrodo;

V_{ei} = volume inicial do eletrodo;

V_{ef} = volume final do eletrodo;

V_{ci} = volume inicial do corpo de prova;

V_{cf} = volume final do corpo de prova.

Segundo Khan (2008), maiores correntes removerão maiores quantidades de material porém a quantidade de material removido do eletrodo também será maior. Como o formato do eletrodo afeta diretamente o produto final, ocorrerão problemas de forma e acabamento na peça, portanto é necessário balancear os parâmetros de entrada para controlar as influências do processo.

A determinação da taxa de remoção de material (V_w), é a relação do volume de material retirado do corpo de prova durante o tempo de realização dos ensaios, conforme equação 4 (GUITRAU, 1997):

$$V_w = \frac{V_{ci} - V_{cf}}{t} \quad (\text{eq. 4})$$

Onde:

V_w = taxa de remoção de material (mm^3/min);

t = duração do ensaio (min).

Quanto à taxa de remoção de material, para Gostimirovic, et. al. (2011), em condições reais a corrente de descarga e a duração de pulso são os principais fatores de influência na quantidade de material removido, assim a maior parte da energia de descarga do processo é utilizada refundindo partículas que não foram expulsas da cavidade erodida o que afeta diretamente a produtividade da eletroerosão.

As interações de integridade superficial são analisadas pela rugosidade superficial e suas relações. A rugosidade superficial determina o perfil analisado conforme a norma DIN, para as análises de tipos R_a , R_y e R_z .

A rugosidade R_a caracteriza-se pelo valor da altura do retângulo formado pela média aritmética das áreas do perfil formadas pela linha disposta de modo que as áreas do perfil sejam as mesmas acima e abaixo desta linha (linha média), conforme demonstra a figura 4.

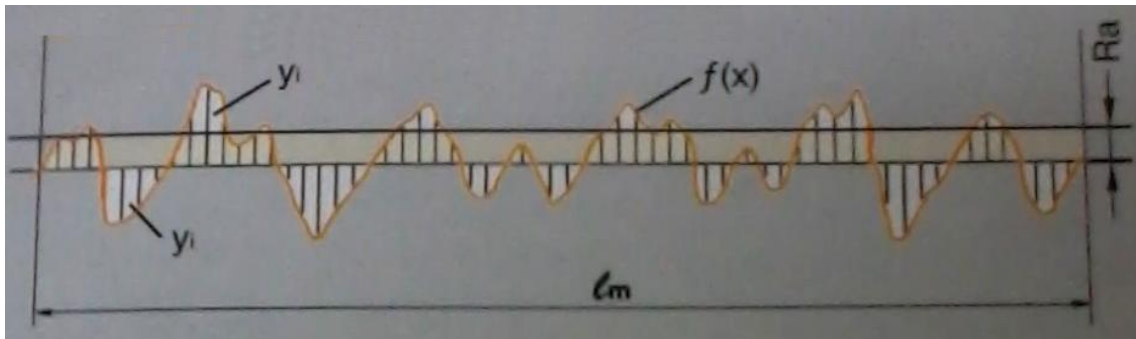


Figura 4 – Rugosidade média aritmética (R_a).
 Fonte: Adaptação de Mitutoyo, 2014

A rugosidade R_y corresponde ao valor da máxima distância entre picos e vales (Z) do perfil obtidos no percurso de medição (l_m) é dividido em um número de seções, como apresentada a figura 5, correspondente ao comprimento de amostra definido no aparelho de medição de rugosidade.

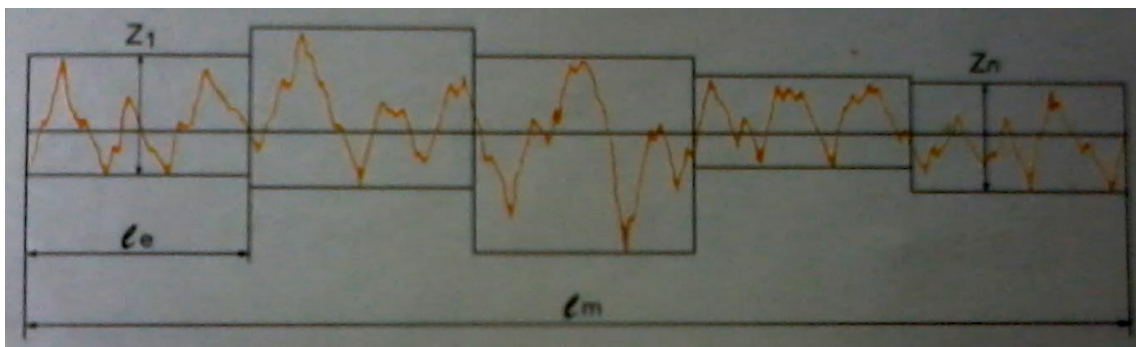


Figura 5 – Rugosidade da máxima altura entre pico-vale (R_y).
 Fonte: Adaptação de Mitutoyo, 2014

Similar a R_y , a rugosidade R_z corresponde ao valor médio das distâncias máximas dos picos e vales obtidos no perfil dividindo o percurso de medição (l_m) em um número n de seções de comprimentos correspondentes (l_e).

A rugosidade R_y representa o valor máximo obtido no perfil no comprimento de amostra porém pode se tratar de um valor isolado e mascarar as demais medidas, R_z contribui para que o valor medido represente melhor o perfil como um todo no percurso de medição.

2.4 MATERIAIS EMPREGADOS

Neste trabalho analisou-se o comportamento de uma peça de aço inoxidável austenítico usinada pelo processo de eletroerosão por penetração utilizando eletrodo de cobre. Segundo Amorim e Weingaertner (2004), aços inoxidáveis são empregados na fabricação de moldes para injeção por sua proteção contra corrosão e boa condutividade térmica. Isso garante uma redução do tempo de resfriamento do materiais moldados e um maior controle dimensional, assim como, resistência à corrosão as resinas plásticas empregadas nos produtos a serem moldados.

O aço escolhido para a realização dos ensaios foi o aço ABNT/AISI 304, e caracteriza-se por um aço austenítico com alta ductilidade, seu baixo teor de carbono evita que carbonetos se precipitem na zona refundida gerada durante o tempo de descarga desligado. As composições químicas desta liga são apresentadas na tabela 1. (MATWEB, 2014)

Tabela 1 – Características do aço AISI 304

Aço inox austenítico Cr-Ni			
Densidade	8 g/m ³	Carbono, C	< 0,030 %
Dureza Rockwell B	82	Cromo, Cr	18-20 %
Dureza Rockwell C	12	Ferro, Fe	64,9 – 74 %
Tensão de Elasticidade	210 MPa	Manganês, Mn	< 2,0 %
Tensão Máxima	564 MPa	Níquel, Ni	8,0 – 12 %
Módulo de Elasticidade	193 – 200 GPa	Fósforo, P	< 0,045 %
Condutividade Térmica	14 – 16,3 W/mK	Silício, Si	< 1,0 %
Ponto de Fusão	1400 – 1450 °C	Enxofre, S	< 0,030 %

Fonte: Adaptação de Online Material Property Data – MATWEB (2014)

Para preparação dos corpos de prova utilizou-se fluídos refrigerantes durante o corte dos corpos de prova buscando evitar alterações que pudessem acarretar discrepâncias nos resultados.

Na escolha do material do eletrodo buscou-se manter o mesmo material utilizado nos ensaios do fornecedor do equipamento, cuja tabela 5 encontra-se na

seção de Anexos, para realizar a comparação dos resultados obtidos neste trabalho. Khan (2008) indica a utilização de eletrodos de cobre por estes possuírem uma maior eficiência na taxa de remoção com o aumento da corrente de entrada na usinagem de aços em comparação a outros materiais, como o latão, e por seu custo quando comparado aos eletrodos de grafite. A tabela 2 apresenta as principais propriedades do cobre eletrolítico.

Tabela 2 – Principais propriedades do eletrodo utilizado

Cobre Eletrolítico	
Densidade	8,91 g/ m ³
Condutividade Térmica	391 W/mK
Ponto de Fusão	1083 °C
Resistividade Elétrica	1,69 ohm.cm
Capacidade Térmica	0,385 J/g°C

Fonte: Khan (2008)

2.5 PARÂMETROS ANALISADOS

Este estudo busca analisar a influência do aumento na corrente sobre a desgaste da ferramenta, remoção de material e acabamento superficial.

As condições de ensaio foram baseadas na tabela 5 fornecida pelo fabricante do equipamento e estabelecidas levando em consideração os parâmetros de interesse a serem analisados. Como parâmetro principal de variação a corrente de entrada (i) foi escolhida por sua influência na eficiência do processo, já os tempos de descarga elétrica ligada (T_{on}), o *duty time* (DT) e polaridade positiva do eletrodo foram mantidos constantes.

Como este estudo pretende comparar a influência da corrente no desgaste da ferramenta, remoção de material e acabamento superficial com os valores fornecidos pelo fabricante, conforme a tabela 3, o *duty time* utilizado foi o mesmo tabelado pelo manual do equipamento 89% para um valor de T_{on} igual a 100 μ s.

Os valores fornecidos pelo fabricante seguem o procedimento de eletroerosão por penetração utilizando eletrodos de cobre eletrolítico, com polaridade positiva, em corpos de prova de aço (n para uma tensão de 100V.

Tabela 3 – Valores de usinagem fornecidos pelo fabricante

T_{on} (μs)	i (A)	DT (%)	R_{max} (μm)	V_w (mm^3/min)	V_y (%)
100	3	89	19	3,5	0,0
100	6	89	23	22	0,8
100	9	89	28	37	1,2
100	12	89	30	62	1,3
100	15	89	33	87	2,7
100	18	89	35	112	4
100	21	89	37	128	6,5
100	24	89	38	144	9
100	27	89	40	172	10
100	30	89	42	200	11
100	33	89	45	216	12
100	36	89	47	232	13

Fonte: Adaptação de manual do equipamento de eletroerosão EDM 440 – ENGEMAQ (2002)

3 METODOLOGIA

A metodologia empregada buscou determinar os parâmetros fixos e variáveis, padronização dos materiais ensaiados e de repetições suficientes para o cálculo de intervalo de confiança.

Os ensaios propõem a obtenção de uma cavidade de 5 milímetros de profundidade a partir de um eletrodo de cobre eletrolítico de uma polegada de diâmetro em um corpo de prova de aço inox AISI 304 de uma polegada e meia de diâmetro, obtidos comercialmente.

O estudo realizado por Arantes (2003) mostra que a escolha do dielétrico também é fundamental no processo, influenciando diretamente o acabamento superficial, provocando superfícies irregulares, porosidades e microtrincas. Os ensaios realizados utilizaram o fluido dielétrico de hidrocarboneto *Electron*, indicado pelo fabricante e inerte ao manuseio.

3.1 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENSAIO

Conforme a literatura apresenta, o principal fator de influência no processo de usinagem por eletroerosão é a corrente de entrada, principalmente na qualidade da cavidade obtida no tempo de usinagem. Por isso, escolheu-se como parâmetro principal de análise da corrente disponível no equipamento pela corrente de entrada 1 a 34,5 A para o controlador 440 NC. (Engemaq, 2002)

Buscando obter a influência da corrente no processo, determinou-se que os demais parâmetros de influência no processo seriam mantidos constantes para este estudo. Os parâmetros a serem mantidos fixos caracterizaram-se por tempos de descarga elétrica ligado (T_{on}), assim como sua relação com o *duty time* (DT), o afastamento do eletrodo para facilitar a lavagem de cavaco e o fluido dielétrico utilizado.

Os resultados obtidos foram confrontados com os dados disponíveis na tabela 5, fornecidos pelo fabricante do equipamento, que apresenta uma faixa de 3 a 36 A (TS 1 a 12) para o parâmetro de tempo de T_{on} selecionado ($T_{on} = 100$), portanto as variações do aumento de corrente foram convencionadas conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros de ensaio utilizados em respectivas amostras

Parâmetros de Ensaio			
T _{on} (μ s)	DT (%)	Corrente (A)	Identificação das amostras (e ordens de ensaio)
100	89	6	2a (1), 2b (7), 2c (13)
100	89	12	4a (2), 4b (8), 4c (14)
100	89	18	6a (3), 6b (9), 6c (15)
100	89	24	8a (4), 8b (10), 8c (16)
100	89	30	10a (5), 10b (11), 10c (17)
100	89	33	11a (6), 11b (12), 11c (18)

Com estas variações de corrente foram obtidos os gráficos para a análise de sua influência em relação ao desgaste relativo do eletrodo (V_y), taxa de remoção de material (V_w) e rugosidades relativas (R_a , R_y e R_z). Para garantir a confiabilidade dos ensaios foram realizadas três repetições para cada valor de corrente, correspondendo a um total de 18 ensaios.

3.2 PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS

Os corpos de prova e eletrodos utilizados foram adquiridos comercialmente na forma de tarugos redondos e usinados nos laboratórios do campus nas dimensões apresentadas na figura 6.

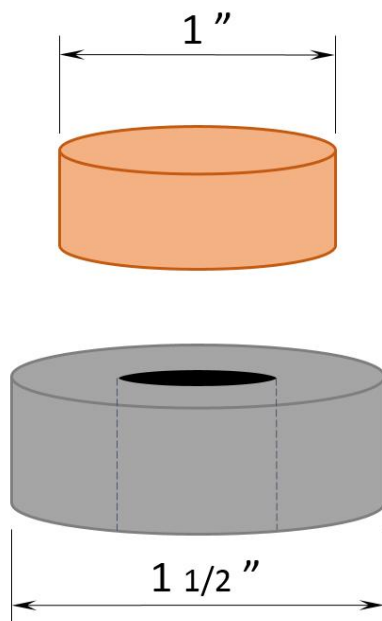


Figura 6 – Dimensões dos materiais ensaiados.

Ambos materiais foram seccionados em 18 amostras, através de um disco de corte, usinados, identificados e pesados em uma balança calibrada, modelo Chyo 180 com incremento de escala 0,001 g e capacidade máxima de 180 g, os equipamentos utilizados encontram-se nos laboratórios de Ensaio de Materiais e de Usinagem do Campus Ponta Grossa, as informações referentes aos valores obtidos encontra-se na tabela 6 na seção de Apêndices.

3.3 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

O equipamento utilizado para realizar os ensaios foi uma máquina de eletroerosão ENGEMAQ EDM 440 NC, conforme figura 7, que encontra-se no laboratório de usinagem da universidade. O roteiro de ensaios seguiu o padrão de preparação do equipamento, fixação dos materiais, inserção de dados, retirada e limpeza dos materiais após os ensaios.



Figura 7 – Equipamento de eletroerosão Engemaq EDM 440 NC.

A preparação do equipamento de eletroerosão ocorreu no desligamento das funções da mesma, bloqueio do painel para evitar que comandos fossem inseridos,

esvaziar a cuba de fluído dielétrico, retirar quaisquer materiais que estivessem dentro da cuba, e retirar o eletrodo do cabeçote.

A fixação dos materiais foi realizada após a preparação do equipamento, fixando o eletrodo (ânodo) no cabeçote, e o corpo de prova (cátodo) em uma morsa no interior da cuba. Ainda, foi verificado o paralelismo entre a face do eletrodo e a face do corpo de prova com a ajuda de um relógio comparador, como demonstrado na figura 8, fazendo os ajustes necessários no cabeçote (que possui uma regulagem de giro em dois planos) visando minimizar possíveis erros de paralelismo.



Figura 8 – Medição do paralelismo entre eletrodo e peça.

Ocorria a inserção de dados através do painel controlador, onde o setup incluía a definição de tempo de descarga ligado (T_{on}), *duty time* (DT), corrente de

entrada (TS), afastamento (0,5 s) e deslocamento no eixo z, como pode ser observado na figura 9.

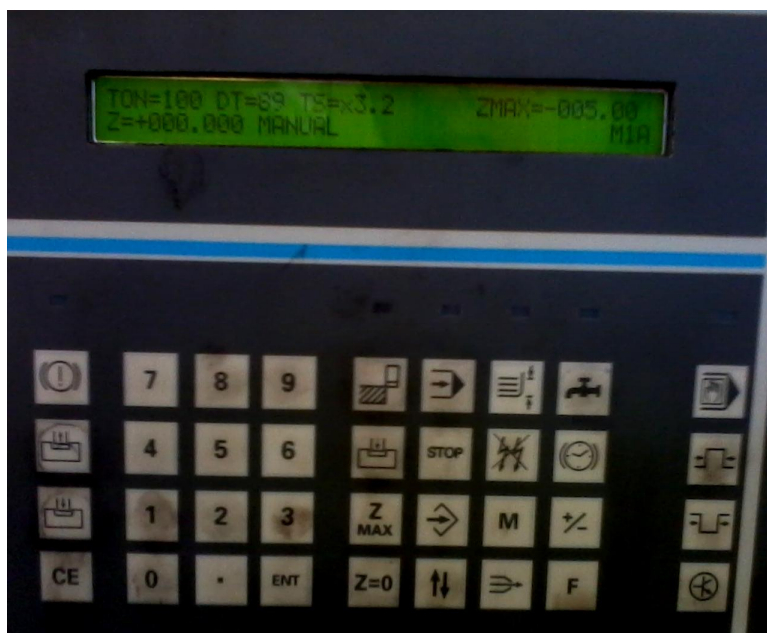


Figura 9 – Setup dos parâmetros de ensaio.

A lavagem de resíduos foi realizada através de uma mangueira posicionada no interior da cuba que possui uma base magnética de fixação, o tipo da lavagem realizado durante os ensaios foi o de lavagem forçada posicionando o bico da mangueira em um ângulo de aproximadamente 45° entre eletrodo e a peça.

Ao final do ensaio, quando o valor inserido para o eixo z é atingido (Z_{\max}), um aviso sonoro era emitido pelo equipamento indicando o fim de erosão e o procedimento de retirada dos materiais era iniciado. Os materiais foram limpos, secos, e armazenados para que pudessem ser pesados.

3.4 COMPILAÇÃO DOS DADOS OBTIDOS

A taxa de desgaste relativo é esperada que seja menor que os dados informados pelo fabricante do equipamento, conforme os estudos de Amorin e Weingaertner (2002), Arantes (2007), Abbas, et. al. (2007) e Khan (2008), que concluíram que o cobre apresenta um menor desgaste relativo na realização da eletroerosão em ligas metálicas.

Após a realização dos ensaios os materiais foram submetidos a novamente a pesagem em balança de precisão Chyo 180, para que pudessem ser calculados as propriedades de interesse de análise, estes valores podem ser verificados na tabela 6 na seção de Apêndices. A diferença na massa possibilitou o cálculo da taxa de desgaste do eletrodo (V_y) e da taxa de remoção de material (V_r), através das equações 3 e 4.

Ainda foram realizados os ensaios de rugosidade superficial. Para isso, utilizou-se o equipamento Mitutoyo SurfTest 301, do laboratório de Metrologia do campus. O equipamento passou pela calibração inicial utilizando um padrão que possui $2,95 \mu\text{m } R_a$ e $9,5 \mu\text{m } R_y$. Os ensaios seguiram três repetições, utilizando cinco comprimentos de amostra e *cut-off* 0,8 mm para cada corpo de prova na superfície lateral da cavidade obtida no processo, para a determinação das rugosidades tipo R_a , R_y e R_z que são indicadas no visor do aparelho após a medição para cada repetição.

Após a realização de todos os ensaios, foram calculados os desvios padrão dos valores obtidos e seus respectivos intervalos de confiança, utilizando um coeficiente de incerteza de resultados de 95%, conforme a equação 5 (CORREIA, 2003). A figura 18, que demonstra os valores de incertezas obtidos, pode ser visualizada na seção de Apêndices.

$$IC_{\mu} = \left(X - t_{n-1} \frac{S}{\sqrt{n}} ; X + t_{n-1} \frac{S}{\sqrt{n}} \right) \quad (\text{eq. 5})$$

Onde:

IC_{μ} = intervalo de confiança para a média;

\bar{X} = média aritmética dos valores ensaiados;

t_{n-1} = coeficiente de *student* para a amostragem n ;

n = amostragem.

4 RESULTADOS

Os resultados foram analisados confrontando os valores obtidos nos ensaios realizados em laboratório para os materiais utilizados com os fornecidos pelo fabricante, conforme a tabela 3, para a variação na corrente de entrada (TS) e suas influências na taxa de desgaste do eletrodo (V_y), taxa de remoção de material (V_w) e valores de rugosidade (R_a , R_y e R_z).

4.1 TAXA DE DESGASTE RELATIVO DO ELETRODO

A figura 10 mostra o comportamento da taxa de desgaste relativo do eletrodo, assim como, o comportamento apresentado nos dados fornecidos pelo fabricante do equipamento de eletroerosão.

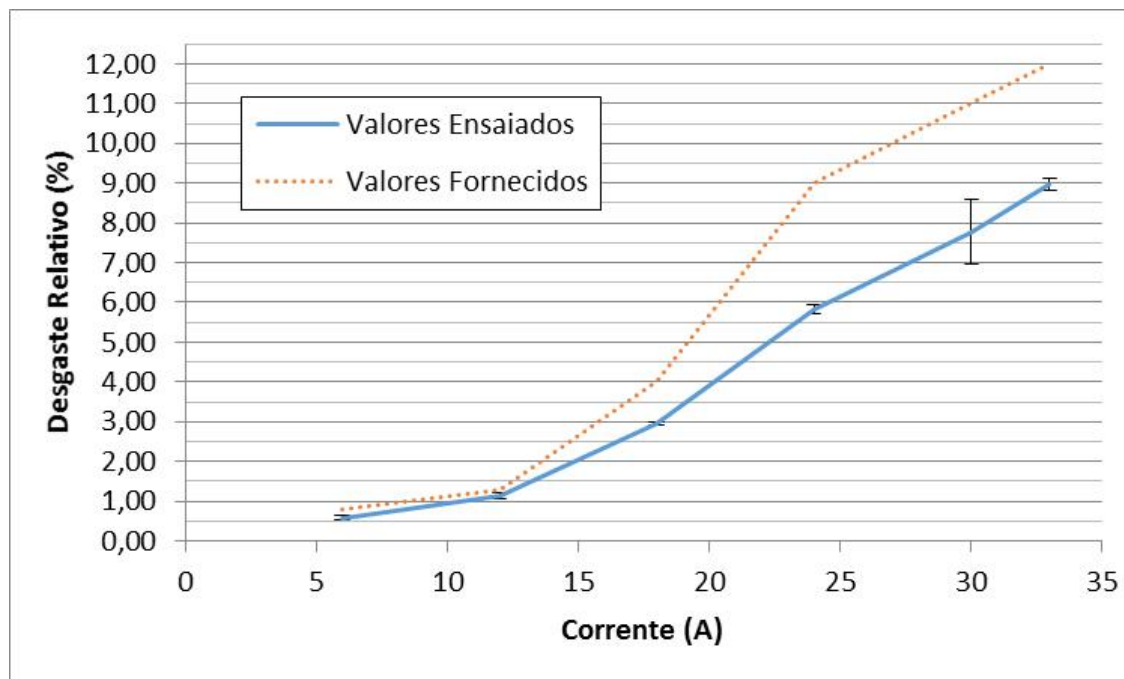


Figura 10 – Gráfico dos efeitos do aumento de corrente sobre o desgaste relativo. Eletrodo de cobre eletrolítico, Material usinado aço AISI 304, Ton 100 μ s e DT 89%. Valores fornecidos referentes a Tabela 4.

Pode-se concluir que o aumento na corrente provocou um aumento de desgaste do eletrodo, mantendo os tempos de ondas ligada (T_{on}) e desligada (T_{off}) constantes, confirmando o comportamento esperado para o ensaio.

Isto está de acordo com Golapalakannan e Senthilelan (2013) que discutem que a taxa de desgaste relativo do eletrodo (V_y), ou *electrode wear rate* (EWR), pode ser determinantemente influenciada pelo aumento na corrente, graças a maior energia empregada nas descargas elétricas e portanto maior quantidade de material fundido.

Nota-se que o desgaste relativo obtido para o aço AISI 304 foi em média 30% menor que os valores fornecidos pelo fabricante para a usinagem de aços (não especificado), como pode ser visualizado na figura 10, especialmente para maiores correntes.

4.2 TAXA DE REMOÇÃO DE MATERIAL

Do mesmo modo que atua influenciando diretamente o desgaste relativo V_y , o aumento da corrente também afeta diretamente a taxa de remoção de material (V_w), ou *material removal rate* (MRR). A figura 11 apresenta as taxas de remoção de material (V_w) obtidas nos ensaios, assim como os valores fornecidos pelo fabricante para a usinagem por eletroerosão.

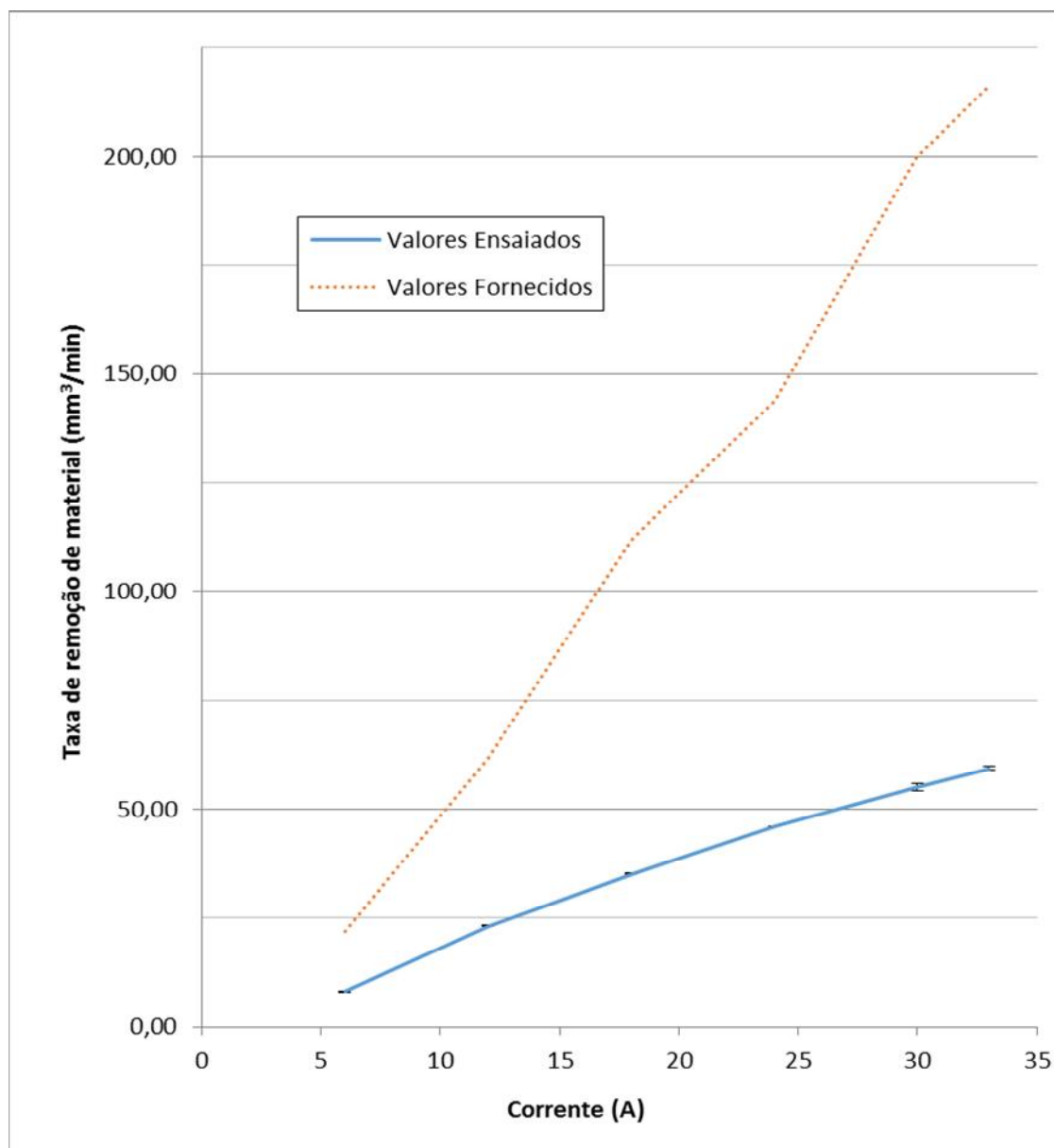


Figura 11 – Gráfico dos efeitos do aumento de corrente sobre a taxa de remoção de material. Eletrodo de cobre eletrolítico, Material usinado aço AISI 304, T_{on} 100 μ s e DT 89%. Valores fornecidos referentes a Tabela 4.

Observando a figura 11, aumento da corrente provocou um aumento da taxa de remoção de material. Comparando-se os dados obtidos, as amostras apresentaram uma taxa de remoção aproximadamente três vezes menor que os valores fornecidos pelo fabricante.

Isso corrobora com Khan (2008), que explica que o aumento da corrente resulta do aumento da energia nas descargas elétricas, que formam maiores

cavidades erodidas geradas durante T_{on} . Ainda, Khan (2008) discute que as partículas de metal fundido são mais difíceis de serem expelidas, isso leva a formação de zonas refundidas de material, que deverão ser erodidas em posteriores descargas, o que diminui eficiência do processo.

Os ensaios realizados aplicaram o uso do tempo de retração (0,5 s) entre os ciclos do processos, buscando uma melhor lavagem das partículas na cavidade, fato que não é mencionado pelo fabricante. Como ocorreram essas retrações o tempo de usinagem foi maior e pode alterar drasticamente o valor da taxa de remoção.

4.3 RUGOSIDADES

Assim como a taxa de desgaste do eletrodo e a taxa de remoção de material, o acabamento superficial sofre influências diretas dos parâmetros do processo da eletroerosão. Os resultados obtidos para a rugosidade média aritmética (R_a), segundo norma DIN, podem ser verificados na figura 12.

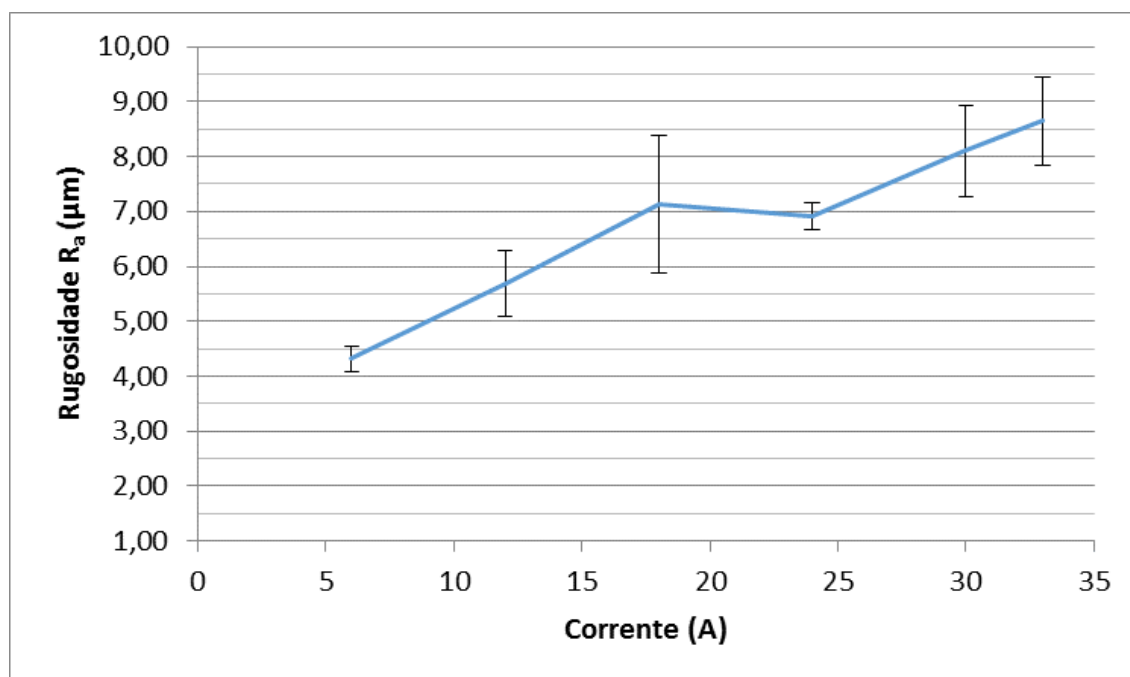


Figura 12 – Gráfico dos efeitos do aumento de corrente sobre a rugosidade R_a . Eletrodo de cobre eletrolítico, Material usinado aço AISI 304, T_{on} 100 μs e DT 89%.

Isto está de acordo com o estudo realizado por Gostimirovic, et. al. (2011), o aumento da energia das descargas produz regiões termicamente afetadas de maior

fragilidade que resultam em maiores crateras na superfície usinada, e portanto, maior rugosidade superficial.

Os resultados obtidos para a análise de altura máxima de perfil (R_y), segundo norma DIN, assim como os valores de rugosidade máxima obtidos pelo fabricante ($R_{m\acute{a}x}$), podem ser observados através da figura 13.

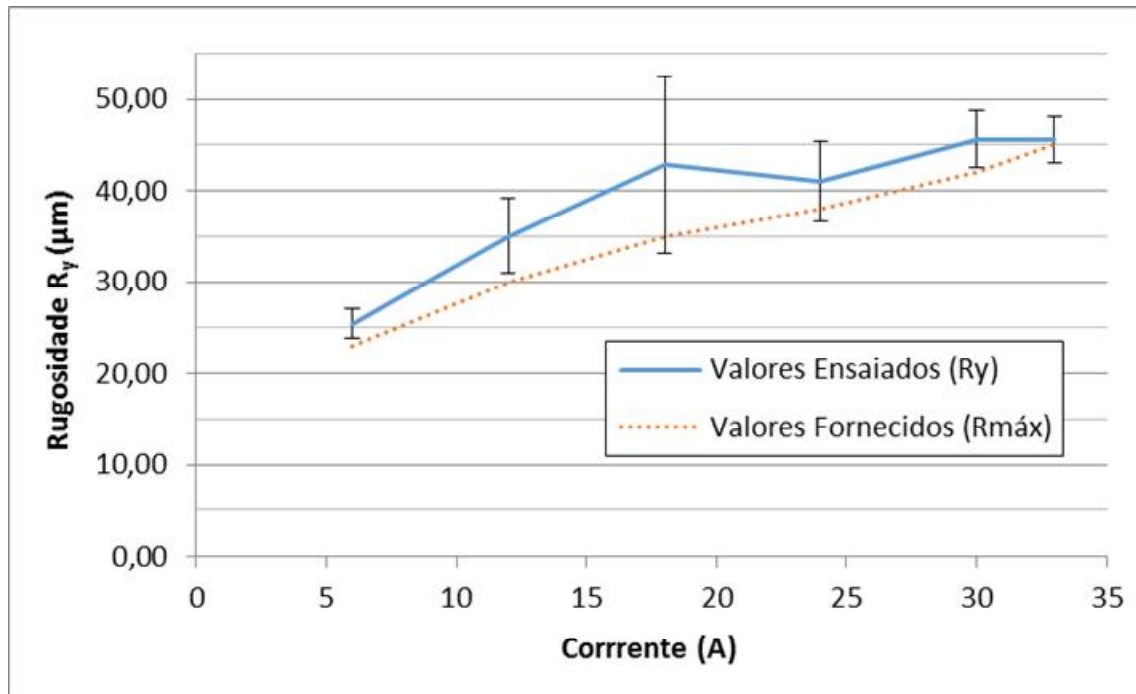


Figura 13 – Gráfico dos efeitos do aumento de corrente sobre a rugosidade R_y . Eletrodo de cobre eletrolítico, Material usinado aço AISI 304, T_{on} 100 μs e DT 89%. Valores fornecidos referentes a Tabela 4.

Para a rugosidade máxima (R_y), os valores dos intervalos estão próximos aos fornecidos pelo fabricante, e apresentam concordância de que o aumento da corrente provocará um aumento na rugosidade.

A figura 14 apresenta os resultados obtidos nos ensaios para a média de alturas de cinco pontos de rugosidade (R_z), conforme norma DIN.

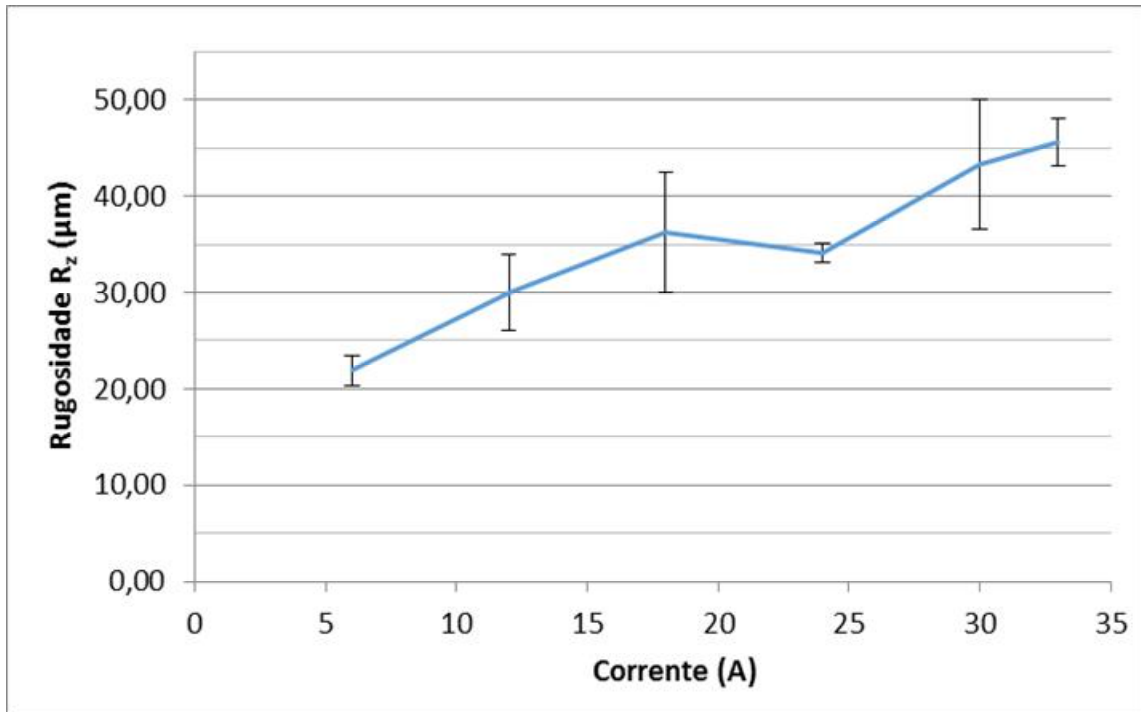


Figura 14 – Gráfico dos efeitos do aumento de corrente sobre a rugosidade R_z . Eletrodo de cobre eletrolítico, Material usinado aço AISI 304, T_{on} 100 μs e DT 89%.

Novamente os valores obtidos seguiram a mesma tendência das outras medições, aumento da rugosidade R_z conforme o aumento da corrente em um crescimento aproximadamente linear nos intervalos de confiança.

5 CONCLUSÃO

Os ensaios demonstram que, como nos dados fornecidos pelo fabricante, com aumento da corrente ocorrerá um maior desgaste do eletrodo, maior taxa de remoção de material e aumento das rugosidade. Comprovando a indicação da literatura na utilização de maiores correntes para usinagens de desbaste, sacrificando o eletrodo para uma maior remoção de material, e menores correntes para usinagens de acabamento garantindo a geometria final e uma melhor qualidade superficial da cavidade usinada.

Para a utilização de eletrodos de cobre eletrolítico na usinagem de aços AISI 304, nas faixas de 6 a 33 A, é possível verificar que o eletrodo apresenta um desgaste relativo 30% menor que para a usinagem obtida pelo fornecedor do equipamento, para um aço não especificado, e uma taxa de remoção aproximadamente vezes menor, utilizando tempo de retração, portanto um maior tempo de usinagem.

A análise das rugosidades demonstra que resultados obtidos para os pontos de corrente ensaiados, com variações entre 25 e 45 μm para a rugosidade R_y , está de acordo com o comportamento obtido pelo fabricante.

Em concordância com a literatura consultada, ficou evidenciada a influência do aumento da corrente como fator determinante dos parâmetros de remoção de material, desgaste da ferramenta de usinagem e acabamento superficial.

As dispersões dos resultados para a taxa de remoção de material e para o desgaste do eletrodo demonstram que mesmo a variação da corrente sendo um parâmetro de entrada com elevada influência nos parâmetros analisados é possível ter controle e estabilidade no processo.

6 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de futuros trabalhos propõe-se os seguintes itens:

- A análise da utilização de eletrodos de desgaste e acabamento e suas influências no acabamento superficial para aços inoxidáveis;
- As influências das variações dos tempos de onda ligado e da corrente no processo de eletroerosão para ligas Fe-Cr;
- A análise microestrutural do aumento de corrente em aços inoxidáveis austeníticos e sua influência devido ao aumento da energia térmica no processo,
- E a influência do uso do tempo de retração na eficiência de remoção de material.

REFERÊNCIAS

ABBAS, N. M.; SOLOMON, D. G.; BAHARI, F. A review on current research trends in electrical discharge machining. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. Malásia, v. 47, p. 1214-1228, 2007.

AMORIN, F. L.; WEINGAERTNER, W. L. Influence of duty factor on the die-sinking electrical discharge machining of high-strength aluminum alloy under rough machining. **Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences**. Rio de Janeiro, vol. 24, p. 194-199, 2002.

AMORIN, F. L.; WEINGAERTNER, W. L. Die-sinking electrical discharge machining of a high-strength copper-based alloy for injection molds. **Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences**. Rio de Janeiro, vol. 26, p. 137-144, 2004.

AMORIN, F. L.; WEINGAERTNER, W. L. The behavior of graphite and copper electrodes on the finish die-sinking electrical discharge machining (EDM) of AISI P20 tool steel. **Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences**. Rio de Janeiro, vol. 29, p. 366-371, 2007.

ARANTES, L. J.; SILVA, M. B. da; SILVA, E. M. da; RASLAN, A. A. Avaliação de superfícies usinadas por diferentes fluídos dielétricos no processo de usinagem por eletroerosão. **Revista Escola de Minas**. Ouro Preto, v. 56, p. 91-96, 2003.

ARANTES, L. J.; **Desenvolvimento e avaliação do processo híbrido do usinagem por descargas elétricas e jato de água abrasivo (AJEDM)**. 2007. 108 f. Dissertação (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. Minas Gerais, 2007.

CORREIA, S. M. B. B.; **Probabilidade e estatística**. Belo Horizonte: PUC Minas. 2003.

DEMARCO, A. **Lifestyle**. Disponível em <<http://www.forbes.com/sites/anthonydemarco/2014/02/05/sochi-gold-medal-will-be-the-largest-in-olympic-history-heres-how-much-its-worth>> Acesso em 04/12/2014.

ENGEMAQ. **Manual de instalação, operação e manutenção: EDM 200 NC e EDM 440 NC**. Caxias do Sul. 2002.

GOPALAKANNAN, S.; SENTHILVELAN, T. Optimization of machining parameters for EDM operations based on central composite design and desirability approach. **Journal of Mechanical Science and Technology**. India, vol. 28, p. 1045-1053, 2013.

GOSTIMIROVIC, M.; KOVAC, P.; SEKULIC, M.; SKORIC, B. Influence of discharge energy on machining characteristics in EDM. **Journal of Mechanical Science and Technology**. Serbia, vol. 26, p. 173-179, 2012.

GUITRAU, E. P. **The EDM handbook**. Cincinnati: Hanser Gardner Publ. 1997.

HOCHENG, H.; LEI, W. T.; HSU, H. S. Preliminary study of material removal in electrical-discharge machining of SiC/Al. **Journal of Materials Processing Technology**. Taiwan, v. 63, p. 813-818, 1997.

LEE, S. H.; LI, X. P. Study of the effect of machining parameters on the machining characteristics in electrical discharge machining of tungsten carbide. **Journal of Materials Processing Technology**. Singapura, v. 115, p. 344-358, 2001.

LIU, Y.; Ji, R.; ZHANG, Y.; ZHANG, H. Investigation of emulsion for die sinking EDM. **International Journal of Advanced Manufacture Technology**. Londres, v.47, p. 403-409, 2010.

KHAN, A. A. Electrode wear and material removal rate during EDM of aluminum and mild steel using copper and brass electrodes. **International Journal of Advanced Manufacture Technology**. Londres, v.39, p. 482-487, 2008.

KUMAR, S.; SINGH, R.; SINGH, T. P.; SETHI, B. L. Surface modification by electrical discharge machining: A review. **Journal of Materials Processing Technology**. India, v.209, p. 3675-3687, 2008.

MALHOTRA, N.; RANI, S.; SINGH, H. Improvements in performance of EDM - A review. In: SOUTHEASTCON, 2008, Huntsville. **Anais**. Katra: Shri Mata Vaishno Devi Univ., 2008. p. 599-603.

MATWEB. **Material property data of 304 stainless steel**. Disponível em <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=abc4415b0f8b490387e3c922237098da>> Acesso em 10/12/2014.

MITUTOYO CORPORATION. **Surface Roughness Tester Surftest SJ-301 Series**. Disponível em <<http://www.mitutoyo.com/service/catalog/03/E15013.pdf>> Acesso em 15/12/2014.

MUTHURAMALINGAM, T.; MOHAN, B. A review on influence on electrical process parameters in EDM process. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**. India, v.201, 2014.

OLINIKI, R. **Influência da combinação entre os parâmetros de usinagem por eletroerosão na integridade superficial do aço AISI H13 temperado e revenido**. 2009. 123 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

SANSONE, J. L.; **Avaliação do efeito de diferentes etapas de processamento de moldes de injeção na microestrutura e propriedades do aço AISI H13**. 2010. 85 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

SANTOS, R. F. **Influência do material da peça e do tratamento térmico na eletroerosão nos aços AISI H13 e AISI D6**. 2007. 122 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

SANTOS, I. **Análise dos parâmetros de entrada na eletroerosão de penetração da liga de titânio TI-6AL-4V**. 2010. 126 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

ZHANG, Y.; LIU, Y.; SHEN, Y.; LI, Z.; JI, R.; CAI, B. A novel method of determining energy distribution and plasma diameter of EDM. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. Londres, v.75, p. 425-432, 2014.

ZHANG, Y.; LIU, Y.; SHEN, Y.; JI, R.; LI, Z.; ZHENG, C. Investigation on the influence of the dielectrics on the material removal characteristics of EDM. **Journal of Materials Processing Technology**. China, v.214, p. 1052-1061, 2014.

ANEXOS

Tabela 5 – Parâmetros de usinagem fornecidos pelo fabricante.

engemaq®

ENGEMAQ		ELETRODO: Cobre (eletrolítico) ELECTRODE: Electrolytic Copper							PEÇA: Aço WORKPIECE: Steel			POLARIDADE ELETRODO: (+) ELECTRODE POLARITY: (+)				TENSÃO: 100 V TENSION: 100 V			
VALORES ESTABELECIDOS SETTING VALUES		RUGOSIDADE ROUGHNESS		REMOÇÃO MATERIAL Vw STOCK REMOVAL Vw			TAXA DE DESGASTE Vv WEAR RATE Vv			SUBDIMENSIONAMENTO – UNDERSIZE 2ps = 2 gap slide				CONDICÕES DE TESTE TEST CONDITIONS					
Ion	TS	Ion	Rmax	Rmax	Vw	Vw	Vv	PRESSÃO(mm)		PRESSURE(In)		ASPIRAÇÃO(mm)		ASPIRATION(In)		Vmin	trv	ÁREA	
μs	OT	%	μm	μIn	mm3/min	ln3/min	%	2ps max	2ps	2ps max	2ps	2ps max	2ps	2ps max	2ps	Voll	AMP	Cm²	In2

50	1	89	14	551	5,8	.00040	1,5	0,141	0,082	.0055	.0032	0,125	0,066	.0049	.0026	40	2,5	5	.775
50	2	89	17	669	27	.00159	1,6	0,168	0,094	.0066	.0037	0,154	0,080	.0061	.0031	40	5	5	.775
50	3	91	21	827	36	.00212	3,0	0,192	0,105	.0075	.0041	0,177	0,090	.0070	.0035	36	8	5	.775
50	4	91	23	905	60	.00354	6,0	0,202	0,109	.0079	.0043	0,187	0,094	.0074	.0037	33	12	10	1.550
50	5	91	26	1024	81	.00478	8,0	0,226	0,118	.0089	.0046	0,212	0,103	.0083	.0040	32	15	10	1.550
50	6	91	28	1102	104	.00614	10	0,250	0,126	.0098	.0050	0,236	0,112	.0093	.0044	30	19	10	1.550
50	7	91	30	1181	120	.00708	12	0,259	0,129	.0102	.0051					30	21	10	1.550
50	8	91	31	1220	136	.00802	15	0,267	0,132	.0105	.0052					30	23	10	1.550
50	9	91	32	1260	156	.00920	16	0,279	0,137	.0110	.0054					30	25	10	1.550
50	10	91	33	1299	176	.01038	17	0,291	0,142	.0114	.0056					30	28	10	1.550
50	11	91	34	1338	192	.01133	18	0,299	0,145	.0118	.0057					30	32	10	1.550
50	12	91	35	1378	208	.01227	20	0,306	0,147	.0120	.0058					30	36	10	1.550

75	1	83	16	630	5	.00029	0,0	0,155	0,090	.0061	.0035	0,138	0,073	.0054	.0029	38	2,5	5	.775
75	2	83	20	787	24	.00142	1,2	0,185	0,103	.0073	.0040	0,169	0,088	.0066	.0035	39	5,5	5	.775
75	3	86	24	945	43	.00254	2,1	0,211	0,116	.0083	.0046	0,195	0,099	.0077	.0039	36	8,5	5	.775
75	4	86	26	1024	60	.00354	3,7	0,222	0,120	.0087	.0047	0,206	0,103	.0081	.0040	33	12	10	1.550
75	5	86	29	1142	79	.00466	5,4	0,249	0,130	.0098	.0051	0,233	0,113	.0092	.0044	32	15	10	1.550
75	6	86	32	1260	112	.00661	7,0	0,275	0,139	.0108	.0055	0,260	0,123	.0102	.0048	30	19	10	1.550
75	7	86	34	1338	128	.00755	9,5	0,285	0,142	.0112	.0056					30	21	10	1.550
75	8	86	36	1417	144	.00850	12	0,294	0,145	.0116	.0057					30	24	10	1.550
75	9	86	37	1457	168	.00991	13	0,307	0,151	.0121	.0059					30	27	10	1.550
75	10	86	38	1496	192	.01132	14	0,320	0,156	.0126	.0061					30	30	10	1.550
75	11	86	39	1535	204	.01204	15	0,329	0,159	.0129	.0062					30	33	10	1.550
75	12	86	40	1575	216	.01274	16	0,337	0,162	.0133	.0064					30	37	10	1.550

100	1	87	19	748	3,5	.00021	0,0	0,172	0,096	.0068	.0038	0,156	0,080	.0061	.0031	36	2,5	5	.775
100	2	87	23	905	22	.00130	0,8	0,203	0,110	.0080	.0043	0,189	0,096	.0074	.0038	38	6	5	.775
100	3	89	28	1102	37	.00218	1,2	0,237	0,124	.0093	.0049	0,223	0,110	.0088	.0043	35	9	5	.775
100	4	89	30	1181	62	.00366	1,3	0,254	0,132	.0100	.0052	0,242	0,120	.0095	.0047	35	12	10	1.550
100	5	89	33	1299	87	.00513	2,7	0,278	0,139	.0109	.0055	0,266	0,127	.0105	.0050	32	15	10	1.550
100	6	89	35	1378	112	.00661	4	0,301	0,146	.0118	.0057	0,289	0,134	.0114	.0053	30	19	10	1.550
100	7	89	37	1457	128	.00755	6,5	0,316	0,152	.0124	.0060					30	22	10	1.550
100	8	89	38	1496	144	.00850	9	0,330	0,157	.0130	.0062					30	26	10	1.550
100	9	89	40	1575	172	.01014	10	0,345	0,163	.0136	.0064					30	29	10	1.550
100	10	89	42	1653	200	.01180	11	0,360	0,168	.0142	.0066					30	32	10	1.550
100	11	89	45	1772	216	.01274	12	0,371	0,172	.0146	.0068					30	35	10	1.550
100	12	89	47	1850	232	.01369	13	0,381	0,175	.0150	.0069					30	38	10	1.550

Fonte: Adaptação de manual do equipamento de eletroerosão EDM 440 – ENGEMAQ (2002)

APÊNDICES

Tabela 6 – Pesagem dos materiais ensaiados

N°	Massa Eletrodo (g)		Massa Corpo de Prova (g)	
	Inicial	Final	Inicial	Final
#				
1	65,14	65,03	123,34	108,01
2	54,79	54,59	121,77	106,69
3	64,39	63,91	126,46	111,61
4	69,40	68,47	127,28	113,25
5	60,91	59,66	123,51	109,09
6	67,93	66,60	127,22	113,65
7	71,12	71,03	128,37	113,13
8	67,00	66,79	127,36	111,64
9	69,58	69,09	109,50	94,83
10	50,64	49,70	121,84	107,39
11	69,83	68,60	123,91	109,78
12	65,87	64,40	105,70	91,22
13	43,69	43,59	119,58	103,95
14	68,47	68,29	132,63	117,19
15	67,90	67,40	123,43	108,20
16	68,85	67,90	128,35	113,47
17	66,44	65,19	122,95	108,41
18	64,23	62,83	123,13	109,11

Tabela 7 – Resultados obtidos nos ensaios de eletroerosão

Identificação Amostras (Ordem de ensaios)		Tempo (min)	Taxa Desgaste do Eletrodo - V_y (%)	Taxa de Remoção - V_w (mm^3/min)	Corrente (A)
2a	1	242,85	0,64	7,89	6
2b	7	235,00	0,53	8,11	6
2c	13	239,33	0,57	8,16	6
4a	2	82,05	1,19	22,97	12
4b	8	83,78	1,20	23,45	12
4c	14	82,52	1,05	23,39	12
6a	3	53,07	2,90	34,98	18
6b	9	52,33	3,00	35,04	18
6c	15	53,88	2,95	35,33	18
8a	4	38,15	5,95	45,97	24
8b	10	39,23	5,84	46,05	24
8c	16	40,32	5,73	46,13	24
10a	5	32,58	7,78	55,32	30
10b	11	32,58	7,82	54,21	30
10c	17	32,58	7,72	55,79	30
11a	6	28,33	8,80	59,87	33
11b	12	30,63	9,12	59,09	33
11c	18	29,48	8,96	59,46	33

Tabela 8 – Resultados obtidos na medição de rugosidades

Amostra	Ra			Ra μ	Ry			Ry μ	Rz			Rz μ
2a	3,64	4,02	4,69	4,12	23,50	22,60	32,80	26,30	20,30	20,40	24,80	21,83
2b	5,21	4,40	4,08	4,56	29,10	25,00	25,40	26,50	25,00	22,40	23,00	23,47
2c	3,96	3,94	4,88	4,26	22,20	21,80	26,80	23,60	18,40	17,80	24,70	20,30
4a	4,51	5,96	4,66	5,04	29,10	37,40	24,40	30,30	23,30	30,60	22,60	25,50
4b	5,94	6,90	5,92	6,25	34,70	40,50	35,20	36,80	28,10	38,40	29,80	32,10
4c	6,02	5,88	5,38	5,76	40,40	34,30	39,20	37,97	35,40	30,50	31,50	32,47
6a	6,43	5,60	5,21	5,75	38,70	28,20	32,40	33,10	37,00	24,70	26,60	29,43
6b	8,29	7,51	8,81	8,20	54,80	39,10	63,00	52,30	42,30	30,90	51,80	41,67
6c	8,30	7,21	6,70	7,40	46,20	45,20	37,70	43,03	44,30	35,60	32,60	37,50
8a	6,24	6,52	7,26	6,67	33,20	36,00	40,80	36,67	31,80	30,00	37,40	33,07
8b	6,68	6,96	7,12	6,92	42,80	35,80	44,40	41,00	32,80	32,30	37,10	34,07
8c	7,11	7,40	6,97	7,16	52,40	35,60	48,00	45,33	33,80	34,50	36,80	35,03
10a	5,55	7,62	8,89	7,35	45,00	41,30	42,70	43,00	32,60	35,90	39,40	35,97
10b	7,62	9,14	7,09	7,95	48,00	50,70	35,80	44,83	48,00	50,70	35,80	44,83
10c	7,63	10,68	8,69	9,00	37,20	60,40	49,60	49,07	37,20	60,40	49,60	49,07
11a	11,85	9,53	6,97	9,45	53,90	59,60	30,70	48,07	53,90	59,60	30,70	48,07
11b	9,32	7,62	6,60	7,85	49,10	39,70	40,60	43,13	49,10	39,70	40,60	43,13
11c	10,59	8,56	6,79	8,65	51,50	49,70	35,70	45,63	51,50	49,70	35,70	45,63

Tabela 9 – Resultados finais e incertezas.

#	2	σ	4	σ	6	σ	8	σ	10	σ	11	σ
Ra	4,31	0,23	5,69	0,61	7,12	1,25	6,92	0,24	8,10	0,83	8,65	0,80
Ry	25,47	1,62	35,02	4,13	42,81	9,60	41,00	4,33	45,63	3,11	45,61	2,47
Rz	21,87	1,58	30,02	3,92	36,20	6,22	34,06	0,98	43,29	6,69	45,61	2,47
Vy	0,58	0,06	1,15	0,09	2,95	0,05	5,84	0,11	7,77	0,81	8,96	0,16
Vw	8,05	0,14	23,27	0,26	35,12	0,19	46,05	0,08	55,10	0,81	59,47	0,39