



FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI CIMATEC  
PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSO  
GESTÃO E TECNOLOGIA INDUSTRIAL

HELAINÉ PEREIRA NEVES

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO  
PROCESSO DE ELETROEROSÃO NO DESGASTE DO  
ELETRODO E NA PRODUTIVIDADE DURANTE A  
USINAGEM DA LIGA INCONEL 718

Salvador  
2014

HELAINÉ PEREIRA NEVES

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO  
PROCESSO DE ELETROEROSÃO NO DEGRADAMENTO DO  
ELETRODO E NA PRODUTIVIDADE DURANTE A  
USINAGEM DA LIGA INCONEL 718

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação Stricto Sensu da Faculdade Tecnologia  
SENAI CIMATEC como requisito parcial para a obtenção  
do título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial

Orientador: Prof.Dr. Guilherme Oliveira de Souza

Salvador  
2014

Dedico este trabalho a minha família e a todos que me deram apoio nesta  
magnífica jornada.

## RESUMO

A eletroerosão é um processo de usinagem que promove a remoção de material através da aplicação de descargas elétricas. O conhecimento dos parâmetros que permitem uma maior produtividade é importante para redução do tempo de fabricação de uma peça. Ao mesmo tempo, faz-se necessário reduzir o custo do processo através da diminuição do consumo de insumos. Para isso, é fundamental o entendimento sobre como os parâmetros do processo afetam a produtividade e o desgaste relativo do eletrodo. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento do processo com a variação dos parâmetros de eletroerosão durante a etapa de desbaste da liga INCONEL 718 no que tange o desgaste relativo do eletrodo e a taxa de remoção do material da peça. Para isso, foram realizadas duas etapas de ensaios com este material. Na primeira etapa, oito parâmetros foram variados em dois níveis. Na segunda etapa, foi avaliado o comportamento do processo com a variação em quatro níveis do tempo de onda ligado ( $t_{on}$ ) e do tempo de onda desligado ( $t_{off}$ ). Para obtenção da produtividade do processo foi considerada a taxa de remoção de material da peça através da medição da diferença de massa antes e após a usinagem. Da mesma forma, foi medido o desgaste relativo do eletrodo. Os resultados dos ensaios foram tratados e analisados estatisticamente. Da primeira etapa deste trabalho constatou-se que a polaridade do eletrodo teve grande influência sobre a taxa de remoção de material, sendo recomendada a adoção da polaridade positiva na usinagem deste material. Para o desgaste relativo do eletrodo, nenhuma variável apresentou influência estatística considerável. Da segunda etapa do trabalho, pode-se verificar a existência de um valor para  $t_{on}$  que proporciona uma maior taxa de remoção, além de uma tendência a obtenção de desgaste nulo para o eletrodo com a utilização de longos  $t_{on}$ . Também foi verificada uma redução da taxa de remoção com a diminuição de  $t_{off}$ . Algumas observações sobre as possíveis causas que levaram aos resultados apresentados foram realizadas.

Palavras-chave: EDM, INCONEL, produtividade, desgaste relativo.

## ABSTRACT

EDM is a machining process that promotes the removal of material by applying electrical discharges. The knowledge of the parameters that allows greater productivity is important for reducing manufacturing time of a piece. At the same time, it is necessary to reduce the cost of the process by reducing the consumption of raw materials. For this, it is essential to understand how the process parameters affect the productivity and the electrode wear. In this context, this paper aims to analyze the behavior of the process with the variation of parameters during step EDM roughing of the alloy INCONEL 718 with respect the wear on the electrode and the removal rate of the workpiece material. For this, two-step tests were conducted with this material. In the first step, eight parameters were varied on two levels. In the second step, the behavior of the process with four levels of variation in the time wave on ( $t_{on}$ ) and the duration of the time wave off ( $t_{off}$ ) was evaluated. To obtain the productivity of the process was considered the rate of removal of material from the part by measuring the mass difference before and after of the machining. Of the same way, the electrode wear was measured. The test results were processed and analyzed statistically. The first stage of this work it was verified that the polarity of the electrode had great influence on the rate of material removal and recommended the adoption of positive polarity in the machining this material. For electrode wear, no variable showed statistically significant influence. The second stage of the study, it can be seen that there is a value for  $t_{on}$  which provides a higher rate of removal and a tendency towards a zero for electrode wear with the use of long  $t_{on}$ . Also it showed a reduction in removal rate with decreasing  $t_{off}$ . Some observations on the possible causes that led to the results were performed.

Keywords: EDM, INCONEL, removal rate, electrode wear

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Eletrodos no Processo EDM por penetração .....	17
Figura 2 - Fluxo Metodológico adotado no desenvolvimento deste trabalho....	21
Figura 3 - Circuito de Lazarenko .....	23
Figura 4 – Máquina de Eletroerosão por Penetração.....	24
Figura 5 - Fases de uma descarga elétrica no processo EDM.....	26
Figura 6 - Configuração do Plasma e Cavidades Fundidas após certo tempo de usinagem.....	27
Figura 7 - Superfície eletroerodida de um aço AISI P20, ampliação de 200 vezes .....	32
Figura 8 - Microestrutura de uma amostra de Aço-Mola 65Mn após Eletroerosão.....	33
Figura 9 - Tipos de Movimentação do Eletrodo-Ferramenta para Limpeza do Canal.....	36
Figura 10 - Lavagem Lateral .....	36
Figura 11 - Diferenças na Localização do Furo de Lavagem pelo Eletrodo .....	37
Figura 12 - Limpeza pela Peça: com adução de fluido.....	37
Figura 13 - Limpeza pela Peça: através de sucção.....	37
Figura 14 - Evolução da tensão e da corrente elétrica durante a ocorrência de uma descarga no processo EDM .....	39
Figura 15: Características de Corrente e Tensão associadas a diferentes tipos de descarga em gases .....	40
Figura 16 - Modos de atuação do gerador da máquina de eletroerosão utilizada nos experimentos – Frequências e Pulsos Iguais .....	42

Figura 17 - Taxa de remoção x tempo da descarga.....	43
Figura 18 - Taxa de remoção x duração da descarga na eletroerosão do Aço AISI P20 .....	44
Figura 19 - Taxa de remoção no cátodo e no ânodo em decorrência de $t_{on}$ ....	45
Figura 20 - Representação do Efeito do Regime de Desbaste em EDM (Baixa Frequência de Pulsos).....	47
Figura 21 - Representação do Efeito do Regime de Acabamento em EDM: Alta Frequência de Pulsos.....	48
Figura 22: Taxa de Remoção do Material em Relação a $t_{on}$ , na eletroerosão de Hastelloy.....	53
Figura 23: Desgaste Relativo do Eletrodo em Relação a $t_{on}$ , na eletroerosão de Hastelloy.....	53
Figura 24 - Temperatura da Peça e Velocidade de Usinagem X Relação de Contato na Eletroerosão de Ti6Al4V .....	55
Figura 25 - Material do Eletrodo X Taxa de Remoção e Desgaste do Eletrodo, na usinagem de Ti6Al4V .....	57
Figura 26 - Desenho em CAD com dimensões e foto do eletrodo-ferramenta utilizado nos experimentos.....	59
Figura 27 - Corpo de prova de INCONEL 718, antes da usinagem. ....	60
Figura 28 - Balança de precisão pesando um dos corpos de prova.....	60
Figura 29 - Estufa utilizada na secagem dos eletrodos peça e ferramenta.....	61
Figura 30 - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados na Taxa de Remoção do INCONEL 718 ( $\alpha = 0,005$ ).....	74
Figura 31 - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados no Desgaste Relativo do Eletrodo na Usinagem do INCONEL 718 ( $\alpha = 0,005$ ).....	74

Figura 32 - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados na Taxa de Remoção do INCONEL 718, após refinamento dos dados ( $\alpha = 0,005$ ).....	75
Figura 33 - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados no Desgaste Relativo do Eletrodo na Usinagem do INCONEL 718, após refinamento dos dados ( $\alpha = 0,005$ ) .....	75
Figura 34 - Gráfico Taxa de Remoção x Polaridade - Usinagem do INCONEL 718 (99,5% de confiança).....	76
Figura 35 - Gráfico Taxa de Remoção x Corrente de Pico - Usinagem do INCONEL 718 (99,5% de confiança).....	77
Figura 36 - Gráfico Taxa de Remoção x Lavagem - Usinagem do INCONEL 718 (99,5% de confiança).....	78
Figura 37 - Gráfico Taxa de Remoção x Tempo de Erosão - Usinagem do INCONEL 718 (99,5% de confiança).....	78
Figura 38 - Gráfico Taxa de Remoção x $t_{on}$ (99,5% de confiança) .....	80
Figura 39 - Gráfico da Regressão Quadrática dos Dados da Taxa de Remoção x $t_{on}$ : com ajuste logarítmico em y .....	80
Figura 40 - Gráfico de Regressão da Taxa de Remoção x $t_{on}$ , com valores isolados de $t_{off}$ .....	81
Figura 41 - Volume Removido por Pulso x $t_{on}$ .....	82
Figura 42 - Taxa de Erosão x $t_{on}$ .....	83
Figura 43 - Gráfico Desgaste Relativo x $t_{on}$ (99,5% de confiança) .....	84
Figura 44 - Gráfico da Regressão dos Dados do Desgaste Relativo x $t_{on}$ .....	85
Figura 45 - Gráfico do Desgaste Relativo x $t_{on}$ , com valores isolados de $t_{off}$ ....	85
Figura 46 - Gráfico da Taxa de Remoção x $t_{off}$ (99,5% de confiança).....	87
Figura 47 - Gráfico da Regressão dos Dados da Taxa de Remoção x $t_{off}$ .....	87

Figura 48 - Gráfico da Taxa de Remoção x $t_{off}$ , com valores isolados de $t_{on}$ ....	88
Figura 49 - Gráfico do Desgaste Relativo x $t_{off}$ (99,5% de confiança) .....	89
Figura 50 - Gráfico do Desgaste Relativo x $t_{off}$ em diferentes valores de $t_{on}$ (99,5% de confiança).....	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Influência dos Principais Parâmetros Elétricos sobre o Processo EDM .....	48
Tabela 2 - Composição Química INCONEL 718. ....	50
Tabela 3: Propriedades físicas do INCONEL 718 à temperatura ambiente .....	51
Tabela 4 - Níveis dos Parâmetros Avaliados no Pré-Ensaio com o Aço AISI P20 .....	63
Tabela 5 - Valor-p para influência individual de cada parâmetro sobre a taxa de remoção do aço AISI P20.....	64
Tabela 6 - Valor-p para influência individual de cada parâmetro sobre o desgaste do eletrodo na eletroerosão do aço AISI P20 .....	65
Tabela 7 - Valores dos Parâmetros que foram mantidos inalterados na etapa do pré-ensaio do Aço ABNT 304.....	65
Tabela 8 - Valor-p para influência individual de cada parâmetro sobre a taxa de remoção do aço ABNT 304 .....	66
Tabela 9 - Valor-p para influência individual de cada parâmetro sobre o desgaste relativo na eletroerosão do aço ABNT 304 .....	66
Tabela 10 - Níveis dos Parâmetros Avaliados.....	67
Tabela 11 - Parâmetros do Planejamento Experimental Fatorial Fracionário – 1ª Etapa.....	67
Tabela 12 - Valores dos parâmetros adotados em cada ensaio realizado na 1ª etapa experimental.....	69
Tabela 13 - Planejamento Experimental da 2ª Etapa.....	71
Tabela 14 - Níveis dos Parâmetros Avaliados.....	71

Tabela 15 - Valores de $t_{on}$ e $t_{off}$ de cada ensaio realizado na 2ª etapa experimental.....	72
Tabela 16 - Resultados da 1ª Etapa de Ensaio com o INCONEL 718.....	73
Tabela 17: Polaridade Adotada nos Trabalhos Apresentados na Revisão da Literatura .....	77
Tabela 18 - Resultados da 2ª Etapa de Ensaio com o INCONEL 718.....	79

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EDM - *Electro Discharge Machining* (Eletroerosão)

CNC – Controle Numérico Computadorizado

$\mu$ EDM – *Micro Electro Discharge Machining* (Microeletroerosão)

ANOVA – *Analysis of Variance* (Análise de Variância)

CAD - *Computer Aided Design* (Projeto Assistido por Computador)

DOE – *Design of Experiments* (Projeto de Experimentos)

## LISTA DE SÍMBOLOS

Cu – Cobre

$W_e$  - energia da descarga elétrica

$u_e$  - tensão média da descarga elétrica

$i_e$  - corrente elétrica média durante a descarga

$t_e$  - duração da descarga, após rompimento da rigidez dielétrica

TR – Taxa de Remoção

$M_i$  – massa inicial da amostra

$M_f$  – massa final da amostra

$\rho$  – massa específica

T – tempo total

DR – Desgaste Relativo

$m_{ie}$  – massa inicial do eletrodo

$m_{fe}$  – massa final do eletrodo

$\rho_e$  – massa específica do eletrodo

$\hat{u}_i$  - tensão em aberto

$u_e$  - tensão média da descarga

U - tensão média de trabalho durante a usinagem

$t_d$  - tempo de retardo de ignição da descarga

$t_e$  - duração da descarga

$t_i$  - duração do pulso de tensão

$t_o$  - duração do intervalo entre duas sucessivas descargas

$t_p$  - duração do período do ciclo de uma descarga

$\hat{I}_e$  - corrente máxima durante a descarga

$i_e$  - corrente média durante a descarga

$\tau$  - relação de contato

$t_{on}$  - duração de uma descarga elétrica

$i_e$  - corrente média durante a descarga elétrica

$t_{off}$  - duração do intervalo entre duas descargas elétricas

VR - volume removido por pulso

Q - quantidade de pulsos

$T_e$  - taxa de erosão

# SUMÁRIO

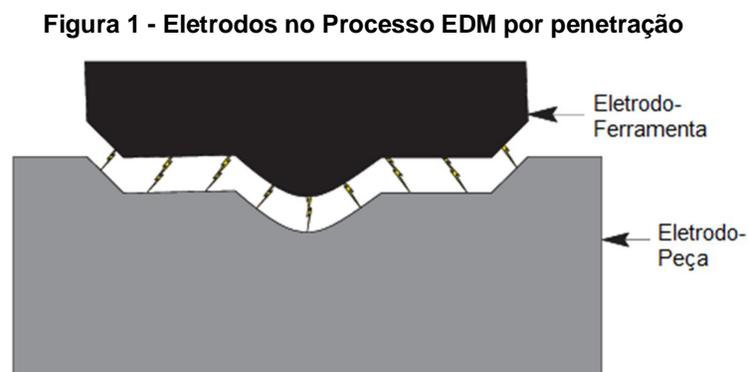
1	INTRODUÇÃO .....	17
1.1	Objetivo Geral .....	19
1.2	Objetivos específicos .....	19
1.3	Abordagem Metodológica .....	20
2	REVISÃO TEÓRICA.....	22
2.1	Mecanismos de Remoção de Material .....	25
2.2	Otimização do Processo de Eletroerosão .....	28
2.2.1	Taxa de remoção.....	29
2.2.2	Desgaste do Eletrodo-Ferramenta.....	30
2.2.3	Qualidade da Superfície Usinada por EDM .....	32
2.3	Parâmetros de Controle do Processo .....	33
2.3.1	Material do eletrodo .....	34
2.3.2	Condições de lavagem .....	35
2.3.3	Parâmetros elétricos de controle das descargas.....	38
2.4	HRSA, Superligas à Base de Níquel e Ligas de Titânio.....	48
2.4.1	INCONEL 718.....	50
2.4.2	Eletroerosão de HRSA, de Ligas de Titânio e de INCONEL 718..	51
3	APARATO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	58
3.1	Materiais.....	58
3.2	Pré-Ensaio.....	61

3.3	Procedimentos experimentais .....	66
3.3.1	1ª Etapa de Ensaios .....	66
3.3.2	2ª Etapa de Ensaios .....	71
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	73
4.1	1ª ETAPA DE ENSAIOS .....	73
4.2	2ª Etapa de Ensaios.....	79
4.2.1	Influência de $t_{on}$ .....	79
4.2.2	Influência de $t_{off}$ .....	86
5	Conclusão.....	90
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	92
	REFERÊNCIAS.....	94
	Apêndice A.....	99
	Apêndice B.....	104
	Apêndice C.....	113
	Apêndice D.....	116
	Apêndice E.....	118
	Apêndice F.....	127
	Apêndice G.....	131

## 1 INTRODUÇÃO

As superligas resistentes ao calor (HRSA – *Heat Resistant Super Alloys*), entre elas a liga de níquel INCONEL 718, são utilizadas em aplicações que exijam boa resistência mecânica em elevadas temperaturas. Por conseguinte, estas ligas são bastante aplicadas em componentes de turbomáquinas que são submetidos a altas solicitações térmicas. Devido a suas propriedades mecânicas, a usinagem convencional destas ligas é dificultada. Como alternativa, para a fabricação de algumas peças, aplica-se o processo especial de usinagem denominado eletroerosão, no qual a remoção de material se dá pelo efeito erosivo produzido quando sucessivas e discretas descargas elétricas ocorrem entre dois materiais condutores denominados eletrodos (EZUGWU et al., 2003; SIVAKUMAR; GANDHINATHAN, 2013; AMORIM; WEINGAERTNER, 2004).

De um modo geral, no processo de usinagem por eletroerosão, o eletrodo-ferramenta produz a sua imagem no eletrodo-peça através da remoção de material por descargas elétricas efetuadas sob um líquido não condutor de eletricidade denominado dielétrico, conforme representado na Figura 1 (KÖNIG; WEINGAERTNER, 1990).



**Fonte: Adaptado de Sommer e Sommer (2005)**

Segundo Dauw e Van Coppenolle (1995), a partir de 1960, muitos laboratórios e centros industriais de pesquisa europeus, japoneses e russos se dedicaram à pesquisa fundamental do fenômeno da eletroerosão. Muitos modelos teóricos

sobre o comportamento de faíscas elétricas unitárias foram formulados. Os fenômenos físicos, tais como tempo de ignição, distribuição da energia na fenda de trabalho e a transferência de calor no canal de plasma e nos eletrodos foram modelados, obtendo-se resultados satisfatórios.

No período de 1970 a 1975, estas pesquisas atingiram um ápice e estudos relacionados à modelagem teórica das condições reais do processo EDM foram desenvolvidos com a finalidade de obter informações mais precisas sobre os fenômenos envolvidos. Entretanto, devido ao comportamento estocástico das sucessivas faíscas elétricas, aliado a aspectos como contaminação do canal de plasma e a alguns fenômenos aleatórios específicos, os resultados para as condições reais não foram satisfatórios (DAUW; VAN COPPENOLLE, 1995).

A dificuldade na formulação de um modelo unificado para o processo de eletroerosão fez com que, após a década de 1970, decaísse o interesse na pesquisa fundamental. Em contrapartida, laboratórios e indústrias passaram a realizar pesquisa tecnológica aplicada do processo EDM, visando o aperfeiçoamento do processo, desenvolvimento das tabelas de tecnologia e melhoria nos sistemas elétricos e de controle das máquinas de EDM (AMORIM, 2002).

Um número significativo de artigos tem focado na melhoria do desempenho do processo, tais como aumento da taxa de remoção de material, diminuição do desgaste relativo do eletrodo e melhora na qualidade da superfície usinada (HO; NEWMAN, 2003).

O desempenho do processo de eletroerosão e a sua capacidade em conferir as características necessárias à peça estão diretamente ligados aos parâmetros elétricos utilizados. Desta forma, o conhecimento dos parâmetros que permitem uma maior produtividade é importante para redução do tempo de fabricação de uma peça.

Ao mesmo tempo, faz-se necessário reduzir o custo do processo através da diminuição do consumo de insumos. No processo de eletroerosão por penetração, o principal insumo utilizado é o eletrodo-ferramenta que também é

erodido durante a usinagem da peça. Visando a garantia da qualidade e atendimento aos requisitos finais da peça usinada, é necessária a troca do eletrodo-ferramenta quando o seu desgaste atinge um determinado nível. Os valores monetários associados ao recondicionamento ou fabricação de um novo eletrodo, aliado ao tempo despendido durante a troca frequente de eletrodos, estabelecem a necessidade da redução do desgaste da ferramenta para a diminuição de alguns custos associados à fabricação de uma determinada peça.

Em geral, no processo de eletroerosão, o aumento da velocidade de remoção de material da peça leva a um aumento do desgaste do eletrodo. Logo, é necessário um entendimento sobre como os parâmetros do processo afetam a produtividade e o desgaste relativo do eletrodo para estabelecimento de valores que potencializem o processo em relação a estes dois aspectos.

Este trabalho traz algumas contribuições que possibilitam a ampliação da compreensão tecnológica do processo de eletroerosão de superligas resistentes ao calor, concedendo informações adicionais e relevantes a este estudo.

### **1.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar a influência da variação dos parâmetros do processo de eletroerosão sobre o desgaste relativo do eletrodo-ferramenta de cobre eletrolítico e a taxa de remoção do material da peça na etapa de desbaste da liga INCONEL 718.

### **1.2 Objetivos específicos**

Este trabalho foi dividido em três etapas experimentais com seus respectivos objetivos específicos:

- Validar a metodologia experimental através da realização de pré-ensaios com os aços AISI P20 e ABNT 304.
- Verificar a influência, sobre a taxa de remoção e o desgaste relativo do eletrodo de cobre eletrolítico na usinagem da liga INCONEL 718, da

variação em dois níveis dos seguintes parâmetros: corrente de pico, polaridade,  $t_{on}$ ,  $t_{off}$ , tensão, lavagem, tempo de erosão e modo de oscilação.

- Analisar o comportamento da taxa de remoção e do desgaste relativo do eletrodo de cobre eletrolítico com a variação dos valores de  $t_{on}$  e  $t_{off}$ , na usinagem da liga INCONEL 718.

### **1.3 Abordagem Metodológica**

Para alcançar o objetivo deste trabalho, inicialmente foram realizadas uma revisão teórica e um levantamento do estado da arte relativo ao processo de eletroerosão por penetração. Os mecanismos de remoção de material foram detalhados sob a perspectiva da teoria termoelétrica. Da mesma forma, foram apresentados alguns estudos para a otimização do processo EDM visando o aprimoramento dos fatores taxa de remoção, desgaste do eletrodo e qualidade da superfície usinada (rugosidade da peça). Além disso, foram identificados os principais parâmetros de controle do processo e relatada a influência que a variação destes parâmetros tem sobre os fatores apresentados.

Ainda dentro do âmbito da revisão teórica, também foi apresentado o estado da arte relativo à aplicação do processo de eletroerosão na usinagem de superligas resistentes ao calor, em especial, na usinagem da liga à base de níquel INCONEL 718.

Para reconhecimento da máquina de eletroerosão utilizada nos ensaios e para mapeamento da influência sobre a taxa de remoção e o desgaste do eletrodo dos parâmetros que podem ser manipulados na máquina utilizada, foi elaborada uma série de ensaios exploratórios utilizando como material do eletrodo-peça dois tipos de aços: AISI P20 e ABNT 304. Em todos os ensaios a duração do processo de eletroerosão foi igual. Para obtenção da produtividade foi considerada a taxa de remoção de material da peça através da medição da diferença de massa antes e após a usinagem. Da mesma forma foi obtido o desgaste do eletrodo. Para modelagem, tratamento e auxílio na análise dos dados foi utilizado o software de estatística Minitab, versão 14. Estes ensaios permitiram o amadurecimento da metodologia adotada nas etapas experimentais subsequentes.

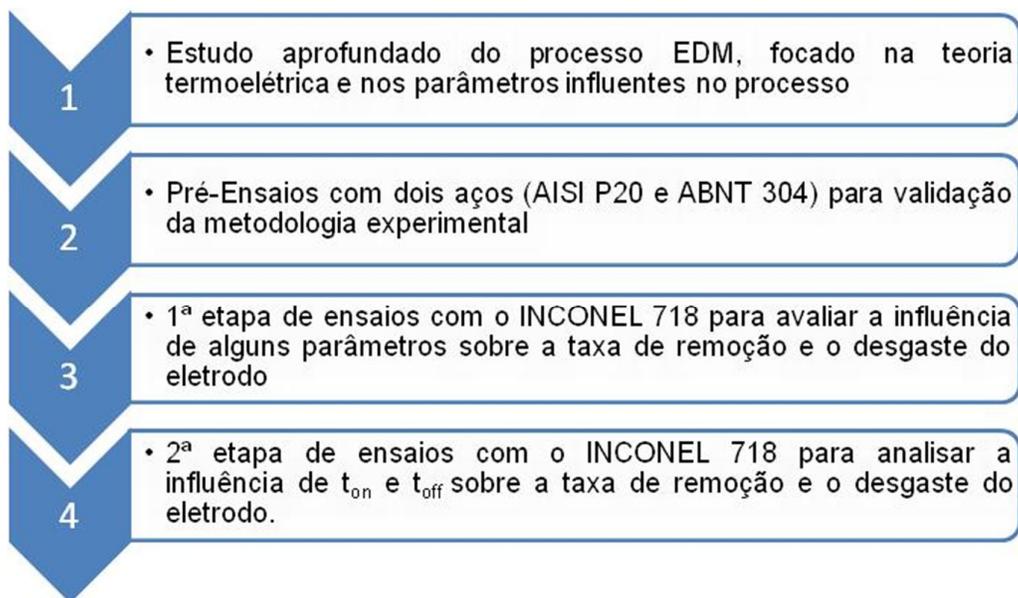
Para a primeira etapa de ensaios com o INCONEL 718, foi realizado um experimento fatorial fracionário para avaliação da influência sobre a produtividade e o desgaste relativo do eletrodo da variação em dois níveis de 8 parâmetros do processo. Já na segunda etapa de ensaios com o INCONEL 718, houve a variação em quatro níveis dos valores de  $t_{on}$  e  $t_{off}$ . A metodologia adotada foi a mesma aplicada nos ensaios realizados com os aços AISI P20 e ABNT 304.

Os resultados obtidos nas duas etapas experimentais com o INCONEL foram analisados utilizando as ferramentas estatísticas disponíveis. Sob o ponto de vista dos fenômenos termoelétricos que levam ao processo de remoção de material foram feitas algumas considerações que fundamentam alguns dos resultados apresentados nos experimentos.

Por fim, as principais conclusões obtidas nas duas fases experimentais foram apresentadas. Também foram destacadas algumas sugestões para futuras atividades de pesquisa visando um maior aprofundamento do estudo apresentado neste trabalho.

A Figura 2 apresenta um resumo do fluxo metodológico adotado no desenvolvimento deste trabalho.

**Figura 2 - Fluxo Metodológico adotado no desenvolvimento deste trabalho**



Fonte: O Autor

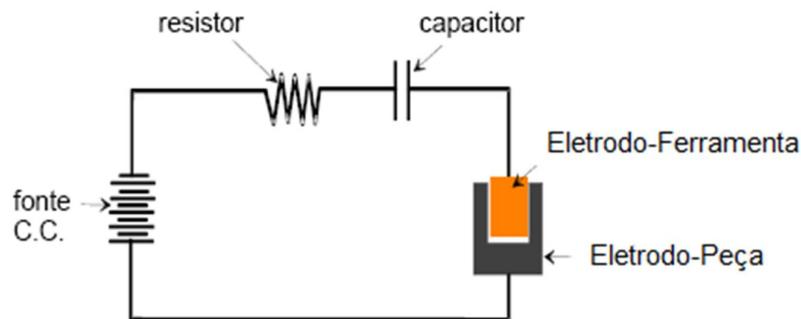
## 2 REVISÃO TEÓRICA

EDM (*Electrical Discharge Machining*) é um processo de usinagem não convencional amplamente utilizado na indústria para gerar cavidades com formas complexas e profundas, na fabricação de matrizes, moldes e punções. É também utilizado no acabamento de peças da indústria aeronáutica, automotiva e de componentes cirúrgicos. Sua característica peculiar de remover material utilizando descargas elétricas faz com que ele seja aplicado com êxito na usinagem de qualquer material condutor, independente de sua dureza, resistência mecânica ou forma. Além disso, no processo EDM não há contato mecânico entre o eletrodo e a peça, eliminando tensões mecânicas e vibração durante a usinagem (GARGH et al, 2010; HO; NEWMAN, 2003).

A base do processo EDM foi iniciada com a descoberta do efeito erosivo de descargas elétricas pelo químico inglês Joseph Priestley em 1770, sendo que, as primeiras aplicações do processo de usinagem através de descargas elétricas datam do período entre a primeira e a segunda guerra mundial. Basicamente, este processo era utilizado na remoção de ferramentas de usinagem quebradas dentro de cavidades profundas. Os equipamentos utilizados eram rudimentares e o controle da distância entre o eletrodo e a peça era feito manualmente (OLINIKI, 2009).

Somente em 1943, na Universidade de Moscou, o efeito erosivo das descargas elétricas foi explorado construtivamente pelos irmãos Lazarenko que desenvolveram um processo de usinagem em materiais com baixa usinabilidade através da fusão e evaporação do metal da superfície da peça por descargas elétricas controladas. O sistema utilizado na máquina dos Lazarenko para a fonte de alimentação foi do tipo resistência-capacitância e serviu como modelo para o desenvolvimento sucessivo de máquinas EDM. Em 1950, foi concedida a primeira patente britânica e, neste mesmo ano, EUA, Japão e Suíça desenvolveram as suas primeiras máquinas de eletroerosão (HO; NEWMAN, 2003; MALHOTRA et al, 2008). A Figura 3 traz um esquema do sistema resistência-capacitância utilizado pelos irmãos Lazarenko.

**Figura 3 - Circuito de Lazarenko**



**Fonte: Adaptado de Oliniki (2009)**

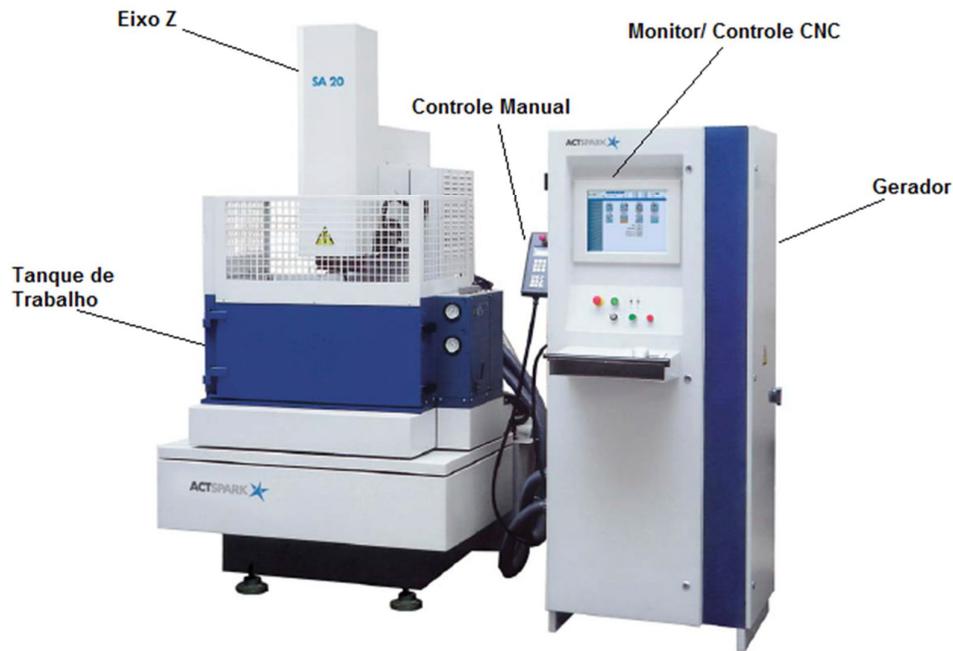
A partir de 1960, com o desenvolvimento da indústria de semicondutores, houve uma grande melhoria nas máquinas de eletroerosão. Com a introdução dos comandos numéricos computadorizados (CNC) no final da década de 1960 e no início da década de 1970, os movimentos dos eletrodos tornaram-se mais precisos, melhorando o desempenho do processo de EDM. Durante a década de 1980 e 1990, os esforços para melhoria do processo foram concentrados no projeto do gerador e do servo-controle e na automatização da máquina (HOUMAN, 1983; MASAKI et al, 1990).

Atualmente, as máquinas de eletroerosão possuem geradores que permitem a geração de pulsos estáticos isoenergéticos ou isofrequentes. Ao permitir a determinação da duração do pulso da descarga elétrica pode-se ter um controle mais preciso na energia aplicada ao processo, tornando-o mais estável. Além disso, algumas máquinas possuem um circuito adicional semelhante ao de Lazarenko que possibilita a aplicação de uma potência reduzida e, desta forma, a obtenção de um acabamento mais fino (SILVA, 2006; OLINIKI, 2009). A Figura 4 traz uma máquina de eletroerosão por penetração com a identificação dos seus principais componentes.

Em algumas aplicações, o processo EDM vem substituindo alguns processos de usinagem convencionais, tais como a furação e o fresamento de aços-ferramenta que já passaram por algum tratamento térmico para aumento da sua dureza. Nos processos convencionais, o tratamento térmico tem que ser realizado após a usinagem para evitar o desgaste excessivo da ferramenta

que, muitas vezes, inviabiliza a fabricação da peça. Este inconveniente não ocorre na usinagem por eletroerosão, evitando problemas de variabilidade dimensional decorrente do tratamento térmico posterior à usinagem (ARTHUR et al, 1996).

**Figura 4 – Máquina de Eletroerosão por Penetração**



**Fonte: Adaptado de ActSpart (2006)**

A tendência na redução do tamanho dos produtos, fez com que aumentasse o interesse na aplicação de EDM em microusinagem ( $\mu$ EDM), na década de 1980, aumentando o número de pesquisas nesta área. Este processo é capaz de usinar pequenos furos e eixos de até 5  $\mu$ m de diâmetro, além de peças tridimensionais com formas complexas (RAJURKAR; YU, 2000). O mais recente interesse industrial e acadêmico é o desenvolvimento e o uso de usinagem híbrida, utilizando processos de usinagem convencionais e não convencionais, combinando as vantagens e limitando os efeitos adversos quando estes são aplicados individualmente (ANSPINWALL et al, 2001).

## 2.1 Mecanismos de Remoção de Material

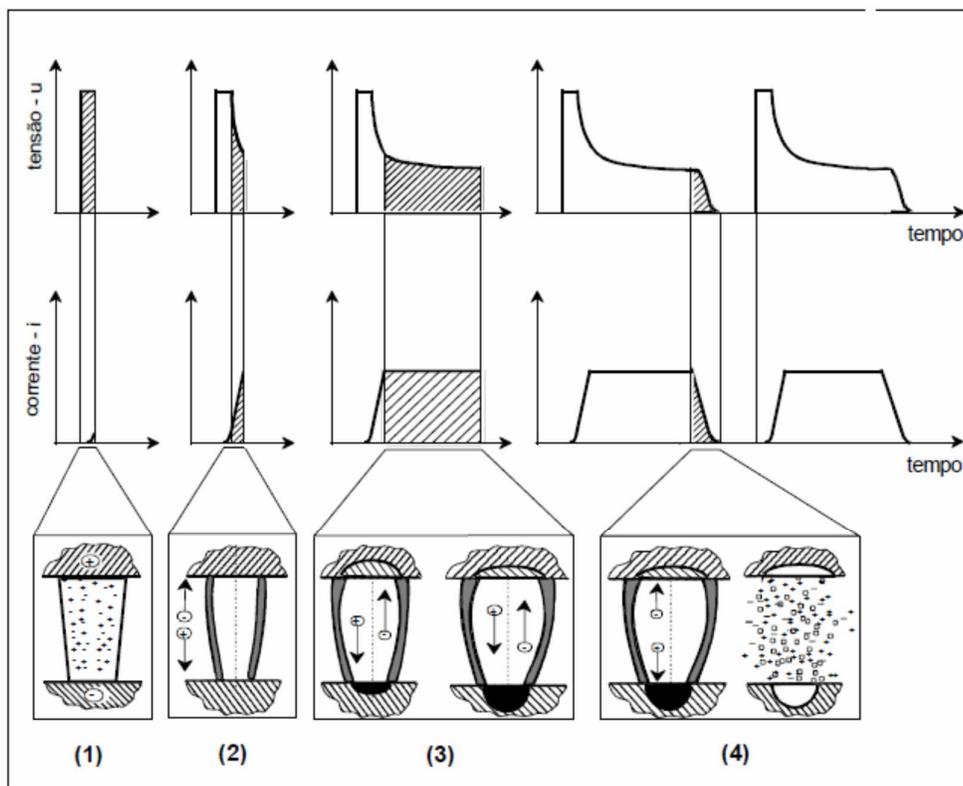
Segundo König et al. (1975), desde o início da utilização de descargas elétricas para usinagem de materiais por Lazarenko, várias teorias têm sido postuladas para explicar os fenômenos envolvidos no processo. Amorim (2002) relatou as teorias eletromecânica e termomecânica. A primeira teoria explica que a remoção de material é baseada no estabelecimento de um campo elétrico capaz de superar as forças de coesão na superfície do material, promovendo assim a sua remoção. A teoria termomecânica propõe que a remoção de material decorre da fusão localizada causada pela formação de chamas decorrentes de vários efeitos físicos durante a descarga elétrica. Entretanto, os resultados experimentais obtidos não validam nenhuma destas duas teorias.

Não existe um modelo completo e definitivo que explique os fenômenos envolvidos no processo de eletroerosão. Vários pesquisadores, inclusive Dibitonto et al. (1989), Eubank et al. (1993) e Amorim (2002), apresentam como teoria mais aceita a termoelétrica. De acordo com esta teoria, no processo de eletroerosão podem-se distinguir quatro fases consecutivas apresentadas na Figura 5.

A fase de ignição da descarga (fase 1 da Figura 5) é estabelecida entre o eletrodo-ferramenta e a peça uma tensão em aberto, inicialmente não há fluxo de corrente devido à resistência do próprio dielétrico. O servomecanismo faz o eletrodo ferramenta avançar em direção à peça até a distância de trabalho denominada *gap*, causando assim um aumento do campo elétrico entre as superfícies dos eletrodos. Nos picos de rugosidade, o campo elétrico estabelecido é máximo e ocorre a emissão fria primária de elétrons do cátodo (eletrodo negativo), que são acelerados em direção ao ânodo (eletrodo positivo). Nesse deslocamento, os elétrons atingem as moléculas do fluido dielétrico, liberando mais elétrons e íons positivos que são acelerados em direção ao cátodo. Quando estes íons atingem o cátodo, liberam mais elétrons (emissão secundária) que são atraídos pelo ânodo e atingem as moléculas do dielétrico liberando mais elétrons e íons positivos, iniciando um processo denominado ionização por impacto (SILVA, 2006). O período de tempo

associado a esta primeira fase é denominado de tempo de ignição ou tempo de retardo da descarga elétrica ( $t_d$ ).

**Figura 5 - Fases de uma descarga elétrica no processo EDM**



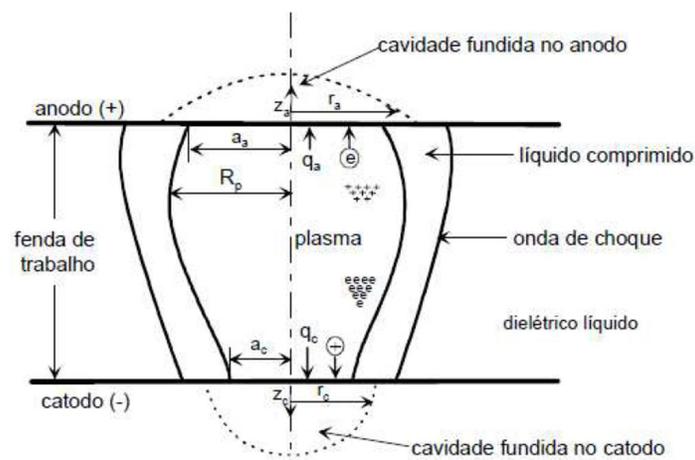
Fonte: Amorim (2002)

A segunda fase é a de formação do canal de plasma (fase 2 da Figura 5), na qual o processo de ionização por impacto causa o aquecimento e evaporação de parte do dielétrico, diminuindo a sua resistência elétrica e aumentando a corrente elétrica. Neste momento observa-se a formação e intensificação de túneis transportadores de energia elétrica do ânodo para o cátodo, causando a diminuição da tensão em aberto para a tensão de ruptura do dielétrico e, na sequência, um rápido aumento da corrente elétrica. Forma-se um canal de plasma circundado por uma bolha de vapor e pelo líquido dielétrico que tende a dificultar o aumento do mesmo, e, desta forma, concentra-se a energia do plasma em um pequeno volume (SILVA, 2006).

Na sequência, ocorre a fusão e evaporação do material dos eletrodos (fase 3 da Figura 5). O canal de plasma é mantido por um período de tempo e, durante este período, o plasma de alta energia funde continuamente por condução

térmica uma pequena quantidade de material em ambos os eletrodos. A quantidade de material fundido depende da intensidade de corrente, do tempo de descarga e das propriedades térmicas dos materiais dos eletrodos. Porém, devido à elevada pressão do plasma, pouco deste material é evaporado. Dibitonto et al. (1989) e Eubank et al. (1993) acreditam que os efeitos da viscosidade do dielétrico são responsáveis pelo formato do canal de plasma, similar a de um barril (Figura 6). O diâmetro do plasma na região de cada eletrodo é influenciado pela dimensão das partículas que são emitidas pelos mesmos. Desta forma, o raio do plasma na região do cátodo é muito menor do que o raio formado na região anódica.

**Figura 6 - Configuração do Plasma e Cavidades Fundidas após certo tempo de usinagem**



Fonte: Oliniki (2009)

No transcorrer do tempo de descarga há um aumento contínuo no tamanho do canal de plasma causado pela irradiação da energia deste para o fluido dielétrico circundante causando vaporização, dissociação e ionização de um pequeno volume de dielétrico que gera um aumento do diâmetro do plasma e da bolha de gases, bem como queda da pressão e da temperatura atuantes sobre as cavidades fundidas (AMORIM, 2002).

Da mesma forma, a cada incremento do tempo da descarga, a dimensão do raio anódico tende a aumentar, enquanto que o raio catódico permanece praticamente constante. Como consequência, a expansão do canal de plasma ocasiona a solidificação de parte do material da cavidade fundida no ânodo e um aprofundamento da cavidade no cátodo (AMORIM, 2002).

A quarta e última fase é a de Ejeção do material fundido (fase 4 da Figura 5). Ao final da duração da descarga, o sistema de controle do gerador da máquina interrompe instantaneamente a corrente elétrica, estabelecendo um intervalo de tempo para o início da próxima descarga. Com a suspensão da descarga, há uma queda brusca de pressão que resulta na extinção da bolha de gás e do canal de plasma, gerando forças associadas ao fenômeno de superaquecimento suficiente para separar o material fundido das paredes das cavidades geradas nas superfícies dos eletrodos. Parte deste material fundido é expulso pela lavagem do dielétrico para fora da fenda de trabalho e a outra parte se solidifica na própria cratera, formando uma camada de material denominada camada branca ou refundida com propriedades diferentes do metal de base (SILVA, 2006).

De acordo com a teoria termoelétrica, as propriedades mecânicas da peça e do eletrodo têm pouca influência sobre o desempenho do processo. Entretanto, as propriedades termofísicas como condutividade térmica e elétrica, a expansão térmica, a temperatura de fusão e de ebulição, influenciam consideravelmente no processo (SANTOS, 2007; AMORIM, 2002).

## **2.2 Otimização do Processo de Eletroerosão**

O processo de eletroerosão tem sido extensivamente aplicado na fabricação de moldes e matrizes. Outrossim, a aplicação deste processo tem se estendido às indústrias médica, odontológica, óptica e de pesquisa e desenvolvimento de produtos automotivos e aeroespaciais. Estas aplicações exigem requisitos rigorosos de usinagem de ligas de alto desempenho em elevadas temperaturas, o que gera forte interesse de pesquisadores e fabricantes de máquinas para EDM, com o objetivo de melhorar o desempenho do processo nestes tipos de aplicações. Além disso, os curtos ciclos de desenvolvimento de produtos exigem uma melhor eficácia no processo EDM, visando à redução do tempo de usinagem (HO; NEWMAN, 2003).

Em EDM, três características de usinagem são importantes e determinam o desempenho do processo: taxa de remoção de material, rugosidade da superfície e desgaste do eletrodo (GARG et al., 2010). A otimização dos

parâmetros elétricos e não-elétricos causa o aprimoramento das medidas de desempenho do processo, levando a um aumento na taxa de remoção, diminuição do desgaste do eletrodo e obtenção do acabamento superficial desejado. Tradicionalmente, a seleção dos parâmetros de processo mais favoráveis é feita com base em tabelas e manuais das máquinas de eletroerosão, sendo que, na maioria das vezes, este procedimento não leva aos valores ótimos de processo (HO; NEWMAN, 2003).

A seguir, os conceitos de taxa de remoção, desgaste do eletrodo e acabamento superficial serão abordados, assim como alguns estudos para aprimoramento destes fatores.

### **2.2.1 Taxa de remoção**

Taxa de remoção é uma medida de desempenho do processo que indica a quantidade de material removido do eletrodo-peça durante um determinado período de tempo. A quantidade de material removido pode ser quantificada em forma de volume ou massa, sendo a primeira opção a mais utilizada. Consequentemente, a taxa de remoção é comumente indicada pela unidade  $\text{mm}^3/\text{min}$  (AMORIM, 2002; SANTOS, 2010).

A taxa de remoção de material é influenciada pelas propriedades físicas dos materiais dos eletrodos, pelo tipo de fluido dielétrico e pela polaridade do eletrodo-ferramenta (ROETHEL et al, 1976; ERDEN, 1983).

Técnicas para melhorar a produtividade através do aumento da taxa de remoção têm sido estudadas: Kunieda e Kiyohara (1998) investigaram um sistema de descargas múltiplas através da divisão do eletrodo-ferramenta em múltiplos eletrodos eletricamente isolados, permitindo assim várias descargas para cada pulso elétrico. Desde 1980, são realizados estudos sobre a utilização de um sistema de vibração ultrassônica nos eletrodos que facilita a limpeza do canal de plasma e melhora a estabilidade do processo, aumentando a taxa de remoção de material (ABBAS; SOLOMON; BAHARI, 2007).

Marafona e Wykes (2000) realizaram um experimento modelado pelo método Taguchi para encontrar os parâmetros que aperfeiçoavam o processo de

eletroerosão de um aço-ferramenta com eletrodos de cobre-tungstênio, no que tange a taxa de remoção, o desgaste do eletrodo e a rugosidade da superfície erodida. Deste experimento, eles constataram que os maiores valores de taxa de remoção foram às associadas às maiores correntes de pico. Entretanto, em relação à duração do pulso, as maiores taxas de remoção foram obtidas com a utilização dos valores intermediários deste parâmetro.

Técnicas de análise de variância (ANOVA) são utilizadas para identificar as variáveis do processo que mais afetam a medida de desempenho em questão. Além disso, a aplicação da técnica de prototipagem rápida na fabricação de eletrodos tem sido estudada visando à melhora de desempenho da ferramenta e uma melhor estabilidade na formação das faíscas, o que leva a um aumento da taxa de remoção e um aprimoramento no acabamento de superfície (ARTHUR et al, 1996).

### **2.2.2 Desgaste do Eletrodo-Ferramenta**

O processo de desgaste do eletrodo-ferramenta é semelhante à remoção de material da peça. Entretanto, ao contrário do que se pretende naquela, é imprescindível a diminuição do desgaste para aperfeiçoamento do processo de eletroerosão.

Para medição do desempenho do processo em relação ao desgaste da ferramenta, geralmente é realizada uma comparação da quantidade de material perdido pela ferramenta em relação à quantidade de material que a mesma conseguiu remover, no mesmo período de tempo. A esta relação dá-se o nome de desgaste relativo e, geralmente, é apresentada em forma de percentual (AMORIM, 2002; SANTOS, 2010).

Acredita-se que, durante a eletroerosão com a utilização de hidrocarbonetos como óleo dielétrico e eletrodos de cobre, haja a deposição sobre a superfície do eletrodo de uma camada de carbono proveniente da decomposição do óleo durante a descarga elétrica. A superfície atacada age como catalisador para deposição de mais carbono sobre o eletrodo. Esta camada de carbono protege o eletrodo da erosão decorrente da descarga elétrica. Entretanto, a deposição

da camada de carbono sobre as bordas do eletrodo é dificultada, sendo o desgaste maior nesta região (MOHRI et al, 1995).

Segundo König e Weingaertner (1990), em decorrência da estrutura e porosidade de eletrodos de grafite, este é mais receptivo do que o cobre para adesão de partículas existentes no canal de descarga que se depositam na superfície ou se difundem para dentro do eletrodo. Devido a este comportamento, o desgaste relativo de eletrodos de grafite também diminui com a utilização de tempos de descarga elevados.

Quanto maior a duração da descarga elétrica, maior a quantidade de carbono depositado sobre a superfície. Desta forma, acredita-se que o desgaste do eletrodo pode ser nulo com a utilização de longos pulsos, através do alcance do equilíbrio da quantidade de material removido do eletrodo e a quantidade de carbono precipitado sobre a superfície do mesmo (MOHRI et al, 1995).

Considerando o efeito de proteção da camada de carbono sobre a superfície do eletrodo, Marafona e Wykes (2000) estudaram um método para aprimorar o desempenho do processo de eletroerosão com a obtenção de uma elevada taxa de remoção associada a um baixo desgaste de eletrodo. O método consistiu na utilização de duas etapas para realização da usinagem: na primeira etapa, foi aplicada uma baixa corrente associado a um longo pulso para promover a deposição da camada de carbono. Na segunda etapa, é adotada uma maior corrente elétrica, permitindo assim o aumento da taxa de remoção. Os resultados apresentados neste trabalho foram satisfatórios.

A adoção de um movimento orbital do eletrodo é a estratégia mais comum para redução do desgaste relativo da ferramenta. O movimento orbital facilita a limpeza da fenda de trabalho, melhorando a eficiência e precisão do processo (HO; NEWMAN, 2003). Entretanto, esta estratégia é limitada pela propensão da geometria do eletrodo a movimentos rotacionais.

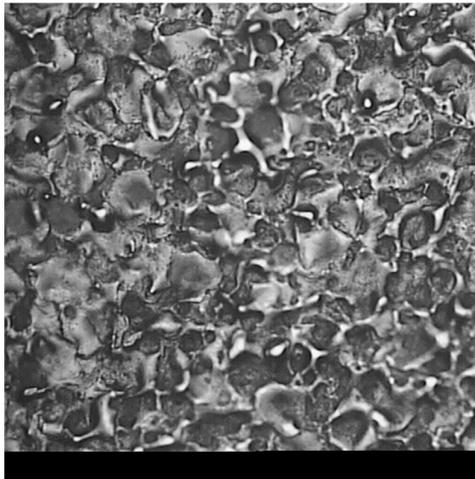
Yu, Masuzawa e Fujino (1998) introduziram um método de desgaste uniforme na superfície do eletrodo com a utilização de eletrodos com formato simples e remoção de material da peça, camada por camada, permitindo a usinagem 3D de microcavidades. Por sua vez, Bleys et al (2002) avaliaram a redução do

comprimento do eletrodo através de uma análise do pulso elétrico e compensaram o seu desgaste através da adoção de um movimento descendente do eletrodo, controlado em tempo real.

### 2.2.3 Qualidade da Superfície Usinada por EDM

A superfície de um produto provindo da eletroerosão apresenta pequenas crateras decorrentes da microfusão localizada que promove a remoção de material. Em decorrência das altas temperaturas e dos bruscos ciclos de aquecimento e resfriamento, há uma grande possibilidade de surgimento de microfissuras e variação estrutural (SANTOS, 2010). A Figura 7 mostra a superfície eletroerodida do aço AISI P20 ampliada em duzentas vezes.

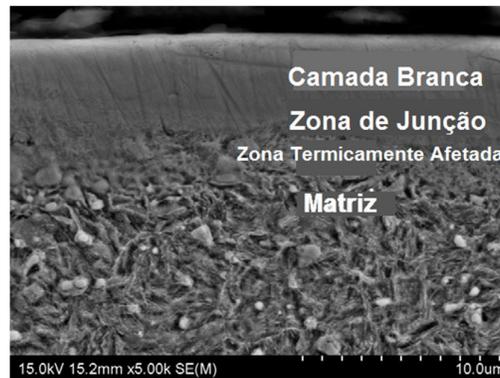
**Figura 7 - Superfície eletroerodida de um aço AISI P20, ampliação de 200 vezes**



**Fonte: O Autor**

A superfície usinada por eletroerosão é constituída por três zonas distintas: “camada branca” ou de material ressolidificado, zona termicamente afetada pelo calor e material base que não foi afetado pelo processo. A “camada branca” apresenta integridade deficiente e, frequentemente, vem acompanhada de formação de microtrincas (HO; NEWMAN, 2003; SANTOS, 2010). A Figura 8 traz a micrografia da seção transversal de um aço-mola eletroerodido com a distinção das suas zonas.

**Figura 8 - Microestrutura de uma amostra de Aço-Mola 65Mn após Eletroerosão**



Fonte: Adaptado de Chunjie et al. (2011)

Lim et al (1991) fizeram uma revisão sobre a metalurgia da superfície eletroerodida que é dependente do comportamento de solidificação do metal fundido após a cessação da descarga elétrica. Gangadhar et al (1991) e Mohri et al (1993) sugeriram a utilização de eletrodos de compósitos sinterizados provindos da metalurgia do pó para redução na formação de microtrincas que ocasiona o aumento da resistência a corrosão e ao desgaste na superfície usinada.

Alguns autores estudam a utilização de pós-metálicos suspensos no dielétrico com o intuito de facilitar o processo de ignição e melhorar a estabilidade das faíscas elétricas, diminuindo a formação de microtrincas, aumentando a dureza e melhorando as propriedades da superfície eletroerodida, além de obter superfícies espelhadas. Do mesmo modo, esta prática também aumenta a taxa de remoção do material da peça (ABBAS; SOLOMON; BAHARI, 2007).

### **2.3 Parâmetros de Controle do Processo**

Existem diversos parâmetros elétricos e não-elétricos que influenciam o desempenho do processo de eletroerosão. Santos (2010) discriminou alguns destes parâmetros:

- Material da peça e do eletrodo;
- Composição e condição do fluido dielétrico;
- Condição de limpeza da fenda de trabalho: geometria da cavidade, pressão e vazão do fluido dielétrico, entre outros;

- Sistema de usinagem com ou sem retração do eletrodo-ferramenta. Com a utilização da retração, outras variáveis são envolvidas no processo, tais como a distância de retração do eletrodo e a velocidade de deslocamento do mesmo no movimento de retração e retorno;
- Parâmetros elétricos de controle: corrente elétrica durante a descarga, polaridade dos eletrodos, tensão média durante a descarga, duração da descarga elétrica, duração do intervalo entre duas descargas elétricas consecutivas, entre outros.

A seguir, serão descritas as influências destes parâmetros no processo EDM.

### **2.3.1 Material do eletrodo**

Para o processo de eletroerosão, as propriedades termofísicas dos eletrodos peça e ferramenta influenciam o desempenho do processo. As propriedades do material que afetam a decisão na escolha do material para a utilização como eletrodo-ferramenta são: condutividade elétrica, ponto de fusão, composição química, integridade superficial, usinabilidade e custo financeiro. Os materiais que são utilizados como eletrodos são: latão, cobre, prata, tungstênio, cobre-tungstênio, prata-tungstênio, carboneto de tungstênio, grafite e cobre-grafite (SIVAKUMAR; GANDHINATHAN, 2013). As menores taxas de desgaste são obtidas com a utilização de materiais que apresentam alto ponto de fusão e elevadas condutividade térmica e elétrica. Geralmente, são utilizados o cobre eletrolítico e a grafite como materiais para fabricação do eletrodo-ferramenta (SANTOS, 2007; AMORIM, 2002).

De um modo geral, tem-se que: eletrodos metálicos devem ser usados na usinagem de ligas de baixa temperatura de fusão e eletrodos de grafite, na usinagem de ligas de alta temperatura de fusão (SOMMER; SOMMER, 2005).

Devido ao seu alto ponto de fusão, os eletrodos de grafite podem ser utilizados em condições mais severas de usinagem com a utilização de correntes elétricas maiores, tempo de descargas maiores e polaridade negativa no eletrodo. Estas condições permitem uma maior remoção de material da peça, associado a um baixo desgaste do eletrodo-ferramenta. A grafite apresenta uma boa estabilidade dimensional que permite a sua utilização na eletroerosão

de cavidades profundas sob condições de desbaste, não comprometendo as condições de lavagem da fenda de trabalho devido à dilatação térmica quase nula deste material. Conjuntamente, por ter baixa densidade, a grafite é bastante utilizada para fabricação de eletrodos de grandes dimensões. Entretanto, a usinagem de grafite é mais difícil, pois há a geração de um pó extremamente abrasivo que pode danificar a máquina-ferramenta utilizada no processo (SANTOS, 2007; AMORIM, 2002).

Em contrapartida, os eletrodos de cobre permitem a obtenção de superfícies erodidas com melhor aspecto visual devido a sua boa capacidade de polimento. Desta forma, este material é bastante utilizado na fabricação de peças que não permitem a realização de uma etapa de polimento após a eletroerosão (AMORIM, 2002).

### **2.3.2 Condições de lavagem**

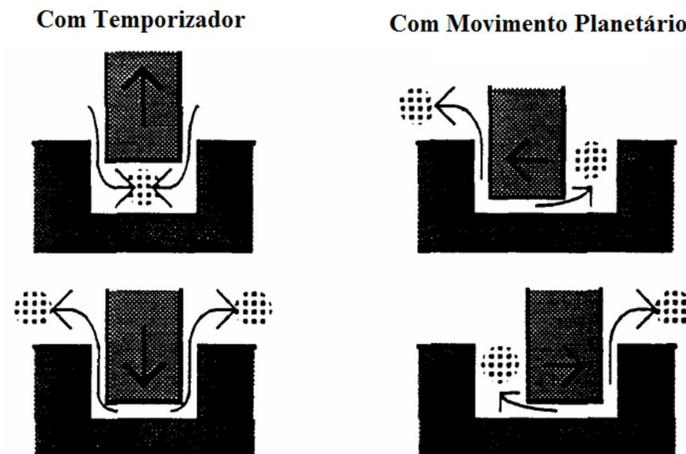
Uma das funções do fluido dielétrico no processo de eletroerosão é a limpeza das partículas removidas durante a ocorrência da descarga elétrica. Ele também atua na concentração da energia da descarga e na redução da expansão do canal de plasma, além de atuar como fluido refrigerante nos eletrodos (AMORIM, 2002). A composição e a condição de limpeza do fluido dielétrico influenciam na estabilidade do processo, afetando a taxa de remoção e a rugosidade obtida na peça.

Geralmente são utilizados óleos hidrocarbonetos como fluido dielétrico no processo de eletroerosão por penetração, inclusive o próprio querosene. A água deionizada é comumente utilizada nos processos de eletroerosão a fio, entretanto, o desempenho do processo é melhor quando utilizados os hidrocarbonetos. Alguns pesquisadores também estão estudando a aplicação da usinagem a seco, visto que o ar é dielétrico (SANTOS, 2010).

A escolha do tipo de limpeza é muito específica para cada caso de eletroerosão e depende da forma geométrica do eletrodo e da peça, estratégia de usinagem a ser adotada, máquina de eletroerosão utilizada e da profundidade de usinagem.

Um dos tipos de limpeza muito adotado é a realizada pela movimentação do eletrodo. Este tipo de limpeza depende do tipo de movimentação permitida pelos sistemas de acionamento da máquina de eletroerosão utilizada. A Figura 9 ilustra duas possibilidades de movimentação do eletrodo para propiciar a limpeza do canal de uma máquina de eletroerosão CNC comercial.

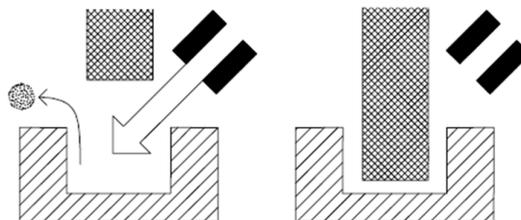
**Figura 9 - Tipos de Movimentação do Eletrodo-Ferramenta para Limpeza do Canal**



Fonte: Adaptado de ACTSpark (2006)

Outro tipo de limpeza do canal que pode ser adotada é a lavagem lateral. Para tal, utiliza-se um bico de lavagem direcionando o fluxo de fluido dielétrico na lateral da cavidade erodida, visando facilitar o processo de injeção de fluido dielétrico na fenda de trabalho, conforme ilustrado na Figura 10.

**Figura 10 - Lavagem Lateral**

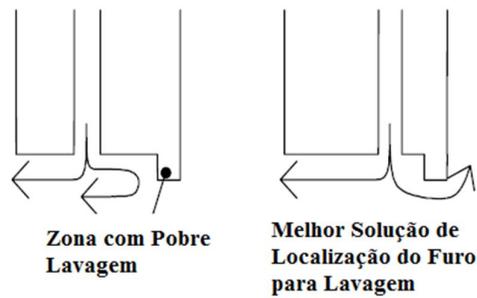


Fonte: ACTSpark (2006)

Outra forma é realizar a lavagem através do eletrodo, promovendo a injeção do fluido dielétrico na fenda de trabalho por meio de um furo de lavagem no eletrodo-ferramenta. Há várias possibilidades de localização e de tamanho para o furo de lavagem, conforme indicação da Figura 11. Existe também a

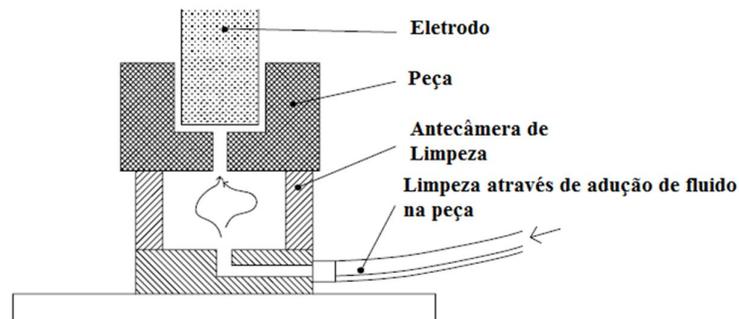
possibilidade de promover a lavagem através da peça. Para isto, utiliza-se uma antecâmara de limpeza localizada abaixo da peça. A limpeza pode ocorrer por adução de fluido (Figura 12) ou pela produção de sucção na câmara (Figura 13).

**Figura 11 - Diferenças na Localização do Furo de Lavagem pelo Eletrodo**



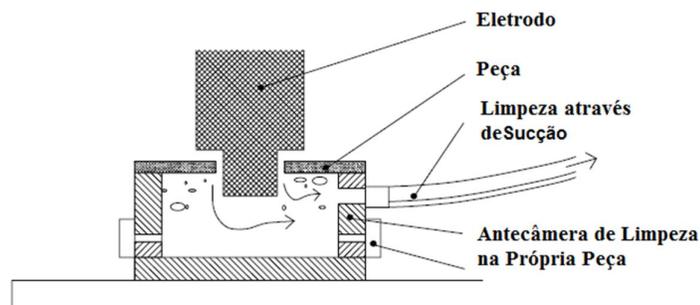
Fonte: Adaptado de ACTSpark (2006)

**Figura 12 - Limpeza pela Peça: com adução de fluido**



Fonte: Adaptado de ACTSpark (2006)

**Figura 13 - Limpeza pela Peça: através de sucção**



Fonte: Adaptado de ACTSpark (2006)

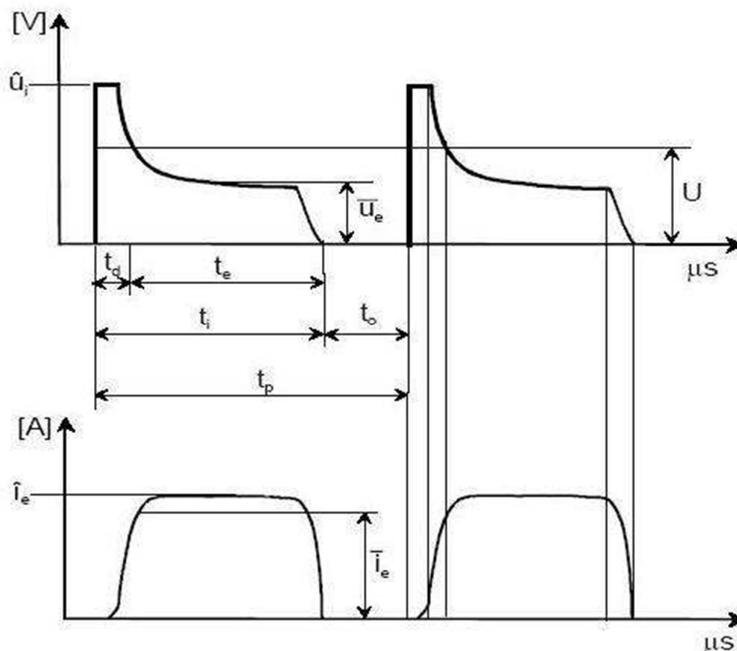
As máquinas atuais de eletroerosão possuem um sistema de controle de posicionamento do eletrodo-ferramenta (servomecanismo) que realiza o posicionamento da ferramenta de forma a manter uma fenda de trabalho (*gap*) apropriada para a usinagem. Grandes larguras de fendas de trabalho resultam em uma maior tensão e em longos tempos de retardo da descarga. Quando a medida da tensão da fenda de trabalho é superior à tensão de referência pré-definida pelo operador, o servomecanismo atua, aproximando o eletrodo da peça. Caso contrário, o eletrodo é retraído. Assim, curtos-circuitos causados por partículas residuais e crateras disformes, que causam a diminuição da fenda de trabalho, podem ser evitados (KUNIEDA et al, 2005).

### 2.3.3 Parâmetros elétricos de controle das descargas

Amorim (2002) traz os principais parâmetros elétricos de controle do processo de EDM que podem ser regulados em uma ampla faixa de variação que depende do tipo de máquina utilizada. A Figura 14 mostra a evolução da tensão e corrente durante a ocorrência de uma descarga elétrica, onde:

- $\hat{u}_i$ : tensão em aberto;
- $\overline{u}_e$ : tensão média da descarga;
- $U$ : tensão média de trabalho durante a usinagem;
- $t_d$ : tempo de retardo de ignição da descarga;
- $t_e$ : duração da descarga;
- $t_i$ : duração do pulso de tensão ( $t_d + t_e$ );
- $t_o$ : duração do intervalo entre duas sucessivas descargas;
- $t_p$ : duração do período do ciclo de uma descarga.
- $\hat{i}_e$ : corrente máxima durante a descarga;
- $\overline{i}_e$ : corrente média durante a descarga;
- $\tau$ : representa a razão entre a duração do pulso ( $t_i$ ) e a duração do período do ciclo da descarga ( $t_p$ ), denominada de relação de contato.

**Figura 14 - Evolução da tensão e da corrente elétrica durante a ocorrência de uma descarga no processo EDM**



Fonte: Amorim (2002)

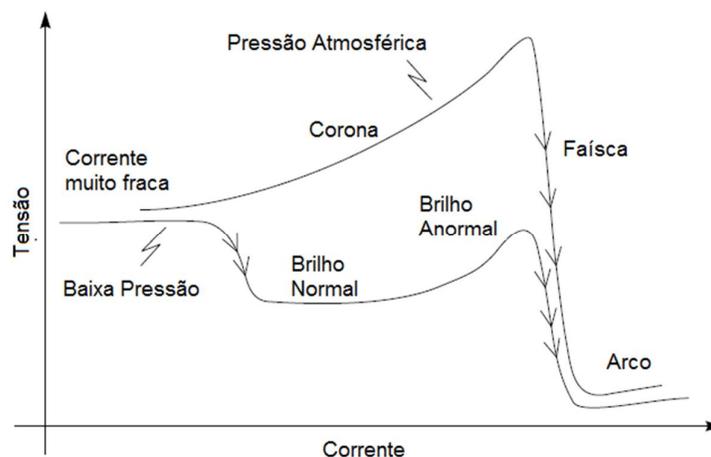
### Corrente e Tensão Elétrica

De acordo com Descoedres (2006) o processo de formação do plasma na eletroerosão é definido pela ocorrência de centelhas elétricas, definidas como um processo transiente caracterizado por uma alta corrente e tensão acima de 20 V. Estas centelhas podem se transformar em arcos elétricos quando são usados longos tempos de descarga elétrica ou quando utilizados eletrodos de grafite, estes fatores estimulam a formação do chamado “ponto quente” na superfície de cada um dos eletrodos. Por sua vez, as descargas seguintes ocorrerão entre estes dois “pontos quentes”, transformando a centelha em um arco elétrico.

Os arcos elétricos são caracterizados por uma alta corrente e baixa tensão (15 a 20 V) e causam a queima em pontos localizados na superfície dos eletrodos, danificando o seu formato e promovendo a remoção de material não uniforme na superfície dos eletrodos. Estes arcos devem ser evitados com a interrupção da descarga elétrica e a manutenção de um período de tempo que possibilite a

recuperação da resistividade do fluido dielétrico. A Figura 15 representa as características de corrente e tensão de diferentes tipos de descarga elétrica em gases.

**Figura 15: Características de Corrente e Tensão associadas a diferentes tipos de descarga em gases**



**Fonte: Adaptado de Descoedres, 2006**

A corrente elétrica da descarga no processo de eletroerosão é um parâmetro de extrema importância na qualidade e no rendimento da operação. A seleção da corrente depende da rugosidade esperada, do máximo desgaste do eletrodo permitido, da produtividade desejada, das características térmicas do eletrodo, das condições da fenda de trabalho e da área de contato eletrodo-peça (SANTOS, 2007).

A energia atribuída à descarga elétrica pode ser representada pela fórmula (AMORIM, 2002):

$$W_e = u_e \times i_e \times t_e \quad (1)$$

Sendo:

$W_e$ : energia da descarga elétrica;

$u_e$ : tensão média da descarga elétrica;

$i_e$ : corrente elétrica média durante a descarga;

$t_e$ : duração da descarga, após rompimento da rigidez dielétrica.

Esta energia determina a quantidade de material removida por descarga elétrica, sendo que, quanto maior o seu valor, maior o volume removido de material de ambos os eletrodos.

Da fórmula exposta, pode-se concluir que, quanto maior a corrente elétrica aplicada no processo, maior o volume removido de material dos eletrodos. Saha (2008) reitera que maiores correntes proporcionam maiores crateras e, conseqüentemente, maior taxa de remoção e maior rugosidade na peça usinada.

Em contrapartida, a tensão média da descarga elétrica influi diretamente na dimensão da fenda de trabalho (*gap*). Desta forma, a adoção de pequenas tensões resulta em pequenos *gaps*, favorecendo a formação de curtos-circuitos que não promovem a remoção de material (AMORIM, 2002). Além disso, baixas tensões estão associadas à ocorrência de arcos elétricos que prejudicam o desempenho do processo, proporcionando um desgaste não uniforme no eletrodo-ferramenta associado a uma baixa taxa de remoção de material (DESCOEUDRES, 2006).

A elevação da tensão média da descarga resulta no aumento da abertura da fenda de trabalho que favorece a limpeza das partículas eletroerodidas e a uma maior estabilidade nas descargas elétricas o que leva a um aumento da taxa de remoção de material e a um baixo desgaste do eletrodo. Entretanto, o aumento excessivo da tensão e, conseqüentemente, do *gap* provoca um aumento do tempo de ignição da descarga ( $t_d$ ) e do tempo total do período do ciclo, resultando na diminuição do rendimento do processo de remoção de material (AMORIM, 2002).

### **Duração dos Pulsos**

Analisando as definições dos tempos de cada fase durante a ocorrência do pulso elétrico, vale ressaltar que:

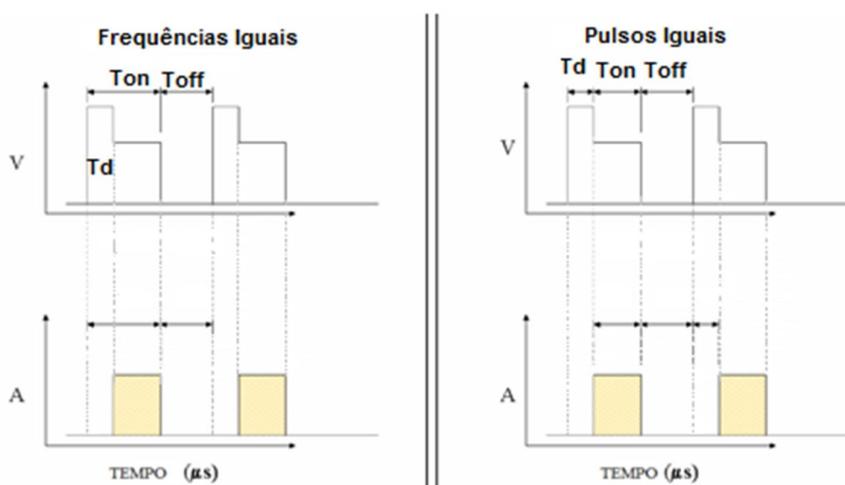
O tempo de onda ligado, comumente denominado de  $t_{on}$  é o tempo durante o qual a faísca possui energia elétrica. Este valor é inserido diretamente na máquina e se situa na faixa de alguns microssegundos a alguns milissegundos [...] (SANTOS, 2007, p.32).

Da mesma forma, Santos (2007, p.32) define que o “[...] tempo de onda desligado, denominado  $t_{off}$ , é o tempo necessário à estabilização do ambiente no gap, incluído o tempo de explosão da bolha de gases, após o tempo de corrente ligada [...]”.

Pelas definições apresentadas acima, pode-se inferir que  $t_{on}$  equivale a  $t_i$  na nomenclatura utilizada por Amorim (2002). Da mesma forma,  $t_{off}$  equivale a  $t_o$ . Para este trabalho, convencionou-se a adoção da nomenclatura assumida por Santos (2007) que também é empregada pela máquina EDM utilizada no desenvolvimento deste trabalho.

Algumas máquinas de eletroerosão permitem a definição do tipo de pulso da descarga elétrica. No modo isopulso, as descargas têm duração constante. Por outro lado, no modo isofrequência, a frequência em que ocorrem as descargas é que permanece constante, conforme pode ser visto na Figura 16. Desta forma, a depender do tipo de pulso adotado, o valor que se pode manipular diretamente na máquina (convencionalmente denominado  $t_{on}$ ) pode coincidir com o tempo de tensão ativa (frequências iguais) ou com o tempo de passagem de corrente (pulsos iguais).

**Figura 16 - Modos de atuação do gerador da máquina de eletroerosão utilizada nos experimentos – Frequências e Pulsos Iguais**



Fonte: Adaptado de ACTSpark (2006)

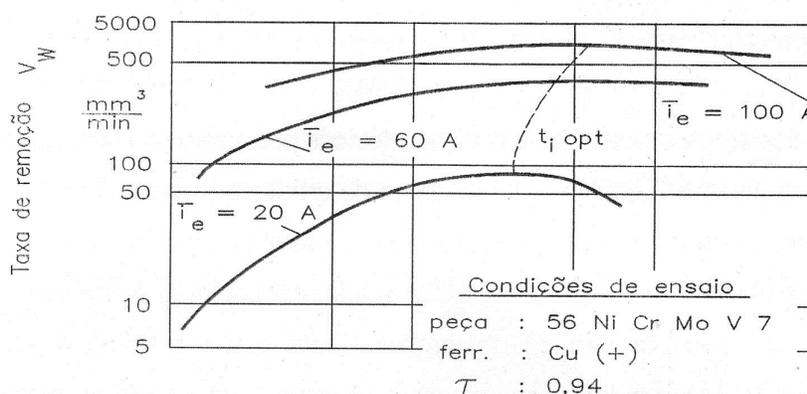
De acordo com König e Weingaertner (1990): “Com o aumento da duração do pulso ou tempo de descarga a taxa de remoção inicialmente cresce, assume o

valor máximo e novamente decresce”. Este comportamento é explicado pelo aumento da parcela de energia despendida no processo de remoção com o aumento do tempo de descarga que proporciona um aumento na remoção de material e também um aumento no diâmetro do canal de plasma até um valor considerado ótimo. Após atingir este valor, o aumento da perda de energia da descarga para os eletrodos, para o dielétrico e por irradiação faz com que haja uma diminuição da taxa de remoção com o aumento sucessivo da duração da descarga (KÖNIG; WEINGAERTNER, 1990).

A Figura 17 representa o comportamento da taxa de remoção com o aumento do tempo de descarga, através da utilização de diversas correntes de pico na eletroerosão do aço-liga 56Ni-Cr-Mo-V7 com eletrodos de cobre. Observação semelhante também foi realizada por Amorim e Weingaertner (2005), que encontraram resultados parecidos na eletroerosão do aço AISI P20, com eletrodos de cobre e polaridade positiva, como pode ser visto na Figura 18.

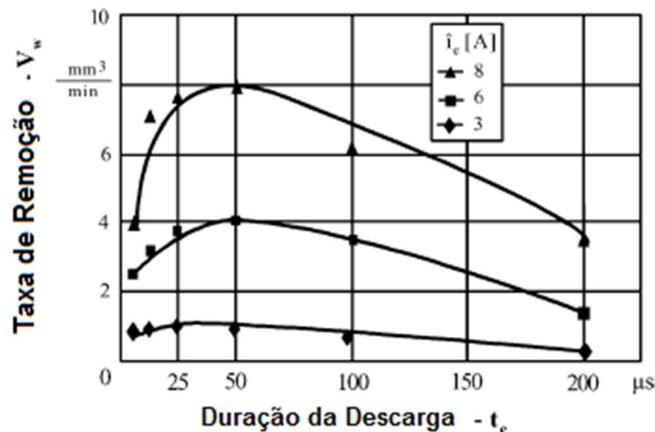
Referente à influência de  $t_{off}$ , segundo König e Weingaertner (1990), um valor elevado deste parâmetro resulta em mau aproveitamento da energia disponível na unidade do tempo, ocasionando uma baixa taxa de remoção. Por outro lado, a adoção de valores muito baixos de  $t_{off}$  impossibilita uma limpeza adequada da fenda de trabalho e a recuperação da resistividade do fluido dielétrico, prejudicando a estabilidade do processo com a ocorrência de descargas falhas que não promovem a remoção de material.

**Figura 17 - Taxa de remoção x tempo da descarga**



**Fonte: König e Weingaertner (1990)**

Figura 18 - Taxa de remoção x duração da descarga na eletroerosão do Aço AISI P20



Fonte: Amorim e Weingaertner (2005)

A relação de contato ou “*duty factor*” é definida como a razão entre a duração do pulso (que equivale a  $t_{on}$  para o modo isofrequência ou  $t_{on} + t_d$  para o modo isopulso) e a duração do período do ciclo da descarga ( $t_p = t_{on} + t_{off}$ ). Esta relação influencia a estabilidade do processo, afetando a taxa de remoção e o desgaste do eletrodo. Ao se trabalhar com relação de contato, normalmente varia-se o valor de  $t_{off}$ , mantendo constante o valor de  $t_{on}$ . Desta forma, até certo ponto, quanto maior a relação de contato (utilização de um menor valor de  $t_{off}$  em relação a um determinado  $t_{on}$ ), maior a taxa de remoção de material e menor o desgaste do eletrodo. Entretanto, a utilização de valores muito grandes de relação de contato causa uma contaminação excessiva da fenda de trabalho e a instabilidade do processo, acarretando em arcos e curtos-circuitos que levam a uma diminuição da taxa de remoção e a um aumento do desgaste do eletrodo (AMORIM, 2002).

### Polaridade do eletrodo-ferramenta

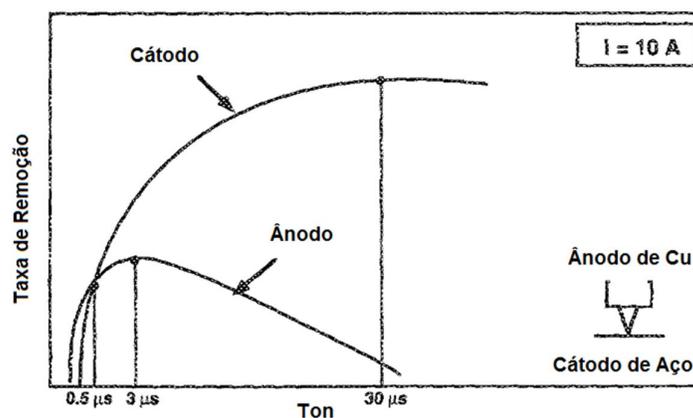
Por convenção, quando um processo tem polaridade positiva significa que o eletrodo-ferramenta está localizado no polo positivo e o eletrodo-peça, no polo negativo. Geralmente, as máquinas EDM permitem a utilização tanto da polaridade positiva quanto da negativa, dependendo esta escolha do tipo de aplicação requerida. Kunieda et al (2005) afirmaram que, em eletroerosão por penetração a utilização da polaridade positiva do eletrodo é benéfica ao processo, exceto quando são aplicadas descargas de pequena duração, pois nesta condição o desgaste do eletrodo é maior devido a deficiência da proteção

relativa a deposição de uma camada de carbono muito fina sobre a sua superfície.

Dibitonto et al. (1989) argumentaram que, devido à alta mobilidade dos elétrons, no início da descarga, apenas o ânodo (polaridade positiva) é atingido pelos elétrons, só havendo fusão e remoção de material no mesmo. A remoção de material no cátodo (polaridade negativa) só é iniciada após, aproximadamente, o dobro do período de tempo observado para o início da fusão de material do ânodo. Desta forma, para valores de tempo de descarga muito pequenos (abaixo de  $0,5 \mu\text{s}$ ), a adoção da polaridade negativa resulta em uma maior remoção de material da peça do que do eletrodo. Com o passar do tempo, os íons positivos resultantes do processo de ionização por impacto atingem o cátodo, aumentando a remoção de material no mesmo.

Com a continuidade do processo e a expansão do canal de plasma conforme descrito anteriormente, após certo período de tempo, a remoção de material se torna maior no cátodo. A Figura 19 representa a diferença entre a remoção de material do ânodo e do cátodo em função do tempo de pulso.

**Figura 19 - Taxa de erosão no cátodo e no ânodo em decorrência de  $t_{on}$**



**Fonte: Adaptado de Dibitonto et al. (1989)**

Amorim (2002) e Santos (2007) concluíram que, para os processos de eletroerosão a fio, a polaridade do eletrodo-ferramenta deve ser estabelecida como negativa e deve-se trabalhar com tempos de descarga muito curtos (entre  $0,1$  e  $10 \mu\text{s}$ ). Estas condições evitam a quebra do fio durante a

usinagem, pois a remoção de material ocorrerá preponderantemente através da ação dos elétrons, sendo irrelevante a ação dos íons positivos sobre o fio.

Para a eletroerosão por penetração, de uma forma geral, tem-se que (AMORIM, 2002; SANTOS 2007):

- Na eletroerosão com eletrodos de cobre, em condições de desbaste, normalmente a polaridade positiva apresenta melhor desempenho, resultando em uma maior taxa de remoção de material da peça e em um menor desgaste do eletrodo-ferramenta.
- Na eletroerosão com eletrodos de cobre, em condições de acabamento, a prática comum é utilizar a polaridade negativa.
- A polaridade negativa é usada com eletrodos de grafite e na usinagem de metal duro, titânio e metais refratários usando eletrodos metálicos.

Entretanto, a escolha da polaridade dos eletrodos depende das propriedades termofísicas dos materiais. Desta forma, faz-se necessária a realização de ensaios experimentais para definição deste parâmetro no processo de usinagem de um material (AMORIM, 2002).

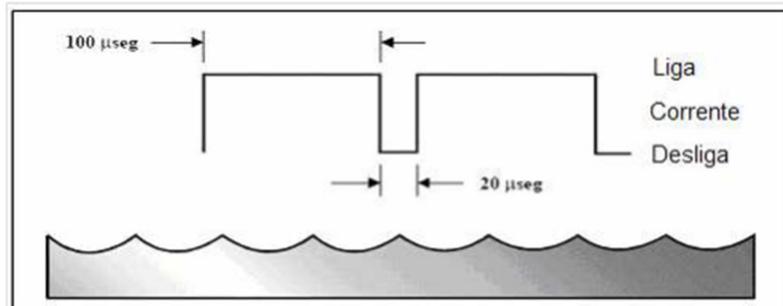
### **Regimes de desbaste e acabamento**

A adoção de valores elevados de corrente de pico aliada a longas durações da descarga elétrica (menor frequência) resulta em maiores taxas de remoção de material. Entretanto, neste tipo de regime, o acabamento superficial alcançado não é bom, pois há a formação de cavidades com maior dimensão o que eleva a rugosidade final da peça. Esta condição de pulso é geralmente utilizada em regimes de desbaste (KUNIEDA et al, 2005). A Figura 20 traz um desenho representativo do efeito deste tipo de regime sobre a superfície da peça.

Por outro lado, a adoção de pulsos elétricos com longas durações associada à utilização de uma baixa corrente de pico resulta em um melhor acabamento superficial e um baixo desgaste do eletrodo. Em contrapartida, a taxa de remoção é prejudicada. Esta condição de pulso é aplicada em processos de acabamento. Nesta situação, a densidade de corrente na peça é menor, levando a formação de menores poças de fusão e a dissipação por condução

de calor de boa parte da energia distribuída na peça. A remoção de material por pulso é pequena. Portanto, a eficiência energética da descarga na remoção de material é maior em pulsos que possuem uma maior corrente de pico e menores durações do que em pulsos de mesma quantidade de energia, mas com menor corrente e maior duração (KUNIEDA et al, 2005).

**Figura 20 - Representação do Efeito do Regime de Desbaste em EDM (Baixa Frequência de Pulsos)**

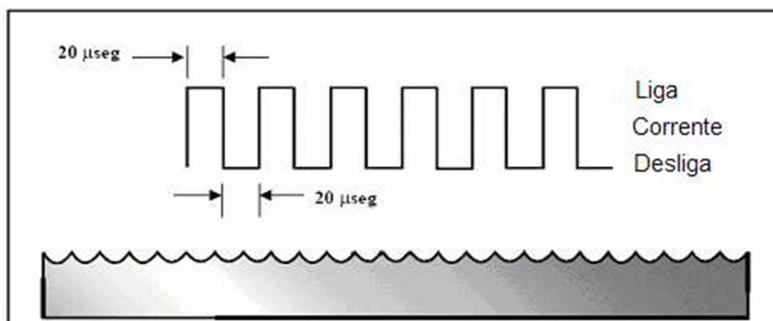


Fonte: Santos (2007)

Da mesma forma, condições de pulso com menores durações de descarga (maior frequência) e elevada corrente de pico resultam em baixa rugosidade superficial devido à formação de poças de fusão de pequenas dimensões (Figura 21). Entretanto, a remoção de material por pulso é maior do que a obtida em condições de usinagem aplicadas em processos de acabamento (grandes durações de descarga e baixa corrente de pico) com a mesma quantidade de energia por pulso. A adoção de uma maior frequência da descarga elétrica resulta no aumento da taxa de remoção. Contudo, o desgaste do eletrodo é maior, devido à espessura fina da camada de carbono depositada sobre sua superfície. Este tipo de descarga é aplicado em eletroerosão a fio, onde não há uma preocupação em relação ao desgaste do eletrodo (neste tipo de processo, o eletrodo ferramenta é um fio de latão), pois durante o processo ele é sempre renovado (KUNIEDA et al, 2005).

A Tabela 1 apresenta um resumo da influência dos principais parâmetros elétricos sobre o processo EDM com a adoção de eletrodos de cobre e hidrocarboneto como fluido dielétrico.

**Figura 21 - Representação do Efeito do Regime de Acabamento em EDM: Alta Frequência de Pulsos**



Fonte: Santos (2007)

**Tabela 1 - Influência dos Principais Parâmetros Elétricos sobre o Processo EDM**

Parâmetro	Influência Esperada sobre a Taxa de Remoção	Influência Esperada sobre o Desgaste do Eletrodo
<b>Polaridade</b>	Para pequenos $t_{on}$ ( $<10 \mu s$ ): polaridade negativa aumenta a taxa de remoção Para médios e grandes $t_{on}$ : polaridade positiva aumenta a taxa de remoção	Para pequenos $t_{on}$ ( $<10 \mu s$ ): polaridade negativa reduz o desgaste do eletrodo Para médios e grandes $t_{on}$ : polaridade positiva reduz o desgaste do eletrodo
<b>Corrente de Pico</b>	O aumento deste parâmetro eleva a taxa de remoção	O aumento deste parâmetro eleva o desgaste do eletrodo
$t_{on}$	O aumento deste parâmetro eleva a taxa de remoção até um valor máximo Em seguida, o aumento de $t_{on}$ reduz a taxa de remoção	O aumento deste parâmetro reduz o desgaste do eletrodo
$t_{off}$	O aumento deste parâmetro reduz a taxa de remoção	Não há informações sobre a influência deste parâmetro sobre o desgaste do eletrodo
<b>Tensão</b>	Até certo ponto, o aumento deste parâmetro eleva a taxa de remoção	O aumento deste parâmetro reduz o desgaste do eletrodo

Fonte: O Autor<sup>1</sup>

## 2.4 HRSA, Superligas à Base de Níquel e Ligas de Titânio

As superligas resistentes ao calor (HRSA – *Heat Resistant Super Alloys*) são materiais capazes de suportar a altas temperaturas sem uma redução significativa das suas resistências mecânica e a oxidação. Estas superligas são largamente utilizadas nas indústrias aeroespacial, petróleo e gás, médico-hospitalar (COROMANT, 20??).

<sup>1</sup> Informações compiladas de: Dibitonto et al. (1989), König e Weingaertner (1990), Amorim (2002), Amorim e Weingaertner (2005), Kunieda et al (2005), Santos (2007) e Saha (2008).

As superligas podem ser divididas em três grupos: a base de níquel, a base de cobalto e a base de níquel-ferro. As superligas à base de níquel e a base de cobalto foram projetadas para fundição, enquanto as à base de níquel-ferro, para serem trabalhadas mecanicamente. O limite de temperatura para aplicação estrutural destas ligas é de 950°C, sendo que elas podem ser utilizadas em até 1200°C quando não houver solicitações mecânicas (SANTOS, 1993).

As superligas a base de níquel são as que possuem maior aplicação tecnológica. Elas possuem uma estrutura cristalina cúbica de face centrada que permite uma grande solubilidade de elementos de liga na matriz austenítica. A capacidade de controle de precipitação de fases intermetálicas permite um endurecimento pela formação de carbonetos e outras soluções sólidas, o que confere uma alta resistência mecânica a estas ligas. Essa capacidade de endurecimento torna as superligas à base de níquel adequadas para aplicações em turbinas de jato, motores de foguetes e plantas de geração de energia (ICZ, 2014; RESENDE et al, 2009).

A maioria das superligas também apresenta boa ductilidade nas condições de serviço, boa resistência ao impacto, à fadiga de alto e baixo ciclo, à fadiga térmica, à fluência, boa resistência à corrosão e capacidade de operar continuamente em elevadas temperaturas (ICZ, 2014; NASCIMENTO, 2007).

Apesar de não fazerem parte da classificação das superligas resistentes ao calor, as ligas de titânio apresentam propriedades, características e aplicações semelhantes às apresentadas por aquelas. As ligas de titânio tem elevada resistência mecânica em altas temperaturas e excelente resistência a corrosão, além de uma alta razão entre resistência mecânica e massa específica. Devido a essas propriedades, estas ligas são bastante aplicadas nas indústrias aeronáutica, automobilística, química e biomédica (SIVAKUMAR; GANDHINATHAN, 2013; KAO et al., 2010).

O processo EDM tem sido usado com sucesso na usinagem de materiais duros, que apresentam baixa usinabilidade pelos métodos tradicionais de usinagem, tais como os aços-ferramentas endurecidos por tratamento térmico.

Devido as suas baixas condutividades térmicas e elevadas resistências mecânicas, as superligas a base de níquel e as ligas de titânio também apresentam baixa usinabilidade. A eletroerosão pode ser utilizada como alternativa na usinagem destes materiais.

A seguir, serão abordadas as principais características da liga INCONEL 718 e, em seguida, alguns resultados de pesquisas do processo EDM das ligas de níquel e das ligas de titânio são apresentados.

#### 2.4.1 INCONEL 718

O INCONEL 718 é uma das mais importantes superligas à base de níquel-ferro. Esta superliga é endurecível por precipitação através da formação de compostos intermetálicos e é apropriada para aplicações na faixa de temperatura de -250°C a 649°C. A sua composição química propicia uma ampla variedade de microestruturas. Os principais elementos de ligas deste material são cromo, nióbio, molibdênio, titânio e alumínio (SANTOS, 1993). A composição química do INCONEL 718 é indicada na Tabela 2.

**Tabela 2 - Composição Química INCONEL 718.**

<b>Elementos Químicos</b>	<b>(%p)</b>
C	0,04
Si	0,30
Mn	0,20
Ni	53,00
Cr	18,60
Nb	5,00
Al	0,40
Ti	0,90
Mo	3,10
Fe	18,50

Fonte: Adaptado de ICZ (2014)

Devido às elevadas propriedades mecânicas, esta liga é extremamente utilizada nas indústrias nuclear, de criogenia, petrolífera e principalmente aeroespacial, na constituição da “espinha dorsal” dos motores a jato, tanto comerciais quanto militares, além de ser bastante utilizada na fabricação de outros componentes de alto desempenho (RESENDE et al., 2009).

O nióbio é o elemento utilizado para aumentar a resistência mecânica da liga, através da formação de uma fase metaestável  $Ni_3Nb$ , com a forma de discos alongados orientados paralelamente aos planos cristalográficos da matriz austenítica. Além desta fase, há também a formação em menor quantidade de uma segunda fase [ $Ni_3(Ti, Al)$ ]. A precipitação destas fases ocorre naturalmente ou pode ser acelerada com a utilização de tratamentos térmicos (RESENDE et al., 2009). A lenta velocidade de envelhecimento desta liga permite que a mesma seja soldada e recozida sem a ocorrência de trincas devido às tensões causadas pelas precipitações intermetálicas (SANTOS, 1993).

O INCONEL 718 apresenta boa resistência à oxidação em até  $1000^{\circ}C$  e uma boa resistência à corrosão em meios agressivos (SANTOS, 1993). Quando o INCONEL 718 é submetido a temperaturas entre  $600$  e  $800^{\circ}C$  durante um longo período de tempo, ocorre a dissolução de uma das fases endurecedoras do material, conduzindo a uma redução da sua resistência mecânica. A temperatura máxima para utilização desta superliga é de  $815^{\circ}C$  (RESENDE et al., 2009). A Tabela 3 traz um resumo das principais propriedades físicas da liga INCONEL 718.

**Tabela 3: Propriedades físicas do INCONEL 718 à temperatura ambiente**

<b>Propriedade Física</b>	<b>Valor</b>
Densidade	8,19 g/cm <sup>3</sup>
Condutividade térmica	11,2 W/m.K
Resistividade elétrica (20°C)	127 μohm.cm
Módulo de elasticidade	200 GPa
Limite de escoamento	434 GPa
Resistência à tração	855 MPa
Dureza	89 HRb

Fonte: Newton et al. (2009)

#### **2.4.2 Eletroerosão de HRSA, de Ligas de Titânio e de INCONEL 718**

Embora a resistência à alta temperatura e a dureza sejam requisitos desejáveis nas superligas resistentes ao calor e nas ligas de titânio, estas propriedades dificultam a usinagem convencional destes materiais devido às altas tensões geradas durante o processo que resulta na redução da vida da ferramenta de corte. A baixa condutividade térmica destas ligas faz com que haja uma elevada concentração de temperatura na interface ferramenta-peça durante o

processo de usinagem destes materiais. Desta forma, é necessária a utilização de ferramentas especiais que são consideravelmente mais caras (EZUGWU et al., 2003).

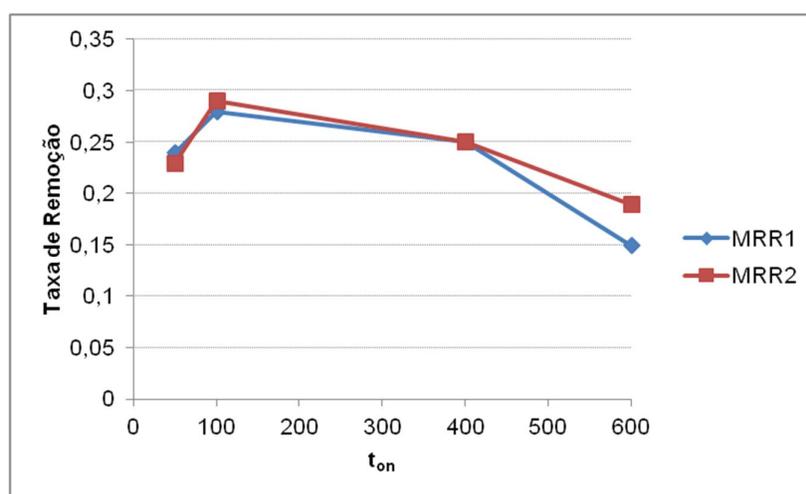
A remoção de material por EDM é um processo térmico e elétrico e não há contato mecânico entre a ferramenta e a peça de trabalho, evitando assim as vibrações e as tensões mecânicas inerentes aos processos convencionais de usinagem. Desta forma, as propriedades térmicas e elétricas do material são importantes para o rendimento do processo EDM, enquanto que, as propriedades mecânicas podem ser menosprezadas (SIVAKUMAR, GANDHINATHAN, 2013; FONDA et al., 2008).

A eletroerosão surge como uma interessante alternativa para usinagem das superligas resistentes ao calor e das ligas de titânio. Entretanto, a velocidade de remoção de material no processo EDM é muito inferior à obtida com os processos convencionais de usinagem. Além disso, a integridade da superfície da peça eletroerodida é afetada devido à formação de uma zona termicamente afetada, de uma camada de material ressolidificado e de microtrincas decorrentes do processo térmico característico do mecanismo de remoção de material. Consequentemente, a confiabilidade das peças obtidas por este processo é prejudicada (IZQUIERDO et al., 2012).

Lin, Yan e Chang (2000) estudaram a combinação do processo EDM com um sistema de ultrassom para aprimorar a eficiência e precisão da usinagem da liga de titânio Ti-6Al-4V com eletrodos de cobre e polaridade negativa, no que diz respeito a taxa de remoção, desgaste do eletrodo, rugosidade da superfície e espessura da camada branca. Para todos os experimentos, foram utilizadas partículas abrasivas no fluido dielétrico para aprimorar a taxa de remoção. Durante os experimentos, alguns parâmetros como tipo de dielétrico, corrente de pico, duração do pulso e concentração dos grãos abrasivos no fluido foram manipulados. Como resultado, eles concluíram que a combinação EDM e ultrassom aprimorou a taxa de remoção de material, reduziu a espessura da camada branca e aumentou a rugosidade da superfície.

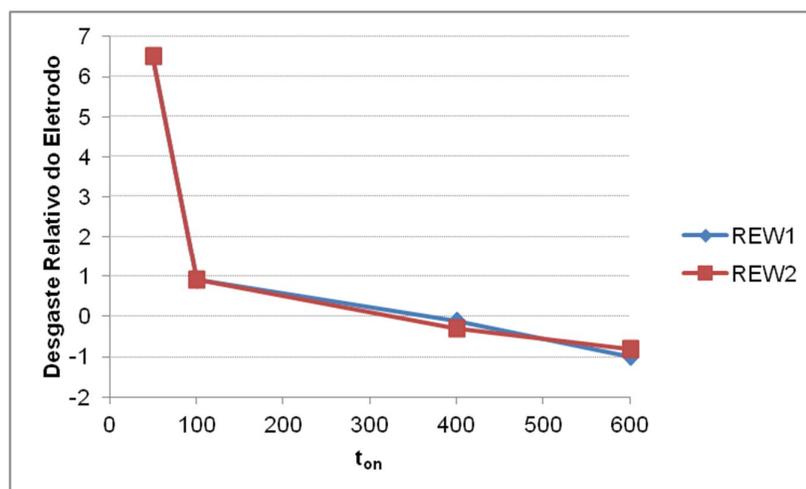
Kang e Kim (2003) estudaram como a duração do pulso afeta a integridade da superfície na eletroerosão da superliga de níquel Hastelloy-X, com a adoção da polaridade positiva no eletrodo-ferramenta. Neste estudo, eles concluíram que a utilização de pulsos com longos ton e curtos toff resulta em uma pior integridade superficial, favorecendo a formação de microtrincas e o aumento da espessura da zona termicamente afetada. Além disso, o comportamento da taxa de remoção e do desgaste do eletrodo mostrou-se não linear com o aumento de ton, conforme ilustrado na Figura 22 e na Figura 23.

**Figura 22: Taxa de Remoção do Material em Relação a  $t_{on}$ , na eletroerosão de Hastelloy**



Fonte: Adaptado de Kang e Kim, 2003.

**Figura 23: Desgaste Relativo do Eletrodo em Relação a  $t_{on}$ , na eletroerosão de Hastelloy**



Fonte: Adaptado de Kang e Kim, 2003.

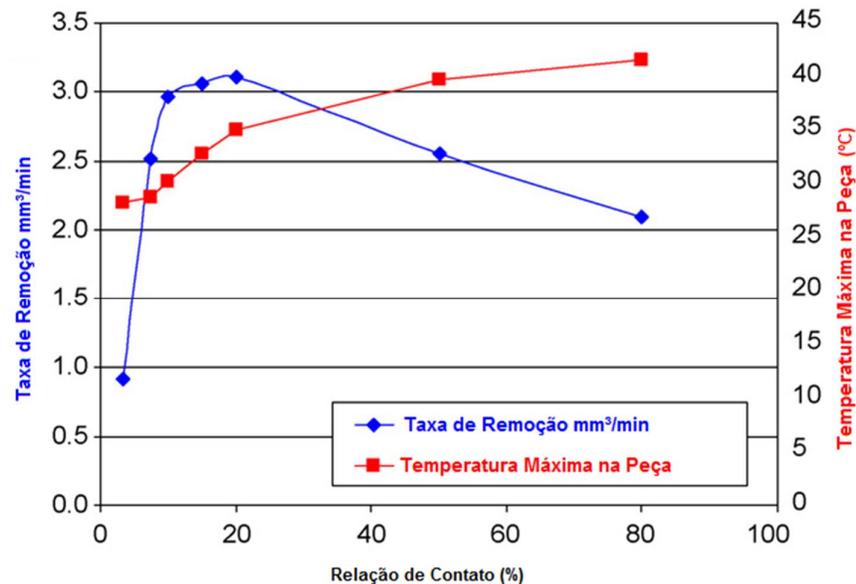
A eletroerosão da liga de titânio Ti-6Al-4V foi novamente estudada por Fonda et al. (2008) que avaliaram o efeito das propriedades térmicas e elétricas deste material sobre a produtividade do processo. A taxa em que o material é removido depende da velocidade em que este absorve e dissipa o calor despendido em cada descarga elétrica: o aumento da resistividade dificulta a condução elétrica no material o que ocasiona a diminuição da fenda de trabalho (*gap*), facilitando a ocorrência de arcos e curtos-circuitos que prejudicam o rendimento do processo. Para evitar o aumento da temperatura da peça, é necessário encontrar uma relação de contato que proporciona uma adequada dissipação de calor entre as descargas elétricas. Este estudo deve ser realizado, principalmente, para materiais que possuem baixa condutividade térmica associada a uma alta resistividade elétrica.

Quanto maior a relação de contato adotada, maior o aumento de temperatura da peça durante a usinagem, devido à baixa condutividade térmica desta liga que dificulta a condução do calor. Isso promove o aumento da resistividade da peça que prejudica a remoção de material por dificultar o estabelecimento do pulso elétrico. Há, assim, um valor para a relação de contato, onde, acima do mesmo, a taxa de remoção é prejudicada. A Figura 24 apresenta um gráfico que indica o comportamento da taxa de remoção e da temperatura máxima na peça com o aumento da relação de contato na eletroerosão da liga de titânio Ti-6Al-4V. Neste estudo o valor de  $t_{on}$  foi mantido fixo em 20  $\mu s$ , sendo que  $t_{off}$  foi variado para obtenção das diferentes relações de contato analisadas no mesmo (FONDA et al., 2008).

Kuppan et al. (2008) estudaram a influência da variação dos parâmetros corrente elétrica,  $t_{on}$ , relação de contato e velocidade de rotação do eletrodo-ferramenta sobre a taxa de remoção de material e a rugosidade superficial da peça na furação profunda da liga INCONEL 718 utilizando o processo EDM. Para o eletrodo-ferramenta a polaridade adotada em todos os ensaios foi positiva. No final do estudo, eles concluíram que a taxa de remoção é influenciada positivamente pelos aumentos da corrente de pico, da relação de contato e da velocidade de rotação do eletrodo, enquanto que a duração do pulso não afetou significativamente este fator. Em relação à rugosidade, há um

aumento deste com os aumentos da corrente elétrica e da duração do pulso. Os demais parâmetros não influenciaram significativamente este fator.

**Figura 24 - Temperatura da Peça e Velocidade de Usinagem X Relação de Contato na Eletroerosão de Ti6Al4V**



Fonte: Adaptado de Fonda et al. (2008)

Yilmaz e Okka (2010) realizaram um experimento comparativo do processo de furação por eletroerosão nas ligas INCONEL 718 e Ti-6Al-4V. Neste experimento foi avaliada a influência do tipo de eletrodo (com um único canal de lavagem ou com múltiplos canais de lavagem) e do material do eletrodo (cobre ou latão) sobre a taxa de remoção, desgaste do eletrodo, integridade final do material e acabamento superficial. A polaridade adotada nos experimentos foi a negativa para o eletrodo-ferramenta. Como resultado, eles obtiveram que, a utilização de um único canal de lavagem apresentou melhores resultados tanto para a taxa de remoção quanto para o desgaste do eletrodo para ambos os materiais avaliados como peça e como eletrodo. Entretanto, referente ao acabamento superficial e à integridade final do material, a utilização de múltiplos canais de lavagem apresentou melhores resultados, em todas as condições de usinagem adotadas nos experimentos.

Kao et al. (2010) investigaram os melhores parâmetros para o processo EDM da liga Ti-6Al-4V no que tange à taxa de remoção, o desgaste relativo e a rugosidade da superfície da peça com a utilização de eletrodos de cobre e

polaridade positiva. Os parâmetros avaliados foram: corrente de pico, tensão elétrica, duração do pulso e relação de contato. Para realização do planejamento experimental, eles utilizaram o método de Taguchi. No final, eles apresentaram os parâmetros considerados ótimos de acordo com a análise relacional *Grey* para eletroerosão desta liga de titânio nas condições experimentais adotadas.

Nesta mesma linha, Rahman et al. (2010) também utilizaram a ferramenta estatística DOE (*Design of Experiments*) para planejar um experimento fatorial fracionário visando avaliar o efeito da corrente de pico,  $t_{on}$  e  $t_{off}$  sobre a taxa de remoção de material na eletroerosão da liga Ti-6Al-4V com a utilização de eletrodos de cobre-tungstênio e polaridade positiva. A metodologia de superfície de resposta foi utilizada para encontrar os parâmetros que otimizam o processo sobre o aspecto avaliado. O aumento da corrente de pico e de  $t_{on}$  influenciou positivamente a taxa de remoção, enquanto que o efeito de  $t_{off}$  variou de acordo com a corrente de pico utilizada, sendo que, no geral, o aumento deste parâmetro prejudicou o processo de remoção de material.

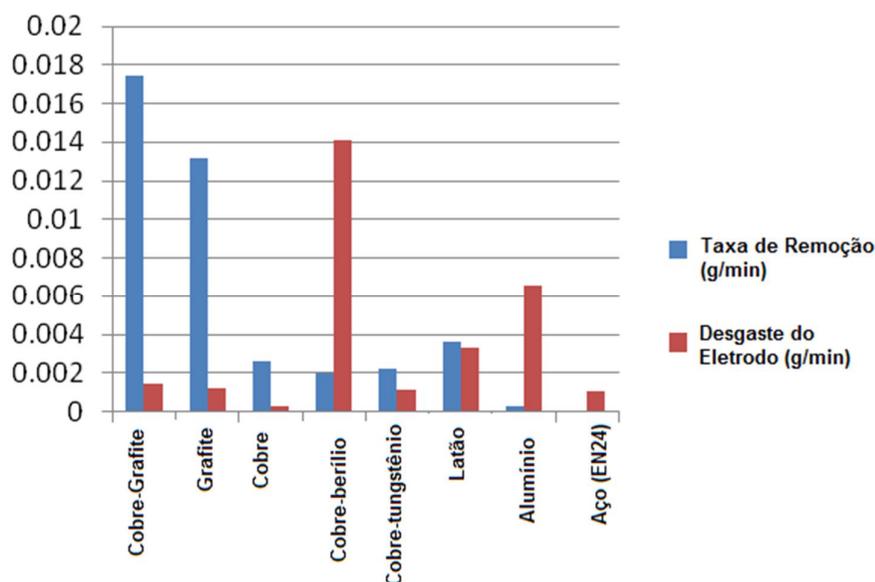
Do mesmo modo, Rajesha et al. (2011) avaliaram o efeito da variação dos parâmetros corrente elétrica, relação de contato, pressão de lavagem, controle de sensibilidade e controle da abertura da fenda de trabalho sobre a taxa de remoção, a rugosidade da peça e o desgaste do eletrodo na furação por eletroerosão de INCONEL 718 utilizando um eletrodo oco. A polaridade adotada para o eletrodo-ferramenta nestes ensaios foi a negativa. Os resultados obtidos para a taxa de remoção, para o desgaste do eletrodo e para a rugosidade da superfície indicam que a corrente elétrica é o parâmetro mais influente sobre estes fatores, sendo que, há um aumento nos mesmos quando utilizados valores elevados deste parâmetro.

Izquierdo et al. (2012) utilizaram um modelo térmico de múltiplas faíscas para caracterizar as propriedades da descarga elétrica e os mecanismos de remoção de material. Os dados obtidos deste modelo foram utilizados para descrever a extensão da camada ressolidificada com a decorrência de sucessivas descargas durante a usinagem de INCONEL 718. Uma importante conclusão deste estudo é que há sempre um valor de  $t_{on}$ , próximo ao valor

informado pelos fabricantes de máquinas EDM, para o qual a energia consumida no processo é otimizada, maximizando a taxa de remoção de material em relação a uma determinada rugosidade superficial desejada.

Sivakumar e Gandhinathan (2013) também estudaram a liga de titânio Ti-6Al-4V, visando identificar os parâmetros ótimos de eletroerosão e o melhor material a ser utilizado como eletrodo-ferramenta, tendo em consideração a obtenção de maiores taxas de remoção e menores desgastes do eletrodo. Foram estudados os seguintes materiais para o eletrodo-ferramenta: cobre eletrolítico, cobre-berílio, cobre-tungstênio, grafite, alumínio, aço e cobre impregnado de grafite. Corrente de pico,  $t_{on}$  e  $t_{off}$  foram avaliados através de um experimento modelado pelo método de Taguchi. No final, eles concluíram que os melhores resultados foram obtidos com a utilização de cobre impregnado de grafite, conforme Figura 25. A taxa de remoção é principalmente influenciada pela corrente de pico e por  $t_{on}$ , sendo que  $t_{off}$  tem menor efeito sobre este fator. Já para o desgaste do eletrodo, os parâmetros mais influentes foram  $t_{on}$  e  $t_{off}$ .

**Figura 25 - Material do Eletrodo X Taxa de Remoção e Desgaste do Eletrodo, na usinagem de Ti6Al4V**



Fonte: Adaptado de Sivakumar e Gandhinathan (2013)

A seguir, serão abordados o aparato e o procedimento experimental adotados no desenvolvimento deste trabalho.

### 3 APARATO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para avaliar a influência da variação dos parâmetros do processo EDM da liga INCONEL 718 sobre o desgaste relativo do eletrodo-ferramenta e a taxa de remoção do material da peça foram realizadas duas etapas experimentais. A primeira etapa de ensaios é constituída por um experimento fatorial fracionário onde 08 parâmetros do processo EDM foram variados em dois níveis. A segunda etapa é constituída por um experimento fatorial completo onde os parâmetros  $t_{on}$  e  $t_{off}$  foram variados em 04 níveis. Antes de iniciar os estudos com o INCONEL 718, foram realizados pré-ensaios com os aços AISI P20 e ABNT 304 para consolidação da metodologia experimental adotada. Nesta seção, a metodologia e os materiais utilizados são apresentados para cada etapa de ensaios realizados.

#### 3.1 Materiais

A máquina de eletroerosão por penetração utilizada na realização dos ensaios foi o modelo SA 20 do fabricante ACTSpark. Esta máquina permite a manipulação de 19 variáveis de processo com a possibilidade de controle do processo de modo a inibir a formação de curtos-circuitos e a degeneração das faíscas em arco elétrico.

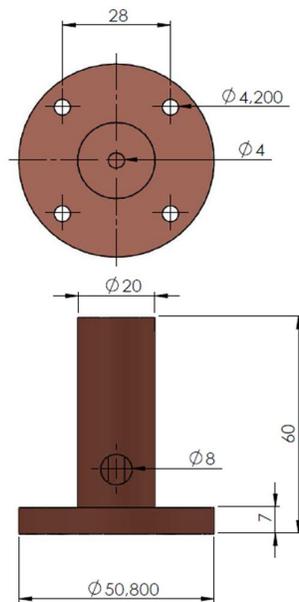
Como fluido dielétrico foi utilizado um hidrocarboneto saturado C9–C12 (tetrâmero hidrogenado) produzido pela Archem Química e aplicado convencionalmente para este tipo de processo na indústria (ARCHEM, 2009).

Dentre os materiais mais comuns para fabricação de eletrodos-ferramentas, o cobre eletrolítico (99,9% Cu) foi escolhido. Antes de se optar por eletrodos de cobre, foram realizadas algumas tentativas para elaboração de uma metodologia confiável para medição do desgaste de eletrodos de grafite através da diferença de massa. Entretanto, elas se mostraram inviáveis, devido à permeabilidade do grafite que absorve o fluido dielétrico, complicando a realização de medidas precisas da remoção de material de eletrodos fabricados com este material.

Os eletrodos-ferramentas foram usinados na forma de barras cilíndricas escalonadas com uma seção principal medindo 20 mm de diâmetro e 53 mm de comprimento e outra seção com diâmetro 50,8 mm de diâmetro e 7 mm de comprimento, que serviu como base para fixação do eletrodo ao System 3R. Na seção principal foi usinado um furo central de 4 mm de diâmetro visando o estudo da influência da utilização da lavagem pelo centro do eletrodo no desempenho do processo.

A Figura 26 traz uma ilustração do eletrodo-ferramenta com suas dimensões e a foto de um dos eletrodos-ferramenta utilizado nos ensaios. A fixação do eletrodo-ferramenta na máquina foi realizada por um sistema System 3R.

**Figura 26 - Desenho em CAD com dimensões e foto do eletrodo-ferramenta utilizado nos experimentos.**



**Fonte: O Autor**

Os corpos de prova foram usinados na forma de blocos com dimensões de 30 mm x 30 mm e espessura de 10 mm. Estes blocos foram cortados pelo processo de eletroerosão a fio e retificados para minimizar as possíveis interferências das irregularidades da superfície dos corpos de prova sobre os resultados dos ensaios. O material utilizado foi o INCONEL 718, uma liga a base de ferro-níquel, de alta resistência e endurecível por precipitação, aplicada em componentes que precisam resistir a elevadas tensões em

temperaturas altas. A Figura 27 traz uma foto de um dos corpos de prova, antes da usinagem.

**Figura 27 - Corpo de prova de INCONEL 718, antes da usinagem.**



**Fonte: O Autor**

Para a análise da produtividade do processo e do desgaste relativo foi considerada a taxa de remoção de material dos eletrodos peça e ferramenta através da medição da diferença de massa, antes e após a usinagem. Para isso, utilizou-se de uma balança de precisão, com resolução de 0,001 g, modelo Mark M503 da marca BEL. A Figura 28 exibe esta balança pesando um dos corpos de prova, após a usinagem do mesmo. Para diminuir a influência dos possíveis erros aleatórios sobre os resultados, foram realizadas 4 repetições para cada medição de massa. A média destas medições equivale à medida utilizada nas análises dos resultados.

**Figura 28 - Balança de precisão pesando um dos corpos de prova.**



**Fonte: O Autor**

Para eliminar erros sistemáticos durante a etapa de pesagem devido à impregnação do fluido sobre a superfície dos eletrodos peça e ferramenta, após o processo de usinagem estes foram aquecidos em uma estufa elétrica da marca Biomatic (Figura 29) a 150 °C por 20 minutos. Desta forma, procurou-se garantir que a medição da massa perdida durante o processo de usinagem seja o mais próxima possível do valor real.

**Figura 29 - Estufa utilizada na secagem dos eletrodos peça e ferramenta.**



**Fonte: O Autor**

### **3.2 Pré-Ensaio**

Antes de iniciar os ensaios com o INCONEL 718, foram realizados pré-ensaios com o aço-ferramenta AISI P20 e o aço inoxidável ABNT 304. O intuito do desenvolvimento destes pré-ensaios foi avaliar qual a importância estatística das variáveis que podem ser manipuladas na máquina escolhida sobre os fatores de desempenho avaliados (taxa de remoção e desgaste do eletrodo). Desta forma, buscou-se reduzir o número de parâmetros a serem manipulados nos ensaios definitivos com o INCONEL 718.

Onze parâmetros foram selecionados para serem avaliados na usinagem do aço AISI P20, sendo eles: polaridade, corrente de pico,  $t_{on}$ ,  $t_{off}$ , tempo de erosão, lavagem, modo de oscilação, velocidade do temporizador, distância de

retração do eletrodo-ferramenta e ganho. O significado destes parâmetros, de acordo com o manual da máquina utilizada (ACTSPARK, 2006) são descritos a seguir:

- **Polaridade:** quando o eletrodo-ferramenta está localizado no polo positivo do campo elétrico formado entre este e a peça, a polaridade do processo é definida como positiva, caso contrário, a polaridade é definida como negativa.
- **Corrente de Pico:** valor máximo de corrente atingida durante uma descarga. A máquina utilizada permite a utilização de correntes de pico na faixa de 0,8 a 39 A.
- **$t_{on}$ :** a depender do modo de atuação do gerador, o valor de  $t_{on}$  pode englobar o valor de  $t_d$  (modo isofrequência) ou pode corresponder à parcela do tempo onde há passagem de corrente elétrica (modo isopulso). A máquina EDM utilizada permite a seleção de valores de  $t_{on}$  entre 0,4 e 514.000  $\mu$ s.
- **$t_{off}$ :** tempo entre dois pulsos elétricos consecutivos, necessário para a deionização do canal e o reestabelecimento das propriedades do fluido dielétrico. A faixa de valores permitidos pela máquina EDM utilizada é entre 0,4 e 514.000  $\mu$ s.
- **Tensão:** o valor que pode ser ajustado na máquina EDM utilizada nos ensaios corresponde ao da tensão em aberto, estabelecida no momento inicial do processo de eletroerosão. Este parâmetro pode ser ajustado entre 0 e 300 volts.
- **Lavagem:** neste trabalho foi avaliada a influência da adição de um sistema de lavagem central por meio de um furo localizado no centro da ponta do eletrodo, com pressão de adução de 0,1 MPa.
- **Tempo de Erosão:** intervalo de tempo em que descargas sucessivas são aplicadas sem interrupção do processo para retração do eletrodo-ferramenta. A faixa permitida pela máquina para este parâmetro é entre 0,1 e 32 s.
- **Modo de oscilação:** esta máquina de eletroerosão permite a escolha do modo de atuação do gerador em dois tipos de pulsos de descarga: isopulso, ou seja, pulsos com mesmo tempo de duração de passagem de corrente

pela fenda de trabalho, fazendo com que a frequência de ocorrência dos pulsos varie de acordo com o a variação de  $t_d$  ou isofrequência, ou seja, mantém-se constante a frequência de ocorrência dos pulsos, fazendo com que o tempo de duração de passagem de corrente varie de acordo com o a variação de  $t_d$ .

- **Velocidade do temporizador:** velocidade de retração e avanço do eletrodo-ferramenta para limpeza da fenda de trabalho que pode ser variado discretamente entre valores pré-determinados na faixa de 0,6 mm/s a 24,4 mm/s.
- **Distância de retração do eletrodo-ferramenta:** distância entre a posição atual do eletrodo (*gap*) e a peça durante a retração da ferramenta no processo EDM. Este parâmetro pode ser variado de 0 a 25,4 mm, sendo que, com a adoção do valor nulo a máquina realiza o ajuste desta distância automaticamente.
- **Ganho:** é o ganho de velocidade do servo-sistema durante a erosão. Pode ser qualquer valor inteiro dentro do intervalo de 0 a 255.

Como o número de variáveis é elevado, o experimento adotado foi um fatorial fracionário com resolução IV, sem replicações, onde cada parâmetro foi variado em dois níveis, conforme indicado na Tabela 4. A escolha de um dos níveis destes parâmetros foi baseada nos valores recomendados na tabela de programação da máquina EDM para usinagem de aço, nas condições pré-definidas (material e formato do eletrodo e rugosidade final desejada na peça de 10  $\mu\text{m}$ ). Foram realizados sessenta e quatro testes.

**Tabela 4 - Níveis dos Parâmetros Avaliados no Pré-Ensaio com o Aço AISI P20**

Parâmetros	1º Nível	2º Nível
Polaridade	Negativa	Positiva
Corrente de Pico (A)	13	29
$t_{on}$ ( $\mu\text{s}$ )	115,5	237,1
$t_{off}$ ( $\mu\text{s}$ )	115,5	237,1
Lavagem Central	Sem	Com
Tensão (V)	75	125
Tempo de Erosão (s)	0,4	0,8
Velocidade do Temporizador (mm/s)	1,8	11,2
Distância de Retração (mm)	3	10
Ganho	11	21
Modo de Oscilação	Isofrequência	Isopulso

Fonte: O Autor

Os gráficos de Pareto e os demais gráficos obtidos como resultado para este pré-ensaio estão disponíveis no Apêndice A deste trabalho. Os dados foram avaliados com 99,5% de nível de significância. A Tabela 5 traz o valor-p ou nível descritivo do teste para cada parâmetro em relação à taxa de remoção, onde aqueles que possuem valor inferior a 0,005 possuem influência estatística sobre o processo.

**Tabela 5 - Valor-p para influência individual de cada parâmetro sobre a taxa de remoção do aço AISI P20**

<b>Termo</b>	<b>Valor-p</b>
Polaridade	0,000
Corrente de Pico	0,000
$t_{on}$	0,657
$t_{off}$	0,016
Lavagem	0,218
Tensão	0,281
Tempo de Erosão	0,000
Velocidade do Temporizador	0,722
Distância de Retração	0,276
Ganho	0,554
Modo de Oscilação	0,131

**Fonte: O Autor**

Em resumo, apenas os parâmetros polaridade, corrente de pico e tempo de erosão apresentaram efeito individual com influência sobre a taxa de remoção. Já em relação ao desgaste relativo, nenhum parâmetro influenciou significativamente o processo, conforme pode ser verificado na Tabela 6.

Analisando os resultados obtidos no pré-ensaio com o aço ABNT P20 indicados na Tabela 5, percebe-se que quatro parâmetros avaliados (velocidade do temporizador, distância de retração, ganho e  $t_{on}$ ) possuem as mais baixas influências estatísticas individuais sobre o processo em relação à taxa de remoção. Já em relação ao desgaste relativo (Tabela 6), os parâmetros menos influentes são: distância de retração, ganho e velocidade do temporizador. Desta forma, optou-se por realizar a próxima etapa de pré-ensaios com o aço ABNT 304, retirando da análise estes três parâmetros. Estes foram mantidos fixos nos valores em que se obtiveram as maiores taxas de remoção, indicados na Tabela 7.

**Tabela 6 - Valor-p para influência individual de cada parâmetro sobre o desgaste do eletrodo na eletroerosão do aço AISI P20**

<b>Termo</b>	<b>Valor-p</b>
Polaridade	0,043
Corrente de Pico	0,339
$t_{on}$	0,219
$t_{off}$	0,015
Lavagem	0,038
Tensão	0,049
Tempo de Erosão	0,230
Velocidade do Temporizador	0,442
Distância de Retração	0,877
Ganho	0,484
Modo de Oscilação	0,253

**Fonte: O Autor**

**Tabela 7 - Valores dos Parâmetros que foram mantidos inalterados na etapa do pré-ensaio do Aço ABNT 304**

Velocidade do Temporizador (mm/s)	1,8
Distância de Retração (mm)	3
Ganho	21

**Fonte: O Autor**

A mesma metodologia utilizada na usinagem do primeiro material foi aplicada nesta etapa. O experimento adotado foi um fatorial fracionário de resolução IV com um total de 32 condições experimentais, sem replicações. Os gráficos de Pareto e os demais gráficos obtidos como resultado nesta etapa do pré-teste também estão disponíveis no Apêndice A deste trabalho. Abaixo seguem a Tabela 8 e a Tabela 9 com os valores-p obtidos para a taxa de remoção e para o desgaste do eletrodo no pré-ensaio com aço ABNT 304. Analisando estes dados, verificou-se que somente a polaridade e a corrente de pico apresentaram influência sobre a taxa de remoção e que nenhum parâmetro influenciou o desgaste do eletrodo.

Com a realização dos pré-ensaios, pôde-se validar a metodologia utilizada, sendo esta uma etapa fundamental para a realização do planejamento dos ensaios definitivos com o INCONEL 718.

**Tabela 8 - Valor-p para influência individual de cada parâmetro sobre a taxa de remoção do aço ABNT 304**

<b>Termo</b>	<b>Valor-p</b>
Polaridade	0,001
Corrente de Pico	0,004
$t_{on}$	0,888
$t_{off}$	0,295
Lavagem	0,011
Tensão	0,562
Tempo de Erosão	0,054
Modo de Oscilação	0,860

Fonte: O Autor

**Tabela 9 - Valor-p para influência individual de cada parâmetro sobre o desgaste relativo na eletroerosão do aço ABNT 304**

<b>Termo</b>	<b>Valor-p</b>
Polaridade	0,112
Corrente de Pico	0,169
$t_{on}$	0,184
$t_{off}$	0,451
Lavagem	0,339
Tensão	0,168
Tempo de Erosão	0,522
Modo de Oscilação	0,786

Fonte: O Autor

### 3.3 Procedimentos experimentais

Os procedimentos experimentais realizados na primeira e segunda etapa dos ensaios exploratórios com o INCONEL 718 são descritos a seguir.

#### 3.3.1 1ª Etapa de Ensaios

Após a realização dos pré-ensaios, os parâmetros indicados na Tabela 10 foram selecionados para serem avaliados na 1ª etapa de ensaios exploratórios com o INCONEL 718. Estes foram variados em dois níveis. Os valores adotados foram os mesmos utilizados na etapa de pré-ensaios com os aços AISI P20 e ABNT 304. Os experimentos foram modelados através de planejamento fatorial fracionário do Projeto de Experimentos (DOE – *Design of Experiments*) com o auxílio das ferramentas estatísticas da versão 14 do

software Minitab. A resolução IV foi adotada para estes ensaios, permitindo assim analisar os efeitos principais e as interações simples. A Tabela 11 apresenta um resumo dos parâmetros do planejamento experimental. Para reduzir a influência de outros fatores não avaliados experimentalmente e diminuir o efeito dos erros aleatórios nos resultados, os experimentos foram aleatorizados.

**Tabela 10 - Níveis dos Parâmetros Avaliados**

Parâmetros	1º Nível	2º Nível
<b>Polaridade</b>	Negativa	Positiva
<b>Corrente de Pico (A)</b>	13	29
<b>t<sub>on</sub> (µs)</b>	115,5	237,1
<b>t<sub>off</sub> (µs)</b>	115,5	237,1
<b>Lavagem Central</b>	Sem	Com
<b>Tensão (V)</b>	75	125
<b>Tempo de Erosão (s)</b>	0,4	0,8
<b>Modo de Oscilação</b>	Isofrequência	Isopulso

Fonte: O Autor

**Tabela 11 - Parâmetros do Planejamento Experimental Fatorial Fracionário – 1ª Etapa**

Tipo de Planejamento	Fatorial Fracionário Resolução IV: 2 <sup>8-3</sup>
Matrizes Geradoras	F = ABC; G = ABD; H = BCDE
Relação de Definição	I = ABCF = ABDG = BCDEH = CDFG = ADEFH = ACEGH = BEFGH
Quantidade de Repetições	0
Quantidade de Ensaios	32

Fonte: O Autor

Antes de cada ensaio, o eletrodo e a amostra de INCONEL 718 foram pesados na balança de precisão e suas massas foram registradas. A máquina de eletroerosão foi preparada com os valores dos parâmetros associados a cada ensaio, conforme planejamento estatístico. O eletrodo foi fixado na máquina através do sistema System 3R, garantindo sempre a mesma posição de fixação na máquina. Para evitar que a amostra saísse da posição durante a usinagem, esta foi colada com uma pequena quantidade de cianoacrilato (super cola).

Para cada ensaio, o tempo de usinagem foi de 30 minutos. Após este período, o eletrodo sem o System 3R e a amostra erodida foram submetidos ao processo de secagem em estufa, na temperatura de 150 °C, por 20 minutos. No caso da peça, antes do processo de secagem, os resíduos da cola utilizada

para sua fixação à mesa da máquina EDM foram removidos com a utilização de uma pequena espátula metálica.

Para realização do processo de pesagem após a usinagem foi necessário esperar um tempo para resfriamento do material, evitando assim danos à balança e erros de medição gerados pela pressão negativa que o processo de resfriamento faz durante a pesagem do material aquecido. Após o resfriamento, o eletrodo e a amostra erodida foram pesados e suas massas registradas.

Para obtenção da taxa de remoção de material da amostra, foi considerada a massa específica do INCONEL 718 através do seguinte cálculo:

$$TR = \frac{(m_i - m_f) / \rho}{T} \quad (2)$$

Sendo que:

TR: Taxa de Remoção

$m_i$ : massa inicial da amostra

$m_f$ : massa final da amostra

$\rho$ : massa específica do INCONEL 718 = 0,008 g/mm<sup>3</sup>

T: tempo total (30 minutos)

O desgaste relativo é a razão entre a taxa de volume perdido do eletrodo-ferramenta e a taxa de remoção de material da peça usinada. Desta forma, para obtenção do desgaste relativo do eletrodo também foi considerada a massa específica do cobre eletrolítico, através da seguinte fórmula:

$$DR = \frac{(m_{ie} - m_{fe}) / \rho_e}{(m_i - m_f) / \rho} \times 100 \quad (3)$$

Sendo que:

DR: Desgaste Relativo

$m_{ie}$ : massa inicial do eletrodo

$m_{fe}$ : massa final do eletrodo

$\rho_e$ : massa específica do eletrodo (cobre eletrolítico) = 0,009 g/mm<sup>3</sup>.

$m_i$ : massa inicial da amostra

$m_f$ : massa final da amostra

A Tabela 12 apresenta os valores dos parâmetros avaliados em cada ensaio realizado na 1ª etapa experimental com o INCONEL 718.

Tabela 12 - Valores dos parâmetros adotados em cada ensaio realizado na 1ª etapa experimental

Ensaio	Polaridade	Corrente de Pico (A)	t <sub>on</sub> (µs)	t <sub>off</sub> (µs)	Lavagem	Tensão (V)	Tempo de Erosão (s)	Modo de Oscilação
1	-	13	115,5	115,5	sem	75	0,3	Isopulso
2	+	13	115,5	115,5	sem	125	0,8	Isopulso
3	-	29	115,5	115,5	sem	125	0,8	Isofrequência
4	+	29	115,5	115,5	sem	75	0,3	Isofrequência
5	-	13	237,1	115,5	sem	125	0,3	Isofrequência
6	+	13	237,1	115,5	sem	75	0,8	Isofrequência
7	-	29	237,1	115,5	sem	75	0,8	Isopulso
8	+	29	237,1	115,5	sem	125	0,3	Isopulso
9	-	13	115,5	237,1	sem	75	0,8	Isofrequência
10	+	13	115,5	237,1	sem	125	0,3	Isofrequência
11	-	29	115,5	237,1	sem	125	0,3	Isopulso
12	+	29	115,5	237,1	sem	75	0,8	Isopulso
13	-	13	237,1	237,1	sem	125	0,8	Isopulso
14	+	13	237,1	237,1	sem	75	0,3	Isopulso
15	-	29	237,1	237,1	sem	75	0,3	Isofrequência
16	+	29	237,1	237,1	sem	125	0,8	Isofrequência

Fonte: O Autor

Tabela 12 - Valores dos parâmetros adotados em cada ensaio realizado na 1ª etapa experimental (continuação)

Ensaio	Polaridade	Corrente de Pico (A)	t <sub>on</sub> (µs)	t <sub>off</sub> (µs)	Lavagem	Tensão (V)	Tempo de Erosão (s)	Modo de Oscilação
17	-	13	115,5	115,5	com	75	0,3	Isofrequência
18	+	13	115,5	115,5	com	125	0,8	Isofrequência
19	-	29	115,5	115,5	com	125	0,8	Isopulso
20	+	29	115,5	115,5	com	75	0,3	Isopulso
21	-	13	237,1	115,5	com	125	0,3	Isopulso
22	+	13	237,1	115,5	com	75	0,8	Isopulso
23	-	29	237,1	115,5	com	75	0,8	Isofrequência
24	+	29	237,1	115,5	com	125	0,3	Isofrequência
25	-	13	115,5	237,1	com	75	0,8	Isopulso
26	+	13	115,5	237,1	com	125	0,3	Isopulso
27	-	29	115,5	237,1	com	125	0,3	Isofrequência
28	+	29	115,5	237,1	com	75	0,8	Isofrequência
29	-	13	237,1	237,1	com	125	0,8	Isofrequência
30	+	13	237,1	237,1	com	75	0,3	Isofrequência
31	-	29	237,1	237,1	com	75	0,3	Isopulso
32	+	29	237,1	237,1	com	125	0,8	Isopulso

Fonte: O Autor

### 3.3.2 2ª Etapa de Ensaios

É de consenso científico que os parâmetros elétricos  $t_{on}$  e  $t_{off}$  são importantes para o desenvolvimento do processo EDM, pois afetam a quantidade de energia e a estabilidade do pulso elétrico e, desta forma, a taxa de remoção e o desgaste do eletrodo. A segunda etapa de ensaios foi concebida com o objetivo de analisar o comportamento do processo EDM de INCONEL 718 com a variação destes parâmetros. Para isso foram modelados experimentos com a variação de  $t_{on}$  e  $t_{off}$  em quatro valores, através de fatorial completo multinível do Projeto de Experimentos (DOE). Os ensaios foram aleatorizados. Segue Tabela 13 com o resumo dos parâmetros do planejamento experimental.

**Tabela 13 - Planejamento Experimental da 2ª Etapa**

Parâmetro	$t_{on}$	$t_{off}$
Valores ( $\mu s$ )	50; 200; 400; 800	50; 200; 400; 800
Número de Repetições	1	
Número de Corridas	32	

Fonte: O Autor

Os demais parâmetros avaliados na primeira etapa de ensaios foram mantidos fixos nos valores que resultaram em maiores taxas de remoção. Na Tabela 14 são apresentados estes valores.

**Tabela 14 - Níveis dos Parâmetros Avaliados**

Parâmetro	Valor
Polaridade	Positiva
Corrente de Pico (A)	29
Lavagem Central	Sem
Tensão (V)	125
Tempo de Erosão (s)	0,8
Modo de Oscilação	Frequências Iguais

Fonte: O Autor

Os materiais e procedimentos experimentais adotados na primeira etapa foram mantidos.

A Tabela 15 apresenta os valores de  $t_{on}$  e  $t_{off}$  adotados em cada ensaio realizado.

Tabela 15 - Valores de  $t_{on}$  e  $t_{off}$  de cada ensaio realizado na 2ª etapa experimental

Ensaio	$t_{on}$ ( $\mu s$ )	$t_{off}$ ( $\mu s$ )	Ensaio	$t_{on}$ ( $\mu s$ )	$t_{off}$ ( $\mu s$ )
1	800	800	17	800	50
2	200	50	18	400	200
3	400	800	19	200	400
4	50	200	20	800	400
5	50	400	21	400	400
6	400	50	22	200	800
7	800	800	23	800	50
8	200	50	24	50	200
9	50	400	25	50	800
10	400	800	26	200	200
11	400	200	27	200	800
12	400	50	28	50	50
13	800	400	29	800	200
14	800	200	30	50	50
15	50	800	31	200	200
16	400	400	32	200	400

Fonte: O Autor

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, os resultados obtidos nas duas etapas de ensaios experimentais são apresentados e analisados sob o ponto de vista dos fenômenos físicos envolvidos no processo EDM.

### 4.1 1ª ETAPA DE ENSAIOS

A Tabela 16 exibe os valores da taxa de remoção e do desgaste relativo do eletrodo obtidos como resultado para cada ensaio da 1ª etapa de experimentos com o INCONEL 718. Os valores da medição de massa que permitiram a obtenção destes dados estão disponíveis no Apêndice B.

Tabela 16 - Resultados da 1ª Etapa de Ensaio com o INCONEL 718.

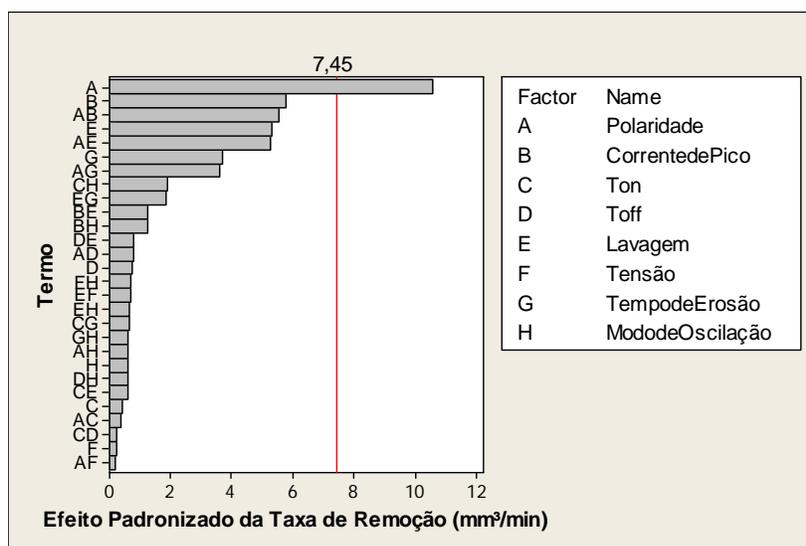
Ensaio	Taxa de Remoção (mm <sup>3</sup> /min)	Desgaste Relativo (%)	Ensaio	Taxa de Remoção (mm <sup>3</sup> /min)	Desgaste Relativo (%)
1	0,015	88,89	17	0,004	133,33
2	1,311	0,56	18	0,174	10,11
3	0,050	35,19	19	0,026	35,56
4	1,388	5,14	20	0,460	10,06
5	0,014	82,05	21	0,002	711,11
6	0,980	0,28	22	0,044	69,84
7	0,036	-2,54	23	0,033	0,00
8	1,330	-1,04	24	0,581	0,00
9	0,009	49,38	25	0,024	7,73
10	0,224	8,68	26	0,090	20,67
11	0,029	19,05	27	0,024	77,29
12	2,028	3,42	28	1,316	8,16
13	0,011	96,97	29	0,013	37,04
14	0,355	1,04	30	0,044	25,4
15	0,015	14,04	31	0,020	51,46
16	2,417	0,00	32	0,745	1,99

Fonte: O Autor

Após a obtenção dos dados experimentais, os resultados foram avaliados estatisticamente. Os dados estatísticos desta análise estão disponíveis no Apêndice C. A Figura 30 mostra o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados dos fatores avaliados na taxa de remoção do INCONEL 718. Todos os efeitos

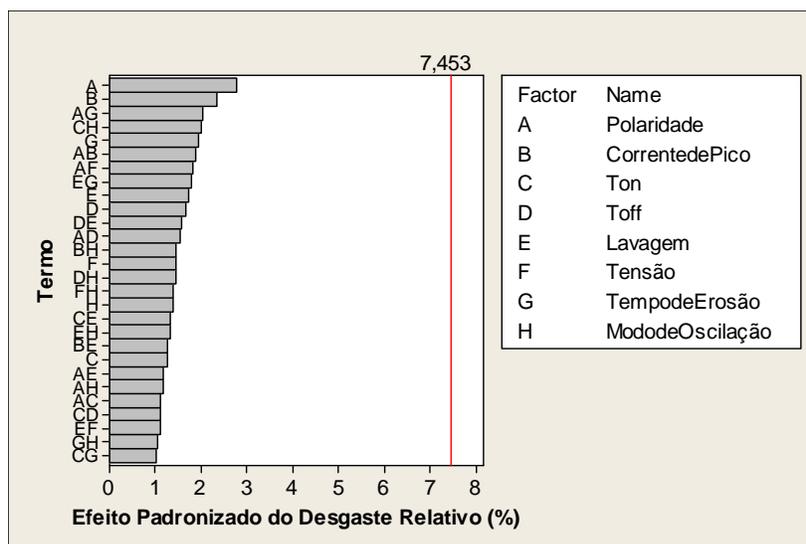
que ultrapassam a linha no valor de 7,45 apresentam influência estatística sobre o processo em relação à taxa de remoção de material da peça, para um nível de confiança de 99,5%. O gráfico de Pareto indica que somente a polaridade teve efeito estatisticamente significativo sobre a taxa de remoção nos ensaios realizados com o INCONEL 718. Já para o desgaste relativo (Figura 31), não são identificados parâmetros influentes no processo.

**Figura 30 - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados na Taxa de Remoção do INCONEL 718 ( $\alpha = 0,005$ )**



Fonte: O Autor

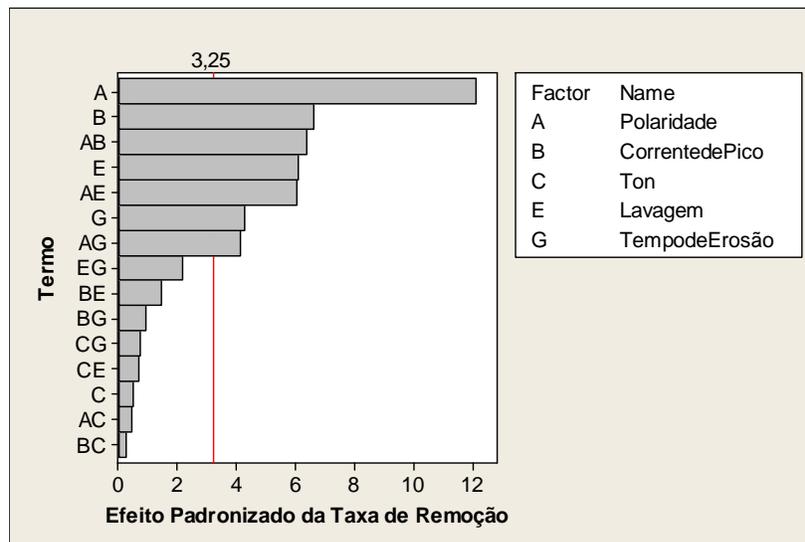
**Figura 31 - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados no Desgaste Relativo do Eletrodo na Usinagem do INCONEL 718 ( $\alpha = 0,005$ )**



Fonte: O Autor

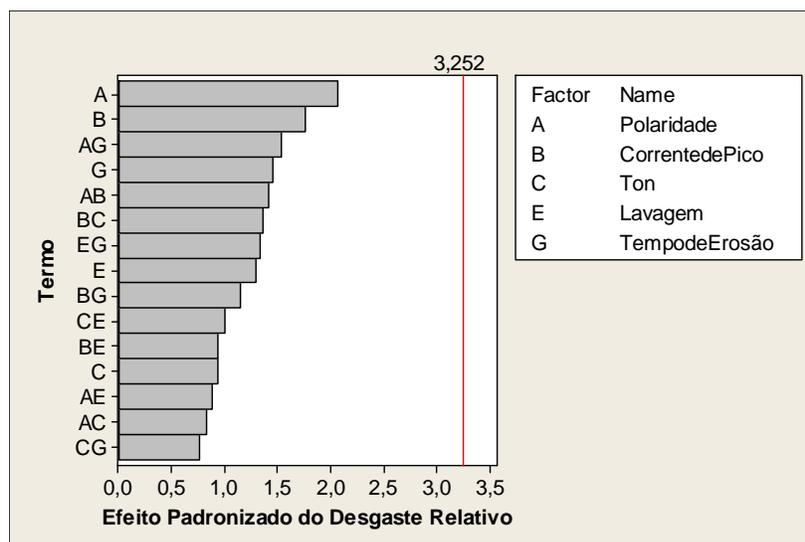
Visando refinar os resultados encontrados, foram retirados da análise de Pareto, os parâmetros que tiveram efeitos muito pouco significativos tanto para taxa de remoção quanto para o desgaste relativo, que são: modo de oscilação, tensão e  $t_{off}$ . O resultado deste refinamento pode ser visto na Figura 32 (para Taxa de Remoção) e na Figura 33 (para o Desgaste Relativo). No Apêndice D estão os dados estatísticos desta nova análise.

**Figura 32 - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados na Taxa de Remoção do INCONEL 718, após refinamento dos dados ( $\alpha = 0,005$ )**



Fonte: O Autor

**Figura 33 - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados no Desgaste Relativo do Eletrodo na Usinagem do INCONEL 718, após refinamento dos dados ( $\alpha = 0,005$ )**

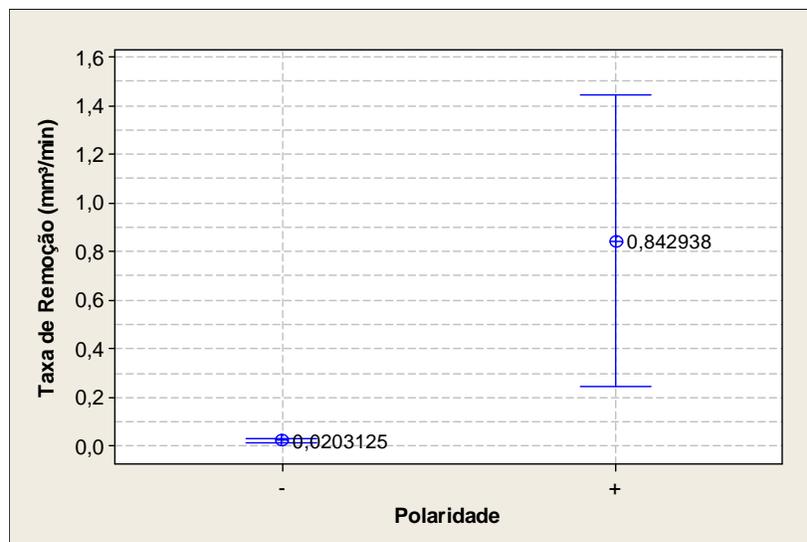


Fonte: O Autor

Após o refinamento da análise de Pareto, pode-se concluir que, com exceção de  $t_{on}$ , os demais fatores (polaridade, corrente de pico, lavagem e tempo de erosão) e a interação dos mesmos com a polaridade influenciaram a taxa de remoção. Para o desgaste relativo, nenhum parâmetro apresentou influência estatística sobre este fator.

O efeito da polaridade sobre a taxa de remoção de material da peça é apresentado na Figura 34. Pode-se perceber que a polaridade positiva beneficiou o processo, aumentando a taxa de remoção.

**Figura 34 - Gráfico Taxa de Remoção x Polaridade - Usinagem do INCONEL 718 (99,5% de confiança)**



Fonte: O Autor

O modelo proposto por Dibitonto et al. (1989) indica uma maior remoção de material na região catódica (polaridade negativa) quando a duração do pulso elétrico é superior a  $0,5 \mu s$ , na eletroerosão de aço com eletrodos de cobre. Desta forma, com a adoção da polaridade positiva no eletrodo (neste caso, o ânodo do circuito eletrodo-fluido dielétrico-peça) há uma maior remoção de material da peça. Do mesmo modo, com a adoção da polaridade negativa há uma maior remoção de material do eletrodo. Entretanto, a revisão teórica sobre eletroerosão das superligas resistentes ao calor e das ligas de titânio não permitiu definir qual polaridade é mais adequada na usinagem destes materiais, visto que, na bibliografia consultada este parâmetro é mantido fixo em um determinado tipo.

A Tabela 17 traz um resumo sobre os materiais estudados na revisão da literatura e o tipo de polaridade adotada nestes trabalhos. Tem-se que, para o INCONEL 718, não há uma recomendação definida sobre a polaridade a ser adotada na eletroerosão deste material.

**Tabela 17: Polaridade Adotada nos Trabalhos Apresentados na Revisão da Literatura**

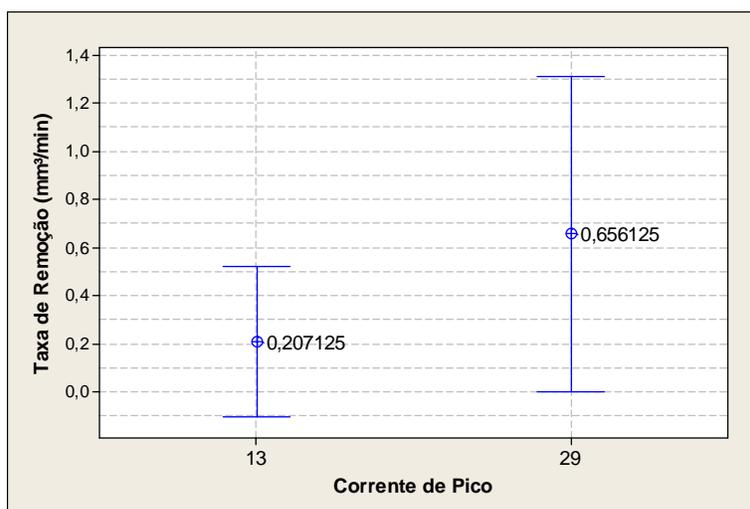
<b>Autores</b>	<b>Material Estudado</b>	<b>Polaridade Adotada</b>
Lin, Yan e Chang (2000)	Ti-6Al-4V	Negativa
Kang e Kim (2003)	Hastelloy-X	Positiva
Kuppan et al. (2008)	INCONEL 718	Positiva
Yilmaz e Okka (2010)	INCONEL 718 e Ti-6Al-4V	Negativa
Kao et al. (2010)	Ti-6Al-4V	Positiva
Rahman et al. (2010)	Ti-6Al-4V	Positiva
Rajesh et al. (2011)	INCONEL 718	Negativa

**Fonte: O Autor**

Pelos resultados apresentados neste trabalho, pode-se definir a adoção da polaridade positiva como a mais adequada para obtenção de maiores taxas de remoção na usinagem de INCONEL 718.

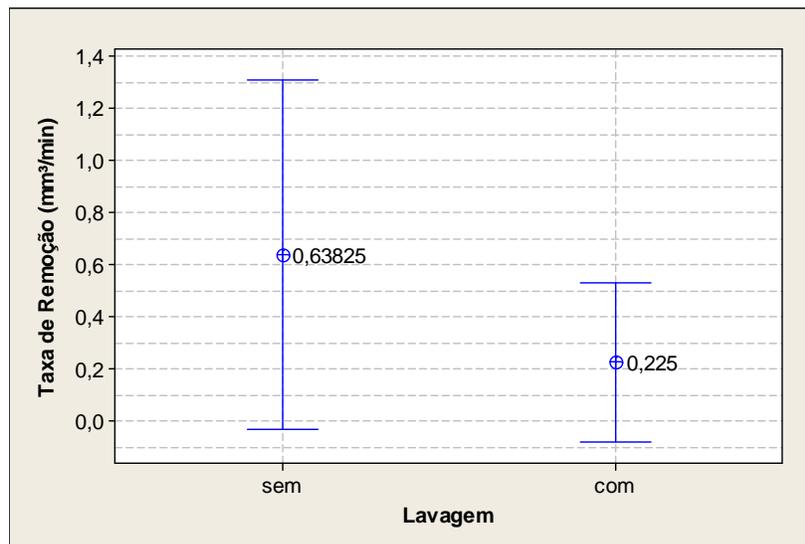
As influências dos demais parâmetros que influenciaram estatisticamente a taxa de remoção estão demonstradas na Figura 35 (Corrente de Pico), na Figura 36 (Lavagem) e na Figura 37 (Tempo de Erosão). Entretanto, devido à sobreposição dos intervalos de confiança em todos os gráficos não é possível analisar as influências destes parâmetros sobre a taxa de remoção.

**Figura 35 - Gráfico Taxa de Remoção x Corrente de Pico - Usinagem do INCONEL 718 (99,5% de confiança)**



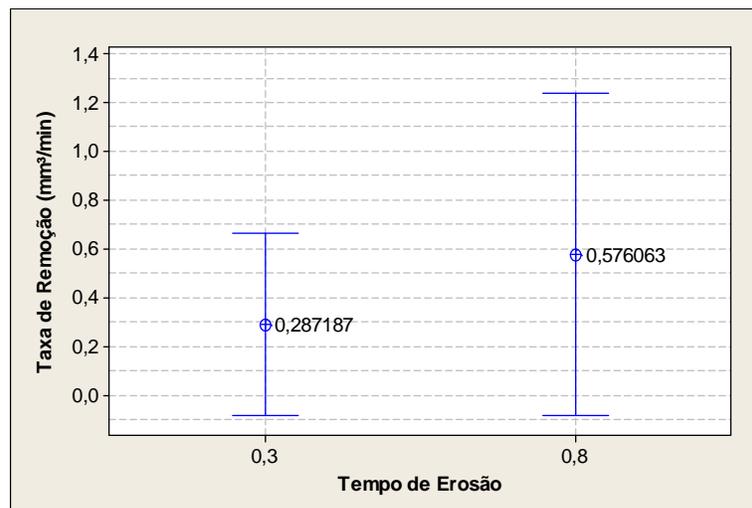
**Fonte: O Autor**

**Figura 36 - Gráfico Taxa de Remoção x Lavagem - Usinagem do INCONEL 718 (99,5% de confiança)**



Fonte: O Autor

**Figura 37 - Gráfico Taxa de Remoção x Tempo de Erosão - Usinagem do INCONEL 718 (99,5% de confiança)**



Fonte: O Autor

Portanto, da primeira etapa de ensaios com o INCONEL 718 pode-se concluir que a polaridade, a corrente de pico, a lavagem e o tempo de erosão apresentaram influência estatística sobre o processo no que se refere à taxa de remoção de material da peça e que nenhum parâmetro avaliado influenciou os resultados em relação ao desgaste relativo da ferramenta. Nas condições de usinagem adotadas nos ensaios realizados, a adoção da polaridade positiva beneficia a taxa de remoção. Entretanto, para os demais parâmetros avaliados,

não se pôde realizar uma análise conclusiva da influência dos mesmos sobre este fator, devido à grande dispersão dos dados coletados que levou a uma sobreposição dos intervalos de confiança.

#### 4.2 2ª Etapa de Ensaios

A Tabela 18 apresenta os resultados obtidos na 2ª etapa de experimentos com o INCONEL 718. Os valores da medição de massa que permitiram a obtenção destes dados estão disponíveis no Apêndice E.

Tabela 18 - Resultados da 2ª Etapa de Ensaios com o INCONEL 718

Ensaio	Taxa de Remoção (mm <sup>3</sup> /min)	Desgaste Relativo (%)	Ensaio	Taxa de Remoção (mm <sup>3</sup> /min)	Desgaste Relativo (%)
1	26,314	-0,090	17	51,822	0,171
2	49,259	0,240	18	40,374	-0,347
3	19,541	-1,880	19	11,558	1,673
4	5,777	30,780	20	36,771	0,028
5	2,997	31,630	21	15,096	-0,130
6	52,767	-0,040	22	12,159	0,722
7	27,486	-0,660	23	50,879	-0,068
8	53,296	0,440	24	5,302	27,733
9	2,694	37,350	25	2,350	27,505
10	20,485	-0,220	26	17,392	0,440
11	34,082	-0,080	27	5,926	0,457
12	57,108	-0,060	28	22,142	20,118
13	36,758	-0,437	29	37,42	-0,082
14	44,630	-0,195	30	25,244	19,059
15	2,068	29,551	31	14,704	-1,411
16	28,979	-0,119	32	7,385	0,772

Fonte: O Autor

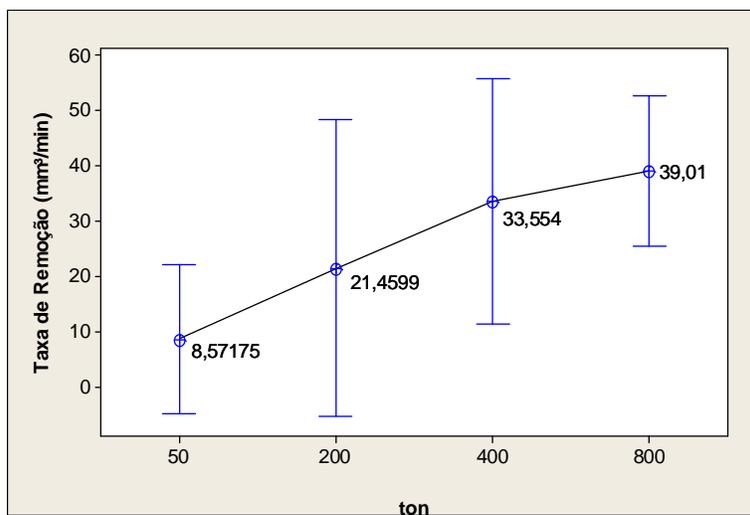
##### 4.2.1 Influência de $t_{on}$

A Figura 38 apresenta o gráfico do efeito da modificação de  $t_{on}$  sobre a taxa de remoção de material da peça. Pode-se verificar pelos valores apresentados para os extremos de  $t_{on}$  (50  $\mu$ s e 800  $\mu$ s), que há uma tendência de aumento da taxa de remoção com o aumento deste parâmetro.

Para verificar o provável comportamento da curva da influência de  $t_{on}$  sobre a taxa de remoção foram realizadas algumas regressões que podem ser

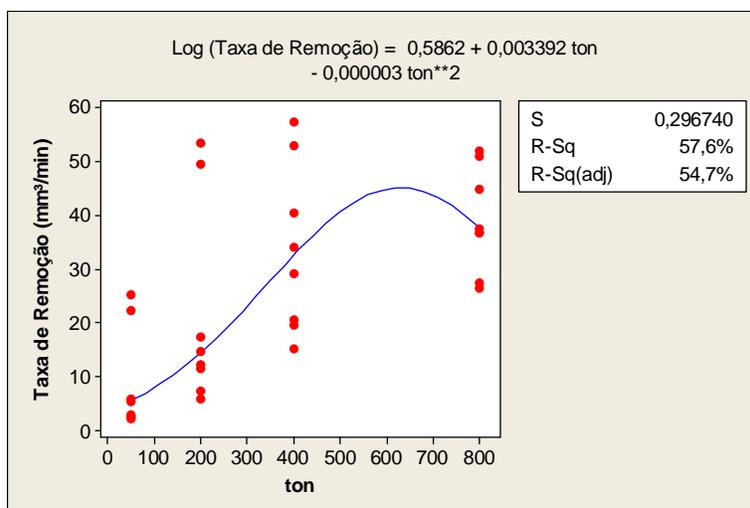
visualizadas no Apêndice F deste trabalho. A curva de regressão que obteve melhor ajuste (maior valor do coeficiente de determinação ou R-quadrático) é apresentada na Figura 39.

**Figura 38 - Gráfico Taxa de Remoção x  $t_{on}$  (99,5% de confiança)**



Fonte: O Autor

**Figura 39 - Gráfico da Regressão Quadrática dos Dados da Taxa de Remoção x  $t_{on}$ : com ajuste logarítmico em y**

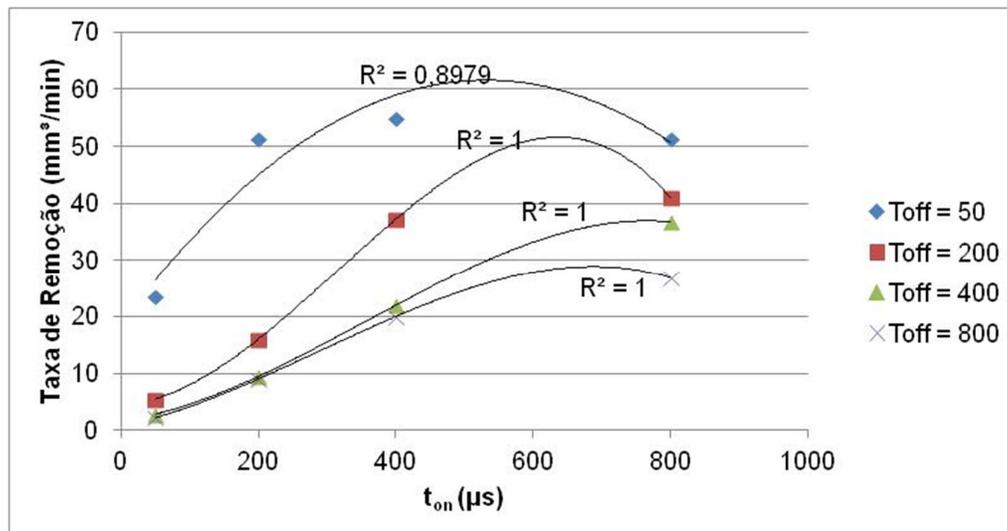


Fonte: O Autor

Sabe-se que o gráfico apresentado contempla os valores de todos os ensaios realizados e sofre a influência da variação simultânea de  $t_{on}$  e  $t_{off}$ , afetando assim o valor do coeficiente de determinação. Visando avaliar a influência isolada de  $t_{on}$  sobre o processo, foram traçadas as curvas apresentadas na

Figura 40 que indicam uma taxa de remoção máxima com a adoção de  $t_{on} = 500 \mu s$  e  $t_{off} = 50 \mu s$ .

**Figura 40 - Gráfico de Regressão da Taxa de Remoção x  $t_{on}$ , com valores isolados de  $t_{off}$**



Fonte: O Autor

Analisando o comportamento destas curvas, pode-se observar que a elevação do valor de  $t_{on}$  proporciona um aumento gradual da taxa de remoção até um valor máximo, considerado ótimo para o processo e equivalente à máxima taxa de remoção alcançada. Acima deste valor de  $t_{on}$  a taxa de remoção tende a diminuir. Percebe-se que o comportamento destas curvas é análogo aos das curvas apresentadas por König e Weingaertner (1990) e por Amorim e Weingaertner (2005) (respectivamente, Figura 17 e Figura 18, localizadas no capítulo 02 deste trabalho).

O comportamento desta curva pode ser explicado analisando a capacidade de remoção de material de cada pulso elétrico. Para isso, será necessário avaliar o volume removido por pulso elétrico e a taxa de erosão (que equivale a taxa de remoção de material em cada pulso elétrico).

Considerando os resultados obtidos nos ensaios, pode-se calcular o volume removido por pulso através das seguintes equações:

$$VR = \frac{(m_i - m_f)}{\rho \times Q} \quad (4)$$

Sendo VR o volume removido por pulso e Q a quantidade de pulsos elétricos, calculada através da equação:

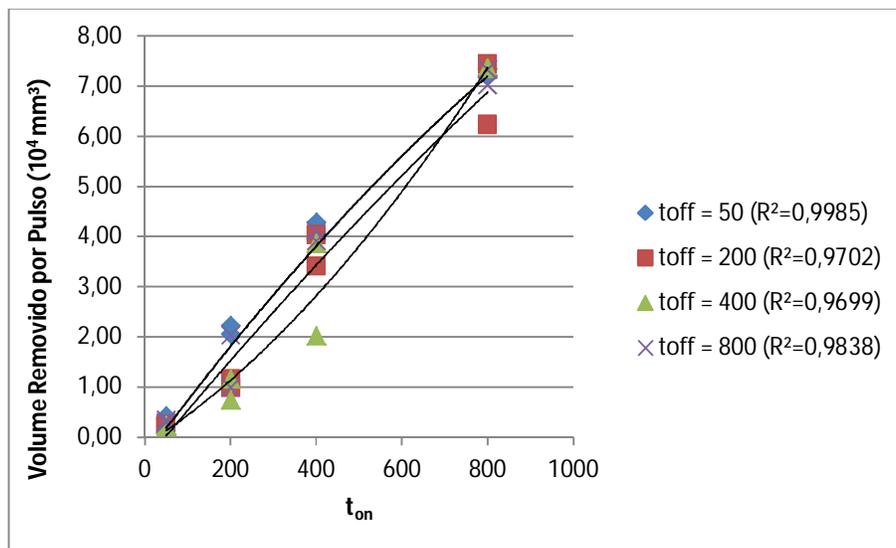
$$Q = \frac{T}{t_{on} + t_{off}} \quad (5)$$

A taxa de erosão ( $T_e$ ), dada por Dibitonto et al. (1987) também foi calculada como indicado a seguir:

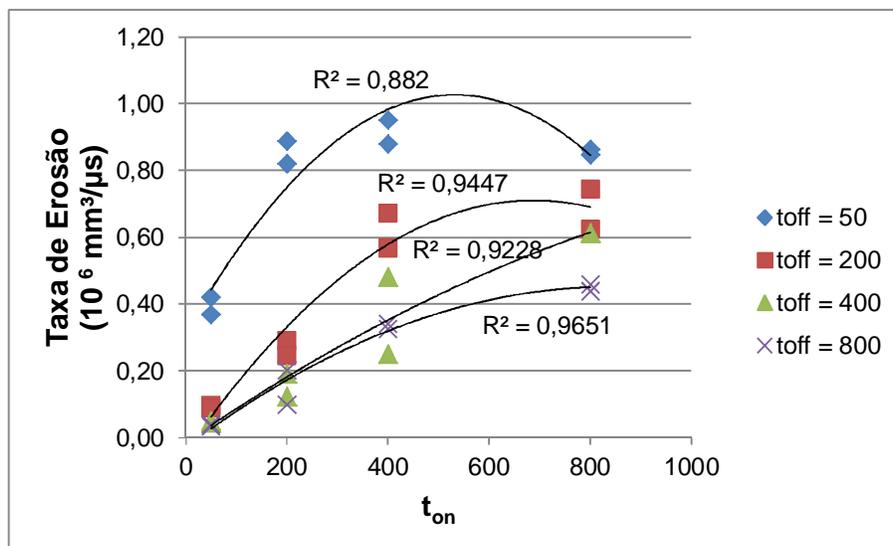
$$T_e = \frac{VR}{t_{on} + t_{off}} \quad (6)$$

Os valores calculados para o volume removido por pulso e para a taxa de remoção específica são apresentados no Apêndice G. A partir destes dados foram plotadas as curvas Volume Removido por Pulso x  $t_{on}$  (Figura 41) e Taxa de Erosão x  $t_{on}$  (Figura 42).

**Figura 41 - Volume Removido por Pulso x  $t_{on}$**



Fonte: O Autor

Figura 42 - Taxa de Erosão x  $t_{on}$ 

Fonte: O Autor

Pela Figura 41, percebe-se um aumento de volume removido por pulso, comportamento coerente com o fato de que um maior tempo de pulso implica em maior energia aportada ao processo e, logo, maior volume removido. Todas as curvas apresentadas na figura correspondem a regressões polinomiais quadráticas.

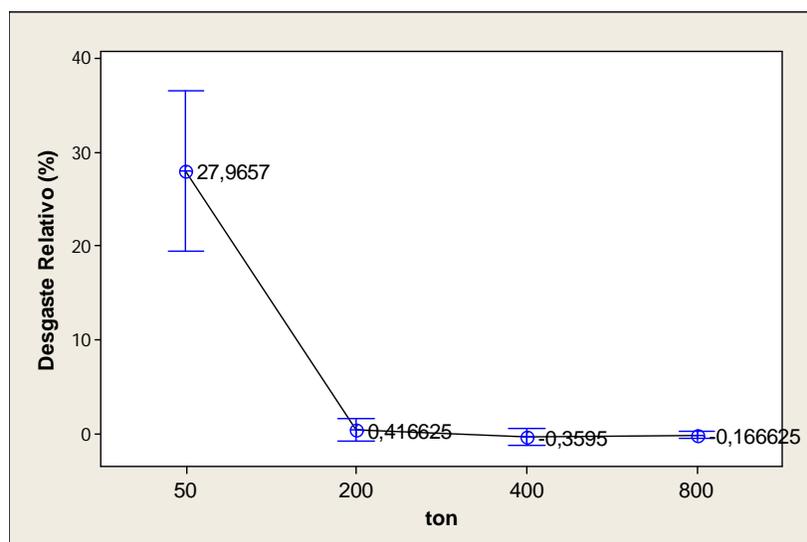
Pode-se perceber pela Figura 42 que a taxa de remoção com que cada pulso remove material (taxa de erosão) se aproxima a um comportamento polinomial quadrático, com concavidade voltada para baixo. Portanto, há um ponto onde a taxa de erosão chega ao seu máximo valor, denominado de  $t_{on}$  ótimo. A adoção de pulsos acima deste valor resulta na redução da taxa de erosão.

A maior parte da energia do plasma é aplicada no aumento da massa e dimensão do canal de plasma, através da contínua vaporização, dissociação e ionização de pequenas quantidades de fluido dielétrico que circunda o canal de plasma. Este aumento ocorre principalmente na região central e no diâmetro da região anódica. Já na região catódica, há um aumento da profundidade da cavidade erodida, sem grande aumento no raio desta região (EUBANK et al., 1993). Após atingir um diâmetro de canal considerado ótimo, o aumento das perdas de energia por condução para o dielétrico e para os eletrodos, além das perdas de energia por irradiação, conduzem a uma redução na velocidade de fusão de material durante a descarga, levando assim a uma redução da taxa de

remoção específica com a utilização de durações de pulsos acima do valor ótimo (König; Weingaertner, 1990). Este comportamento também foi observado por Izquierdo et al. (2012) que relatou a existência de um  $t_{on}$  ótimo para uma determinada rugosidade superficial em que haveria um melhor aproveitamento da energia despendida no processo e, conseqüentemente, uma maior remoção de material.

Em relação ao desgaste relativo do eletrodo-ferramenta, a Figura 43 representa o gráfico do efeito da modificação de  $t_{on}$  sobre este fator. Pode-se verificar que, para os três maiores níveis de  $t_{on}$ , não houve diferença considerável entre os efeitos padronizados dos mesmos. Tendência parecida também foi observada por Kang e Kim (2003) na eletroerosão de outra superliga de níquel (Figura 23).

**Figura 43 - Gráfico Desgaste Relativo x  $t_{on}$  (99,5% de confiança)**

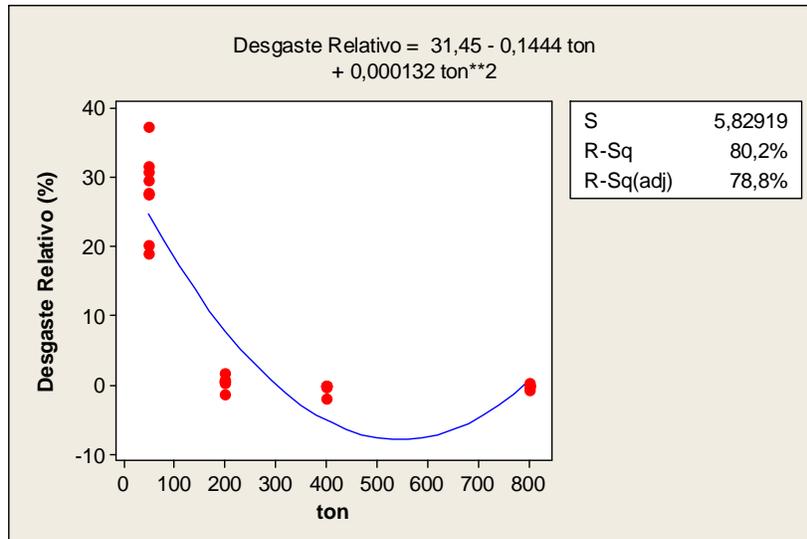


Fonte: O Autor

A curva de regressão que obteve melhor ajuste é apresentada na Figura 44. O coeficiente de determinação ou R quadrático desta curva de ajuste indica que 80,2% das variações computadas no desgaste relativo do eletrodo são explicadas pelas variações de  $t_{on}$ .

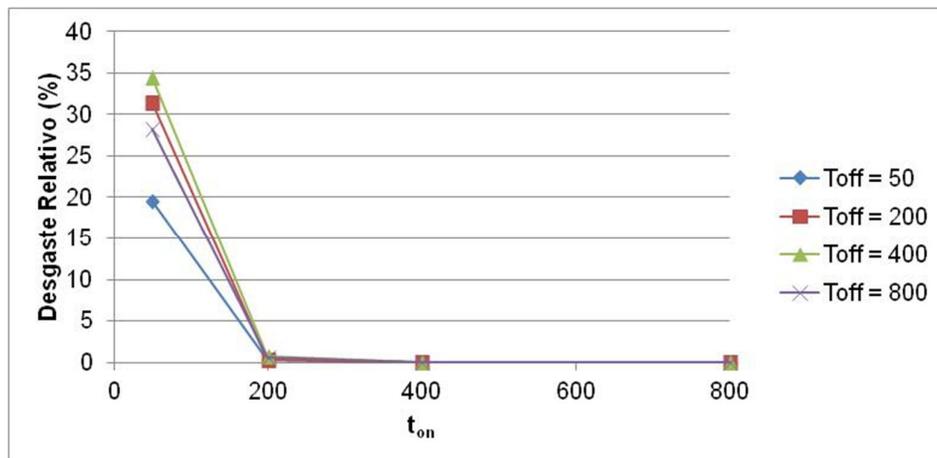
Para avaliar a influência isolada de  $t_{on}$  sobre o desgaste relativo foram traçadas as linhas apresentadas na Figura 45. Observa-se que para valores de  $t_{on}$  iguais a 200, 400 e 800  $\mu$ s, o desgaste relativo é muito próximo de zero para todos os  $t_{off}$  aplicados.

**Figura 44 - Gráfico da Regressão dos Dados do Desgaste Relativo x  $t_{on}$**



Fonte: O Autor

**Figura 45 - Gráfico do Desgaste Relativo x  $t_{on}$ , com valores isolados de  $t_{off}$**



Fonte: O Autor

Pelo comportamento dos dados coletados para o desgaste relativo com a modificação de  $t_{on}$ , pode-se perceber uma queda brusca deste fator com o aumento da duração do tempo de descarga elétrica. Entretanto, no que diz respeito ao desgaste relativo, não há vantagem na utilização de valores muito elevados de  $t_{on}$ , visto que, não há influência significativa nos resultados apresentados para os níveis mais altos.

Levando em consideração os fenômenos envolvidos no processo de formação, manutenção e extinção do canal de plasma, pode-se avaliar o comportamento das curvas apresentadas na Figura 44 e na Figura 45: com o prolongamento da

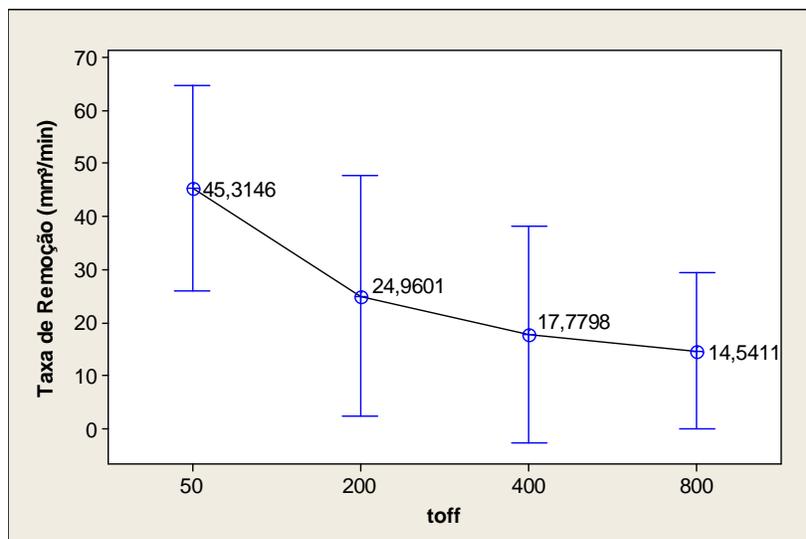
duração do pulso, o aumento do canal de plasma na região anódica ocasionará uma queda na pressão e temperatura que levará a uma diminuição no fluxo de energia dentro desta cavidade e a conseqüente diminuição de fusão do material do ânodo. Acredita-se por este modelo que isso leva ao início da solidificação de parte do material fundido na cavidade anódica (AMORIM, 2006). Como nos ensaios realizados na segunda etapa, o ânodo é o eletrodo-ferramenta, pode-se concluir que o aumento de  $t_{on}$  até o seu valor ótimo resulta na diminuição do volume de material removido do ânodo e em um aumento do volume removido de material da peça (cátodo). Como o desgaste relativo é uma relação percentual entre o volume removido de material do eletrodo-ferramenta e o volume removido da peça durante o processo de eletroerosão, pode-se concluir que há uma acentuada queda deste fator com o aumento de  $t_{on}$ .

Também é necessário considerar o efeito de proteção da camada de carbono sobre a superfície do eletrodo. Como visto, quanto maior a duração da descarga elétrica, maior a quantidade de carbono depositada sobre a superfície do eletrodo. Alguns autores (MOHRI et al, 1995) chegaram a acreditar que haveria um valor de tempo de descarga que causaria um equilíbrio da quantidade de material removido do eletrodo e da quantidade de carbono depositado sobre a sua superfície, de forma a alcançar desgaste nulo no mesmo. Os resultados experimentais mostram esta tendência, onde em alguns dos ensaios obteve-se desgaste relativo abaixo de 0%, indicando um aumento da massa do eletrodo-ferramenta. .

#### **4.2.2 Influência de $t_{off}$**

O gráfico que representa a influência da modificação de  $t_{off}$  sobre a taxa de remoção de material da peça é apresentado na Figura 46. Pode-se verificar que há uma tendência de diminuição da taxa de remoção com o aumento de  $t_{off}$ .

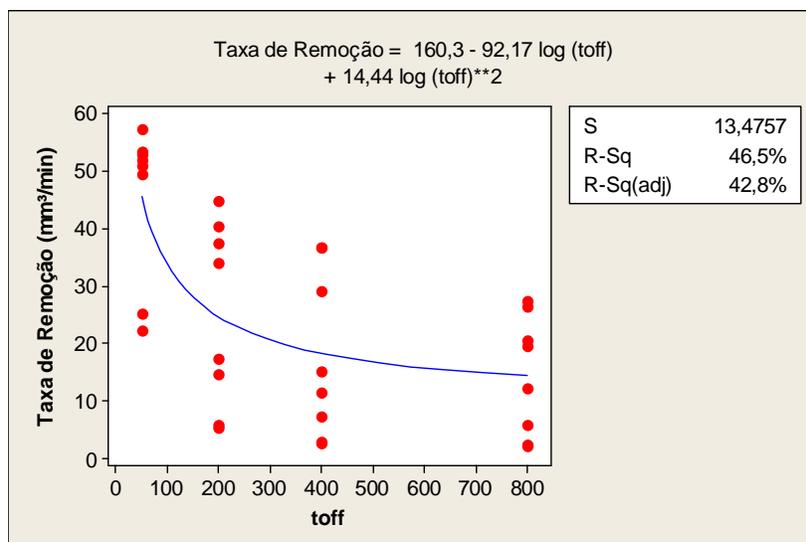
**Figura 46 - Gráfico da Taxa de Remoção x  $t_{off}$  (99,5% de confiança)**



Fonte: O Autor

A **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** traz a curva de regressão que obteve melhor ajuste entre os dados coletados. Entretanto, o ajuste conseguido (46,5%) é baixo, indicando que há outros fatores que influenciam o comportamento desta curva e que não estão sendo considerados na equação. A maior dispersão dos dados também é justificada pela variação conjunta de  $t_{on}$  e  $t_{off}$  no mesmo gráfico.

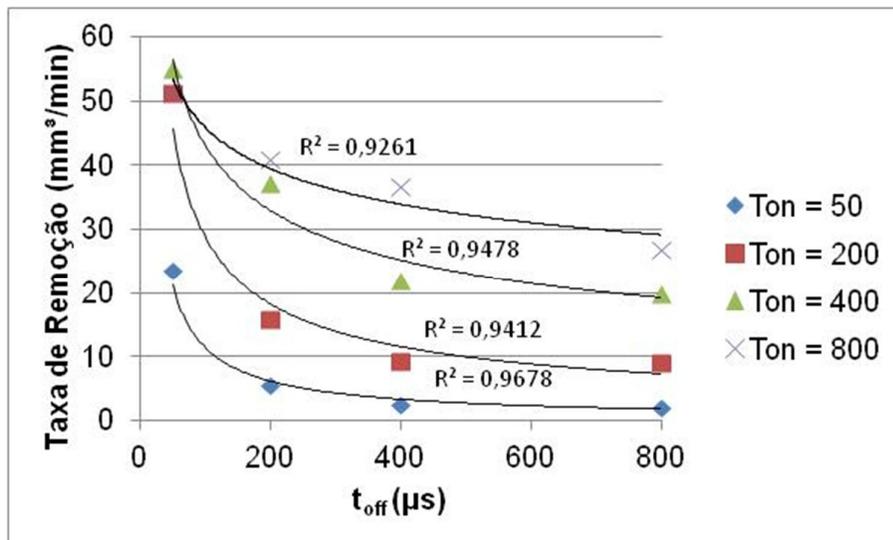
**Figura 47 - Gráfico da Regressão dos Dados da Taxa de Remoção x  $t_{off}$**



Fonte: O Autor

O comportamento desta curva indica que haverá uma diminuição da taxa de remoção com o aumento de  $t_{off}$ . Vale ressaltar que, o gráfico apresentado, contempla os valores de todos os ensaios realizados e é influenciado pela variação de  $t_{on}$  e  $t_{off}$ , concomitantemente. Buscando avaliar a influência isolada de  $t_{off}$  sobre a taxa de remoção foram traçadas as curvas apresentadas na Figura 48.

Figura 48 - Gráfico da Taxa de Remoção x  $t_{off}$ , com valores isolados de  $t_{on}$

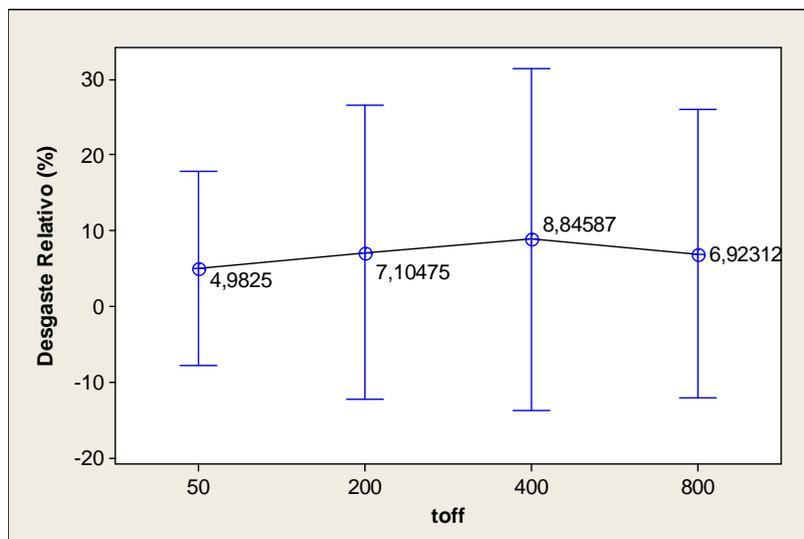


Fonte: O Autor

Durante a ocorrência de  $t_{off}$ , não há remoção de material. Desta forma, a diminuição deste tempo leva a uma redução dos tempos improdutivos do processo de usinagem. Além disso, esta redução favorece certa contaminação da fenda de trabalho uma vez que reduz o tempo destinado a lavagem do canal, proporcionando uma redução do tempo de ignição da centelha ( $t_d$ ).

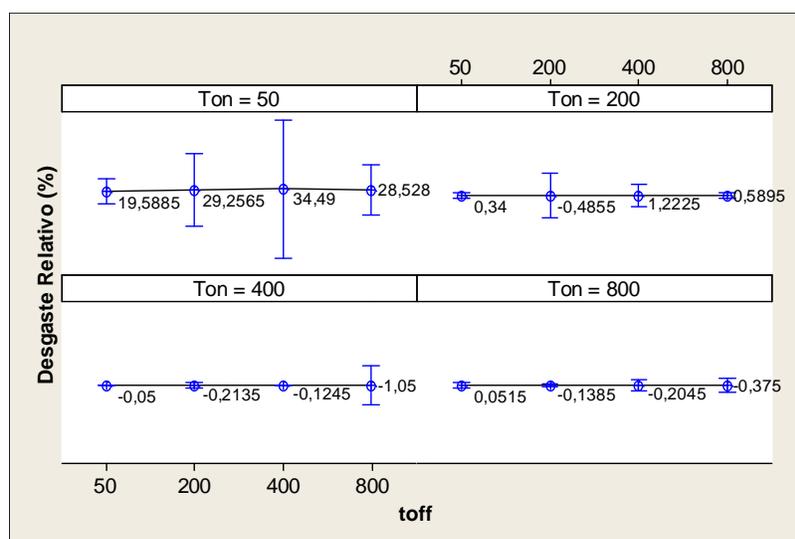
A Figura 49 representa a influência de  $t_{off}$  sobre o desgaste relativo do eletrodo. Devido à sobreposição dos intervalos de confiança, este gráfico não permitiu uma definição sobre esta influência. Para reduzir a dispersão dos dados e isolar a influência de  $t_{off}$ , foram gerados os gráficos dispostos na Figura 50, com a apresentação do efeito deste parâmetro para os diferentes valores de  $t_{on}$  adotados.

Figura 49 - Gráfico do Desgaste Relativo x  $t_{off}$  (99,5% de confiança)



Fonte: O Autor

Figura 50 - Gráfico do Desgaste Relativo x  $t_{off}$  em diferentes valores de  $t_{on}$  (99,5% de confiança)



Fonte: O Autor

Pode-se perceber que, para os diferentes  $t_{on}$  adotados nos ensaios, não houve diferença nas médias dos efeitos do desgaste relativo do eletrodo-ferramenta com o aumento de  $t_{off}$ . Portanto, nas condições adotadas neste trabalho não foi possível verificar a influência de  $t_{off}$  no desgaste relativo durante o processo EDM de INCONEL 718.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar como os parâmetros do processo EDM influenciam a taxa de remoção e o desgaste relativo do eletrodo de cobre eletrolítico na usinagem de desbaste da superliga a base de níquel-ferro INCONEL 718.

Os procedimentos experimentais foram divididos em 03 etapas, sendo a primeira constituída por pré-ensaios com o aço-ferramenta AISI P20 e o aço ABNT 304 para validação da metodologia experimental adotada nos ensaios com o INCONEL 718. Como resultado desta etapa, verificou-se que os parâmetros velocidade do temporizador, distância de retração e ganho apresentaram pouca influência estatística sob o processo nos aspectos avaliados (taxa de remoção e desgaste relativo do eletrodo-ferramenta), tornando possível a eliminação destes parâmetros no planejamento experimental dos ensaios com o INCONEL 718.

A primeira etapa de ensaios com o INCONEL 718 teve como objetivo verificar a influência dos parâmetros polaridade, corrente de pico, tensão,  $t_{on}$ ,  $t_{off}$ , lavagem, tempo de erosão e modo de oscilação sob o desempenho do processo em relação à taxa de remoção e ao desgaste da ferramenta. Constatou-se como resultado que a polaridade, a corrente de pico, a lavagem e o tempo de erosão influenciaram a taxa de remoção de material da peça. Entretanto, com exceção da polaridade, não se pôde avaliar como os demais parâmetros influenciaram o processo devido à sobreposição dos intervalos de confiança. Esta impossibilidade é atribuída à significativa influência da polaridade sob a taxa de remoção que corrompeu os resultados obtidos nos ensaios, ocultando a influência dos demais parâmetros sobre o processo. Para o desgaste do eletrodo-ferramenta, os parâmetros avaliados não tiveram influência estatística considerável.

Devido à inexistência de uma recomendação na bibliografia consultada sobre o tipo de polaridade a ser adotada na eletroerosão da liga INCONEL 718, a primeira etapa experimental deste trabalho tem como principal contribuição o fato de constatar que a adoção da polaridade positiva resultou em maiores

taxas de remoção. Desta forma, recomenda-se a utilização deste tipo de polaridade nas situações em que é necessária uma maior produtividade do processo na eletroerosão de INCONEL 718.

A segunda etapa de ensaios com o INCONEL 718 teve como objetivo avaliar o desempenho do processo em relação à taxa de remoção e ao desgaste da ferramenta com a variação dos valores de  $t_{on}$  e  $t_{off}$  em quatro níveis na usinagem deste material. Dos resultados obtidos, pôde-se verificar uma tendência no aumento da taxa de remoção com a utilização de valores maiores de  $t_{on}$ , além da existência de um valor ótimo deste parâmetro que proporciona uma maior taxa de remoção. As curvas obtidas nas regressões dos dados analisados apontam para uma máxima taxa de remoção com a adoção de  $t_{on} = 500 \mu s$  e  $t_{off} = 50 \mu s$ , considerando-se os parâmetros de processo utilizados.

Analisando a remoção de material por pulso elétrico, verificou-se um aumento do volume removido por pulso com a utilização de  $t_{on}$  mais longos. Também foi constatado que a taxa de erosão (taxa de remoção por pulso) teve um comportamento muito parecido com o observado para taxa de remoção com a variação de  $t_{on}$ : as curvas de regressão observadas indicam a existência de um  $t_{on}$  ótimo onde se obtém a melhor taxa de erosão/remoção. A adoção de pulsos acima deste valor resulta na redução da velocidade média de remoção de material por pulso. Este comportamento é justificado pelo aumento das perdas de energia para o dielétrico e para os eletrodos por condução e irradiação com a expansão do plasma, onde após atingir um determinado diâmetro, estas perdas de energia conduzem a uma redução na velocidade de fusão de material que levam a uma diminuição da taxa de erosão com o prolongamento do pulso. Isso se reflete na taxa de remoção de material.

Para o desgaste relativo do eletrodo, os resultados permitiram verificar uma predisposição à obtenção de valores nulos e até negativos deste fator com a utilização de pulsos de longa duração. A justificativa para este comportamento é principalmente atribuída à formação de uma camada de carbono sobre a superfície do eletrodo que tem sua espessura aumentada com o prolongamento do pulso elétrico. Entretanto, faz-se necessário uma avaliação microestrutural da superfície dos eletrodos-ferramentas para constatar a

adesão desta camada de carbono. Esta avaliação não foi realizada neste trabalho.

Os resultados também apontaram que a utilização de longos  $t_{off}$  prejudica o processo em relação à produtividade, reduzindo a taxa de remoção de material. A principal justificativa para esta tendência é o incremento do tempo improdutivo com o aumento deste parâmetro, visto que, durante a ocorrência de  $t_{off}$  não há remoção de material no processo. Já os resultados obtidos para a avaliação da influência do aumento de  $t_{off}$  sobre o desgaste da ferramenta indicaram que este parâmetro não influenciou no desempenho do processo, nas condições adotadas nos ensaios.

## **5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

A realização do estudo desenvolvido neste trabalho possuem algumas limitações que podem ser mais bem exploradas em outras pesquisas com o INCONEL 718. Segue a seguir, algumas sugestões de tópicos a serem abordados em futuros trabalhos:

- A realização de experimentos que visem avaliar a influência dos parâmetros do processo no desempenho da taxa de remoção e do desgaste do eletrodo com a utilização de eletrodos de grafita. Para este tópico, é necessário aplicar outra metodologia experimental que permita medir de forma confiável a remoção de material do eletrodo-ferramenta.
- A realização de novos experimentos com eletrodos de cobre, utilizando a mesma metodologia experimental adotada na primeira etapa de ensaios, com a exclusão no planejamento experimental do parâmetro polaridade. Recomenda-se, pelos resultados obtidos neste trabalho, a adoção da polaridade positiva nestes novos ensaios.
- A investigação da influência dos parâmetros do processo sobre a rugosidade da peça e a integridade da superfície na eletroerosão desta liga. Para isso, é necessário um novo planejamento experimental com a adoção de níveis de parâmetros adequada para condições de acabamento.

- A realização de experimentos com outros tipos de materiais do eletrodo-ferramenta visando selecionar o mais adequado em relação ao desempenho do processo EDM de INCONEL 718.

## REFERÊNCIAS

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

ACTSPARK. **SA Series CNC Precision Die-Sinking EDM – Technology: C5 Technology**. User's Manual. China, 2006.

AMORIM, F. L. **Tecnologia de eletroerosão por penetração da liga de alumínio AMP 8000 e da liga de cobre CuBe para ferramentas de moldagem de materiais plásticos**. Florianópolis, Santa Catarina: 2002. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

AMORIM, F. L.; WEINGAERTNER, W. L. Die-Sinking Electrical Discharge Machining of a High-Strength Copper-Based Alloy for Injection Molds. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences**, v. 26, n. 02, p. 137-144, 2004.

AMORIM, F. L.; WEINGAERTNER, W. L. The influence of generator actuation mode and process parameters on the performance of finish EDM of a tool steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 166, p. 411–416, 2005.

ANSPINWALL, D. K.; DEWES, R. C.; BURROWS, J. M; PAUL, M. A. Hybrid high speed machining (HSM): system design and experimental results for grinding/HSM and EDM/HSM. **Annals CIRP – Manufacturing Technology**, v. 50, p. 145-148, 2001.

ARCHEM. **Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico – Produto Arclean SDI**. rev. 00. Araras: São Paulo, Brasil, 2009.

ARTHUR, A.; DICKENS, P. M.; COBB, R. C. Using Rapid Prototyping to Produce Electrical Discharge Machining Electrodes. **Rapid Prototyping Journal**, v. 02, p. 4-12, 1996.

BLEYS, P.; KRUTH, J.P.; LAUWERS, B.; ARYD, A.; DELPRETTI, R.; TRICARICO, C. Real-time tool wear compensation in milling EDM. **Annals CIRP**, v. 51, p. 157–160, 2002.

CHUNJIE, D.; JIANHUA, Z.; JIAYUAN, X.; XICHAO, S.; YUNFENG, Z. Microstructures and properties of electrical discharge strengthened layers on 65Mn steel. **Applied Surface Science**, v. 257, p. 2843–2849, 2011.

COROMANT, Sandvik. **Heat resistant super alloys**. Application Guide. p. 3 -5, [20??].

DAUW, D. F.; VAN COPPENOLLE, B. On the evolution of EDM research – part 2: from fundamental research to applied research. **International Symposium for Electromachining**, v. 02, p. 133-142, 1995.

DESCOEUDRES, Antoine. **Characterization of electrical discharge machining plasmas**. Lausanne: França, 2006. Tese de Doutorado, Escola Politécnica Federal de Lausanne, 2006.

DIBITONTO, D. D.; EUBANK, P. T.; Patel, M. R.; BARRUFET, M. A. Theoretical models of the electrical discharge machining process I: a simple cathode erosion model. **Journal of Applied Physics**. USA, v. 66, n. 9, p. 4095-4103, 1989.

ERDEN, A. Effect of materials on the mechanism of electric discharge machining (EDM). **Journal of Engineering, Materials and Technology**. v. 105, p. 132–138, 1983.

EUBANK, P. T.; PATEL, M. R.; BARRUFET, M. A.; BOZKURT, B. Theoretical models of the electrical discharge machining process III: the variable mass, cylindrical plasma mode. **Journal of Applied Physics**. v. 73, n.º 11, p. 7900-7909, 1993.

EZUGWU, E.O.; BONNEY, J.; YAMANE, Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 134, p. 233 – 253, 2003.

FONDA, P.; WANG, Z.; YAMAZAKI, K.; AKUTSU, Y. A fundamental study on Ti–6Al–4V's thermal and electrical properties and their relation to EDM productivity. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 202, pp. 583–589, 2008.

GANGADHAR, A.; SUNMUGAM, M.S.; PHILIP, P.K. Surface modification in electrodischarge processing with a powder compact tool electrode. **Wear**. v. 143, p. 45–55, 1991.

GARGH, R. K.; SINGH, K. K.; SACHDEVA, A.; SHARMA, V. S.; OJHA, K.; SINGH, S. Review of research work in sinking EDM and WEDM on metal matrix composite materials. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v. 50, p. 611-624, 2010.

HO, K. H.; NEWMAN, S. T. State of the Art Electrical Discharge Machining (EDM). **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. v. 43, p. 1287–1300, 2003.

HOUMAN, L. Electrical Discharge Machining: Tooling, Methods and Applications. **Society of Manufacturing Engineers**. pp. 5-19, 1983.

ICZ Instituto de Metais não Ferrosos. **Desenvolvimento, Propriedades e Aplicações das Superligas de Níquel**, Disponível em:< <http://www.icz.org.br/niquel-superligas.php>>. Acesso em: 01 maio. 2014.

IZQUIERDO, B.; PLAZA, S.; SÁNCHEZ, J. A.; POMBO, I.; ORTEGA, N. Numerical prediction of heat affected layer in the EDM of aeronautical alloys. **Applied Surface Science**. v. 259, p. 780 – 790, 2012.

KANG, S. H.; KIM, D. E. Investigation of EDM Characteristics of Nickel-based Heat Resistant Alloy. **KSME International Journal**. v. 17, nº.10, p. 1475- 1484, 2003.

KAO, J. Y.; TSAO, C. C.; WANG, S. S.; HSU, C. Y. Optimization of the EDM parameters on machining Ti-6Al-4V with multiple quality characteristics. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v. 47, p. 395-402, 2010.

KÖNIG, W.; WERTHEIM, R.; ZVIRIN, Y.; ROREN, M. Material removal and energy distribution in electrical discharge machining. **Annals CIRP**. v. 24, p. 95-100, 1975.

KÖNIG, W.; WEINGAERTNER, W. L. **Tecnologia de Fabricação: Volume 3 - Remoção**. 2ª ed., 1990.

KUNIEDA, M.; KIYOHARA M. Simulation of die sinking EDM by discharge location searching algorithm. **International Journal of Electrical Machining**. v. 03, p. 79-85, 1998.

KUNIEDA, M.; LAUWERS, B.; RAJURKAR, K. P.; SCHUMACHER, B. M. Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process. **International Journal of Manufacturing Technology**. v. 54, p. 64-87, 2005.

KUPPAN, P.; RAJADURAI, A.; NARAYANAN, S. Influence of EDM process parameters in deep hole drilling of Inconel 718. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v. 38, p. 78-84, 2008.

LIM, L.C.; LEE, L.C.; WONG, Y.S.; LU, H.H. Solidification microstructure of electro discharge machined surfaces of tool steels. **Journal of Materials Science e Technology**. v. 07, p. 239-248, 1991.

LIN, Y. C.; YAN, B. H.; CHANG, Y. S. Machining characteristics of titanium alloy (Ti-6Al-4V) using a combination process of EDM with USM. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 104, p. 171-177, 2000.

MALHOTRA, N.; SINGH, H.; RANI, S. Improvements in Performance of EDM - A Review. **International Conference in Southeastcon**, 2008.

MARAFONA, J.; WYKES, C. A new method of optimising material removal rate using EDM with copper- tungsten electrodes. **International Journal of Machining, Tools and Manufacture**. v. 40, p. 153-164, 2000.

MASAKI, T.; KAWATA, K.; MASUZAWA, T. Micro Electro-Discharge Machining and its Applications. **Proceeding of IEEE: MEMS**. p. 21-26, 1990.

MOHRI, N.; SAITO, N.; TSUNEKAWA, Y. Metal surface modification by electrical discharge machining with composite electrode. **Annals CIRP**. v. 42, p. 219-222, 1993.

MOHRI, N.; SUZUKI, M.; FURUYA, M.; SAITO, N. Electrode wear process in electrical discharge machining. **Annals CIRP**. v. 44, p. 165-168, 1995.

NASCIMENTO, Jôneo Lopes do. **Estudo da confiabilidade por análise microestrutural e de propriedades mecânicas de superliga de níquel INCONEL 718 empregada em ambientes agressivos na exploração de petróleo**. Rio de Janeiro: 2007. Dissertação de Mestrado, Centro Federal de Educação Tecnológica, 2007.

NEWTON, T.R.; MELKOTE, S.N.; WATKINS, T.R.; TREJO, R.M.; REISTER, L. Investigation of the effect of process parameters on the formation and characteristics of recast layer in wire-EDM of Inconel 718. **Annals Journal of Materials Science and Engineering**. v. 513–514, p. 208–215, 2009.

OLINIKI, Ricardo. **Influência da Combinação entre os Parâmetros de Usinagem por Eletroerosão na Integridade Superficial do Aço AISI H13 Temperado e Revenido**. Curitiba, Paraná: 2009. Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2009.

PATEL, M. R.; BARRUFET, M. A.; EUBANK, P. T.; DIBITONTO, D. D. Theoretical models of the electrical discharge machining process II: The anode erosion model. **Journal of Applied Physics**. USA, v. 66, p. 4104-4111, 1989.

RAHMAN, M. M.; KHAN, Md. A. R.; KADIRGAMA, K.; NOOR, M. M.; BAKAR, R. A. Modeling of Material Removal on Machining of Ti-6Al-4V through EDM using Copper Tungsten Electrode and Positive Polarity. **World Academy of Science, Engineering and Technology**. v. 71, p. 576-581, 2010.

RAJESHA, S.; SHARMA, A. K.; KUMAR, P. On Electro Discharge Machining of Inconel 718 with Hollow Tool. **Journal of Materials Engineering and Performance**. 2011.

RAJURKAR, K. P.; YU, Z. Y. 3D micro-EDM using CAD/CAM. **Annals CIRP - Manufacturing Technology**. v. 49, p. 127-130, 2000.

RESENDE, D. L. de; NETO, C. de M.; REIS, D. A. P.; HIRSCHMANN, A. C. de O. Estudo do Comportamento Mecânico da Superliga INCONEL 718 em Temperaturas Elevadas. **Anais do 15º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA**. 2009.

ROETHEL, F.; KOSEC, L.; GARBAJS V.; PEKLENIK, J. Contribution to the micro-analysis of the spark eroded surfaces. **Annals CIRP**. v. 25, p. 135–140, 1976.

SAHA, S. K. **Experimental Investigation of the Dry Electric Discharge Machining (Dry EDM) Process**. India: 2008. Thesis of master, Department of Mechanical Engineering of Indian Institute of Technology Kanpur, 2008.

SANTOS, R. F. **Influência do Material da Peça e do Tratamento Térmico na Eletroerosão dos Aços AISI H13 e AISI D6**. Belo Horizonte, Minas Gerais: 2007. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2007.

SANTOS, Ingrid Alves dos. **Caracterização de uma superliga de níquel sob temperaturas elevadas**. São Paulo: 1993. Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 1993.

SANTOS, Irapuan. **Análise dos Parâmetros de Entrada na Eletroerosão de Penetração da Liga de Titânio Ti-6Al-4V**. Curitiba, Paraná: 2010. Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2010.

SILVA, N. H. **Usinagem de Furos de Pequenos Diâmetros na Liga de Titânio Ti6Al4V em Máquina de Eletroerosão por Penetração**. Curitiba, Paraná: 2006. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2006.

SIVAKUMAR, K. M.; GANDHINATHAN, R. Establishing Optimum Process Parameters for Machining Titanium Alloys (Ti6Al4V) in Spark Electric Discharge Machining. **International Journal of Engineering and Advanced Technology**. v. 02, p. 201–204, 2013.

SOMMER, C.; SOMMER, S. **Complete EDM Handbook**. Advance Pub, 2005. Disponível em: <http://www.reliableedm.com/Complete-EDM-Handbook.html>

YILMAZ, O.; OKKA, M. A. Effect of single and multi-channel electrodes application on EDM fast hole drilling performance. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v. 51, p. 185–194, 2010.

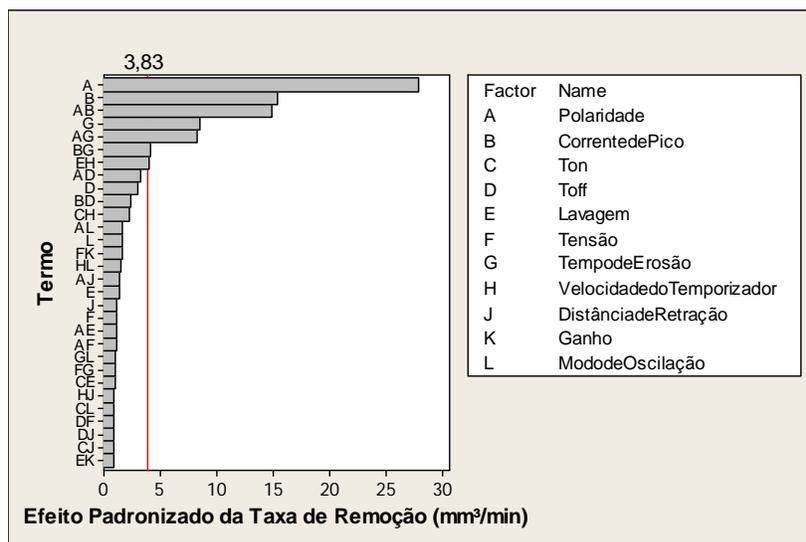
YU, Z.Y.; MASUZAWA, T.; FUJINO M. Micro-EDM for three dimensional cavities - development of uniform wear method. **Annals CIRP**. v. 47, p. 169–172, 1998.

## APÊNDICE A

Os resultados obtidos nos pré-testes com os aços AISI P20 e inoxidável ABNT 304 são apresentados nesta seção. O intervalo de confiança utilizado nas análises foi de 99,5%

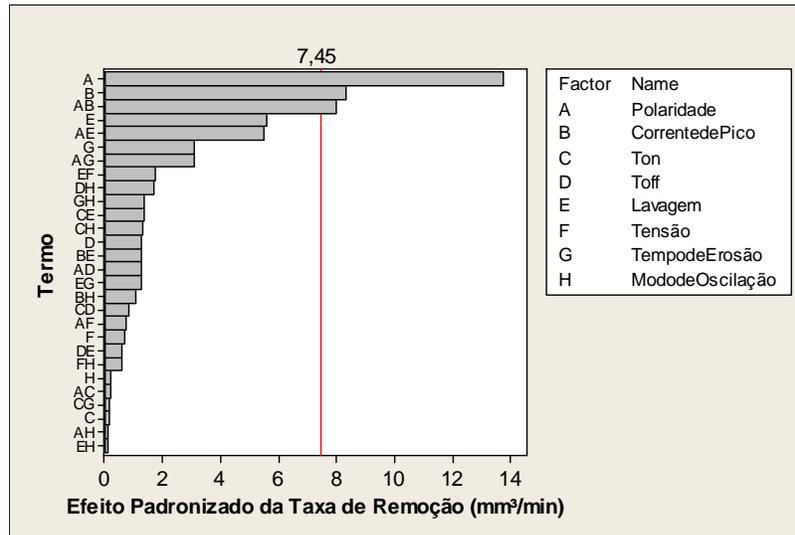
A Figura A1 e a Figura A2 mostram os gráficos de Pareto dos efeitos dos parâmetros na taxa de remoção na eletroerosão dos dois aços avaliados. A polaridade, a corrente de pico e o tempo de erosão foram os fatores que tiveram efeito individual com influência estatística sobre a taxa de remoção na usinagem do aço AISI P20. Já na eletroerosão do aço ABNT 304 apenas a polaridade e a corrente de pico influenciaram o processo em relação à taxa de remoção.

**Figura A1 - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados na Taxa de Remoção do aço AISI P20 ( $\alpha = 0,005$ )**



Fonte: O Autor

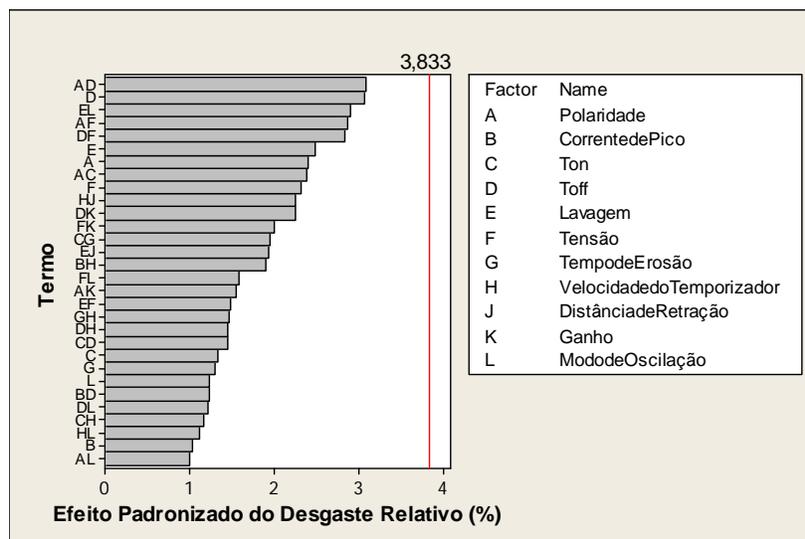
**Figura A2 - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados na Taxa de Remoção do aço ABNT 304 ( $\alpha = 0,005$ )**



Fonte: O Autor

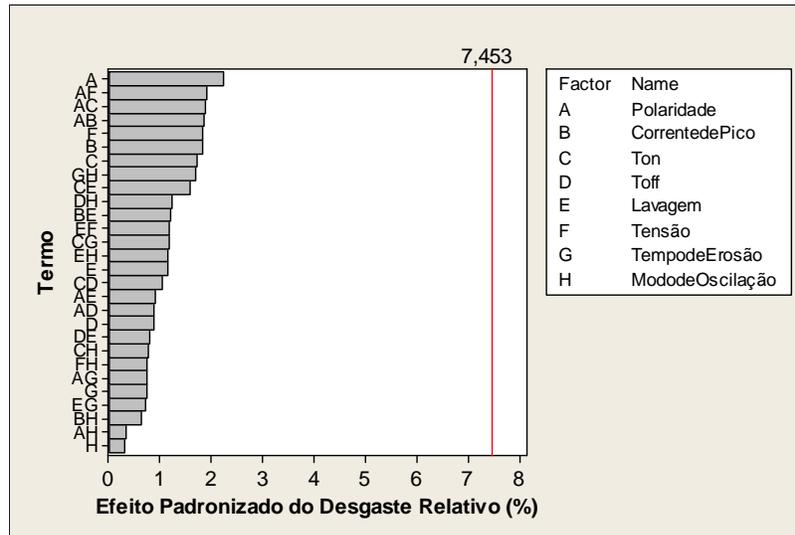
A Figura A3 e a Figura A4 mostram os gráficos de Pareto dos efeitos dos parâmetros no desgaste relativo na eletroerosão dos aços avaliados. Nenhum parâmetro apresentou influência estatística sobre o desempenho do processo em relação ao desgaste relativo do eletrodo-ferramenta.

**Figura A3 - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados no Desgaste Relativo do Eletrodo-Ferramenta do aço AISI P20 ( $\alpha = 0,005$ )**



Fonte: O Autor

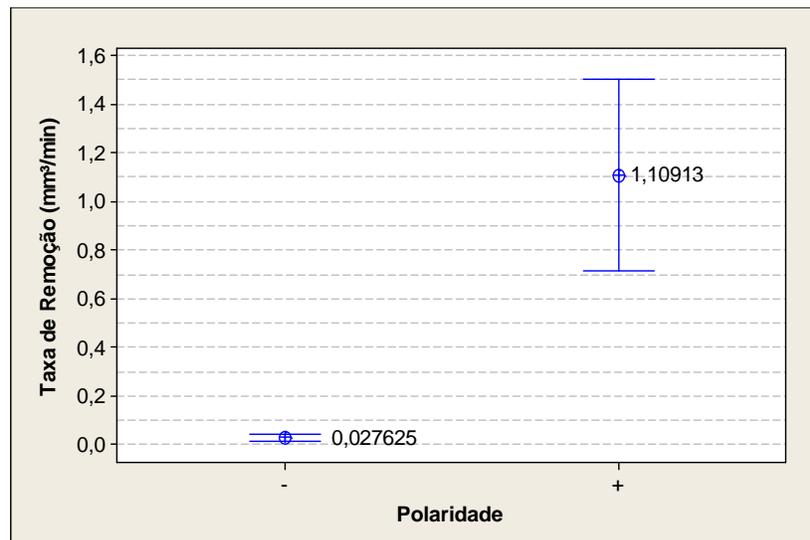
**Figura A4 - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados no Desgaste Relativo do Eletrodo-Ferramenta do aço ABNT 304 ( $\alpha = 0,005$ )**



Fonte: O Autor

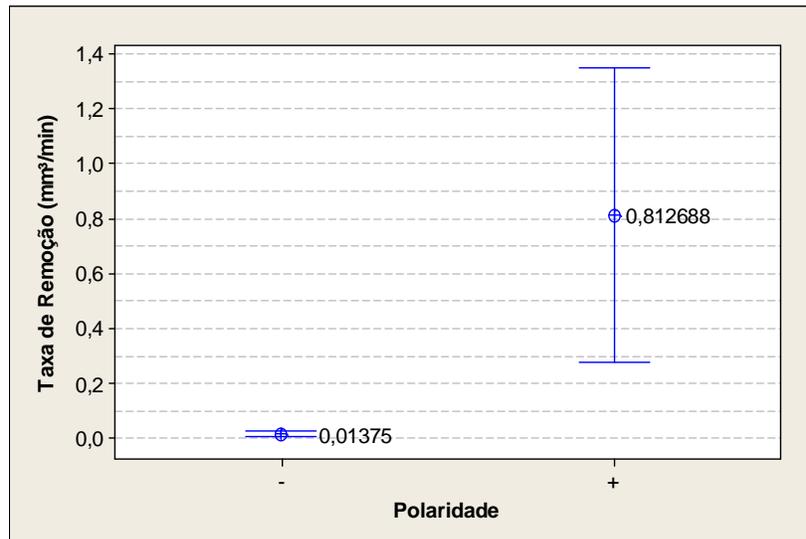
A Figura A5 e a Figura A6 mostram os gráficos do efeito da polaridade sobre a taxa de remoção na eletroerosão dos dois aços analisados. A polaridade positiva beneficiou o processo, aumentando a taxa de remoção nos dois casos.

**Figura A5 - Gráfico Taxa de Remoção x Polaridade - Usinagem do aço AISI P20 (99,5% de confiança)**



Fonte: O Autor

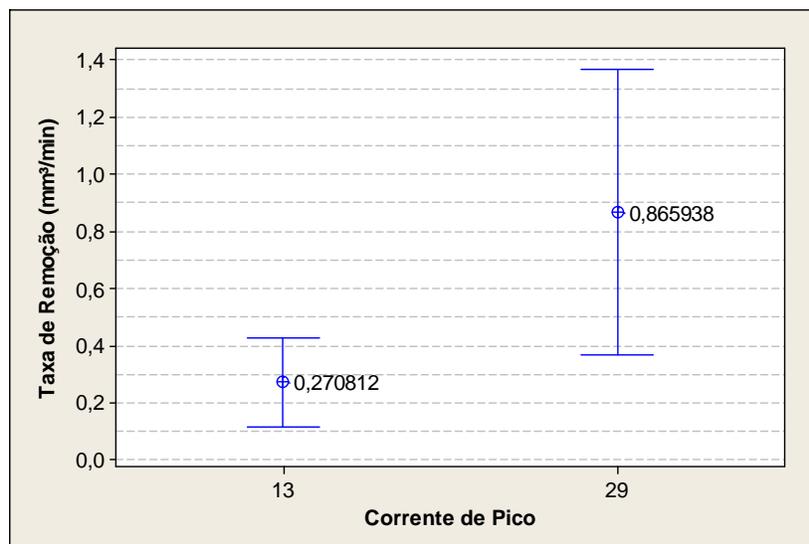
**Figura A6 - Gráfico Taxa de Remoção x Polaridade - Usinagem do aço ABNT 304 (99,5% de confiança)**



Fonte: O Autor

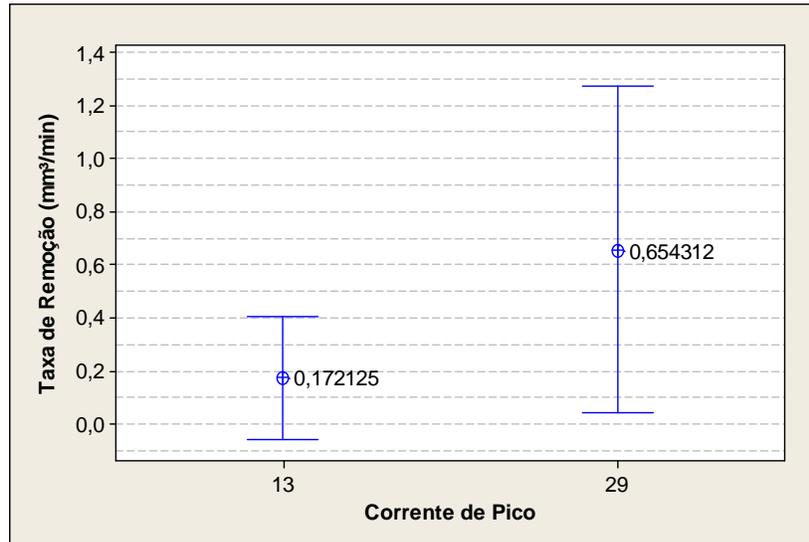
A Figura A7 e a Figura A8 mostram os gráficos do efeito da corrente de pico sobre a taxa de remoção na eletroerosão dos dois aços analisados. Nos dois casos, a interposição dos intervalos de confiança não permitiu avaliar o efeito deste parâmetro sobre a produtividade do processo.

**Figura A7 - Gráfico Taxa de Remoção x Corrente de Pico - Usinagem do aço AISI P20 (99,5% de confiança)**



Fonte: O Autor

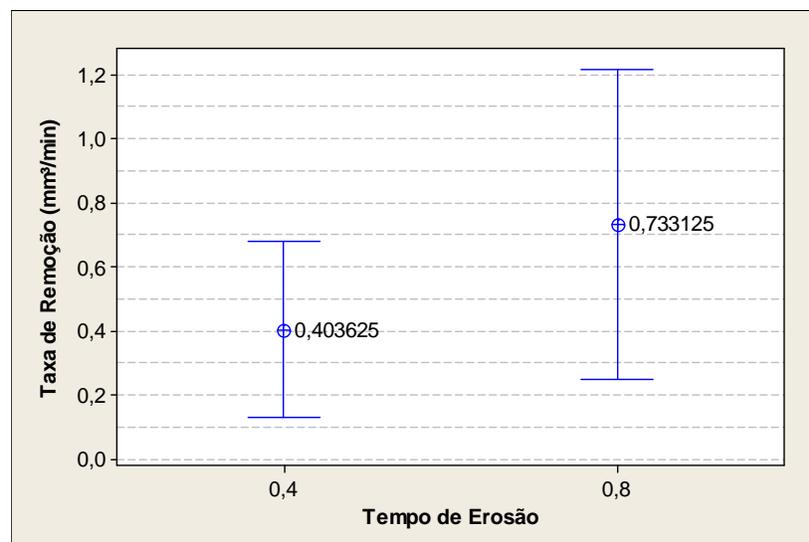
**Figura A8 - Gráfico Taxa de Remoção x Corrente de Pico - Usinagem do aço ABNT 304  
(99,5% de confiança)**



Fonte: O Autor

A Figura A9 mostra o gráfico do efeito do tempo de erosão sobre a taxa de remoção na eletroerosão do aço AISI P20. A interposição dos intervalos de confiança não permitiu avaliar o efeito deste parâmetro sobre a produtividade do processo.

**Figura A9 - Gráfico Taxa de Remoção x Tempo de Erosão - Usinagem do aço AISI P20  
(99,5% de confiança)**



Fonte: O Autor

## APÊNDICE B

**Tabela B1 - Medições de massas durante a primeira etapa dos ensaios com INCONEL**

718

<b>ENSAIO 1</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	264,441	264,441	0,000	Massa Inicial da Peça	49,760	49,759	0,001
	264,441				49,759		
	264,440				49,759		
	264,441				49,758		
Massa Final do Eletrodo	264,438	264,437	0,000	Massa Final da Peça	49,756	49,756	0,001
	264,437				49,755		
	264,437				49,756		
	264,437				49,755		
<b>ENSAIO 2</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	239,294	239,294	0,001	Massa Inicial da Peça	49,701	49,701	0,001
	239,294				49,701		
	239,293				49,700		
	239,293				49,700		
Massa Final do Eletrodo	239,291	239,292	0,001	Massa Final da Peça	49,385	49,386	0,001
	239,291				49,386		
	239,292				49,386		
	239,292				49,386		
<b>ENSAIO 3</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	264,429	264,429	0,000	Massa Inicial da Peça	49,676	49,676	0,001
	264,429				49,676		
	264,429				49,675		
	264,428				49,676		
Massa Final do Eletrodo	264,424	264,424	0,000	Massa Final da Peça	49,664	49,664	0,001
	264,424				49,664		
	264,424				49,664		
	264,424				49,663		

Fonte: O Autor

**Tabela B2 - Medições de massas durante a primeira etapa dos ensaios com INCONEL 718 (continuação)**

<b>ENSAIO 4</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	239,281	239,280	0,001	Massa Inicial da Peça	49,749	49,749	0,001
	239,28				49,748		
	239,281				49,750		
	239,279				49,749		
Massa Final do Eletrodo	239,260	239,261	0,001	Massa Final da Peça	49,416	49,416	0,001
	239,261				49,415		
	239,262				49,417		
	239,261				49,416		
<b>ENSAIO 5</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	264,424	264,424	0,001	Massa Inicial da Peça	49,724	49,725	0,001
	264,422				49,725		
	264,425				49,725		
	264,423				49,724		
Massa Final do Eletrodo	264,421	264,421	0,001	Massa Final da Peça	49,722	49,721	0,001
	264,421				49,722		
	264,420				49,721		
	264,420				49,720		
<b>ENSAIO 6</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	239,251	239,250	0,001	Massa Inicial da Peça	49,653	49,653	0,000
	239,250				49,652		
	239,250				49,653		
	239,249				49,653		
Massa Final do Eletrodo	239,250	239,249	0,001	Massa Final da Peça	49,418	49,418	0,001
	239,249				49,417		
	239,249				49,418		
	239,249				49,417		
<b>ENSAIO 7</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	264,411	264,411	0,001	Massa Inicial da Peça	52,602	52,601	0,001
	264,412				52,601		
	264,411				52,601		
	264,410				52,600		
Massa Final do Eletrodo	264,411	264,411	0,000	Massa Final da Peça	52,592	52,592	0,001
	264,411				52,591		
	264,411				52,593		
	264,412				52,593		

Fonte: O Autor

**Tabela B3 - Medições de massas durante a primeira etapa dos ensaios com INCONEL 718 (continuação)**

<b>ENSAIO 8</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	239,186	239,186	0,001	Massa Inicial da Peça	49,202	49,202	0,000
	239,187				49,202		
	239,186				49,202		
	239,185				49,201		
Massa Final do Eletrodo	239,189	239,190	0,001	Massa Final da Peça	48,882	48,883	0,001
	239,19				48,882		
	239,19				48,883		
	239,19				48,883		
<b>ENSAIO 9</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	264,400	264,400	0,001	Massa Inicial da Peça	49,644	49,644	0,001
	264,399				49,644		
	264,400				49,645		
	264,399				49,644		
Massa Final do Eletrodo	264,399	264,398	0,000	Massa Final da Peça	49,642	49,642	0,001
	264,398				49,643		
	264,398				49,641		
	264,398				49,642		
<b>ENSAIO 10</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	239,199	239,199	0,000	Massa Inicial da Peça	49,231	49,231	0,001
	239,199				49,230		
	239,199				49,230		
	239,199				49,231		
Massa Final do Eletrodo	239,193	239,194	0,001	Massa Final da Peça	49,177	49,177	0,000
	239,194				49,177		
	239,195				49,177		
	239,193				49,176		
<b>ENSAIO 11</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	264,395	264,395	0,001	Massa Inicial da Peça	52,576	52,575	0,000
	264,394				52,575		
	264,395				52,575		
	264,394				52,575		
Massa Final do Eletrodo	264,393	264,393	0,000	Massa Final da Peça	52,57	52,568	0,001
	264,393				52,567		
	264,393				52,568		
	264,393				52,568		

Fonte: O Autor

**Tabela B4 - Medições de massas durante a primeira etapa dos ensaios com INCONEL 718 (continuação)**

<b>ENSAIO 12</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	239,175	239,175	0,001	Massa Inicial da Peça	49,691	49,692	0,001
	239,173				49,691		
	239,175				49,692		
	239,175				49,692		
Massa Final do Eletrodo	239,155	239,156	0,001	Massa Final da Peça	49,205	49,205	0,000
	239,155				49,204		
	239,156				49,205		
	239,157				49,205		
<b>ENSAIO 13</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	264,389	264,388	0,001	Massa Inicial da Peça	49,769	49,769	0,001
	264,388				49,770		
	264,388				49,769		
	264,387				49,769		
Massa Final do Eletrodo	264,386	264,385	0,001	Massa Inicial da Peça	49,767	49,767	0,001
	264,385				49,766		
	264,385				49,767		
	264,384				49,766		
<b>ENSAIO 14</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	239,155	239,156	0,001	Massa Inicial da Peça	49,680	49,679	0,001
	239,155				49,679		
	239,156				49,679		
	239,157				49,678		
Massa Final do Eletrodo	239,155	239,155	0,001	Massa Inicial da Peça	49,594	49,594	0,001
	239,155				49,595		
	239,155				49,594		
	239,154				49,592		
<b>ENSAIO 15</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	264,375	264,376	0,001	Massa Inicial da Peça	49,615	49,614	0,001
	264,375				49,614		
	264,376				49,614		
	264,376				49,614		
Massa Final do Eletrodo	264,375	264,375	0,000	Massa Inicial da Peça	49,61	49,610	0,001
	264,375				49,609		
	264,374				49,610		
	264,375				49,609		

Fonte: O Autor

**Tabela B5 - Medições de massas durante a primeira etapa dos ensaios com INCONEL  
718 (continuação)**

<b>ENSAIO 16</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	239,145	239,145	0,001	Massa Inicial da Peça	49,616	49,617	0,001
	239,145				49,617		
	239,144				49,617		
	239,144				49,616		
Massa Final do Eletrodo	239,144	239,145	0,001	Massa Inicial da Peça	49,037	49,037	0,001
	239,145				49,036		
	239,144				49,036		
	239,145				49,037		
<b>ENSAIO 17</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	264,363	264,364	0,001	Massa Inicial da Peça	49,618	49,618	0,000
	264,364				49,619		
	264,364				49,618		
	264,363				49,618		
Massa Final do Eletrodo	264,363	264,362	0,001	Massa Inicial da Peça	49,617	49,617	0,001
	264,362				49,617		
	264,362				49,617		
	264,361				49,618		
<b>ENSAIO 18</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	239,136	239,136	0,001	Massa Inicial da Peça	53,958	53,958	0,001
	239,135				53,958		
	239,135				53,959		
	239,136				53,958		
Massa Final do Eletrodo	239,131	239,131	0,001	Massa Inicial da Peça	53,917	53,917	0,001
	239,131				53,916		
	239,130				53,916		
	239,131				53,917		
<b>ENSAIO 19</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	264,355	264,356	0,001	Massa Inicial da Peça	53,048	53,049	0,001
	264,357				53,049		
	264,355				53,049		
	264,356				53,048		
Massa Final do Eletrodo	264,353	264,353	0,000	Massa Inicial da Peça	53,043	53,042	0,000
	264,353				53,042		
	264,354				53,042		
	264,353				53,042		

Fonte: O Autor

**Tabela B6 - Medições de massas durante a primeira etapa dos ensaios com INCONEL 718 (continuação)**

<b>ENSAIO 20</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	239,127	239,126	0,001	Massa Inicial da Peça	49,729	49,728	0,001
	239,125				49,727		
	239,125				49,728		
	239,127				49,729		
Massa Final do Eletrodo	239,115	239,114	0,001	Massa Inicial da Peça	49,618	49,618	0,001
	239,113				49,617		
	239,113				49,619		
	239,113				49,617		
<b>ENSAIO 21</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	264,336	264,336	0,000	Massa Inicial da Peça	49,615	49,615	0,001
	264,336				49,614		
	264,336				49,614		
	264,337				49,615		
Massa Final do Eletrodo	264,332	264,332	0,001	Massa Inicial da Peça	49,614	49,618	0,000
	264,332				49,614		
	264,333				49,614		
	264,332				49,614		
<b>ENSAIO 22</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	239,104	239,105	0,000	Massa Inicial da Peça	49,725	49,726	0,001
	239,105				49,726		
	239,105				49,725		
	239,105				49,726		
Massa Final do Eletrodo	239,098	239,097	0,001	Massa Inicial da Peça	49,715	49,715	0,000
	239,096				49,715		
	239,096				49,715		
	239,096				49,715		
<b>ENSAIO 23</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	264,329	264,329	0,001	Massa Inicial da Peça	49,591	49,591	0,001
	264,329				49,590		
	264,328				49,590		
	264,329				49,591		
Massa Final do Eletrodo	264,329	264,329	0,001	Massa Inicial da Peça	49,582	49,583	0,001
	264,329				49,582		
	264,329				49,583		
	264,328				49,583		

Fonte: O Autor

**Tabela B7 - Medições de massas durante a primeira etapa dos ensaios com INCONEL 718 (continuação)**

<b>ENSAIO 24</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	239,088	239,088	0,001	Massa Inicial da Peça	49,550	49,550	0,000
	239,088				49,550		
	239,088				49,550		
	239,089				49,550		
Massa Final do Eletrodo	239,089	239,088	0,001	Massa Inicial da Peça	49,410	49,411	0,001
	239,088				49,410		
	239,088				49,411		
	239,088				49,411		
<b>ENSAIO 25</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	264,320	264,319	0,001	Massa Inicial da Peça	49,045	49,046	0,001
	264,3,18				49,046		
	264,318				49,046		
	264,319				49,045		
Massa Final do Eletrodo	264,319	264,319	0,001	Massa Inicial da Peça	49,040	49,040	0,000
	264,318				49,040		
	264,319				49,040		
	264,318				49,039		
<b>ENSAIO 26</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	239,074	239,074	0,000	Massa Inicial da Peça	49,751	49,751	0,000
	239,074				49,751		
	239,074				49,751		
	239,075				49,751		
Massa Final do Eletrodo	239,069	239,069	0,001	Massa Inicial da Peça	49,728	49,730	0,001
	239,069				49,730		
	239,070				49,730		
	239,069				49,730		
<b>ENSAIO 27</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	264,313	264,313	0,001	Massa Inicial da Peça	49,860	49,860	0,000
	264,314				49,860		
	264,313				49,860		
	264,312				49,859		
Massa Final do Eletrodo	264,309	264,308	0,001	Massa Inicial da Peça	49,854	49,854	0,000
	264,308				49,854		
	264,308				49,854		
	264,307				49,854		

Fonte: O Autor

**Tabela B8 - Medições de massas durante a primeira etapa dos ensaios com INCONEL 718 (continuação)**

<b>ENSAIO 28</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	239,062	239,062	0,000	Massa Inicial da Peça	49,238	49,238	0,000
	239,062				49,238		
	239,062				49,238		
	239,063				49,238		
Massa Final do Eletrodo	239,034	239,033	0,001	Massa Inicial da Peça	48,923	48,922	0,001
	239,033				48,922		
	239,033				48,922		
	239,033				48,922		
<b>ENSAIO 29</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	264,302	264,302	0,000	Massa Inicial da Peça	49,926	49,926	0,001
	264,303				49,926		
	264,302				49,925		
	264,302				49,925		
Massa Final do Eletrodo	264,302	264,301	0,001	Massa Inicial da Peça	49,923	49,923	0,001
	264,300				49,922		
	264,302				49,922		
	264,300				49,923		
<b>ENSAIO 30</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	239,024	239,024	0,001	Massa Inicial da Peça	49,029	49,028	0,001
	239,024				49,028		
	239,023				49,028		
	239,023				49,028		
Massa Final do Eletrodo	239,021	239,021	0,001	Massa Inicial da Peça	49,017	49,018	0,000
	239,020				49,018		
	239,020				49,018		
	239,021				49,018		
<b>ENSAIO 31</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	264,291	264,291	0,000	Massa Inicial da Peça	48,949	48,949	0,000
	264,290				48,949		
	264,291				48,949		
	264,291				48,949		
Massa Final do Eletrodo	264,288	264,288	0,001	Massa Inicial da Peça	48,944	48,944	0,000
	264,290				48,945		
	264,287				48,944		
	264,287				48,944		

Fonte: O Autor

**Tabela B9 - Medições de massas durante a primeira etapa dos ensaios com INCONEL 718 (continuação)**

ENSAIO 32							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	239,006	239,007	0,001	Massa Inicial da Peça	49,744	49,744	0,000
	239,007				49,744		
	239,008				49,744		
	239,008				49,743		
Massa Final do Eletrodo	239,003	239,003	0,001	Massa Inicial da Peça	49,565	49,565	0,000
	239,003				49,565		
	239,003				49,565		
	239,004				49,565		

Fonte: O Autor

## APÊNDICE C

**Tabela C1- Efeitos Estimados e Coeficientes para Taxa de Remoção (mm<sup>3</sup>/min)**

Termo	Efeito	Coef.	SE Coef.	T	P
Constante		0,4316	0,0389	11,0900	0,0020
Polaridade	0,8226	0,4113	0,0389	10,5700	0,0020
Corrente de Pico	0,4490	0,2245	0,0389	5,7700	0,0100
t <sub>on</sub>	-0,0333	-0,0166	0,0389	-0,4300	0,6980
t <sub>off</sub>	0,0572	0,0286	0,0389	0,7400	0,5150
Lavagem	-0,4133	-0,2066	0,0389	-5,3100	0,0130
Tensão	0,0169	0,0084	0,0389	0,2200	0,8420
Tempo de Erosão	0,2889	0,1444	0,0389	3,7100	0,0340
Modo de Oscilação	-0,0475	-0,0238	0,0389	-0,6100	0,5850
Polaridade*Corrente de Pico	0,4314	0,2157	0,0389	5,5400	0,0120
Polaridade*t <sub>on</sub>	-0,0286	-0,0143	0,0389	-0,3700	0,7370
Polaridade*t <sub>off</sub>	0,0616	0,0308	0,0389	0,7900	0,4860
Polaridade*Lavagem	-0,4091	-0,2046	0,0389	-5,2600	0,0130
Polaridade*Tensão	0,0153	0,0076	0,0389	0,2000	0,8570
Polaridade*Tempo de Erosão	0,2790	0,1395	0,0389	3,5900	0,0370
Polaridade*Modo de Oscilação	-0,0476	-0,0238	0,0389	-0,6100	0,5840
Corrente de Pico*Lavagem	-0,0978	-0,0489	0,0389	-1,2600	0,2980
Corrente de Pico*Modo de Oscilação	-0,0963	-0,0481	0,0389	-1,2400	0,3040
t <sub>on</sub> *t <sub>off</sub>	0,0177	0,0089	0,0389	0,2300	0,8340
t <sub>on</sub> *Lavagem	-0,0463	-0,0231	0,0389	-0,5900	0,5940
t <sub>on</sub> *Tempo de Erosão	-0,0491	-0,0246	0,0389	-0,6300	0,5730
t <sub>on</sub> *Modo de Oscilação	-0,1467	-0,0734	0,0389	-1,8900	0,1560
t <sub>off</sub> *Lavagem	0,0617	0,0309	0,0389	0,7900	0,4850
t <sub>off</sub> *Modo de Oscilação	-0,0475	-0,0237	0,0389	-0,6100	0,5850
Lavagem*Tensão	-0,0531	-0,0266	0,0389	-0,6800	0,5440
Lavagem*Tempo de Erosão	-0,1451	-0,0726	0,0389	-1,8700	0,1590
Lavagem*Modo de Oscilação	-0,0498	-0,0249	0,0389	-0,6400	0,5680
Tensão*Modo de Oscilação	0,0534	0,0267	0,0389	0,6900	0,5420
Tempo de Erosão*Modo de Oscilação	-0,0484	-0,0242	0,0389	-0,6200	0,5780

Fonte: O Autor

S = 0,220077    R-Sq = 98,92%    R-Sq (adj) = 88,82%

Tabela C2 - Análise de Variância para Taxa de Remoção (mm<sup>3</sup>/min)

Fonte	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Efeitos Principais	8	9,1157	9,1157	1,13946	23,53	0,013
Interações de 2ª Ordem	20	4,1701	4,1701	0,20851	4,3	0,127
Erro Residual	3	0,1453	0,1453	0,04843		
Total	31	13,4311				

Fonte: O Autor

Tabela C3 - Efeitos Estimados e Coeficientes para Desgaste Relativo (%)

Termo	Efeito	Coef.	SE Coef.	T	P
Constante		50,0300	14,3200	3,4900	0,0400
Polaridade	-79,5200	-39,7600	14,3200	-2,7800	0,0690
Corrente de Pico	-67,8300	-33,9200	14,3200	-2,3700	0,0990
t <sub>on</sub>	35,9000	17,9500	14,3200	1,2500	0,2990
t <sub>off</sub>	-47,2600	-23,6300	14,3200	-1,6500	0,1970
Lavagem	49,9200	24,9600	14,3200	1,7400	0,1800
Tensão	41,8500	20,9300	14,3200	1,4600	0,2400
Tempo de Erosão	-55,8400	-27,9200	14,3200	-1,9500	0,1460
Modo de Oscilação	39,2900	19,6500	14,3200	1,3700	0,2640
Polaridade*Corrente de Pico	54,2300	27,1100	14,3200	1,8900	0,1550
Polaridade*t <sub>on</sub>	-32,0600	-16,0300	14,3200	-1,1200	0,3440
Polaridade*t <sub>off</sub>	44,0700	22,0300	14,3200	1,5400	0,2210
Polaridade*Lavagem	-33,9000	-16,9500	14,3200	-1,1800	0,3220
Polaridade*Tensão	-52,1500	-26,0700	14,3200	-1,8200	0,1660
Polaridade*Tempo de Erosão	58,8900	29,4500	14,3200	2,0600	0,1320
Polaridade*Modo de Oscilação	-33,2000	-16,6000	14,3200	-1,1600	0,3300
Corrente de Pico*Lavagem	-36,0100	-18,0000	14,3200	-1,2600	0,2980
Corrente de Pico*Modo de Oscilação	-42,0300	-21,0100	14,3200	-1,4700	0,2390
t <sub>on</sub> *t <sub>off</sub>	-31,7100	-15,8500	14,3200	-1,1100	0,3490
t <sub>on</sub> *Lavagem	38,3400	19,1700	14,3200	1,3400	0,2730
t <sub>on</sub> *Tempo de Erosão	-29,2200	-14,6100	14,3200	-1,0200	0,3830
t <sub>on</sub> *Modo de Oscilação	56,9600	28,4800	14,3200	1,9900	0,1410
t <sub>off</sub> *Lavagem	-45,2700	-22,6400	14,3200	-1,5800	0,2120
t <sub>off</sub> *Modo de Oscilação	-41,5000	-20,7500	14,3200	-1,4500	0,2430
Lavagem*Tensão	31,6200	15,8100	14,3200	1,1000	0,3500
Lavagem*Tempo de Erosão	-51,5200	-25,7600	14,3200	-1,8000	0,1700
Lavagem*Modo de Oscilação	37,8400	18,9200	14,3200	1,3200	0,2780
Tensão*Modo de Oscilação	40,0200	20,0100	14,3200	1,4000	0,2570
Tempo de Erosão*Modo de Oscilação	-30,1200	-15,0600	14,3200	-1,0500	0,3700

Fonte: O Autor

S = 80,9920    R-Sq = 95,98%    R-Sq (adj) = 58,44%

**Tabela C4 - Análise de Variância para Desgaste Relativo (%)**

<b>Fonte</b>	<b>DF</b>	<b>Seq SS</b>	<b>Adj SS</b>	<b>Adj MS</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Efeitos Principais	8	186814	186814	23352	3,56	0,162
Interações de 2ª Ordem	20	282814	282814	14141	2,16	0,289
Erro Residual	3	19679	19679	6560		
Total	31	489306				

**Fonte: O Autor**

## APÊNDICE D

**Tabela D1 - Efeitos Estimados e Coeficientes para Taxa de Remoção (mm<sup>3</sup>/min)**

Termo	Efeito	Coef.	SE Coef.	T	P
Constante		0,4316	0,034	12,7	0
Polaridade	0,8226	0,4113	0,034	12,1	0
Corrente de Pico	0,449	0,2245	0,034	6,61	0
t <sub>on</sub>	-0,033	-0,017	0,034	-0,5	0,63
Lavagem	-0,413	-0,207	0,034	-6,1	0
Tempo de Erosão	0,2889	0,1444	0,034	4,25	0
Polaridade*Corrente de Pico	0,4314	0,2157	0,034	6,35	0
Polaridade*t <sub>on</sub>	-0,029	-0,014	0,034	-0,4	0,68
Polaridade*Lavagem	-0,409	-0,205	0,034	-6	0
Polaridade*Tempo de Erosão	0,279	0,1395	0,034	4,1	0
Corrente de Pico*t <sub>on</sub>	0,0153	0,0076	0,034	0,22	0,83
Corrente de Pico*Lavagem	-0,098	-0,049	0,034	-1,4	0,17
Corrente de Pico*Tempo de Erosão	0,0616	0,0308	0,034	0,91	0,38
t <sub>on</sub> *Lavagem	-0,046	-0,023	0,034	-0,7	0,51
t <sub>on</sub> *Tempo de Erosão	-0,049	-0,025	0,034	-0,7	0,48
Lavagem*Tempo de Erosão	-0,145	-0,073	0,034	-2,1	0,05

Fonte: O Autor

S = 0,192250    R-Sq = 95,60%    R-Sq (adj) = 91,47%

**Tabela D2 - Análise de Variância para Taxa de Remoção (mm<sup>3</sup>/min)**

Fonte	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Efeitos Principais	5	9,0691	9,0691	1,81383	49,08	0
Interações de 2ª Ordem	10	3,7706	3,7706	0,37706	10,2	0
Erro Residual	16	0,5914	0,5914	0,03696		
Total	31	13,4311				

Fonte: O Autor

Tabela D3 - Efeitos Estimados e Coeficientes para Desgaste Relativo (%)

Termo	Efeito	Coef.	SE Coef.	T	P
Constante		50,03	19,29	2,59	0,02
Polaridade	79,52	39,76	19,29	-2,06	0,056
Corrente de Pico	67,83	33,92	19,29	-1,76	0,098
$t_{on}$	35,9	17,95	19,29	0,93	0,366
Lavagem	49,91	24,96	19,29	1,29	0,214
Tempo de Erosão	55,84	27,92	19,29	-1,45	0,167
Polaridade*Corrente de Pico	54,22	27,11	19,29	1,41	0,179
Polaridade* $t_{on}$	32,06	16,03	19,29	-0,83	0,418
Polaridade*Lavagem	-33,9	16,95	19,29	-0,88	0,393
Polaridade*Tempo de Erosão	58,89	29,45	19,29	1,53	0,146
Corrente de Pico* $t_{on}$	52,15	26,07	19,29	-1,35	0,195
Corrente de Pico*Lavagem	36,01	-18	19,29	-0,93	0,365
Corrente de Pico*Tempo de Erosão	44,07	22,03	19,29	1,14	0,27
$t_{on}$ *Lavagem	38,34	19,17	19,29	0,99	0,335
$t_{on}$ *Tempo de Erosão	29,22	14,61	19,29	-0,76	0,46
Lavagem*Tempo de Erosão	51,52	25,76	19,29	-1,34	0,2

Fonte: O Autor

S = 109,132    R-Sq = 61,06%    R-Sq (adj) = 24,55%

Tabela D4 - Análise de Variância para Desgaste Relativo (%)

Fonte	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Efeitos Principais	5	142580	142580	28516	2,39	0,084
Interações de 2ª Ordem	10	156169	156169	15617	1,31	0,303
Erro Residual	16	190558	190558	11910		
Total	31	489306				

Fonte: O Autor

## APÊNDICE E

**Tabela E1 - Medições de massas durante a segunda etapa dos ensaios com INCONEL**

718

<b>ENSAIO 1 (t<sub>on</sub>: 800; t<sub>off</sub>: 800)</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	263,819	263,818	0,001	Massa Inicial da Peça	43,263	43,263	0,000
	263,817				43,263		
	263,819				43,262		
	263,818				43,263		
Massa Final do Eletrodo	263,823	263,824	0,001	Massa Final da Peça	36,947	36,948	0,001
	263,824				36,948		
	263,824				36,948		
	263,824				36,947		
<b>ENSAIO 2 (t<sub>on</sub>: 200; t<sub>off</sub>: 50)</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	262,488	262,489	0,001	Massa Inicial da Peça	36,724	36,723	0,000
	262,488				36,723		
	262,489				36,723		
	262,489				36,723		
Massa Final do Eletrodo	262,462	262,462	0,000	Massa Final da Peça	24,81	24,810	0,000
	262,462				24,81		
	262,461				24,81		
	262,462				24,809		
<b>ENSAIO 3 (t<sub>on</sub>: 400; t<sub>off</sub>: 800)</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	263,796	263,796	0,000	Massa Inicial da Peça	43,032	43,031	0,000
	263,796				43,031		
	263,795				43,031		
	263,796				43,031		
Massa Final do Eletrodo	263,877	263,878	0,001	Massa Final da Peça	38,342	38,342	0,001
	263,879				38,341		
	263,878				38,341		
	263,879				38,342		

Fonte: O Autor

**Tabela E2 - Medições de massas durante a segunda etapa dos ensaios com INCONEL 718 (continuação)**

<b>ENSAIO 4 (t<sub>on</sub>: 50; t<sub>off</sub>: 200)</b>								
Massa Inicial do Eletrodo	Medidas	Média	Desvio Padrão	Massa Inicial da Peça	Medidas	Média	Desvio Padrão	
	275,555	275,555	0,001		Massa Inicial da Peça	43,246	43,246	0,000
275,554	43,246							
275,555	43,246							
275,555	43,246							
Massa Final do Eletrodo	275,156	275,156	0,001	Massa Final da Peça	41,860	41,860	0,001	
	275,155				41,860			
	275,156				41,858			
	275,156				41,860			
<b>ENSAIO 5 (t<sub>on</sub>: 50; t<sub>off</sub>: 400)</b>								
Massa Inicial do Eletrodo	Medidas	Média	Desvio Padrão	Massa Inicial da Peça	Medidas	Média	Desvio Padrão	
	262,705	262,704	0,001		Massa Inicial da Peça	43,817	43,817	0,001
	262,704					43,816		
	262,704					43,817		
262,703	43,816							
Massa Final do Eletrodo	262,491	262,491	0,001	Massa Final da Peça	43,097	43,097	0,000	
	262,491				43,097			
	262,492				43,097			
	262,491				43,098			
<b>ENSAIO 6 (t<sub>on</sub>: 400; t<sub>off</sub>: 50)</b>								
Massa Inicial do Eletrodo	Medidas	Média	Desvio Padrão	Massa Inicial da Peça	Medidas	Média	Desvio Padrão	
	275,138	275,139	0,001		Massa Inicial da Peça	44,146	44,146	0,001
	275,139					44,145		
	275,139					44,145		
275,139	44,146							
Massa Final do Eletrodo	275,144	275,143	0,001	Massa Final da Peça	31,482	31,482	0,001	
	275,143				31,481			
	275,143				31,481			
	275,142				31,482			
<b>ENSAIO 7 (t<sub>on</sub>: 800; t<sub>off</sub>: 800)</b>								
Massa Inicial do Eletrodo	Medidas	Média	Desvio Padrão	Massa Inicial da Peça	Medidas	Média	Desvio Padrão	
	263,710	263,710	0,000		Massa Inicial da Peça	44,006	44,006	0,000
	263,710					44,006		
	263,710					44,006		
263,709	44,006							
Massa Final do Eletrodo	263,750	263,751	0,001	Massa Final da Peça	37,409	37,409	0,000	
	263,751				37,409			
	263,751				37,410			
	263,750				37,409			

Fonte: O Autor

**Tabela E3 - Medições de massas durante a segunda etapa dos ensaios com INCONEL 718 (continuação)**

<b>ENSAIO 8 (t<sub>on</sub>: 200; t<sub>off</sub>: 50)</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	262,764	262,764	0,001	Massa Inicial da Peça	37,355	37,356	0,001
	262,764				37,355		
	262,763				37,356		
	262,763				37,356		
Massa Final do Eletrodo	262,711	262,711	0,000	Massa Final da Peça	24,565	24,565	0,001
	262,711				24,564		
	262,711				24,565		
	262,711				24,564		
<b>ENSAIO 9 (t<sub>on</sub>: 50; t<sub>off</sub>: 400)</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	266,539	266,540	0,001	Massa Inicial da Peça	41,096	41,096	0,001
	266,540				41,097		
	266,540				41,096		
	266,539				41,096		
Massa Final do Eletrodo	266,314	266,314	0,001	Massa Final da Peça	40,449	40,450	0,001
	266,314				40,450		
	266,313				40,450		
	266,314				40,450		
<b>ENSAIO 10 (t<sub>on</sub>: 400; t<sub>off</sub>: 800)</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	274,957	274,957	0,001	Massa Inicial da Peça	44,111	44,112	0,001
	274,957				44,111		
	274,956				44,112		
	274,956				44,112		
Massa Final do Eletrodo	274,966	274,967	0,000	Massa Final da Peça	39,195	39,195	0,000
	274,967				39,195		
	274,967				39,195		
	274,967				39,195		
<b>ENSAIO 11 (t<sub>on</sub>: 400; t<sub>off</sub>: 200)</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	263,333	263,332	0,001	Massa Inicial da Peça	44,096	44,096	0,000
	263,332				44,096		
	263,332				44,096		
	263,332				44,096		
Massa Final do Eletrodo	263,338	263,338	0,000	Massa Final da Peça	35,917	35,916	0,001
	263,338				35,916		
	263,338				35,916		
	263,339				35,916		

Fonte: O Autor

**Tabela E4 - Medições de massas durante a segunda etapa dos ensaios com INCONEL  
718 (continuação)**

<b>ENSAIO 12 (t<sub>on</sub>: 400; t<sub>off</sub>: 50)</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	274,939	274,939	0,001	Massa Inicial da Peça	41,544	41,544	0,001
	274,939				41,544		
	274,938				41,544		
	274,938				41,545		
Massa Final do Eletrodo	274,947	274,947	0,000	Massa Final da Peça	27,838	27,838	0,000
	274,947				27,838		
	274,947				27,838		
	274,946				27,839		
<b>ENSAIO 13 (t<sub>on</sub>: 800; t<sub>off</sub>: 400)</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	263,315	263,316	0,000	Massa Inicial da Peça	42,055	42,056	0,000
	263,316				42,056		
	263,316				42,056		
	263,316				42,056		
Massa Final do Eletrodo	263,359	263,359	0,000	Massa Inicial da Peça	33,024	33,024	0,000
	263,359				33,024		
	263,359				33,024		
	263,358				33,025		
<b>ENSAIO 14 (t<sub>on</sub>: 800; t<sub>off</sub>: 200)</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	274,922	274,922	0,000	Massa Inicial da Peça	41,949	41,949	0,000
	274,922				41,949		
	274,922				41,949		
	274,923				41,948		
Massa Final do Eletrodo	274,946	274,946	0,001	Massa Inicial da Peça	30,983	30,983	0,001
	274,946				30,983		
	274,945				30,983		
	274,945				30,984		
<b>ENSAIO 15 (t<sub>on</sub>: 50; t<sub>off</sub>: 800)</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	264,381	264,380	0,001	Massa Inicial da Peça	43,291	43,291	0,001
	264,379				43,292		
	264,380				43,290		
	264,379				43,292		
Massa Final do Eletrodo	264,216	264,216	0,001	Massa Inicial da Peça	42,783	42,783	0,001
	264,218				42,784		
	264,215				42,784		

Fonte: O Autor

**Tabela E5 - Medições de massas durante a segunda etapa dos ensaios com INCONEL 718 (continuação)**

<b>ENSAIO 16 (<math>t_{on}</math>: 400; <math>t_{off}</math>: 400)</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	274,878	274,878	0,001	Massa Inicial da Peça	44,370	44,369	0,001
	274,878				44,370		
	274,877				44,368		
	274,877				44,368		
Massa Final do Eletrodo	274,888	274,887	0,001	Massa Inicial da Peça	37,249	37,249	0,001
	274,886				37,249		
	274,887				37,249		
	274,886				37,248		
<b>ENSAIO 17 (<math>t_{on}</math>: 800; <math>t_{off}</math>: 50)</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	263,155	263,154	0,000	Massa Inicial da Peça	44,353	44,353	0,000
	263,154				44,353		
	263,154				44,353		
	263,154				44,353		
Massa Final do Eletrodo	263,131	263,131	0,001	Massa Inicial da Peça	31,621	31,620	0,000
	263,130				31,620		
	263,130				31,620		
	263,131				31,620		
<b>ENSAIO 18 (<math>t_{on}</math>: 400; <math>t_{off}</math>: 200)</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	274,875	274,875	0,000	Massa Inicial da Peça	44,277	44,277	0,000
	274,875				44,277		
	274,875				44,277		
	274,874				44,276		
Massa Final do Eletrodo	274,912	274,912	0,001	Massa Inicial da Peça	34,357	34,357	0,000
	274,912				34,356		
	274,913				34,357		
	274,912				34,357		
<b>ENSAIO 19 (<math>t_{on}</math>: 200; <math>t_{off}</math>: 400)</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	263,132	263,133	0,000	Massa Inicial da Peça	44,211	44,211	0,001
	263,133				44,211		
	263,133				44,210		
	263,133				44,210		
Massa Final do Eletrodo	263,082	263,081	0,001	Massa Inicial da Peça	41,370	41,371	0,001
	263,080				41,371		
	263,081				41,371		
	263,081				41,371		

Fonte: O Autor

**Tabela E6 - Medições de massas durante a segunda etapa dos ensaios com INCONEL  
718 (continuação)**

<b>ENSAIO 20 (t<sub>on</sub>: 800; t<sub>off</sub>: 400)</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	274,898	274,898	0,001	Massa Inicial da Peça	44,382	44,383	0,001
	274,898				44,384		
	274,897				44,384		
	274,898				44,383		
Massa Final do Eletrodo	274,895	274,895	0,000	Massa Inicial da Peça	35,349	35,349	0,001
	274,895				35,349		
	274,895				35,348		
	274,895				35,348		
<b>ENSAIO 21 (t<sub>on</sub>: 400; t<sub>off</sub>: 400)</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	263,033	263,033	0,001	Massa Inicial da Peça	39,058	39,058	0,001
	263,033				39,058		
	263,032				39,057		
	263,032				39,057		
Massa Final do Eletrodo	263,038	263,038	0,001	Massa Inicial da Peça	30,572	35,349	0,001
	263,038				30,572		
	263,038				30,572		
	263,037				30,573		
<b>ENSAIO 22 (t<sub>on</sub>: 200; t<sub>off</sub>: 800)</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	274,861	274,861	0,001	Massa Inicial da Peça	44,328	44,328	0,001
	274,861				44,328		
	274,861				44,327		
	274,862				44,327		
Massa Final do Eletrodo	274,838	274,838	0,001	Massa Inicial da Peça	41,34	41,340	0,000
	274,838				41,34		
	274,838				41,34		
	274,837				41,34		
<b>ENSAIO 23 (t<sub>on</sub>: 800; t<sub>off</sub>: 50)</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	263,018	263,018	0,001	Massa Inicial da Peça	44,325	44,325	0,001
	263,018				44,325		
	263,018				44,324		
	263,019				44,324		
Massa Final do Eletrodo	263,028	263,028	0,001	Massa Inicial da Peça	31,824	31,824	0,001
	263,028				31,824		
	263,027				31,823		
	263,027				31,823		

Fonte: O Autor

**Tabela E7 - Medições de massas durante a segunda etapa dos ensaios com INCONEL 718 (continuação)**

<b>ENSAIO 24 (t<sub>on</sub>: 50; t<sub>off</sub>: 200)</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	274,814	274,814	0,000	Massa Inicial da Peça	44,21	44,211	0,001
	274,814				44,21		
	274,815				44,211		
	274,814				44,211		
Massa Final do Eletrodo	274,42	274,421	0,000	Massa Inicial da Peça	42,908	42,908	0,001
	274,421				42,908		
	274,421				42,908		
	274,421				42,907		
<b>ENSAIO 25 (t<sub>on</sub>: 50; t<sub>off</sub>: 800)</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	263,010	263,010	0,001	Massa Inicial da Peça	37,305	37,305	0,000
	263,009				37,305		
	263,010				37,304		
	263,009				37,305		
Massa Final do Eletrodo	262,837	262,837	0,001	Massa Inicial da Peça	36,727	36,727	0,001
	262,836				36,728		
	262,836				36,727		
	262,837				36,727		
<b>ENSAIO 26 (t<sub>on</sub>: 200; t<sub>off</sub>: 200)</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	274,411	274,411	0,000	Massa Inicial da Peça	38,986	38,986	0,001
	274,411				38,986		
	274,411				38,987		
	274,411				38,986		
Massa Final do Eletrodo	274,391	274,391	0,001	Massa Inicial da Peça	34,713	34,713	0,001
	274,390				34,712		
	274,390				34,714		
	274,391				34,713		
<b>ENSAIO 27 (t<sub>on</sub>: 200; t<sub>off</sub>: 800)</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	262,807	262,808	0,001	Massa Inicial da Peça	37,335	37,334	0,000
	262,809				37,334		
	262,808				37,334		
	262,808				37,334		
Massa Final do Eletrodo	262,801	262,801	0,000	Massa Inicial da Peça	35,879	35,878	0,000
	262,800				35,878		
	262,801				35,878		
	262,801				35,878		

Fonte: O Autor

**Tabela E8 - Medições de massas durante a segunda etapa dos ensaios com INCONEL 718 (continuação)**

<b>ENSAIO 28 (<math>t_{on}</math>: 50; <math>t_{off}</math>: 50)</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	274,351	274,351	0,000	Massa Inicial da Peça	39,062	39,063	0,001
	274,351				39,063		
	274,35				39,063		
	274,351				39,063		
Massa Final do Eletrodo	273,160	273,159	0,001	Massa Inicial da Peça	33,622	33,623	0,001
	273,159				33,622		
	273,158				33,623		
	273,158				33,623		
<b>ENSAIO 29 (<math>t_{on}</math>: 800; <math>t_{off}</math>: 200)</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	262,780	262,780	0,000	Massa Inicial da Peça	38,982	38,983	0,001
	262,780				38,983		
	262,780				38,983		
	262,779				38,982		
Massa Final do Eletrodo	262,789	262,788	0,001	Massa Inicial da Peça	29,788	29,789	0,001
	262,788				29,789		
	262,787				29,789		
	262,788				29,788		
<b>ENSAIO 30 (<math>t_{on}</math>: 50; <math>t_{off}</math>: 50)</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	273,131	273,130	0,001	Massa Inicial da Peça	39,007	39,008	0,001
	273,129				39,008		
	273,129				39,008		
	273,129				39,008		
Massa Final do Eletrodo	271,842	271,842	0,001	Massa Inicial da Peça	32,805	32,805	0,000
	271,841				32,805		
	271,843				32,806		
	271,842				32,805		
<b>ENSAIO 31 (<math>t_{on}</math>: 200; <math>t_{off}</math>: 200)</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	262,763	262,765	0,001	Massa Inicial da Peça	38,981	38,982	0,000
	262,765				38,982		
	262,765				38,982		
	262,765				38,982		
Massa Final do Eletrodo	262,82	262,820	0,001	Massa Inicial da Peça	35,369	35,369	0,001
	262,82				35,37		
	262,819				35,369		
	262,821				35,368		

Fonte: O Autor

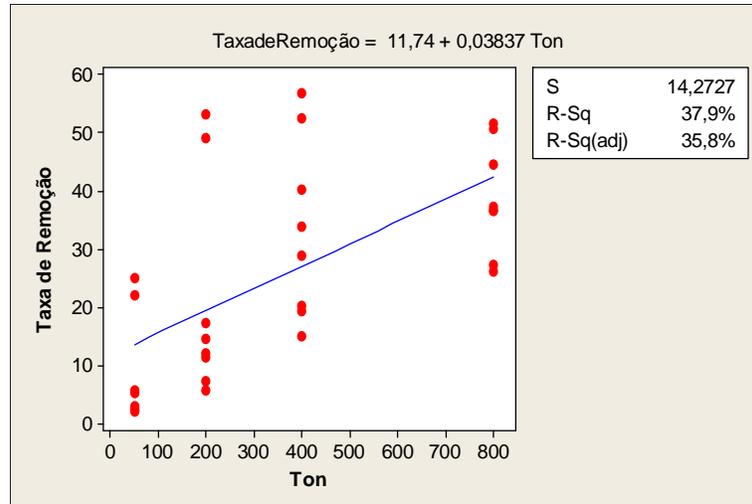
**Tabela E9 - Medições de massas durante a segunda etapa dos ensaios com INCONEL 718 (continuação)**

<b>ENSAIO 32 (t<sub>on</sub>: 200; t<sub>off</sub>: 400)</b>							
	Medidas	Média	Desvio Padrão		Medidas	Média	Desvio Padrão
Massa Inicial do Eletrodo	271,832	271,832	0,001	Massa Inicial da Peça	39,016	39,016	0,000
	271,831				39,016		
	271,831				39,016		
	271,832				39,015		
Massa Final do Eletrodo	271,816	271,816	0,001	Massa Inicial da Peça	37,201	37,201	0,000
	271,817				37,202		
	271,816				37,201		
	271,816				37,201		

Fonte: O Autor

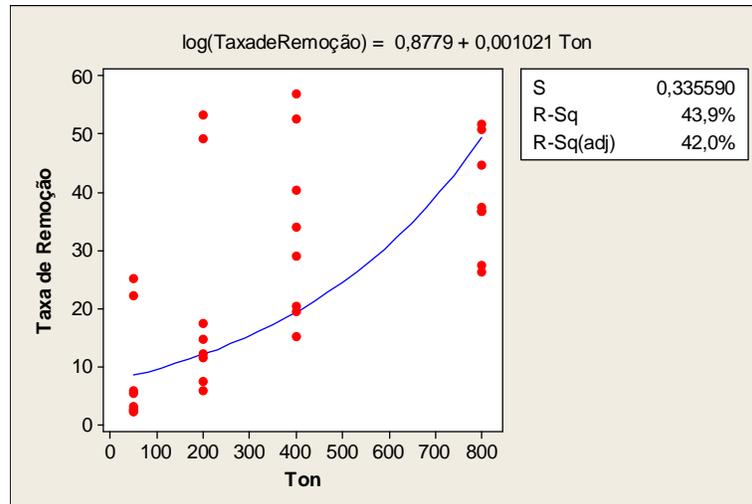
## APÊNDICE F

Figura F1- Gráfico da Regressão Linear dos Dados da Taxa de Remoção x  $t_{on}$



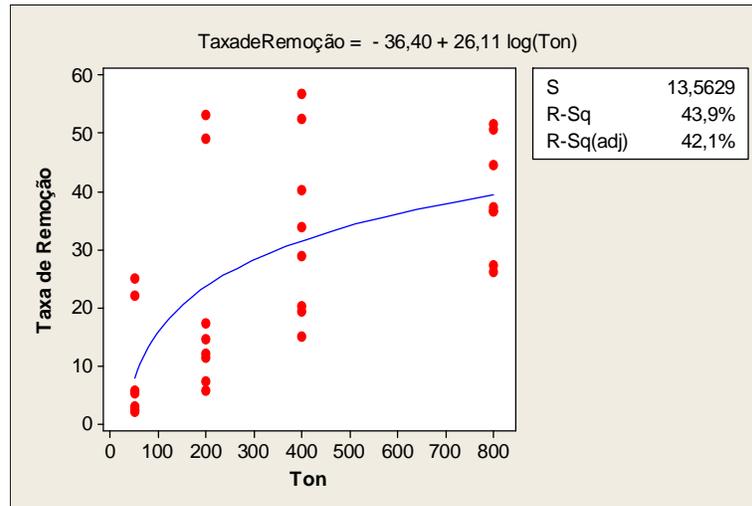
Fonte: O Autor

Figura F2 - Gráfico da Regressão Linear dos Dados, com Ajuste Logarítmico em y, da Taxa de Remoção x  $t_{on}$



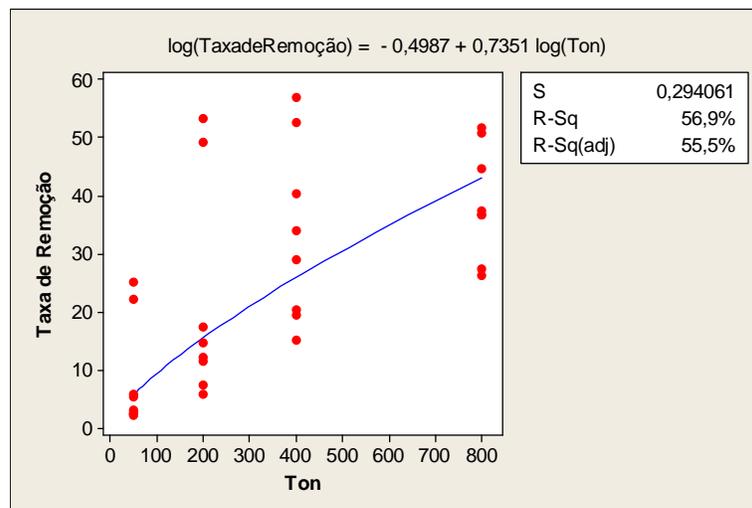
Fonte: O Autor

**Figura F3 - Gráfico da Regressão Linear dos Dados, com Ajuste Logarítmico em x, da Taxa de Remoção x  $t_{on}$**



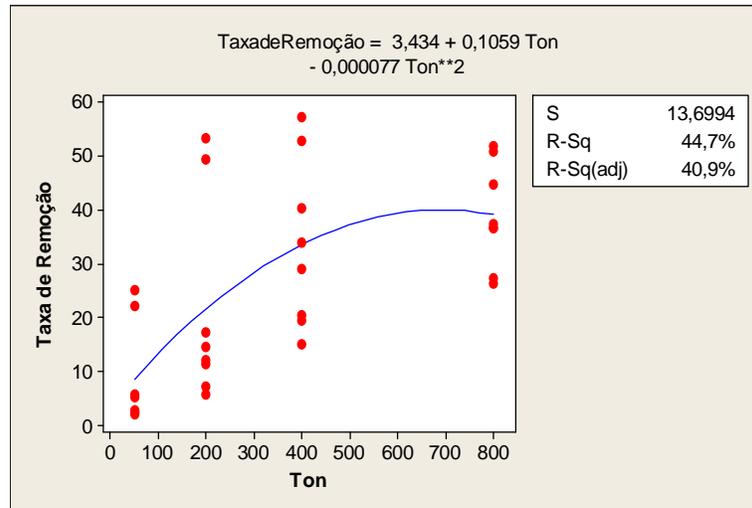
Fonte: O Autor

**Figura F4 - Gráfico da Regressão Linear dos Dados, com Ajuste Logarítmico em x e y, da Taxa de Remoção x  $t_{on}$**



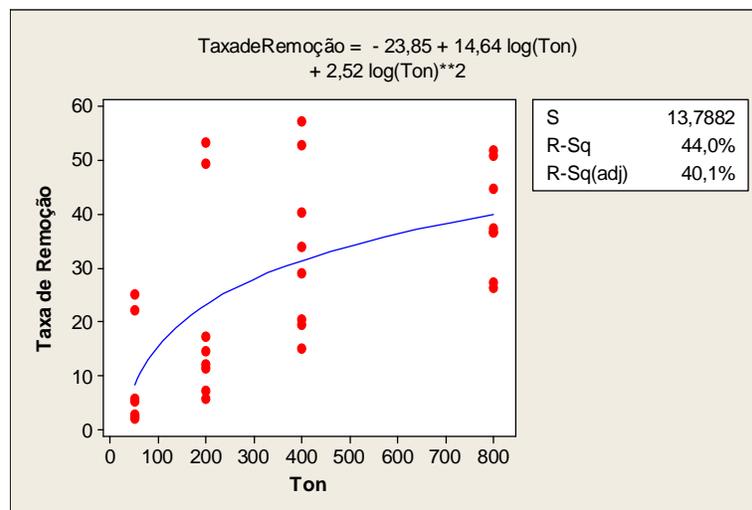
Fonte: O Autor

**Figura F5 - Gráfico da Regressão Quadrática dos Dados da Taxa de Remoção x  $t_{on}$**



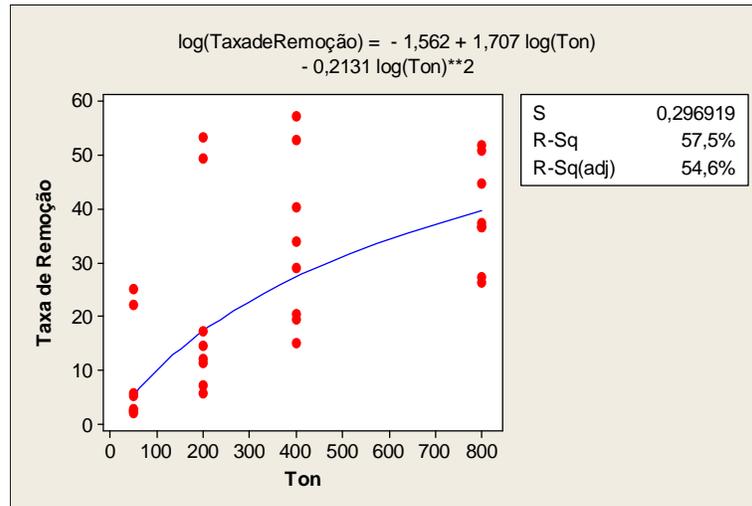
Fonte: O Autor

**Figura F6 - Gráfico da Regressão Quadrática dos Dados, com Ajuste Logarítmico em x, da Taxa de Remoção x  $t_{on}$**



Fonte: O Autor

Figura F7 - Gráfico da Regressão Quadrática dos Dados, com Ajuste Logarítmico em x e y, da Taxa de Remoção x  $t_{on}$



## APÊNDICE G

**Tabela G1 - Quantidade de Pulsos, Volume Removido por Pulso e Taxa de Erosão da 2ª  
Etapa de Ensaios com o INCONEL 718**

$t_{on}$ ( $\mu s$ )	$t_{off}$ ( $\mu s$ )	Q	TR ( $mm^3/min$ )	VR ( $10^{-4} mm^3$ )	$T_e$ ( $10^{-6} mm^3/\mu s$ )
50	50	18.000.000	22,142	0,37	0,37
50	50	18.000.000	25,244	0,42	0,42
50	200	7.200.000	5,777	0,24	0,10
50	200	7.200.000	5,302	0,22	0,09
50	400	4.000.000	2,997	0,22	0,05
50	400	4.000.000	2,694	0,20	0,04
50	800	2.117.647	2,068	0,29	0,03
50	800	2.117.647	2,350	0,33	0,04
200	50	7.200.000	49,259	2,05	0,82
200	50	7.200.000	53,296	2,22	0,89
200	200	4.500.000	17,392	1,16	0,29
200	200	4.500.000	14,704	0,98	0,25
200	400	3.000.000	11,558	1,16	0,19
200	400	3.000.000	7,385	0,74	0,12
200	800	1.800.000	12,159	2,03	0,20
200	800	1.800.000	5,926	0,99	0,10
400	50	4.000.000	52,767	3,96	0,88
400	50	4.000.000	57,108	4,28	0,95
400	200	3.000.000	34,082	3,41	0,57
400	200	3.000.000	40,374	4,04	0,67
400	400	2.250.000	28,979	3,86	0,48
400	400	2.250.000	15,096	2,01	0,25
400	800	1.500.000	19,541	3,91	0,33
400	800	1.500.000	20,485	4,10	0,34
800	50	2.117.647	51,822	7,34	0,86
800	50	2.117.647	50,879	7,21	0,85
800	200	1.800.000	44,630	7,44	0,74
800	200	1.800.000	37,420	6,24	0,62
800	400	1.500.000	36,758	7,35	0,61
800	400	1.500.000	36,771	7,35	0,61
800	800	1.125.000	26,314	7,02	0,44
800	800	1.125.000	27,486	7,33	0,46

Fonte: O Autor