

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ



LEANDRO JOSÉ STEDILE

**Avaliação de Classes de Eletrodo de Grafita
na Eletroerosão por Penetração da Liga Ti6Al4V**

**MESTRADO EM
ENGENHARIA MECÂNICA
PUCPR**



**CURITIBA
DEZEMBRO - 2009**

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ



LEANDRO JOSÉ STEDILE

**Avaliação de Classes de Eletrodo de Grafita
na Eletroerosão por Penetração da Liga Ti6Al4V**

Dissertação apresentada como requisito parcial
à obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica, do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, do Centro de Ciências
Exatas e de Tecnologia, da Pontifícia
Universidade Católica do Paraná – PUCPR.

Orientador: Prof. Dr.Eng. Fred Lacerda Amorim

Co-Orientador: Prof. Ricardo Diego Torres, Ph.D.

CURITIBA

DEZEMBRO – 2009

Dados da Catalogação na Publicação
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/PUCPR
Biblioteca Central

S812a
2009 Stedile, Leandro José
Avaliação de classes de eletrodo de grafita na eletroerosão por penetração da liga Ti6Al4V / Leandro José Stedile ; orientador, Fred Lacerda Amorim ; co-orientador, Ricardo Diego Torres. – 2009.
71 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2009
Bibliografia: f. 62-64

1. Titânio. 2. Ligas de titânio. 3. Usinagem por eletroerosão. I. Amorim, Fred Lacerda. II. Torres, Ricardo D., 1961-. III. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD 20, ed. – 621

Biblioteca Central
Avaliação de classes de eletrodo de grafita na
Ac. 275406 - R. 847955 Ex. 1
Doação - Doação
30/03/2011

TERMO DE APROVAÇÃO

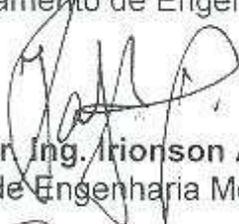
Leandro José Steidle

Avaliação de Classes de Eletrodo de Grafita na Eletroerosão por Penetração da Liga Ti6AL4V

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



Prof. Dr. - Ing. Walter Lindolfo Weingaertner
(Departamento de Engenharia Mecânica)



Prof. Dr. Ing. Irionson Antonio Bassani
Curso de Engenharia Mecânica, (PUCPR)



Prof. Dr. Ricardo Diego Torres
Curso de Engenharia Mecânica, (PUCPR – Co-orientador)



Presidente: **Prof. Dr. Fred Lacerda Amorim**, (Orientador)
Curso de Engenharia Mecânica, (PUCPR - Orientador)

Curitiba, 17 de dezembro de 2009

*Aos meus pais,
Ana Maria G. Stedile e Ambrosio Stedile,
que sempre me deram apoio para trilhar este caminho.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por terem me proporcionado à oportunidade de estudar e darem apoio em todas as etapas de minha vida. Sempre me incentivaram a nunca desistir de meus sonhos mesmo quando pareciam impossíveis.

A minha irmã, Francielen Stedile, por ter estado ao meu lado nestes 26 anos.

A minha namorada Mariana de Abreu Rocco, por ter tido paciência e ter partilhado momentos de conversas e carinhos.

Agradeço a Elidia F. Gelinski e a José Gelinski, meus avós queridos. Onde quer que estejam, tenho certeza que estão sempre orando por mim.

Agradeço ao prof. Dr. Fred Lacerda Amorim por ter dedicado tempo, atenção e esforço para me auxiliar durante a elaboração desta dissertação.

Agradeço também aos professores do curso de Mestrado da PUC-PR, prof. Dr. Irionson Bassani, prof. Dr. Ricardo Diego Torres e ao prof. Dr. Paulo César Soares Júnior, pelas aulas e conhecimentos que me foram transmitidos.

Agradeço ao coordenador do PPGEM prof. Dr. Nathan Mendes, Jane Marques da Rocha, e a todos os funcionários da PUCPR que me ajudaram direta ou indiretamente na conclusão desta dissertação.

*"Queira! Basta ser sincero e desejar profundo.
Você será capaz de sacudir o mundo." Raul Seixas*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xi
SIMBOLOGIA	xiii
RESUMO	xiv
ABSTRACT.....	xv
1. Introdução	1
2. Titânio	3
2.1 Titânio e Ligas de Titânio	3
2.2 Ligas de Titânio $\alpha + \beta$	4
2.3 Aplicações da liga de Titânio Ti6Al4V	6
2.4 Usinabilidade das ligas de titânio	8
3. Fundamentos do processo de eletroerosão	9
3.1 Fundamentos do fenômeno físico de uma descarga	9
3.1.1 Fase de ignição	10
3.1.2 Formação do canal de plasma	10
3.1.3 Fusão e evaporação de material nos eletrodos	11
3.1.4 Ejeção do material fundido	12
3.2 Principais parâmetros de controle do Processo	14
3.2.1 Influência dos parâmetros do processo	15
3.2.3 Materiais para Eletrodos na EDM por penetração	16
4. Procedimento experimental	20
4.1 Esquema experimental geral	20
4.2 Técnicas de quantificação e caracterização dos resultados	25
4.2.1 Taxa de remoção de material V_w e desgaste volumétrico relativo ϑ	25
4.2.2 Avaliação da integridade da superfície de trabalho	26
5. Resultados	28
5.1 Planejamento experimental para o regime de desbaste da liga Ti6Al4V	28
5.2 Erodibilidade da liga Ti6Al4V sob condições de desbaste	29
5.2.1 Taxa de remoção V_w e o desgaste volumétrico relativo ϑ	29
5.2.2 Rugosidade das amostras obtidas por EDM em regime de desbaste	33
5.2.3 Integridade da superfície das amostras após EDM de desbaste	34
5.2.4 XRD das amostras após EDM de desbaste	37
5.3 Planejamento experimental para o regime de semi-acabamento da liga Ti6Al4V	40

5.4 Erodibilidade da liga Ti6Al4V sob condições de semi-acabamento.....	41
5.4.1 Taxa de remoção V_w e o desgaste volumétrico relativo $\bar{\vartheta}$	41
5.4.2 Rugosidade das amostras obtidas por EDM em regime de semi-acabamento	43
5.4.3 Integridade da superfície das amostras após EDM de semi-acabamento.....	44
5.4.4 XRD das amostras após EDM de semi-acabamento	45
5.5 Planejamento experimental para o regime de acabamento da liga Ti6Al4V	48
5.6 Erodibilidade da liga Ti6Al4V sob condições de acabamento	49
5.6.1 Taxa de remoção V_w e o desgaste volumétrico relativo $\bar{\vartheta}$	49
5.6.2 Rugosidade das amostras após EDM de acabamento	51
5.6.3 Integridade da superfície das amostras após EDM de acabamento	51
5.6.4 XRD das amostras após EDM de acabamento	55
6. Conclusões	58
6.1 Erodibilidade da liga Ti6Al4V utilizando eletrodos-ferramenta de grafita de diferentes tamanhos de partículas.....	58
6.2 Recomendações para futuros trabalhos de pesquisa.....	61
7. Referências Bibliográficas	62
APÊNDICE 1	65
APÊNDICE 2	67
APÊNDICE 3	68
APÊNDICE 4	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Componentes fabricados com Ti6Al4V.....	7
Figura 3.1 - Fases de uma descarga elétrica no processo de EDM	10
Figura 3.2 - Representação esquemática da faísca elétrica, destacando a forma do canal de plasma. O fluxo de calor nas superfícies do catodo e do anodo está representado por q_c e q_a , sendo r_a e r_c os raios das cavidades fundidas no anodo e catodo.....	12
Figura 3.3 - Micrografia ótica de aço <i>White layer</i>	13
Figura 3.4 - Evolução da tensão e corrente elétricas durante a descarga de uma faísca, apresentando em destaque os principais parâmetros de controle do processo	14
Figura 4.1 - Modelo esquematizado do plano geral de desenvolvimento dos ensaios	21
Figura 4.2 - Esquema do comportamento da corrente de descarga segundo o modo de atuação do gerador de pulsos retangulares	23
Figura 5.1 - Taxa de remoção V_w da liga Ti6Al4V para usinagem de desbaste com i_e de 32 A e utilização de eletrodo-ferramenta de grafita de 3; 10 e 15 μm de tamanho de partícula	30
Figura 5.2 - Comportamento do desgaste relativo δ da liga Ti6Al4V sob usinagem de desbaste com eletrodos-ferramenta de grafita	32
Figura 5.3 - Comportamento da rugosidade das amostras após EDM em função da variação da duração da descarga e da relação de contato para corrente de 32 A	33
Figura 5.4 - Micrografia da seção transversal de uma amostra da liga de titânio Ti6Al4V usinada em condição de desbaste	35
Figura 5.5 - Comportamento da microdureza Vickers [HV] na usinagem de desbaste da liga Ti6Al4V a partir da camada limite material base da liga, com corrente de descarga de 32 A e eletrodos de grafita com 3, 10 e 15 μm	36
Figura 5.6 Difratoograma de RX das amostras de Ti6Al4V após EDM de desbaste. (A) Eletrodo de grafita de 3 μm , (B) Eletrodo de grafita de 10 μm e (C) Eletrodo de grafita de 15 μm	38
Figura 5.7 - Taxa de remoção V_w da liga Ti6Al4V para corrente $i_e = 12$ A, para usinagem com polaridade negativa do eletrodo-ferramenta e tamanho de partícula = 3, 10 e 15 μm	41

Figura 5.8 – Desgaste relativo δ da liga Ti6Al4V para corrente $i_c = 12 \text{ A}$ para usinagem com polaridade negativa do eletrodo-ferramenta de grafita.....	42
Figura 5.9 – Comportamento da rugosidade das amostras após EDM em função da variação da duração da descarga para corrente de 12 A	43
Figura 5.10 - Micrografia da seção transversal de uma amostra da liga de titânio Ti6Al4V usinada em condição de semi-acabamento	44
Figura 5.11 – Comportamento da microdureza Vickers [HV] na usinagem de semi-acabamento da liga Ti6Al4V a partir da camada limite até o material base da liga, com corrente de descarga de 12 A e eletrodos de grafita com 3, 10 e 15 μm	45
Figura 5.12 Difratoograma de RX das amostras de Ti6Al4V após EDM de semi-acabamento. (A) Eletrodo de grafita de 3 μm , (B) Eletrodo de grafita de 10 μm e (C) Eletrodo de grafita de 15 μm	47
Figura 5.13 - Taxa de remoção V_w da liga Ti6Al4V para corrente $i_c = 3 \text{ A}$, para usinagem com polaridade negativa do eletrodo-ferramenta e tamanho de partícula = 3, 10 e 15 μm	49
Figura 5.14 – Desgaste relativo δ da liga Ti6Al4V para corrente $i_c = 3 \text{ A}$ para usinagem com polaridade negativa do eletrodo-ferramenta de grafita.....	50
Figura 5.15 – Comportamento da rugosidade das amostras após EDM em função da variação da duração da para corrente de 3A	51
Figura 5.16 - Micrografia da seção transversal de uma amostra da liga de titânio Ti6Al4V usinada em condição de acabamento	52
Figura 5.17 - Micrografia da seção transversal de uma amostra da liga de titânio Ti6Al4V usinada em condição de acabamento	53
Figura 5.18 – Comportamento da microdureza Vickers [HV] na usinagem de acabamento da liga Ti6Al4V a partir da camada limite até o material base da liga, com corrente de descarga de 3 A e eletrodos de grafita com 3, 10 e 15 μm	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Elementos de liga (α e β estabilizante)	5
Tabela 2.2 - Composição química da liga de titânio Ti6Al4V	6
Tabela 2.3 - Propriedades físicas do Ti6Al4V	6
Tabela 2.4 - Propriedades mecânicas do Ti6Al4V	6
Tabela 3.1 - Classificação da grafita de acordo com o tamanho de grão	18
Tabela 4.1 - Parâmetros elétricos utilizados nos ensaios de rendimento	23
Tabela 4.2 - Propriedades físicas e termofísicas da grafita	24
Tabela 5.1 - Parâmetros elétricos de processo para os ensaios sob condições de usinagem de desbaste da liga Ti6Al4V	28
Tabela 5.2 - Microdureza [HV] para a liga Ti6Al4V usinado sob condições ótimas de desbaste.....	36
Tabela 5.3 - Parâmetros elétricos de processo para os ensaios sob condições de usinagem de semi-acabamento da liga Ti6Al4V.....	45
Tabela 5.4 - Microdureza [HV] para a liga Ti6Al4V usinado sob condições ótimas de semi-acabamento	48
Tabela 5.5 - Parâmetros elétricos de processo para os ensaios sob condições de usinagem de acabamento da liga Ti6Al4V.....	48
Tabela 5.6 - Microdureza [HV] para a liga Ti6Al4V usinado sob condições de melhor Rugosidade R_a	53
Tabela 6.1 - Condições ótimas dos parâmetros para regime de desbaste.....	59
Tabela 6.2 - Condições ótimas dos parâmetros para regime de semi-acabamento.....	59
Tabela 6.3 - Condições ótimas dos parâmetros para regime de acabamento.....	59

SIMBOLOGIA

Alfabeto Latino

W_e	energia utilizada	[J]
V_w	taxa de remoção de material	[mm ³ /min]
V_e	taxa de desgaste	[mm ³ /min]
\hat{u}_i	tensão em aberto	[V]
u_e	tensão média da descarga	[V]
U	tensão média de trabalho	[V]
t_d	tempo de retardo de ignição	[μ s]
t_e	duração da descarga	[μ s]
t_i	duração do pulso de tensão	[μ s]
t_0	tempo de intervalo entre dois sucessivos pulsos de tensão t_i	[μ s]
t_p	tempo do período do ciclo de uma descarga	[μ s]
i_e	corrente média durante a descarga	[A]
R_a	média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade, em relação à linha média, dentro do percurso de medição	[μ m]
R_z	média aritmética dos cinco valores da rugosidade parcial Z_i	[μ m]

Alfabeto Grego

τ	relação de contato
$\hat{\phi}$	desgaste volumétrico relativo

RESUMO

O titânio e suas ligas apresentam uma crescente aplicação no ambiente industrial devido as suas excelentes propriedades como, por exemplo, alta resistência à corrosão, resistência a altas temperaturas e elevada resistência ao desgaste. Deste modo, as ligas de titânio são amplamente utilizadas nas áreas aeroespacial, biomédica, ambientes altamente corrosivos etc. Porém, o titânio e suas ligas apresentam alta reatividade química com a maioria das ferramentas de corte de geometria definida, além disso, possui baixa condutividade térmica e alta resistência mecânica. Estas características fazem com que as ligas de titânio sejam difíceis de serem trabalhadas pelos processos convencionais de usinagem. A eletroerosão (*Electrical Discharge Machining* – EDM) é um processo de usinagem não convencional que utiliza a conversão de energia elétrica em energia térmica para a remoção de material da peça. Deste modo, as propriedades mecânicas do material da peça não exercem influência na usinagem por eletroerosão. Porém, as propriedades termofísicas do material são extremamente influentes no rendimento da usinagem por EDM. Este trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho de eletrodos de grafita, com diferentes tamanhos de grão (3, 10 e 15 μm), no processo de eletroerosão por penetração em regime de desbaste, semi-acabamento e acabamento da liga de titânio Ti6Al4V. Como variáveis independentes de entrada foram avaliadas a duração da descarga, a corrente de descarga e a polaridade do eletrodo. O rendimento do processo foi avaliado pela taxa de remoção do material da peça, desgaste volumétrico relativo e rugosidade das peças. Aspectos da integridade da superfície das peças eletroerodidas em se tratando de espessura da camada ressolidificada (*recast layer*), micro fissuras, poros e microdureza foram também analisados. O presente trabalho sugere condições econômicas de usinagem para EDM da Liga Ti6Al4V para as classes de grafita ensaiadas sob condições usinagem de desbaste, semi-acabamento e acabamento.

ABSTRACT

The titanium and its alloys have an increasing application in industrial environment due to its excellent properties such as high resistance to corrosion, resistance to high temperatures and high wear resistance. Thus, the titanium alloys are widely used in the aerospace, biomedical, highly corrosive environments. However, titanium and its alloys have high chemical reactivity with most of the tools for cutting geometry set, in addition, has low thermal conductivity and high mechanical strength. These characteristics mean that the titanium alloys are difficult to be worked by conventional machining processes. The Electrical Discharge Machining - EDM is a non-conventional machining process that uses the conversion of electrical energy into heat energy to remove material from the piece. The mechanical properties of the material of the piece does not influence the machining by EDM. However, the properties of the material are extremely influential in the efficiency of the machining by EDM. This study aimed to evaluate the performance of graphite electrodes with different grain sizes (3, 10 and 15 μm) in the process of penetration by EDM under finishing, semi-finishing and roughing of the titanium alloy Ti6Al4V. As independent variables were assessed for entry to the duration of discharge, and discharge current of the electrode polarity. The efficiency of the process was evaluated by the rate of removal of material, volumetric relative wear and surface roughness. Aspects of surface integrity in the case of thickness of surface recast layer, micro cracks, pores and micro hardness were also analyzed. This paper suggests economic conditions for EDM machining of Ti6Al4V Alloy for classes of graphite tested under roughing machining, semi-finishing and finishing.

CAPÍTULO I

Introdução

O titânio e suas ligas são materiais amplamente utilizados na indústria aeroespacial, na área médica para a produção de implantes e componentes cirúrgicos, além de outras importantes aplicações industriais e comerciais como, por exemplo, indústria de refinamento de petróleo, processamento químico e processamento de alimentos, dentre outras. [MYERS,1984]. A extensiva utilização do titânio e suas ligas estão relacionadas às suas excelentes propriedades como, por exemplo, baixa massa específica e uma resistência mecânica similar a dos aços. Além disso, as ligas de titânio possuem elevada resistência ao calor e à corrosão e, quando comparado às outras ligas especiais, apresentam um número muito maior de aplicações na indústria. [ASM Handbook, 1993].

Apesar do crescente aumento na produção e na aplicação do titânio e suas ligas, esses materiais são caros quando comparados a outros materiais. Isto se deve, em parte, a complexidade do processo de extração do titânio, a dificuldade de fusão desse material e a problemas relacionados à usinagem e a outros processos de fabricação de peças de titânio [BOMBERGER et al, 1984]. Métodos de fabricação near-net-shape tais como fundição, forjamento e metalurgia do pó têm sido introduzidos a fim de reduzir os custos de fabricação de componentes de titânio [CHEN, 1982]. No entanto, a maioria das peças de titânio, para diversas aplicações, é produzida por processos de usinagem convencionais, a saber: furação, fresamento, torneamento, retificação etc. [KAHLES,1985].

Porém, a usinabilidade do titânio e de suas ligas, pelas técnicas convencionais, é considerada geralmente ruim, devido a várias propriedades intrínsecas do titânio. [ZNIDARSIC, 1996]. A baixa condutividade térmica do titânio eleva consideravelmente a temperatura na interface ferramenta/peça, fato que afeta a vida da ferramenta de várias formas. O titânio é altamente reativo quimicamente com a maioria das ferramentas de corte, aspecto que possibilita adesão de material na ferramenta durante a usinagem, promovendo falha prematura da ferramenta. Além disto, a alta resistência mecânica e o baixo módulo de elasticidade do titânio e de suas ligas a altas temperaturas também afetam de modo negativo sua usinabilidade. Entretanto, técnicas especiais de usinagem convencional e outros processos de usinagem não-convencional podem ser utilizados como métodos alternativos para melhorar o rendimento da usinagem do titânio e suas ligas. [EZUGWU, 1995].

A eletroerosão (Electrical Discharge Machining – EDM) é um processo de usinagem não-convencional que utiliza a conversão de energia elétrica em calor para a remoção de material da peça. Desse modo, a erodibilidade de um material apresenta muito pouca dependência de suas propriedades mecânicas, ao contrário das técnicas convencionais de usinagem. O rendimento da EDM é fundamentalmente dependente das propriedades termofísicas do eletrodo e da peça a ser usinada. A EDM tem sido aplicada na usinagem de ligas ferrosas e não-ferrosas, materiais cerâmicos condutores de eletricidade, materiais compósitos e ligas especiais [K.H. Ho, 2003]. Para estes materiais as principais áreas de pesquisa mundial em usinagem por eletroerosão estão relacionadas aos seguintes temas: (i) parâmetros de rendimento do processo, (ii) integridade da superfície usinada, (iii) técnicas de controle e monitoramento do processo, (iv) efeito dos parâmetros não elétricos no rendimento da usinagem, (v) projeto e fabricação de eletrodos, dentre outros temas de perspectivas futuras [N.M. 2007].

Em se tratando da eletroerosão de ligas de titânio existe uma relativa carência de pesquisa relacionada à otimização de parâmetros de processo para diferentes tipos de materiais de eletrodo, além de estudos sobre aspectos como, por exemplo, investigação de características de integridade da camada limite [AHMET et.al. 2007]. Em função dos argumentos supracitados o presente trabalho propõe a investigação experimental das influências dos parâmetros elétricos e não-elétricos do processo de eletroerosão por penetração na liga de titânio Ti6Al4V, utilizando diferentes classes especiais de grafita como material do eletrodo. O objetivo é estabelecer condições econômicas de usinagem para operações de desbaste, semi-acabamento e acabamento para o par de materiais grafita/Ti6Al4V, além de avaliar de modo aprofundado a integridade da superfície usinada das peças ensaiadas.

CAPÍTULO II

Titânio

Ligas e compósitos formados a partir do titânio possuem características que o tornam o quarto material mais utilizado na indústria a nível mundial, além de ser o nono elemento mais abundante na superfície da Terra. [DOMACHIE, M.J. 1998]. Neste sentido, com a finalidade de argumentar sobre as vantagens de utilização de ligas de titânio, em especial a liga Ti6Al4V, este capítulo aborda algumas considerações básicas sobre o titânio e suas ligas, propriedades e aplicações da liga de titânio Ti6Al4V.

2.1. Titânio e Ligas de Titânio

Titânio foi reconhecido como um elemento há 200 anos. Porém somente nos últimos 40 anos este metal ganhou importância econômica e industrial. Os desenvolvimentos das ligas de titânio progrediram rapidamente. Os efeitos benéficos da adição de alumínio foram primeiramente descobertos e logo comercializados. As primeiras ligas de titânio utilizadas foram a liga Ti6Al4V e a liga Ti5Al2.5Sn. A liga de titânio Ti6Al4V, em fato, representa mais da metade, em utilização, de todas as ligas de titânio. O titânio, devido a sua reatividade com o oxigênio no ar, na água ou em qualquer outro eletrólito, é submetido à formação espontânea de uma camada limite de óxido, o que torna este material inerte em meios ácidos. Este fato amplia ainda mais o espectro de utilização deste material, como na indústria metal - mecânica, por exemplo. [ASM Handbook, 1993].

O rápido crescimento da indústria do titânio deu-se em função de suas propriedades físicas e químicas como alto limite de resistência e resistência à corrosão. Com densidade de aproximadamente 55% a densidade do aço, as ligas de titânio são amplamente utilizadas em inúmeros componentes, incluindo aplicações em centrais energéticas nucleares, em fábricas de tratamento de alimentos, em trocadores de calor em refinarias de petróleo, em componentes marinhos, e nas próteses médicas. Entretanto, o custo elevado dos componentes feitos de ligas de titânio pode limitar seu uso às aplicações, sendo substituídas por ligas mais baratas, tais como os aços inoxidáveis. O custo relativamente elevado é frequentemente resultado do custo intrínseco da matéria-prima do metal, dos custos de fabricação, e dos custos da remoção do metal. Em consequência, um esforço substancial tem-se centrado nos últimos anos sobre o desenvolvimento de tecnologias de usinagem do titânio e suas ligas. [ASM Handbook, 1993].

As ligas de titânio são usadas geralmente para componentes, que exigem grande confiabilidade, e conseqüentemente, a integridade da superfície usinada deve ser mantida. Durante as operações de usinagem, a superfície das ligas titânio é danificada facilmente devido a sua difícil usinagem. O calor gerado durante o corte é uma fonte principal de dano, especialmente em processos convencionais onde existe o contato direto da ferramenta sobre a peça. As alterações da camada limite incluem: deformação plástica, micro fissuras, transformações da fase e tensões residuais. [CHE-HARONA,2004].

Embora tenha havido um grande avanço no desenvolvimento dos materiais para ferramentas de corte, que melhoraram significativamente a usinabilidade de um grande número de materiais metálicos, nenhum desenvolvimento equivalente foi realizado para as ligas de titânio. Ferramentas de corte de carbeto de tungstênio continuam a manter sua superioridade em quase todos os processos em relação à usinagem das ligas titânio, enquanto a aplicação de revestimento por CVD não substituiu os carbetos cementados devido a sua reatividade com o titânio e a sua baixa dureza a fratura assim como uma baixa condutibilidade térmica. Apesar dos fatores, a maioria das peças de titânio ainda são manufaturadas por métodos convencionais. [EZUGWU, 1995].

2.2 Ligas de Titânio α + β

Titânio existe em duas formas cristalinas CCC (cúbica de corpo centrada) e HC (hexagonal compacta). A temperatura ambiente, não ligado (titânio puro), o titânio apresenta uma forma hexagonal compacta (HC), estrutura cristalina referida como fase alfa (α). A temperatura de 883°C (1621°F) o titânio se transforma em uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), estrutura cristalina conhecida como fase beta (β). Alguns elementos apresentam grande solubilidade na estrutura hexagonal compacta (fase α) e na estrutura cúbica de corpo centrado (fase β). Estes elementos ajudam a estabilizar a fase α formando uma solução intersticial com o titânio. Metais de transição como molibdênio, nióbio e vanádio atuam como estabilizadores da fase β . Os elementos como alumínio e ferro são estabilizadores da fase α . A manipulação destas variações cristalográficas é realizada através da adição de elementos de liga (Tabela 2.1) e processos termomecânicos que propiciam uma grande variedade de ligas de titânio classificadas como: ligas α ; ligas β e ligas de titânio α + β . [ASM Handbook, 1993].

Tabela 2.1 - Elementos de liga (α e β estabilizante)

Elemento de liga	%	Efeito na estrutura cristalina
Alumínio	2 a 7	α estabilizante
Vanádio	2 a 20	β estabilizante
Molibdênio	2 a 20	β estabilizante
Cromo	2 a 12	β estabilizante
Cobre	2 a 6	β estabilizante

- Ligas α contêm elementos como o alumínio entre outros. Este α estabilizante inibe a mudança de fase (aumento na temperatura da mudança de fase). Ligas α geralmente têm resistência ao arrastamento superior as ligas β e são idealmente utilizados a altas temperaturas. A ausência de uma transição dúctil-frágil, característica das ligas β , fazem das ligas α apropriadas para aplicações criogênicas. Ligas α são caracterizadas por boa resistência mecânica, tenacidade e boa soldabilidade, porém ruins em forjabilidade quando comparados com as ligas de titânio β . Esta última característica resulta em uma grande tendência a defeitos em forjamento. Pequenas reduções e freqüente reaquecimento podem minimizar estes defeitos. [ASM Handbook, 1993].

- Ligas $\alpha + \beta$ têm composição que contém uma mistura de fases $\alpha + \beta$ e pode conter entre 10 e 50% a fase β a temperatura ambiente. As ligas $\alpha + \beta$ possuem geralmente boa forjabilidade e sua liga mais utilizada é a Ti6Al4V.

- Ligas β contêm elementos de transição como vanádio, nióbio e molibdênio, elementos que reduzem a temperatura de transição entre a fase α e β e assim promove o desenvolvimento da fase cúbica de corpo centrado (CCC – fase β). Possuem excelente forjabilidade abaixo da temperatura de forjamento das ligas α , e ligas β são conformáveis a frio. Respondem rapidamente a tratamento térmico. O tratamento térmico comum envolve o tratamento da liga seguido de envelhecimento em temperaturas de 450 a 650°C (850 a 1200 °F). O resultado deste tratamento é a formação do dispersado α no retido β . [ASM Handbook, 1993].

2.3 Aplicações da liga de Titânio Ti6Al4V

A liga de titânio mais comum é a Ti6Al4V, onde a composição química, propriedades físicas e propriedades mecânicas estão descritas na Tabela 2.2, na Tabela 2.3 e na Tabela 2.4 respectivamente. [ASM Handbook, 1993].

Tabela 2.2 - Composição química da liga de titânio Ti6Al4V

Composição química (%)						
N	C	Fe	O	Al	V	Ti
0,05	0,10	0,3	0,2	6	4	Restante

Tabela 2.3 - Propriedades físicas do Ti6Al4V

Propriedades Físicas		
Densidade	4,42	g/cm ³
Ponto de fusão	1649	°C
Calor específico	560	J/Kg. °C
Resistividade elétrica	170	Ohm.cm
Condutividade térmica	7,2	W/m.K

Tabela 2.4 - Propriedades mecânicas do Ti6Al4V

Propriedades Mecânicas		
Limite de resistência	897 - 1000	MPa
Módulo de elasticidade	114	GPa
Dureza	36	HRC

As aplicações aeroespaciais, incluindo o uso em componentes estruturais (fuselagem) e em motores de jato era a principal utilização desta liga. O titânio, na verdade, era um material utilizado quase em sua totalidade, na área aeroespacial. Outras áreas têm começado a ser

exploradas recentemente, algumas estão em estágios de desenvolvimento, enquanto outras estão usando ou começando a usar quantidades significativas das ligas de titânio. Pode-se citar:

- Aplicações onde o titânio é usado devido a sua resistência à corrosão, tal como processos químicos, indústria de papel, aplicações marinhas, e produção e armazenamento de energia. A resistência à corrosão do titânio é baseada na formação de uma camada estável, protetora, de óxido. Embora o titânio seja um metal altamente reativo, o titânio igualmente tem afinidade elevada ao oxigênio que forma uma película de óxido protetora altamente aderente em sua superfície. Esta película de óxido se forma espontaneamente, e imediatamente, quando a superfície do metal é exposta ao ar e/ou à umidade. Na natureza, a composição e a espessura dos óxidos na superfície do material, dão forma às ligas de titânio. Na maioria dos ambientes aquosos, o óxido mais tipicamente encontrado é o TiO_2 , mas pode-se encontrar outros óxidos, como: Ti_2O_3 , e TiO .

- Aplicações biomédicas que fazem vantagem da não rejeição do metal no corpo humano, para o uso em implantes cirúrgicos e em dispositivos protéticos.

- Aplicações especiais, que exploram propriedades como: supercondutividade (quando ligado ao nióbio) e o efeito da forma-memória (ligado com níquel).

- Aplicações que variam de câmeras, jóias aos instrumentos musicais, e a equipamentos dos esportivos.

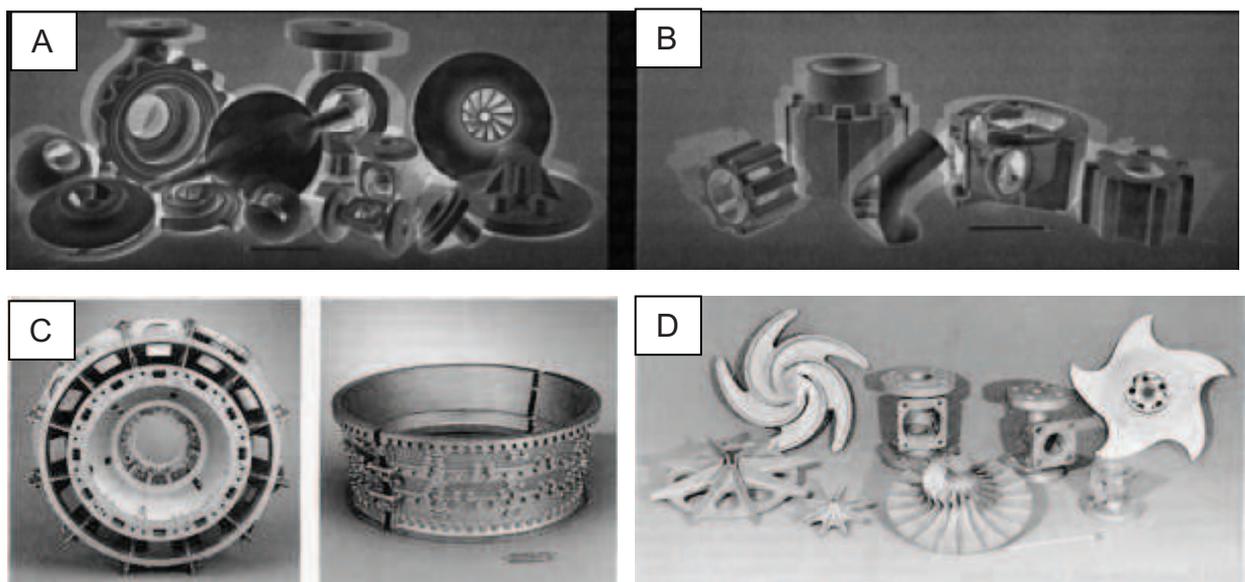


Figura 2.1 – Componentes fabricados com Ti6Al4V. (A) Bombas e válvulas para processamento químico. (B) Componentes aplicados na indústria aeroespacial. (C) Turbinas à gás. (D) Componentes para ambientes corrosivos. [ASM Handbook, 1993].

2.4 Usinabilidade das ligas de titânio

O desempenho da usinagem de ligas de titânio depende, em boa parte, de superar os problemas associados às propriedades inerentes destes materiais, como apresentado abaixo:

- **Altas temperaturas de corte:** altas temperaturas de corte são geradas quando se usina ligas titânio. Estas altas temperaturas se concentram perto do gume ferramenta. Isto ocorre devido à baixa da condutividade térmica do titânio, que dificulta a dissipação de calor produzido entre a ferramenta e a peça durante a usinagem ocasionando um rápido desgaste da ferramenta. A investigação da distribuição da temperatura de corte mostrou que os gradientes de temperatura são muito mais íngremes e a zona afetada termicamente é muito menor e muito mais perto da área de corte ao se usinar ligas titânio. [W. KONIG, 1978, H.C. CHILD, A. DALTON 1968].
- **Pressões de corte elevadas:** a força de corte ao se usinar ligas titânio é similar a do aço, a potência de usinagem é a mesma, porém a distribuição desta força é diferente. A força de usinagem é muito mais concentrada próximo do gume quando se usina ligas de titânio. Isto se deve à alta resistência a deformação a altas temperaturas das ligas de titânio. [N. ZLATIN, 1970]
- **Vibração:** é outro problema a ser superado ao se usinar ligas de titânio, especialmente em usinagem de acabamento. O baixo módulo de elasticidade e o elevado encruamento do titânio é a principal causa de vibração durante a usinagem, isto causa desgaste de flanco prematuro e aumento da temperatura de corte. [B.F. YON TURKOVICH, D.R. DURHAM, 1982]
- **Critérios adicionais para materiais da ferramenta:** além das pressões mecânicas elevadas, das altas temperaturas de corte e das cargas dinâmicas elevadas, que resultam na deformação plástica e no desgaste rápido da ferramenta, as ferramentas de corte sofrem também pela alta reatividade química do titânio. O titânio e suas ligas são quimicamente muito reativos e tem, conseqüentemente, uma tendência de soldar-se à ferramenta de corte durante sua usinagem, conduzindo-a a lascarse e a falhar prematuramente. Estes problemas podem ser minimizados empregando máquinas rígidas e usando ferramentas de corte apropriadas ou métodos não convencionais de corte, como a eletroerosão. [EZUGWU & WANG,1995]

CAPÍTULO III

Fundamentos do processo de Eletroerosão

Neste capítulo são abordados os fundamentos do processo de usinagem por descargas elétricas (*Electrical Discharge Machining - EDM*). O capítulo destaca os fundamentos da teoria atualmente aceita sobre o princípio físico da remoção de material na EDM, e posteriormente é analisada a influência dos principais parâmetros de controle do processo sobre o rendimento tecnológico da usinagem. Ao final são apresentados materiais para eletrodos ferramenta, suas vantagens e desvantagens. Os efeitos da eletroerosão sobre a integridade da superfície usinada do material também são discutidos.

3.1 Fundamentos do fenômeno físico de uma descarga

Desde o início do desenvolvimento do processo de usinagem por eletroerosão, muitas teorias, simulações e investigações experimentais têm sido desenvolvidas para explicar o complexo fenômeno da remoção de material por faíscas elétricas. Entretanto, a mais aceita dentre os pesquisadores é a termoelétrica. De acordo com esta teoria, o ciclo de uma descarga elétrica entre dois eletrodos submersos num meio líquido de trabalho nas seguintes etapas (Figura 3.1)

1. Fase de ignição da faísca.
2. Formação do canal de plasma.
3. Fusão e evaporação de uma pequena quantidade de material nos eletrodos.
4. Ejeção do material fundido.

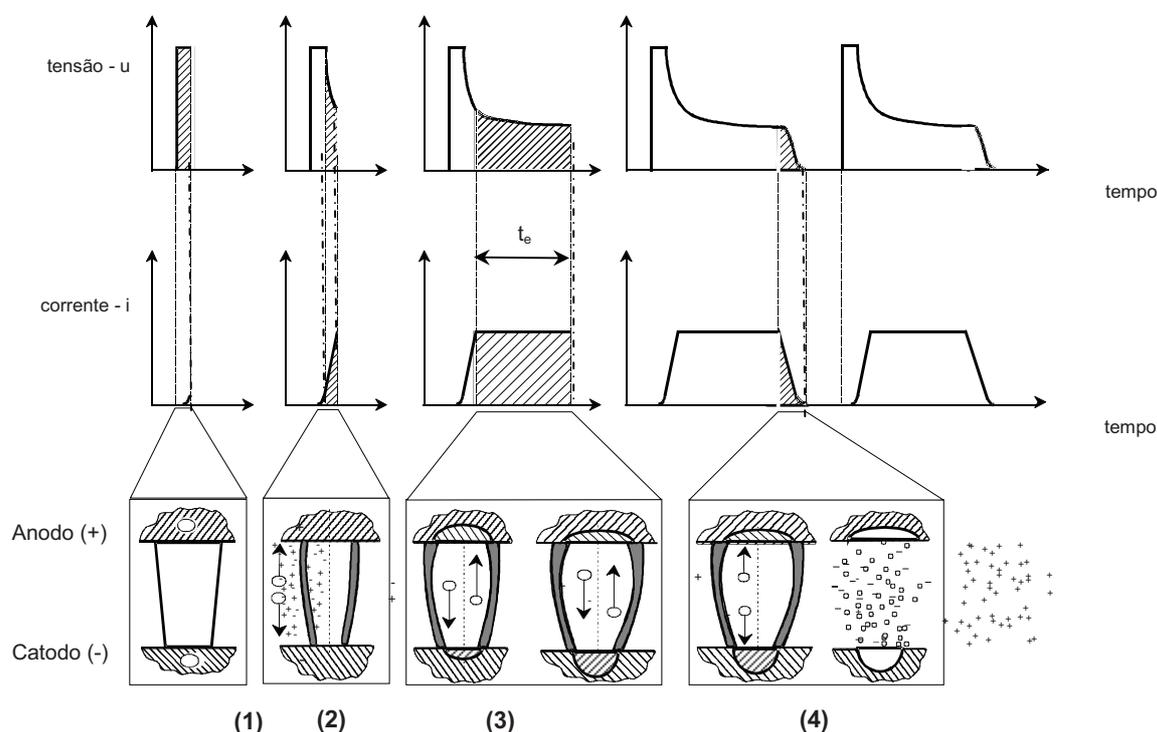


Figura 3.1 - Fases de uma descarga elétrica no processo de EDM. [KÖNIG & KLOCKE,1997].

3.1.1 Fase de ignição

Inicialmente, os eletrodos são posicionados na máquina e separados entre si de uma pequena distância. Uma tensão em aberto u_i aplicada entre eles. No princípio não há fluxo de corrente devido à resistência oferecida pelo fluido dielétrico. Nesse instante, o servomecanismo avança o eletrodo-ferramenta em direção à peça, até aproximar-se da distância da fenda de trabalho, causando um aumento do campo elétrico (E) entre as superfícies dos eletrodos, dado pela razão entre a tensão e a distância entre eles.

3.1.2 Formação do canal de plasma

Tem em consequência, a formação de um canal de plasma circundado por uma bolha de vapor e pelo líquido dielétrico que restringe o crescimento do canal, concentrando a energia da descarga em um pequeno volume. O nível energético inicial do plasma chega a atingir 3 J/mm^3 , ocasionando picos de temperatura da ordem de 40000 K e pressão dinâmica de 3 kbar devido a efeitos inerciais.

3.1.3 Fusão e evaporação de material nos eletrodos

O canal de plasma recém-formado é então mantido por um período de tempo t_e especificado pelo operador. Durante a aplicação da descarga, para evitar a formação de arcos e curtos-circuitos, o sistema de controle do servomecanismo da máquina de EDM controla e mantém equilibrada a amplitude da fenda de trabalho, a qual depende do nível de energia da corrente de descarga i_e . Ao longo do tempo t_e , o plasma de alta energia funde continuamente por condução térmica, certa quantidade de material em ambos os eletrodos, originando uma pequena poça de material líquido em cada um deles. Entretanto, devido à alta pressão do plasma pouca quantidade desse material líquido é evaporado. O aumento do gradiente de temperatura nos eletrodos produzido por efeito Joule pode ser desprezível. Isto acontece porque a densidade de corrente decresce fortemente com o aumento da profundidade a partir da superfície dos eletrodos. [VAN DIJCK,1993].

O fenômeno de fusão de material pode ser mais bem explicado da seguinte forma: as superfícies do anodo e do catodo são intensamente bombardeadas respectivamente por elétrons e íons positivos. Os elétrons penetram no anodo, e ao fazê-lo transformam sua energia cinética em calor, o qual gera fusão de material. Da mesma forma ocorre com os íons positivos, os quais transformam sua energia cinética em calor ao colidirem com o catodo. A quantidade de material fundido depende, dentre outros aspectos, do número de elétrons e de íons que atingem as superfícies dos eletrodos. Esta quantidade está diretamente relacionada às propriedades físicas do par de eletrodos, a intensidade de corrente i_e e ao tempo da descarga t_e .

A fusão de material ocorre primeiramente no anodo, ao passo que no catodo somente ocorrerá alguns microsegundos depois (longos t_e), quando um maior número de íons positivos, iniciam um bombardeamento mais intenso no catodo, transformando sua energia cinética em grande quantidade de calor. A obtenção de fotografias por câmaras de alta velocidade permitiu observar que o canal de plasma possui forma similar a de um barril. [EUBANK, MUKUND, BARRUFET, BOZKURT, 1993].

No decorrer da duração da descarga, o raio a_c do plasma na região próxima ao catodo apresenta-se praticamente constante e bem inferior ao raio a_a , observado na região próxima ao anodo (Figura 3.2) Acredita-se que esta menor magnitude de a_c se deve principalmente à emissão de elétrons pelo catodo, onde se estima raio da ordem de $a_c < 5 \mu\text{m}$, ao passo que no anodo o raio a_a aumenta continuamente durante a evolução da duração da descarga.

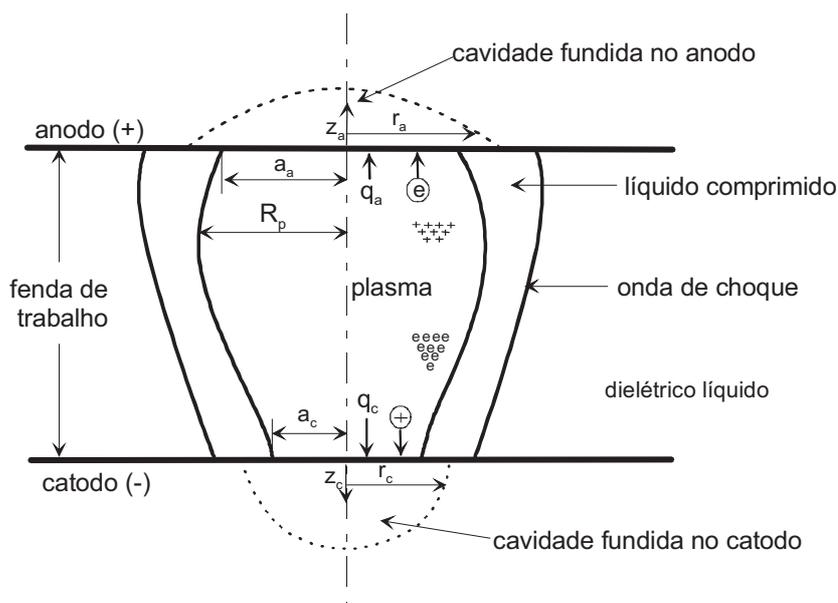


Figura 3.2 - Representação esquemática da faísca elétrica, destacando a forma do canal de plasma. O fluxo de calor nas superfícies do catodo e do anodo está representado por q_c e q_a , sendo r_a e r_c os raios das cavidades fundidas no anodo e catodo. [DIBITONTO ET. AL 1989].

O fenômeno de expansão contínua do diâmetro do canal de plasma acontece pelo fato do plasma transferir energia para as regiões radiais circunvizinhas, assim como para as cavidades fundidas. A cada incremento no tempo da descarga, a irradiação de energia do plasma provoca a vaporização, a dissociação e a ionização de um pequeno volume de dielétrico, causando com isso um aumento da massa do plasma. O raio do plasma (R_p) aumenta com o tempo devido a alta pressão interna do plasma que força a expansão radial do líquido dielétrico circundante. A energia total de uma descarga elétrica é dividida em três parcelas, e pode ser estimada da seguinte forma: a primeira parcela de 18 % é consumida na fusão de material no catodo, a segunda de 8 % destina-se ao anodo, e os 74 % restantes são gastos no aumento da massa e do diâmetro do canal de plasma no fenômeno de conversão do dielétrico líquido circundante em plasma.

3.1.4 Ejeção do material fundido

Ao final do tempo de descarga t_e especificado, o sistema de controle do gerador da máquina interrompe a corrente elétrica, estabelecendo um tempo de intervalo t_o até o início de um novo ciclo de descarga, neste instante ocorre à expulsão do material fundido das cavidades dos eletrodos. O principal mecanismo responsável pela remoção de material no processo de eletroerosão está associado ao fenômeno de superaquecimento do material fundido nas

cavidades dos eletrodos. Este mecanismo foi inicialmente sugerido por Van Dijck [1973] sendo posteriormente comprovado, pela primeira vez, no trabalho de Eubank et al. [1993] e pode ser resumidamente discutido da seguinte forma: durante o tempo de aplicação da descarga, as superfícies das cavidades fundidas nos eletrodos apresentam temperaturas próximas àquelas de ebulição dos materiais. Entretanto, pouco material é evaporado devido à alta pressão exercida pelo plasma sobre as cavidades. Com a interrupção da descarga, e o consequente colapso do canal de plasma e da bolha de vapor por causa da queda brusca de pressão, são geradas forças associadas ao fenômeno do superaquecimento com intensidade suficiente para separar bruscamente o material fundido das paredes das cavidades, gerando uma pequena cratera nas superfícies dos eletrodos. Uma parte do material expelido é carregada pelo fluxo do dielétrico para fora da fenda de trabalho, e a outra parte se solidifica na própria cratera e em regiões vizinhas, constituindo a camada ressolidificada chamada de *white layer* ou *recast layer*, como mostra a Figura 3.3.

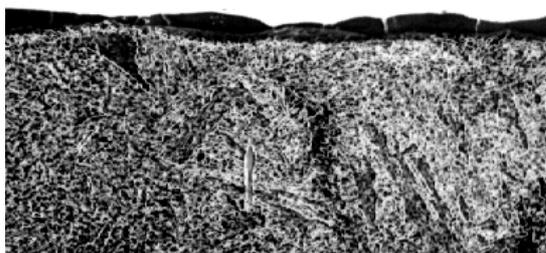


Figura 3.3 – Micrografia ótica de aço *White layer*. [KLOCKE & KARDEN, 1999].

Em se tratando das partículas eletroerodidas que são expelidas da fenda de trabalho, nota-se que a maioria delas apresenta a forma de pequenas esferas sólidas ou ocas. A geometria esférica sólida é devida à expulsão de material no estado líquido e as esferas ocas correspondem ao material expulso na forma de bolhas, que rapidamente se solidificam ao entrar em contato com o dielétrico. [LHIUBET, 1981].

É importante acrescentar que outros mecanismos de origem hidrodinâmica, termodinâmica e elétrica, bem como as propriedades físicas dos materiais, a polaridade dos eletrodos e outros parâmetros de processo, apresentados a seguir, também exercem importante influência na parcela de material removido no ciclo de uma descarga no processo de EDM. [KÖNIG, 1997]

3.2 Principais parâmetros de controle do Processo

Um resumo dos principais parâmetros de controle do processo é apresentado na Figura 3.4.

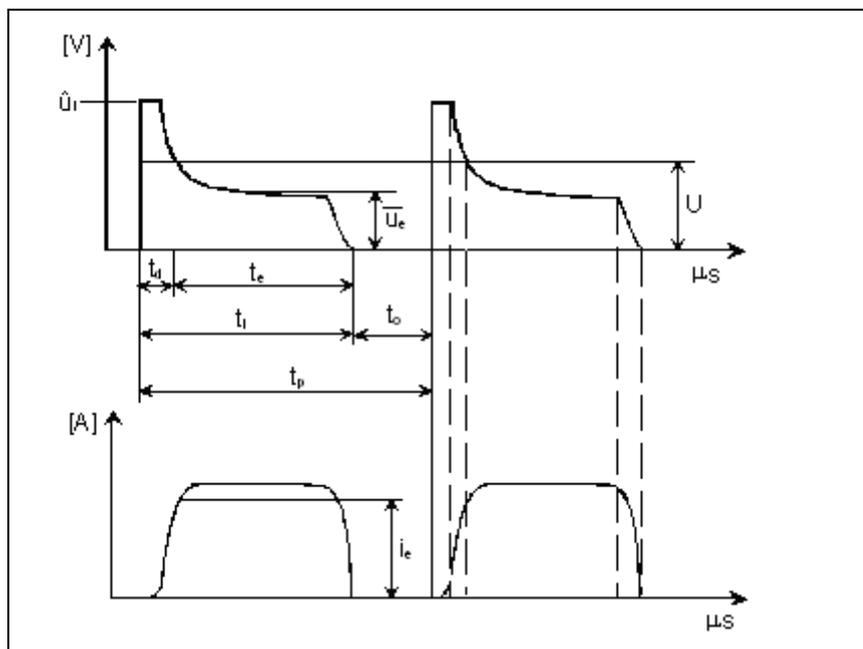


Figura 3.4 - Evolução da tensão e corrente elétricas durante a descarga de uma faísca, apresentando em destaque os principais parâmetros de controle do processo.

\hat{u}_i - tensão em aberto [V]

\bar{u}_e - tensão média da descarga [V]

U - tensão de controle [V]

t_d - tempo de retardo de ignição [μs]

t_e - duração da descarga [μs]

t_i - duração do pulso de tensão ($t_d + t_e$) [μs]

t_o - tempo de intervalo entre dois sucessivos pulsos de tensão t_i [μs];

t_p - tempo do período do ciclo de uma descarga [μs]

i_e - corrente durante a descarga [A];

\bar{i}_e - corrente média durante a descarga [A];

τ - relação de contato: representa a razão entre o tempo de pulso t_i e o tempo de período do ciclo da descarga t_p [μs].

Os parâmetros acima podem ser regulados dentro de uma ampla faixa de variação em função do tipo da máquina de EDM. Para fins de exemplificação geral pode-se dizer que: t_i (1 a 3600 μ s), t_o (1 a 3600 μ s), \hat{u}_i (60 a 300 V), i_e (1 a 350 A), τ (0,1 a 0,9). O apêndice 1 apresenta os parâmetros de controle da máquina CHARMILLES ROBOFORM 30, a qual foi utilizada neste trabalho.

A energia da descarga, que significa a energia fornecida por uma faísca à fenda de trabalho, é simplificada representada por $W_e \approx u_e \cdot i_e \cdot t_e$ [J] e determina o volume de material removido por descarga e também a qualidade do acabamento da superfície eletroerodida. Para avaliação do rendimento tecnológico do processo são utilizados os seguintes aspectos:

- V_w - taxa de remoção de material: caracteriza o volume de material que é removido no tempo no eletrodo-peça [mm^3/min].
- V_e - taxa de desgaste: representa o volume de material que é removido do eletrodo-ferramenta [mm^3/min].
- ϑ - desgaste relativo: representa o desgaste volumétrico relativo entre os eletrodos-ferramenta/peça, dado pela razão entre V_e e V_w normalmente em valores percentuais.

A qualificação da textura superficial das peças eletroerodidas é analisada usualmente pelos parâmetros de rugosidade R_a e R_z [μm].

3.2.1 Influência dos parâmetros do processo

No estabelecimento adequado destas variáveis pode ser conseguida uma assimetria considerável da remoção de material do anodo e do catodo, e também um comportamento equilibrado da fenda de trabalho, resultando em condições estáveis de eletroerosão, que significa, geralmente, a ausência ou diminuição da ocorrência de arcos e curtos-circuitos e, conseqüentemente, melhor rendimento do trabalho da usinagem.

Em se tratando da eletroerosão por penetração em operações do processo, os seguintes comentários gerais podem ser relatados:

- Regime de desbaste - nos regimes mais energéticos, ou seja, com maiores níveis de corrente i_e , as altas pressões e temperaturas do canal de plasma são mantidas por um maior período de tempo, isto é, mais longos são os tempos ótimos de duração da descarga. Por este motivo, normalmente se estabelece à polaridade positiva para o eletrodo-ferramenta (anodo) e a negativa para o eletrodo-peça (catodo). Em conseqüência, é gerado um aumento substancial de

remoção de material na peça V_w e pouca remoção de material V_e no eletrodo-ferramenta. Desta forma, observa-se uma diminuição do desgaste volumétrico relativo ϑ , onde $\vartheta = V_e / V_w$.

- Condições de acabamento - nos regimes de acabamento o objetivo é obter baixos níveis de rugosidade. Deste modo, são empregadas baixas correntes de descarga i_e , assim como também pequenos tempos de duração da descarga. Nestes casos é prática comum adotar a polaridade negativa (catodo) para o eletrodo-ferramenta e a polaridade positiva (anodo) para o eletrodo-peça. Assim, obtém-se a formação de crateras de pequenas dimensões nas peças, resultando, portanto, em menor rugosidade. Entretanto, é importante mencionar que para estas condições de polaridade ocorre um desgaste mais acentuado do eletrodo-ferramenta [AMORIM, 2002].

Cabe também colocar que a escolha da polaridade dos eletrodos também depende das propriedades termofísicas dos materiais, sendo necessária a realização de ensaios experimentais a fim de se poder escolher adequadamente a combinação que produz os melhores resultados sobre o rendimento do processo de EDM.

A relação de contato τ , dada pela razão entre o tempo de pulso t_i ($t_i = t_d + t_e$) e o período do ciclo de uma descarga t_p , exerce forte influência sobre a estabilidade do processo, e, por conseguinte sobre os valores da taxa de remoção V_w e do desgaste relativo ϑ , [KÖNIG & KLOCKE, 1997]. Normalmente, busca-se estabelecer a maior relação de contato possível. Portanto, a fim de garantir o melhor desempenho da usinagem, a determinação da duração do tempo t_o deve ser especificada de maneira a garantir suficiente deionização do dielétrico e adequada lavagem das partículas eletroerodidas.

3.2.3 Materiais para Eletrodos na EDM por penetração

A erodibilidade de um material independe de suas propriedades mecânicas, mas da composição química. Com isso, as propriedades físicas têm uma influência considerável sobre o processo. Pode-se verificar uma diminuição da taxa de remoção como aumento da temperatura de fusão. Alguns modelos demonstram que o comportamento da eletroerosão depende das características térmicas: calor específico, condutividade, temperatura de fusão e ebulição e densidade. Igualmente é conhecido, de resultado de pesquisas, que materiais de eletrodos distintos para o mesmo material das peças e parâmetros de processo, levam a taxa de remoção por descargas diferentes e se distinguem de sobremodo no comportamento de desgaste. [KÖNIG, 1996].

A finalidade para qualquer material usado como eletrodo ferramenta em EDM é transmitir a corrente elétrica para o eletrodo peça. O material a ser utilizado deve apresentar qualidades essenciais como: boa taxa de remoção, baixo desgaste, boa usinabilidade (processo de fabricação e custo). Os eletrodos apresentam diferentes performances, depende da aplicação e do material da peça. Alguns materiais apresentam boa taxa de remoção, porém um desgaste elevado, e outros, em mesma aplicação, apresentam uma baixa taxa de remoção, contudo um pequeno desgaste. Isto se deve as propriedades físicas dos eletrodos peça e ferramenta, e das condições de usinagem.

Os cinco materiais mais comumente utilizados como eletrodos ferramenta são: cobre, latão, zinco, tungstênio e a grafita. Estes materiais são divididos em duas categorias: metálicos e grafita. Os metálicos são divididos em três grupos: Metais comuns, Tungstênio e compósitos de tungstênio e exóticos. A grafita por sua vez divide-se em seis classes: angstrofino, ultrafino, superfino, fino, médio e grosseiro. [POCO, 1994].

- Metais comuns – O cobre é o principal elemento deste grupo, onde ainda latão e zinco também fazem parte. Estes materiais possuem qualidades importantes para a EDM como: alta condutividade térmica e elétrica. Cobre, latão e zinco são facilmente encontrados na natureza com boa qualidade e baixo custo, porém apresentam problemas com desgaste e baixa taxa de remoção.

- Tungstênio e compósitos de tungstênio – teoricamente o tungstênio é o melhor dos metais a ser utilizado como eletrodo ferramenta, pois apresenta alto limite de resistência, densidade, dureza e um ponto de fusão de 3400°C. O tungstênio apresenta fatores que dificultam sua utilização: difícil usinabilidade e caro. Para fazer do tungstênio um material mais atrativo para certas aplicações, uma solução é de combiná-lo com outro elemento mais dúctil como, por exemplo, o cobre. O resultado é um material mais fácil de usinar e com melhor condutividade elétrica e térmica.

- Exóticos – este grupo contém todo metal que é condutor de eletricidade, mas raramente utilizados como eletrodos. Materiais exóticos são utilizados para aplicações específicas fazem parte deste grupo, por exemplo: tântalo, níquel e molibdênio.

- Grafita - elemento não metálico normalmente classificado como um metalóide, pois apresenta características de um metal e de um não metal. A grafita tornou-se um predominante material para a EDM. Diferentes tamanhos de grão e densidades são utilizadas. A Tabela 3.1 apresenta a classificação da grafita de acordo com o tamanho de grão.

Tabela 3.1 - Classificação da grafita de acordo com o tamanho de grão

Angstrofino	< 1 micron
Ultrafino	1 – 5 microns
Superfino	6 – 10 microns
Fino	11 – 20 microns
Médio	21 – 100 microns
Grosseiro	> 100 microns

O custo do eletrodo de grafita varia de acordo com o tamanho de grão, grãos grosseiros são relativamente baratos, porém quanto maior o refinamento dos grãos maior será o custo deste material. Grãos grosseiros são normalmente utilizados para grandes remoções de material por EDM ou onde não existam muitos detalhes de forma. Grafita com grãos refinados é utilizada para usinagem onde se exige um grau maior de detalhes e exige-se também precisão. [POCO, 1994].

Durante o processo de EDM partículas do eletrodo ferramenta são desprendidas. Esta perda de partículas aumenta com o aumento do tamanho de grão. Este efeito causa um aumento no desgaste do eletrodo. O desempenho da grafita depende do tamanho das partículas, consistência micro estrutural e propriedades físicas inerentes. A razão para termos estas classes de grafita é que cada classe possui sua aplicação específica e com resultados de desempenho esperados.

Existe muita discussão no ambiente industrial sobre qual dos materiais promove as melhores condições de rendimento do processo, em relação ao cobre e a grafita. Na verdade, qualquer trabalho de eletroerosão que pode ser executado com cobre também pode ser feito com a grafita. A diferença nos resultados do processo está relacionada principalmente à qualidade da fabricação dos eletrodos e a utilização de parâmetros de eletroerosão adequados para o material do eletrodo em questão. O resultado final do trabalho pode ser o mesmo, seja para EDM com cobre ou grafita, porém os custos envolvidos podem ser substancialmente diferentes. Portanto, uma análise aprofundada sobre o trabalho a ser executado é fundamental no momento de optar por um desses materiais. [ARMOLDWORKS, 2001].

As seguintes considerações gerais podem ser resumidas para efeito de comparação entre os dois materiais:

- Normalmente, eletrodos de grafita são bem mais caros que aqueles confeccionados em cobre. Atualmente existem no mercado classes de grafita com tamanho médio de partícula inferior a $1\ \mu\text{m}$, as quais são desenvolvidas especialmente para trabalho de acabamento fino do processo, todavia o preço dessa classe de material é elevado, apesar de nos últimos anos ter havido queda contínua no preço da matéria-prima.

- A grafita tem uma menor dilatação térmica que o cobre, apresentando deformação quase nula durante o processo. Em especial, na eletroerosão de cavidades profundas sob condições de desbaste, a dilatação térmica volumétrica do cobre é consideravelmente alta, fato que normalmente compromete as condições de lavagem das partículas eletroerodidas. Já a grafita, não apresenta tal inconveniente, sendo bastante utilizada para usinagem de desbaste, com a utilização de classes com maiores tamanhos de partícula (10 a $20\ \mu\text{m}$), os quais possuem preços mais acessíveis.

- A baixa densidade da grafita proporciona a confecção de eletrodos de grande porte bem mais leves que aqueles em cobre e, com isto, torna mais fácil o manuseio da ferramenta no chão de fábrica. [ARMOLDWORKS, 2001].

Sobre o comportamento da eletroerosão com eletrodos de grafita, podem ainda ser acrescentadas as seguintes recomendações:

- A utilização de elevadas tensões em aberto U_i favorece maior desgaste dos eletrodos;
- A polaridade positiva da ferramenta possibilita menores taxas de desgaste V_e , e para polaridade negativa observa-se aumento da velocidade de usinagem e conseqüente aumento das taxas de remoção V_w . [POCO, 1994].

CAPÍTULO IV

Procedimento experimental

Este capítulo descreve o plano experimental geral elaborado para a realização dos ensaios de usinagem de EDM por penetração. Um diagrama esquemático foi desenvolvido com a finalidade de constituir-se como um modelo sistematizado para melhor orientar o desenvolvimento da pesquisa. Na seqüência foram realizados os ensaios principais nos materiais. Os ensaios com a liga Ti6Al4V foram realizados numa máquina CHARMILLES modelo ROBOFORM 30 CNC, vide descrição detalhada desta máquina no apêndice 1. Ao final, transcorreu-se a etapa de análise e discussão das variáveis dependentes do processo, ou seja, os resultados de rendimento, os quais são apresentados nos próximos capítulos.

4.1 Esquema experimental geral

A Figura 4.1 apresenta esquematicamente o planejamento geral dos ensaios. A escolha das variáveis independentes de entrada do processo foi estabelecida de forma a garantir coerência entre o tempo e o número total de ensaios, no sentido de estabelecer parâmetros adequados de processo, isto é, proporcionar condições econômicas de usinagem e, simultaneamente, um entendimento do fenômeno da eletroerosão nos materiais testados. Após a definição das variáveis de entrada, foram desenvolvidos ensaios preliminares em condições de desbaste, semi-acabamento e de acabamento sobre as condições de lavagem e os parâmetros elétricos i_e , t_e , t_i , t_o , \hat{u}_i , com o intuito de estabelecer uma amplitude adequada de variação desses parâmetros, assegurando, desta forma, um rastreamento geral do comportamento dos materiais para o estabelecimento de curvas representativas sobre o rendimento da usinagem.

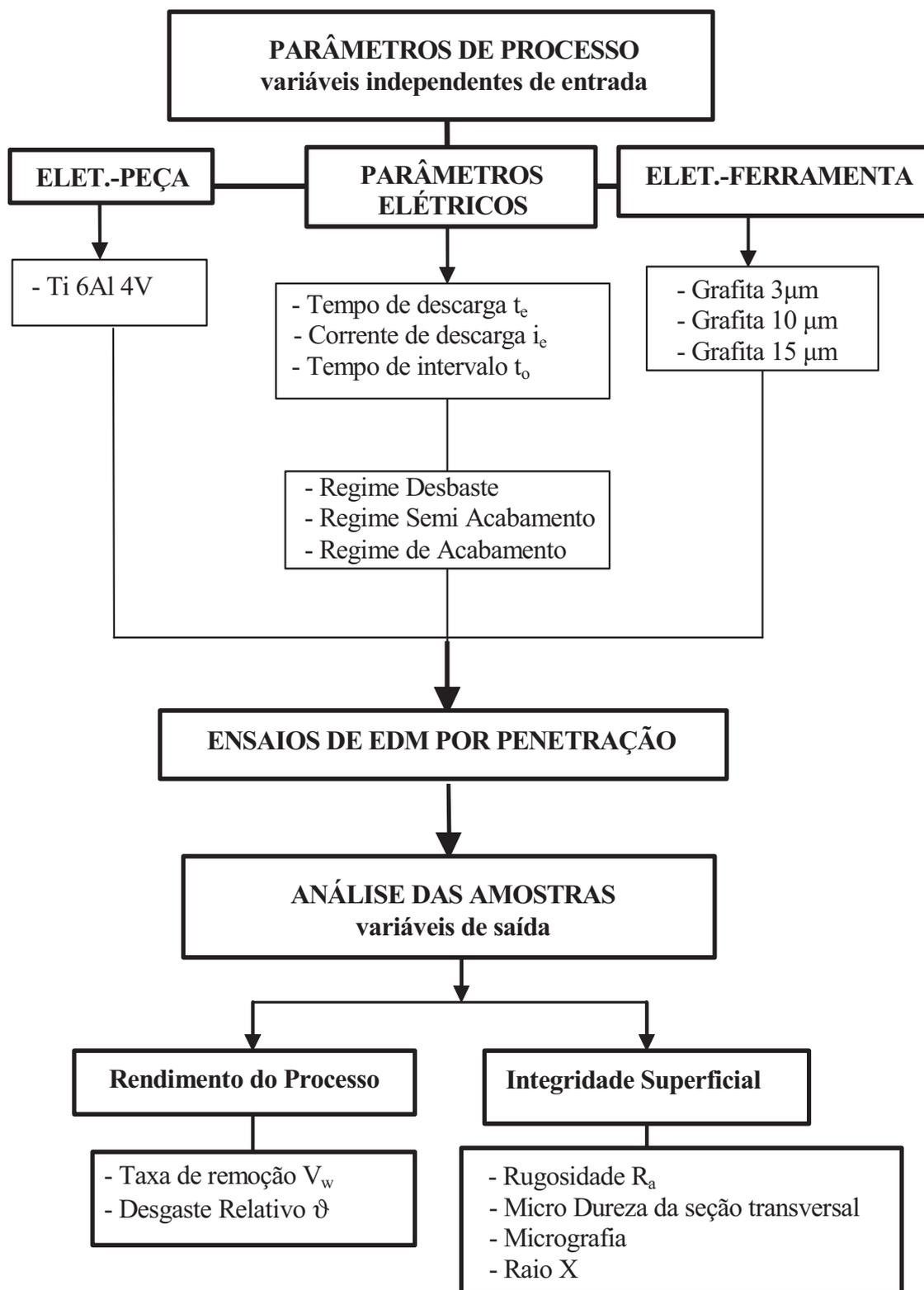


Figura 4.1 - Modelo esquematizado do plano geral de desenvolvimento dos ensaios.

A Figura 4.1 apresenta no primeiro bloco - Parâmetros de Processo - as variáveis independentes de entrada, as quais são representadas por:

- Eletrodo-peça: Os corpos de prova foram confeccionados de duas formas, com seção transversal de 25 X 25 mm e espessura de 15 mm e com seção transversal de 25 X 25 e espessura de 5 mm. Os corpos de prova foram individualmente numerados. As superfícies das amostras foram retificadas ($R_a = 1 \mu\text{m}$) para que houvesse um adequado assentamento de toda a seção frontal do eletrodo-ferramenta sobre a peça desde o início da usinagem, evitando desgaste não-uniforme dos eletrodos, instabilidade do processo na forma de arcos e curtos-circuitos, assim como imprecisão no controle do tempo de cada condição de teste. As dimensões das amostras foram determinadas de maneira a obter cavidades de profundidade adequada, tanto nas condições de desbaste quanto de acabamento, a fim de proporcionar quantificação precisa da taxa de remoção V_w .

- Parâmetros elétricos do processo: são representados pela corrente de descarga i_e , duração da descarga t_e , duração do pulso de tensão t_i , tempo de intervalo t_o e polaridade do eletrodo-ferramenta (-). Estes parâmetros são programados atuando-se sobre o sistema de controle da máquina e representam algumas das principais variáveis que influenciam no rendimento do processo em termos da taxa de remoção de material V_w , do desgaste volumétrico relativo ϑ e nos aspectos de integridade da superfície erodida.

Os parâmetros elétricos foram subdivididos para três condições de usinagem: regime de desbaste, regime de semi-acabamento e regime de acabamento, os quais foram executados com a atuação do gerador da máquina no modo de pulsos estáticos retangulares (Figura 4.2), o qual proporciona rápida elevação da corrente de descarga i_e . Esta forma de atuação do gerador foi utilizada tanto na usinagem de desbaste e semi-acabamento quanto na de acabamento. Nos ensaios sob condições de semi-acabamento e acabamento estabeleceu-se o tempo de usinagem de 30 min para cada conjunto de parâmetros testados. Na condição de desbaste utilizou-se um tempo de usinagem de 10 min. Estes tempos para os regimes citados foram suficientes para promover a obtenção de adequada profundidade das cavidades usinadas, no sentido de garantir precisão sobre a quantificação do volume de material removido tanto no eletrodo-peça quanto no eletrodo-ferramenta.

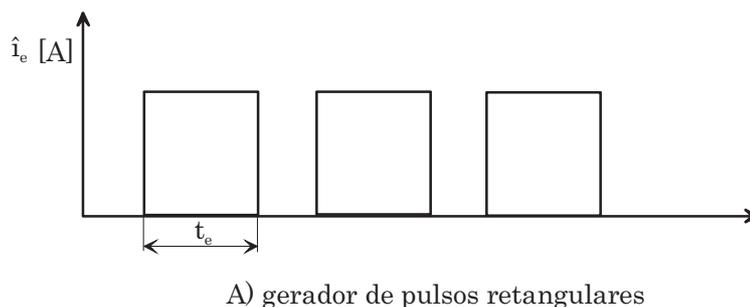


Figura 4.2 - Esquema do comportamento da corrente de descarga segundo o modo de atuação do gerador de pulsos retangulares

A Tabela 4.1 apresenta as variações dos parâmetros elétricos utilizados nos ensaios. A relação de contato $\tau = t_i / (t_i + t_o)$ foi mantida em 0,5, temos $t_o = t_e + t_d$ (isto significa que o tempo de intervalo entre dois sucessivos pulsos de tensão - t_o é igual ao tempo do período do ciclo de uma descarga - t_p) estas relações garantem boa estabilidade no processo. Para as correntes de descarga 3,12 e 32 [A] a tensão em aberto (\hat{u}_i) foi de 160 [V], 120 [V] e 80 [V] respectivamente. Ensaios com polaridade positiva foram realizados, porém não houve resultados satisfatórios.

Tabela 4.1 – parâmetros elétricos utilizados nos ensaios de rendimento

Regime	Corrente de descarga i_e [A]	Eletrodo grafita tamanho da partícula [μm]	Duração da descarga t_e [μs]	Tempo de intervalo t_o [μs]	Polaridade
acabamento	3	3; 10;15	6,4;12,8;25;50;100	6,4;12,8;25;50;100	-
semi-acabamento	12	3; 10;15	6,4;12,8;25;50;100	6,4;12,8;25;50;100	-
desbaste	32	3; 10;15	12,8;25;50;100;200	12,8;25;50;100;200	-

- Eletrodo-ferramenta: foram utilizadas barras cilíndricas de grafita, material tradicionalmente adotado como eletrodo-ferramenta, usinadas com as dimensões de 20 mm no diâmetro e 4 mm no furo central, o qual destinou-se à lavagem sob pressão pelo eletrodo. Trabalhou-se com três tipos de eletrodos de grafita, sendo a diferença entre eles o tamanho da partícula. Foram utilizados eletrodos de tamanho de partícula 3 μm , 10 μm e 15 μm . As propriedades físicas e termofísicas das diferentes grafitas utilizadas como eletrodo-ferramenta estão descritas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Propriedades físicas e termofísicas da grafita.

Diâmetro do grão	μm	15	10	3
Classificação		Fino	Superfino	Ultrafino
Densidade	g/cm^3	1,72	1,77	1,88
Porosidade aberta	%	15	13	10
Diâmetro dos poros	μm	2	1,5	0,6
Permeabilidade	$\times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{seg.}$	15	10	1
Dureza		80 HR10/100	70 HR5/100	110 HR5/100
Resistência a flexão	N/mm^2	45	50	85
Elasticidade	KN/mm^2	10,5	10,5	13,5
Resistividade	$\mu\Omega\text{m}$	12	14	13
Condutividade térmica	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	90	80	100
Dilatação térmica	$\times 10^{-6}/\text{K}$	2,9	3,9	4,7
Conteúdo de cinza	ppm	200	200	200

- Fluido dielétrico e modo de lavagem: trabalhou-se com um hidrocarboneto Arclean Eletron produzido pela Archem Química Ltda. convencionalmente utilizado na indústria, apresentando viscosidade de 3 cSt a 40°C. A lavagem sob pressão de 0,01 MPa pelo eletrodo-ferramenta foi adotada para todos os ensaios.

- Integridade das peças eletroerodidas: foi analisada pelo parâmetro de rugosidade R_a , a espessura da camada limite, a dureza da seção transversal das peças, e ensaio de Raios-X.

- Rendimento do processo: nesta pesquisa foram determinadas a taxa de remoção de material V_w e o desgaste volumétrico relativo ϑ , que se caracterizam como dois dos principais aspectos de análise do rendimento da usinagem por EDM.

4.2 Técnicas de quantificação e caracterização dos resultados

4.2.1 Taxa de remoção de material V_w e desgaste volumétrico relativo ϑ

Em muitos trabalhos experimentais de usinagem por eletroerosão é prática comum quantificar os valores de V_w [mm^3/min] medindo-se a profundidade da cavidade usinada com um instrumento como um paquímetro, e em seguida proceder ao cálculo do volume de material removido. O resultado final de V_w é então dado pela razão entre o volume calculado [mm^3] pelo tempo do teste [min]. É muito importante colocar que esta técnica de determinação do volume usinado gera, em muitos casos, grande imprecisão no resultado da medição. Um primeiro aspecto relaciona-se a baixa resolução destes instrumentos de medição, em especial se são aplicados na medição de cavidades pouco profundas, como é o caso daquelas obtidas em ensaios de acabamento, ou mesmo em usinagem de semi-acabamento e desbaste. Neste último caso, a topografia da cavidade usinada sob elevadas correntes de descarga i_e é caracterizada por crateras de variadas formas, larguras e profundidades. Portanto, a probabilidade de se efetuar a medição num local inadequado é muito alta, fato que leva à obtenção de valores errados sobre a real profundidade da cavidade.

Em se tratando do desgaste volumétrico relativo ϑ , o qual é representado pela razão entre a taxa de desgaste do eletrodo-ferramenta V_e e a taxa de remoção V_w , o procedimento normalmente adotado é o seguinte: o comprimento longitudinal do eletrodo-ferramenta [mm] é medido antes e após o teste e, na seqüência, com base na diferença de comprimento, determina-se o volume de material desgastado da ferramenta. Na eletroerosão é comum que a parte inferior do eletrodo, ou seja, aquela que participa mais efetivamente da usinagem, apresente certo nível de deformação tanto nos cantos quanto ao longo de sua superfície frontal, que neste caso é caracterizada por uma pequena ondulação. Ao se utilizar um instrumento manual de medição pode ocorrer, novamente, como no caso da profundidade da cavidade usinada, a obtenção de um valor errado. Neste caso, mascarando o resultado do desgaste volumétrico relativo $\vartheta = V_e / V_w$.

Nesta pesquisa, a fim de evitar tais distorções de resultados, foi utilizado o seguinte método: para a quantificação criteriosa da taxa de remoção material V_w e do desgaste volumétrico ϑ foi empregada uma balança digital com resolução de 0,0001 g (Apêndice 2) para a medição da massa dos eletrodos-ferramenta e das peças, antes e após os ensaios, tanto sob condições de desbaste quanto de acabamento. As amostras dos eletrodos-ferramenta eram colocadas em estufa à temperatura de 200°C durante 24 horas para que toda a umidade fosse evaporada. Em seguida era feita a medição da massa, e posteriormente executados os ensaios de

usinagem. Logo após, os eletrodos eram novamente levados ao forno sob as mesmas condições de tempo e temperatura, com a mesma finalidade de retirar toda a umidade, sendo na seqüência, depois de resfriados, novamente medidos. Os eletrodos-peça eram devidamente limpos com álcool e ar-comprimido, para a retirada do excesso de impurezas que pudessem causar erros na medição. Com base na massa específica dos materiais calculava-se precisamente o volume de material removido.

4.2.2 Avaliação da integridade da superfície de trabalho

A análise dos aspectos de integridade superfície de trabalho dos eletrodos-peça usinados em regimes de desbaste e de acabamento teve por objetivo investigar a influência da energia média da descarga elétrica, representada simplificada pela expressão $W_e = u_e \cdot i_e \cdot t_e$ [J], pelo fato de influenciar consideravelmente a funcionalidade das peças produzidas pelo processo de eletroerosão. As seguintes técnicas foram utilizadas:

- Acabamento da superfície de trabalho foi analisado pelos parâmetros de rugosidade R_a . Com os resultados dos ensaios foram organizadas planilhas para a elaboração de curvas de rendimento do processo, representadas individualmente por: taxa de remoção V_w , desgaste volumétrico relativo ϑ e rugosidade R_a , em função da variação da duração da descarga t_e , da corrente de descarga i_e e da relação de contato τ . Além disso, também, são apresentadas várias micrografias obtidas nas diversas condições testadas. Todos esses resultados são analisados e discutidos nos capítulos a seguir. A descrição do equipamento utilizado está descrito no apêndice 3.

- Microscopia ótica para a observação da micrografia da seção transversal das amostras com relação à existência de poros e microfissuras. A medição da espessura da camada ressolidificada também foi avaliada por meio um software acoplado ao equipamento. Todos os procedimentos de preparação das amostras e análise da micrografia estão apresentados no apêndice 4.

- A medição de microdureza Vickers (HV) foi aplicada uma carga média de 98,1 mN partindo da camada limite, no fundo da cavidade usinada, no sentido do material base da liga, e teve por finalidade investigar a variação da dureza ao longo da seção transversal das amostras, com o objetivo de rastrear a profundidade da influência térmica do processo sobre o material.

- Ensaio de difração de Raios X foi aplicado para determinar a intensidade da radiação difratada por uma amostra, em função da posição angular que a mesma se encontra. Com a identificação da intensidade de radiação, é possível obter a estrutura eletrônica e a estrutura cristalina do material analisado. A técnica de difração de raios-X propicia uma excelente precisão para medidas de espaçamentos atômicos, além de ser uma técnica não destrutiva. As análises por difração de raios X (XRD) foram feitas num difratômetro de raios X Shimadzu (modelo XRD 7000), utilizando radiação Cu K_α (comprimento de onda de 1,542 Å)

CAPÍTULO V

Resultados

Este capítulo aborda, os resultados e as discussões dos ensaios de usinabilidade da liga de titânio sob regimes de desbaste, semi-acabamento e de acabamento utilizando eletrodos-ferramenta de grafita, com diferentes tamanhos de partículas.

5.1 Planejamento experimental para o regime de desbaste da liga Ti6Al4V

A Tabela 5.1 apresenta as condições de usinagem adotadas para os ensaios da liga Ti6Al4V sob regime de desbaste. A amplitude de variação dos parâmetros elétricos foi estabelecida após ensaios preliminares e em função da programação da máquina Charmilles ROBOFORM 30 disponível no LAUS-PUCPR. Na usinagem de desbaste procura-se otimizar a taxa de remoção de material V_w e simultaneamente reduzir o desgaste volumétrico relativo ϑ .

Tabela 5.1 – Parâmetros elétricos de processo para os ensaios sob condições de usinagem de desbaste da liga Ti6Al4V

Corrente de descarga i_e [A]	Relação de contato τ	Duração da descarga t_e [μ s]	Tempo de intervalo t_o [μ s]	Polaridade do eletrodo ferramenta	Tamanho da partícula de grafita [μ m]
32	0,5	12,8; 25; 50; 100; 200	12,8; 25; 50; 100; 200	Negativa (-)	3; 10; 15

Na máquina ROBOFORM 30 utilizada nesta pesquisa o máximo valor programável para a corrente de descarga é 32 A. Os melhores resultados sobre a taxa de remoção V_w e o desgaste volumétrico relativo ϑ de titânio para usinagem com altas correntes de descarga i_e são normalmente obtidos para longas durações de descarga t_e e polaridade negativa do eletrodo-ferramenta. Neste sentido, com a finalidade de rastrear adequadamente o comportamento de eletroerosão da liga de titânio Ti6Al4V em relação às taxas V_w e ϑ , adotou-se a polaridade negativa para o eletrodo-ferramenta e uma larga faixa de variação da duração da descarga ($t_e = 12,8; 25; 50; 100$ e 200μ s). Cabe acrescentar que a polaridade negativa para o eletrodo-

ferramenta foi determinada após alguns ensaios com polaridade positiva, os quais apresentaram taxas de remoção muito baixas. A relação de contato ($\tau=t_i/(t_i+t_o)$) foi mantida em 0,5, temos $t_o=t_e+t_d$ (isto significa que o tempo de intervalo entre dois sucessivos pulsos de tensão - t_o é igual ao tempo do período do ciclo de uma descarga - t_p) estas relações garantem boa estabilidade no processo.

5.2 Erodibilidade da liga Ti6Al4V sob condições de desgaste

5.2.1 Taxa de remoção V_w e o desgaste volumétrico relativo ϑ

Com o intuito de otimizar a taxa de remoção de material e reduzir o desgaste relativo, foram testados três tamanhos de partículas para os eletrodos de grafita. Pela Figura 5.1 observa-se que na usinagem com o eletrodo de grafita de $3\mu\text{m}$ a máxima taxa de remoção V_w alcançada foi de $135\text{ mm}^3/\text{min}$ com duração da descarga t_e de $50\ \mu\text{s}$. Com o tamanho de partícula de $10\mu\text{m}$ obteve-se um aumento da taxa V_w para aproximadamente $150\text{ mm}^3/\text{min}$ com t_e ótimo de $50\ \mu\text{s}$. Com o aumento do tamanho da partícula para $15\mu\text{m}$ obteve-se uma redução da taxa V_w para aproximadamente $125\text{ mm}^3/\text{min}$ com t_e ótimo também de $50\ \mu\text{s}$.

O comportamento das curvas mostra que existe diferença entre os resultados de V_w para usinagem com a variação do tamanho de partícula da grafita, observa-se uma aumento de 20% em V_w quando se aumentou o tamanho de partícula de 3 para $10\mu\text{m}$. Em contrapartida, obteve-se uma redução de 17% em V_w quando aumentou-se o tamanho de partícula de 10 para $15\mu\text{m}$. A explicação para este comportamento no rendimento de V_w reside no fato de que o aumento do tamanho de partícula, no caso de $3\mu\text{m}$ para $10\mu\text{m}$ aumenta o volume do material desprendido do eletrodo que colide na poça de fusão e ajuda na expulsão de material. Em relação ao aumento de $10\mu\text{m}$ para $15\mu\text{m}$ não há aumento no rendimento de V_w , pois este volume de material desprendido causa sobre-contaminação da fenda de trabalho, prejudicando a quantidade de faíscas.

É importante acrescentar que nos ensaios com eletrodos de grafita de $15\mu\text{m}$ e para qualquer duração da descarga t_e foi observada a presença de um filme negro sobre a superfície das amostras usinadas. Este efeito se deve à deposição de carbono proveniente da desintegração do dielétrico, o qual não foi adequadamente evacuado para fora da fenda de trabalho apesar de a pressão de lavagem p_m de $0,01\text{ MPa}$ ter promovido boa estabilidade do processo. Portanto, por causa do material depositado sobre as amostras, recomenda-se que um pequeno aumento da pressão de lavagem possa causar a redução deste filme negro.

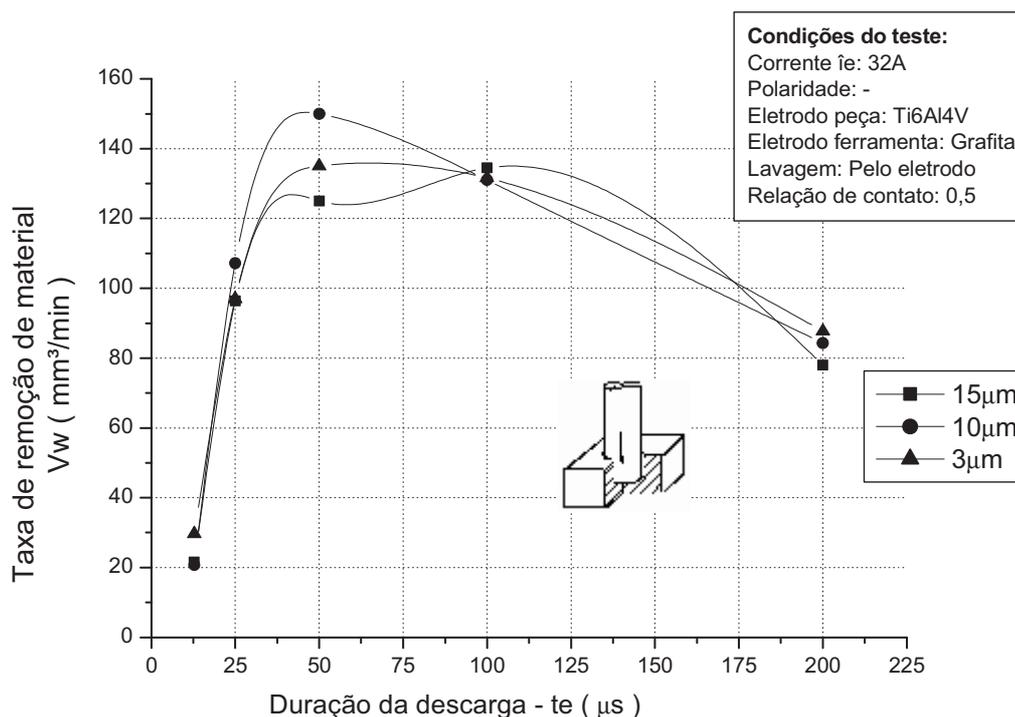


Figura 5.1 - Taxa de remoção V_w da liga Ti6Al4V para usinagem de desbaste com i_e de 32 A e utilização de eletrodos-ferramenta de grafita de 3, 10 e 15 μm de tamanho de partícula.

A estabilidade da usinagem nas durações de descarga $t_e = 12,8$ e $25 \mu s$ foi bastante reduzida, assim como também foi observado um desgaste não-uniforme do eletrodo-ferramenta. Para valores mais elevados de t_e o processo exibiu boa estabilidade, da mesma forma que o desgaste dos eletrodos mostrou-se bem mais uniforme, apresentando uma superfície frontal com boa planicidade. Alguns ensaios com tempo duração de descarga $t_e = 6,4 \mu s$ e relação de contato de 0,5 foram realizados, os quais demonstram resultados insatisfatórios. Foi observada grande instabilidade do processo na forma de arcos e curtos-circuitos. Provavelmente os curtos tempos de intervalo adotados entre as sucessivas descargas não foram suficientes para promover uma adequada lavagem dos subprodutos da usinagem, causando por sua vez sobrecontaminação da fenda de trabalho. Da mesma forma, a superfície frontal dos eletrodos-ferramenta apresentou algumas ondulações. A causa está na inadequada dispersão das descargas elétricas ao longo da superfície frontal provocada pela concentração de subprodutos em certos pontos específicos da fenda de trabalho.

Uma análise do comportamento das curvas das taxas de remoção V_w demonstra que, independentemente do tamanho de partícula do eletrodo-ferramenta, a elevação da duração da descarga t_e proporciona uma ascensão gradual da taxa de remoção até um valor ótimo de $t_e = 50 \mu s$, o qual reflete a máxima taxa de remoção V_w . Para uma duração da descarga t_e mais

longa que a ótima, nota-se que os valores de V_w decaem continuamente. Este comportamento da taxa V_w pode ser explicado da seguinte forma: o prolongamento da duração da descarga t_e promove um aumento progressivo da parcela de energia que é absorvida para a erosão. No entanto, ao mesmo tempo, acontece uma expansão contínua do diâmetro do canal de plasma em sua região central e também naquela próxima ao anodo (eletrodo-ferramenta). Esta expansão é provocada, em sua maior parte, pela transferência radial de energia do plasma para a fronteira com o dielétrico líquido que o circunda. [EUBANK, 1993]

Após atingir um diâmetro de canal ótimo, as perdas de energia do plasma para os eletrodos e para o dielétrico aumentam de tal maneira que a partir deste instante um aumento sucessivo da duração da descarga além do valor ótimo de t_e leva a uma queda acentuada da temperatura e da pressão interna do plasma, promovendo assim grande instabilidade do canal. Em conseqüência acontece uma diminuição da fusão de material no eletrodo-peça (catodo), e possivelmente também pode se iniciar um processo de solidificação do material fundido da cavidade catódica, apesar do diâmetro do canal nesta região permanecer praticamente constante. Como conseqüência desta instabilidade do canal, é possível que no instante da interrupção do fornecimento de energia as forças decorrentes da implosão do canal promovam uma inadequada ejeção do material fundido da cavidade catódica, em concomitância com a geração de uma menor eficiência de lavagem dos produtos eletroerodidos para fora da fenda de trabalho. O resultado final é, portanto, a redução da taxa de remoção de material V_w para utilização de t_e acima do ótimo alcançado. [DIBITONTO, 1989]

O desgaste volumétrico relativo ϑ é dado pela razão entre a taxa de desgaste do eletrodo-ferramenta V_e e a taxa de remoção de material V_w , ou seja, $\vartheta = V_e/V_w$. A Figura 5.2 apresenta o gráfico do comportamento de ϑ em função da variação da duração da descarga para os três tamanhos de partícula do eletrodo de grafita testados na usinagem da liga de titânio Ti6Al4V com corrente de descarga $i_e = 32$ A. Pela avaliação do gráfico vê-se que o desgaste volumétrico relativo ϑ tende a diminuir com o aumento da duração da descarga, independentemente do tamanho da partícula de grafita. No entanto um aumento ainda maior causa aumento no desgaste relativo. Este fenômeno é igualmente explicado pelo aumento de energia no canal de plasma e conseqüente perda de temperatura e pressão, que causa queda na taxa de remoção e conseqüente aumento do desgaste relativo.

Para t_e variando de 12,8 μ s até a duração de descarga, $t_e = 50\mu$ s para todos os tamanhos de partículas estudados, é observada uma queda dos valores de ϑ . Isto se deve ao aumento da taxa de remoção V_w até o seu valor máximo em paralelo com a redução da taxa de desgaste V_e do eletrodo-ferramenta. Este comportamento se deve à boa estabilidade do canal de plasma até

estas durações de descarga t_e , a qual promove a sustentação da continuidade de fusão de material na peça e ao mesmo tempo favorece a solidificação do material fundido na cavidade do eletro-ferramenta.

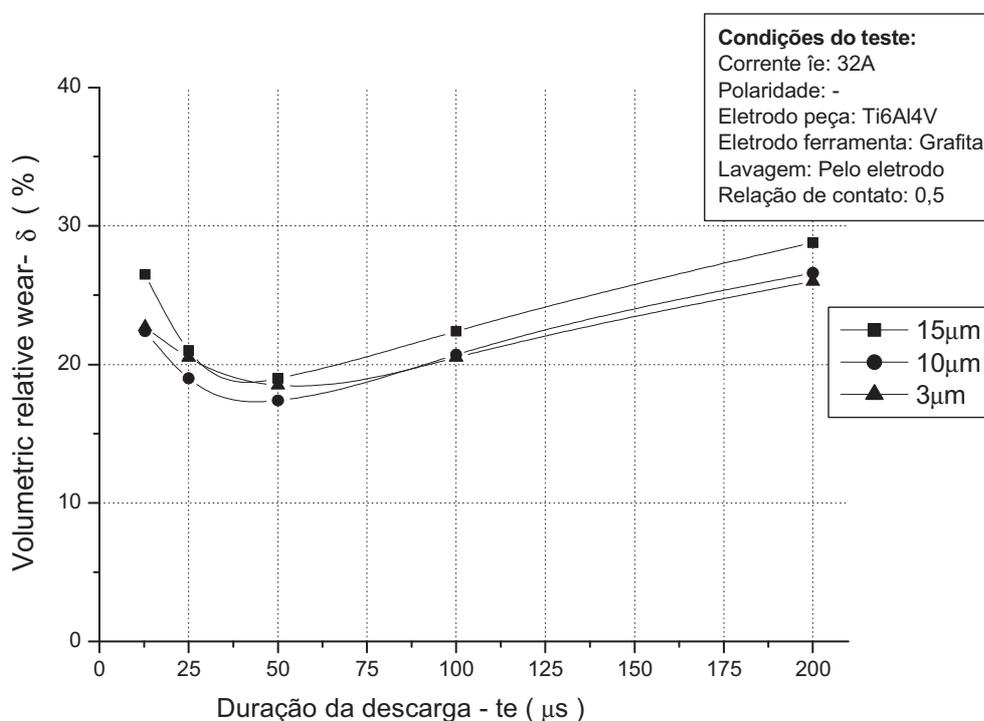


Figura 5.2 - Comportamento do desgaste relativo ϑ da liga Ti6Al4V sob usinagem de desbaste com eletrodos-ferramenta de grafita.

Uma característica interessante do comportamento geral do desgaste relativo ϑ em função da variação do tamanho de partícula do eletrodo ferramenta é a redução dos valores de ϑ na proporção em que se reduz o tamanho da partícula, como pode ser visto pela Figura 5.2. Isto se deve à obtenção de menores taxas de desgaste do eletrodo ferramenta de V_e proporcionadas pelo tamanho da partícula do eletrodo ferramenta. Na usinagem da liga titânio o menor valor do desgaste relativo ϑ obtido foi de 17,4% para a duração ótima da descarga de 50 μs e tamanho de partícula da grafita de 10 μm , apresentando, no entanto, pouca diferença em relação àqueles observados para valores com tamanho de partícula = 3 e 15 μm cujos valores de ϑ se situaram ao redor de 19% para as durações ótimas da descarga $t_e = 50 \mu s$. Estes níveis de desgaste relativo ϑ demonstram uma boa estabilidade e, conseqüentemente, um bom rendimento do processo.

5.2.2 Rugosidade das amostras obtidas por EDM em regime de desbaste

A rugosidade de peças usinadas por eletroerosão por faíscas está relacionada à energia média da descarga elétrica $W_e = u_e \cdot i_e \cdot t_e$ [J]. O aumento da energia W_e acarreta numa maior rugosidade, isto porque crateras de maior profundidade e mais largas são produzidas nas peças após a interrupção da descarga elétrica. Usualmente, a ampliação do nível de energia fornecida por descarga é efetuada pela elevação da duração da descarga t_e ou da corrente de descarga i_e . A Figura 5.3 mostra que para a corrente i_e de 32 A a elevação contínua da duração da descarga t_e proporciona um aumento gradual da rugosidade R_a . Na Figura 5.3 está representado o comportamento da rugosidade para usinagem da liga Ti6Al4V com eletrodo-ferramenta com polaridade negativa e tamanho de partícula de 3,10 e 15 μm para o regime de acabamento, $i_e = 32$ A. Quanto aos níveis de rugosidade R_a observa-se diferença de até 18% para usinagem com tamanhos de partícula de 3, 10 e 15 μm nas condições de ótima duração de descarga t_e , que no caso foi de $t_e = 50 \mu\text{s}$. Nesta condição a rugosidade média R_a para a corrente de descarga $i_e = 32$ A apresentou valores de 11,1; 10,8; e 10,6 μm para tamanhos de partículas de 3; 10 e 15 μm respectivamente. As menores rugosidades foram para uma duração de descarga $t_e = 6,4 \mu\text{s}$ onde os valores encontrados foram de 6,6; 6,5 e 6,2 μm para tamanho de partícula de 3, 10 e 15 μm respectivamente, porém nesta duração de descarga a taxa de remoção e desgaste relativo não apresentaram bons resultados.

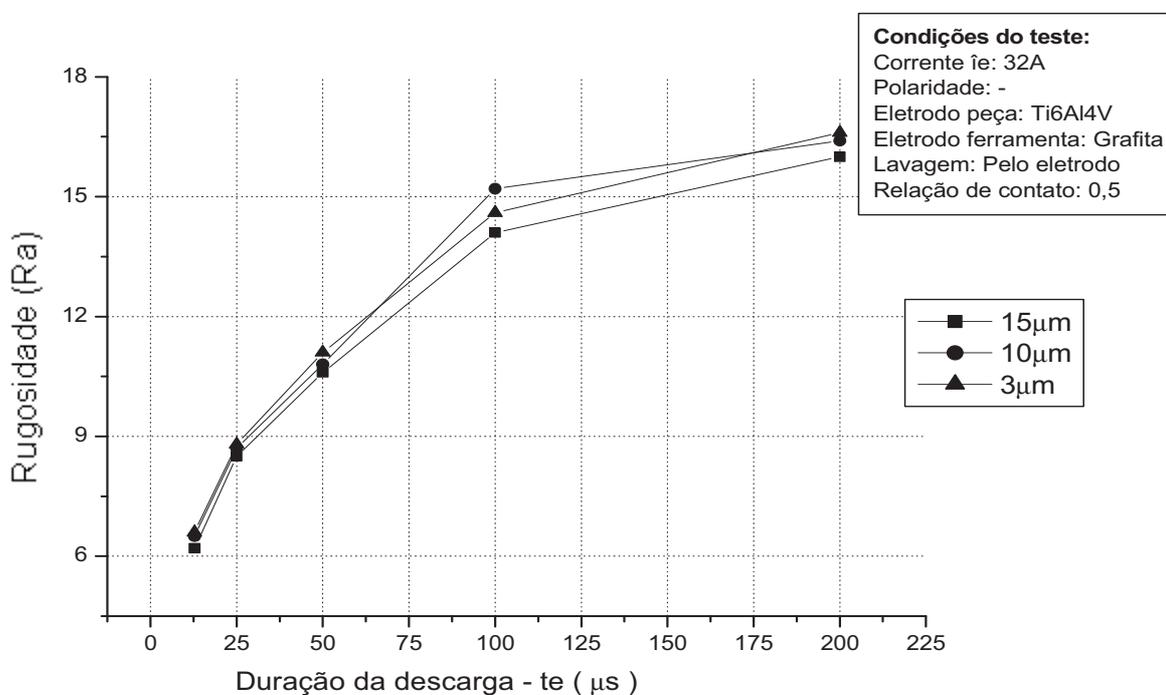


Figura 5.3 – Comportamento da rugosidade das amostras após EDM em função da variação da duração da descarga e da relação de contato para corrente de 32 A.

5.2.3 Integridade da superfície das amostras após EDM de desbaste

Como discutido no Capítulo 3, o processo de eletroerosão por faíscas afeta termicamente as camadas abaixo da superfície das peças usinadas. Dependendo da profundidade dessas zonas termicamente afetadas, a funcionalidade da ferramenta de moldagem, como por exemplo, pode ser seriamente comprometida. Portanto, é importante qualificar e quantificar a influência térmica do processo sobre a seção transversal das peças. Normalmente duas zonas distintas são identificadas nas peças submetidas à erosão por EDM. A primeira delas é a camada limite que é formada pela parte do material liquefeito que não foi expulso ao final da descarga e que acaba por se ressolidificar na cratera recém-formada. Usualmente, apresenta dureza superior ao material base da liga devido principalmente à interação do carbono, liberado pela desintegração do dielétrico, que se difunde para dentro da peça formando carbonetos, como o carbeto de titânio (TC). Além disso, na camada limite geralmente se observa a existência de poros e microfissuras. Logo abaixo da camada limite é observada a presença da zona termicamente afetada. Esta zona é formada por várias camadas, as quais geralmente são extremamente difíceis de ser identificadas por exames ao microscópio óptico. Embora a zona termicamente afetada não tenha sofrido fusão, ela também pode apresentar modificações em sua composição química e estrutura. [JUTZLER, 1982 & STEVENS, 1998].

A Figura 5.4 apresenta a micrografia da seção transversal de uma amostra de Ti6Al4V usinada em condições de desbaste. Pode-se nitidamente observar na micrografia a presença da camada ressolidificada. Nota-se que não existe a presença de microfissuras, tipicamente formada como, por exemplo, nos aços. Observa-se que a camada ressolidificada não apresenta uniformidade de espessura e não está presente em toda a superfície.

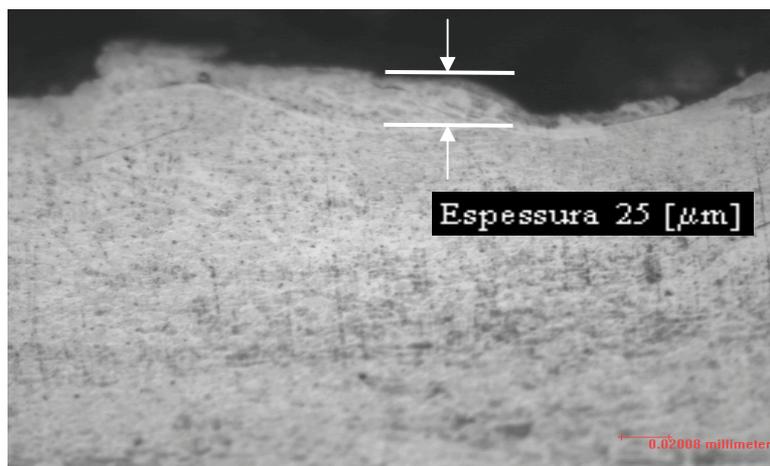


Figura 5.4 - Micrografia da seção transversal de uma amostra da liga de titânio Ti6Al4V erodida em condição de desbaste

No que diz respeito à espessura da camada ressolidificada constatou-se pelas medições de espessura pela micrografia das amostras que o valor máximo de camada branca foi de aproximadamente 25 μm obtido para usinagem de desbaste nas condições de $i_e = 32 \text{ A}$ e $t_e = 50 \mu\text{s}$ para os eletrodos de grafita de tamanho de partícula 3, 10 e 15 μm .

Foram executadas seis medições de microdureza $\text{HV}_{0,05}$ em intervalos espaçados de 35 μm a partir da primeira medição realizada na camada ressolidificada (profundidade 0) da amostra como apresentado na Tabela 5.2. As amostras medidas foram as que apresentaram melhor desempenho, ou seja, peças usinadas com os parâmetros ótimos de processo. Os diferentes tamanhos de partículas dos eletrodos de grafita (3, 10 e 15 μm) apresentaram a mesma variação de dureza em função da profundidade no sentido do material base. Pela Figura 5.5 é possível observar a redução da dureza no sentido do material base da liga. Na camada limite (ressolidificada) observou-se uma dureza de 423 HV e algo em torno de 338 HV no material base da liga. Apesar de não ser perceptível pela micrografia óptica, torna-se evidente pela análise do comportamento da microdureza a existência da zona termicamente afetada.

Tabela 5.2 – Microdureza [HV] para a liga Ti6Al4V usinado sob condições ótimas de desbaste.

Profundidade de medição [μm]	Dureza [HV] $i_e = 32 \text{ A}$
0	423
35	355
70	353
105	350
140	344
175	338

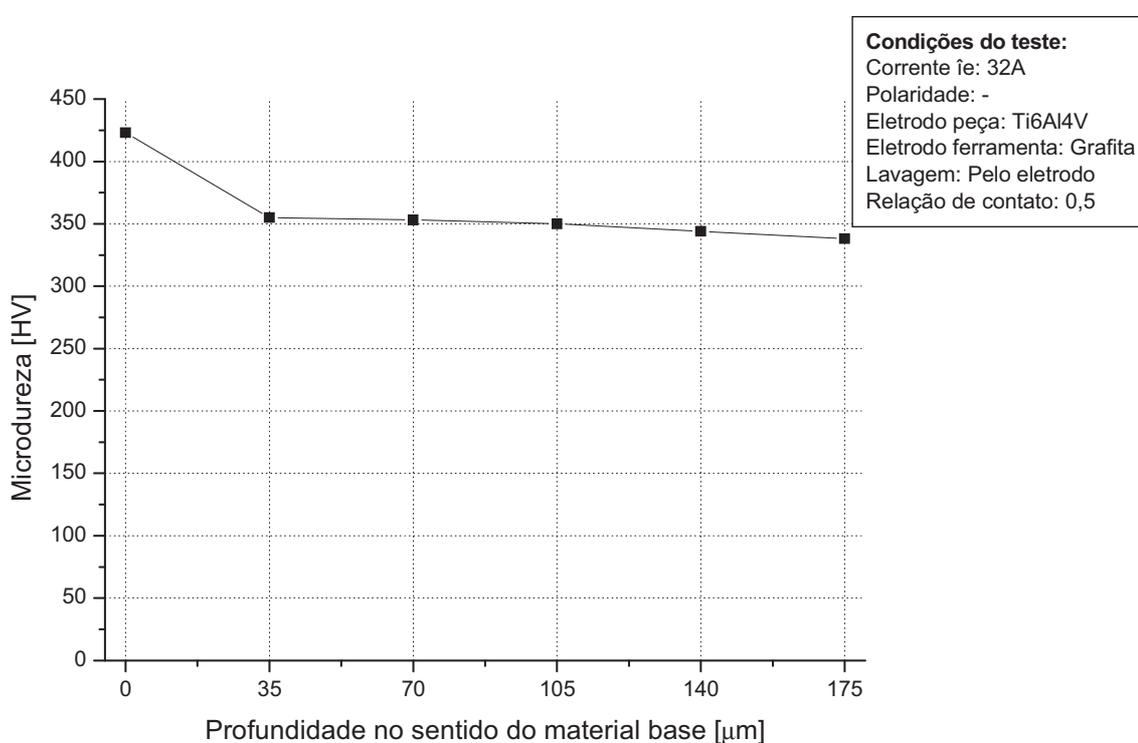
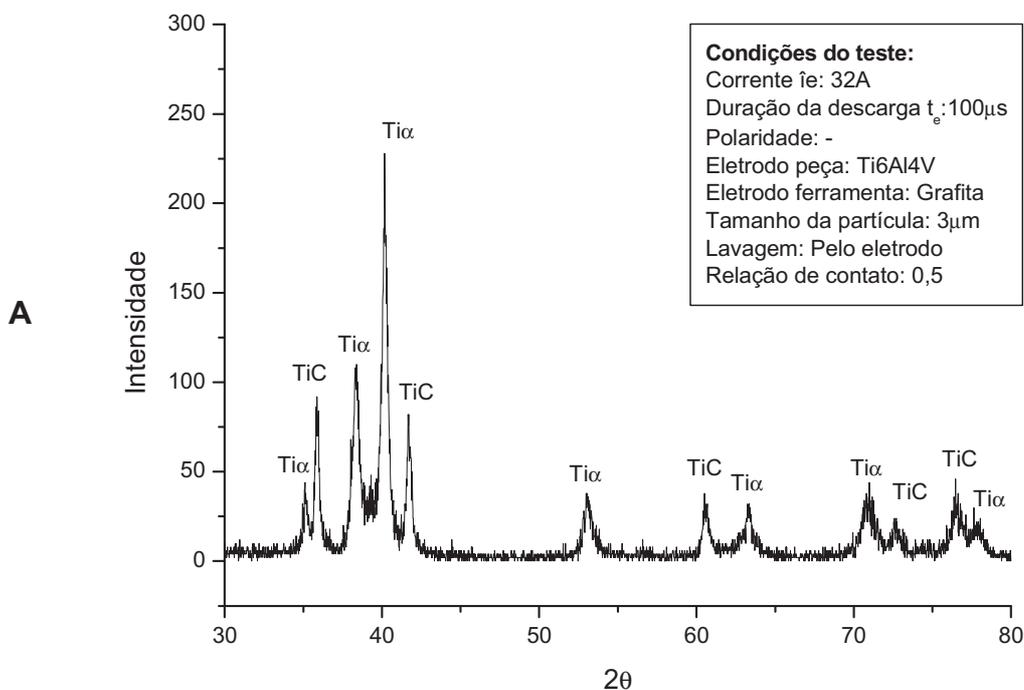


Figura. 5.5 - Comportamentos da microdureza Vickers [HV] na usinagem de desbaste da liga Ti6Al4V a partir da camada limite até o material base da liga, com corrente de descarga de 32 A e eletrodos de grafita com 3, 10 e 15 μm .

5.2.4 XRD das amostras após EDM de desbaste

As amostras analisadas foram as que apresentaram melhores resultados de taxa de remoção e desgaste relativo, ou seja, com os parâmetros ótimos processo em usinagem de desbaste. As análises por difração de raios X (XRD) foram feitas num difratômetro de raios X Shimadzu (modelo XRD 7000), utilizando radiação Cu K_α (comprimento de onda de $1,542 \text{ \AA}$), 40 kV e 20mA, varrendo uma faixa de ângulos de 30 a 80° com varredura contínua e velocidade de $3^\circ / \text{minuto}$. Comparou-se com o padrão JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) do titânio 000-44-1294 e do carbeto de titânio 000-72-2496. Na Figura 5.6 pode-se observar os difratogramas de RX das amostras de Ti6Al4V após EDM de desbaste.



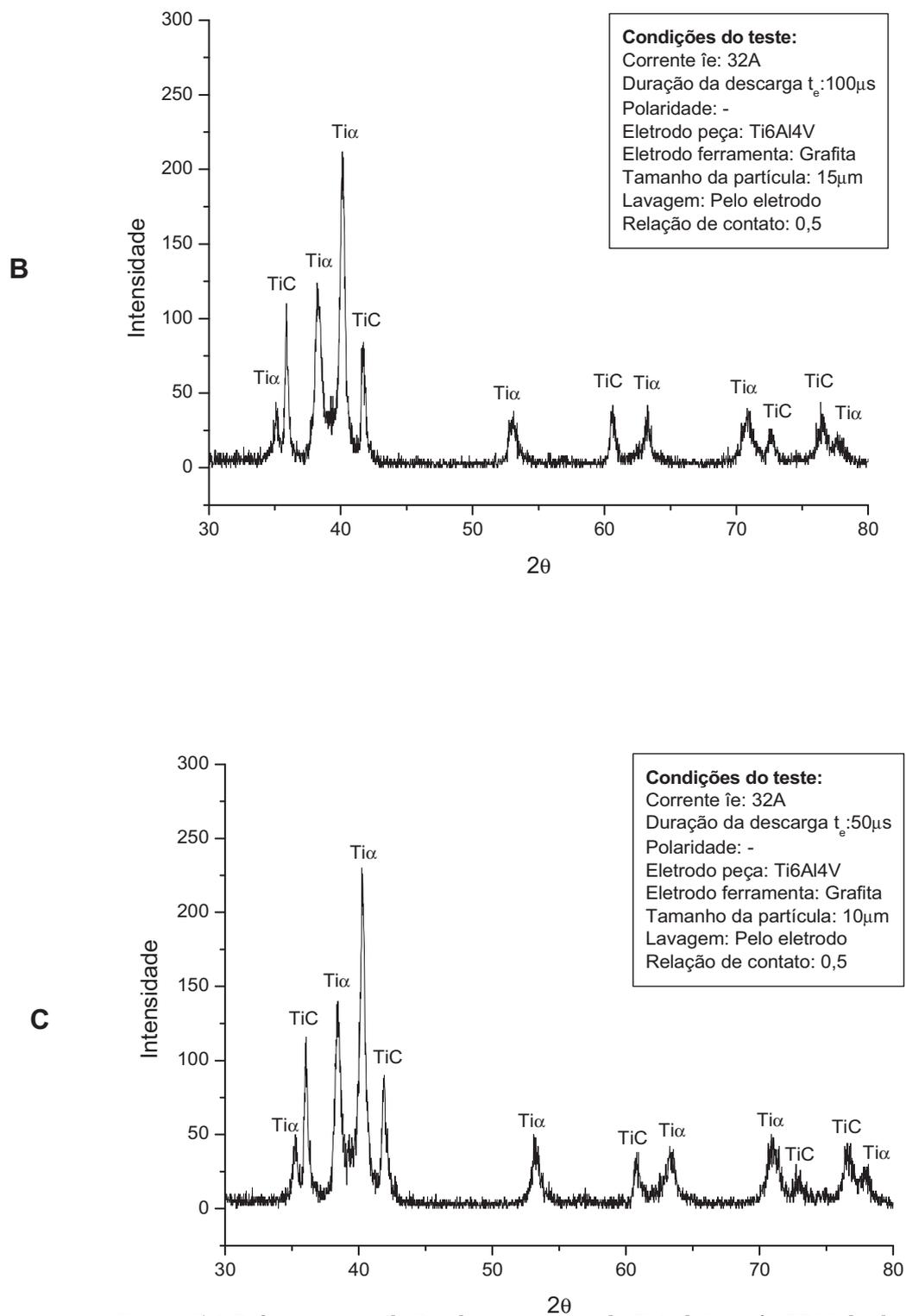


Figura 5.6 Difratoograma de RX das amostras de Ti6Al4V após EDM de desbaste. (A) Eletrodo de grafita de 3 μ m, (B) Eletrodo de grafita de 10 μ m e (C) Eletrodo de grafita de 15 μ m.

A indexação confirmou a presença da fase α (hcp) representada nos padrões de difração como $Ti\alpha$. A fase β na liga $Ti6Al4V$ está dispersa na matriz α , distribuída de maneira uniforme, principalmente nos contornos de grãos α . Como a quantidade de fase β na liga é relativamente pequena e as outras reflexões não coincidentes são de baixa intensidade, fica praticamente impossível garantir a presença da fase β somente pela análise por difração. [A. A. COUTO, 2006]. Após a EDM da liga $Ti6Al4V$ existe a formação de carбето de titânio, representada nos padrões de difração como TiC . O pico mais intenso foi verificado em 2Θ com valor de $40,18$ ($Cu K\alpha$), o que corresponde a $Ti (1\ 0\ 1)$. Este pico é o mais intenso em todos os padrões de difração para a EDM em regime de desbaste. Os picos de carбето de titânio das superfícies usinadas por eletrodo de grafita indicam a formação de carбето Ti_8C_5 . A variação do tamanho de partícula do eletrodo de grafita, não modificou o difratograma das amostras, ou seja, não houve picos de difração em intensidades diferentes as do carбето de titânio TiC e do titânio $Ti\alpha$, o que significa que não houve identificação de diferentes fases ou diferentes materiais.

5.3. Planejamento experimental para o regime de semi-acabamento da liga Ti6Al4V

Na remoção por EDM em regime de semi-acabamento um dos principais objetivos é reduzir a rugosidade da superfície usinada da peça e alcançar as tolerâncias geométricas especificadas pelo projetista. Os ensaios de semi-acabamento da liga Ti6Al4V foram divididos conforme apresentado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Parâmetros elétricos de processo para os ensaios sob condições de usinagem de semi-acabamento da liga Ti6Al4V.

Corrente de descarga i_e [A]	Relação de contato τ	Duração da descarga t_e [μ s]	Tempo de intervalo t_o [μ s]	Polaridade do eletrodo ferramenta	Tamanho da partícula de grafita [μ m]
12	0,5	6,4; 12,8; 25; 50; 100;	6,4; 12,8; 25; 50; 100;	Negativa (-)	3; 10; 15

A relação de contato τ foi mantida em 0,5 para garantir a estabilidade do processo, pois para o nível de corrente de descarga i_e especificado 12 A, espera-se que as melhores taxas de remoção e de textura superficial sejam obtidas para pequenos tempos de duração da descarga t_e . O gerador foi programado para atuar no modo de pulsos retangulares e os ensaios foram conduzidos para polaridade negativa do eletrodo-ferramenta, com o intuito de se comparar os comportamentos da taxa de remoção de material V_w e do desgaste volumétrico relativo. A pressão de lavagem por alimentação do dielétrico pelo furo central do eletrodo-ferramenta também foi estabelecida em 0,01 MPa.

5.4 Erodibilidade da liga Ti6Al4V sob condições de semi-acabamento

5.4.1 Taxa de remoção V_w e desgaste volumétrico relativo ϑ

Na Figura 5.7 estão representados os valores de V_w em função da variação da duração da descarga t_e para usinagem com polaridade negativa do eletrodo-ferramenta. Os gráficos demonstram um bom comportamento de ascensão e queda das curvas das taxas de remoção V_w para a polaridade negativa do eletrodo, assim como uma caracterização clara das durações ótimas das descargas t_e , aspectos estes que evidenciam uma boa estabilidade do processo de EDM. A máxima taxa V_w obtida foi de aproximadamente $50,9 \text{ mm}^3/\text{min}$ com o eletrodo de grafita com tamanho de partícula = $10\mu\text{m}$ e t_e ótimo de $50 \mu\text{s}$, sendo este valor de t_e o mesmo observado para os outros tamanho de partícula, 3 e $15 \mu\text{m}$.

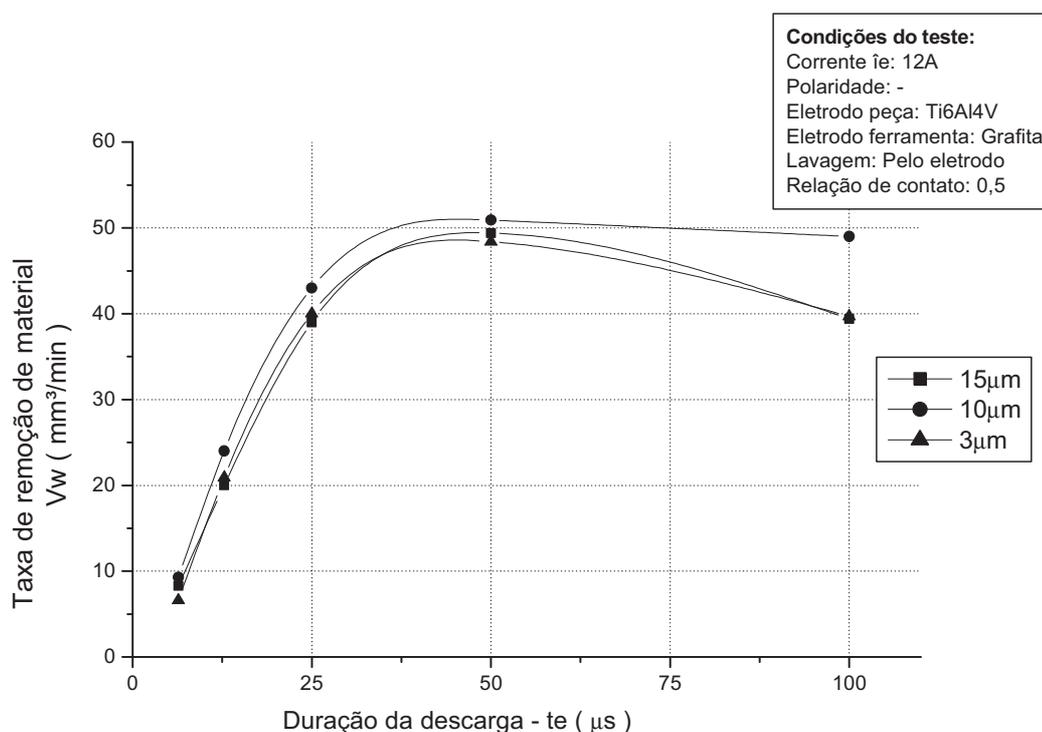


Figura 5.7 - Taxa de remoção V_w da liga Ti6Al4V para corrente $i_e = 12 \text{ A}$, para usinagem com polaridade negativa do eletrodo-ferramenta e tamanho de partícula = 3, 10 e $15\mu\text{m}$.

As taxas de remoção V_w alcançadas para usinagem com polaridade negativa do eletrodo-ferramenta são bastante superiores às obtidas para usinagem com polaridade positiva do eletrodo. A usinagem com a ferramenta positivamente carregada demonstrou grande instabilidade do processo para todas as correntes testadas, apresentando características quase nulas de remoção de material da peça.

A evolução do desgaste volumétrico relativo ϑ em função da variação da duração da

descarga e do tamanho de partícula do eletrodo-ferramenta para os ensaios da liga Ti6Al4V está apresentada na Figura 5.8. Pela comparação das curvas apresentadas na Figura 5.8, existe certa influência do tamanho de partícula sobre os índices de desgaste relativo ϑ , os quais apresentaram uma variação em torno de 5 a 7 % para a mesma condição de duração ótima da descarga de 50 μs na corrente de descarga $i_e = 12 \text{ A}$. A diminuição gradual do desgaste relativo demonstra um comportamento estável da usinagem.

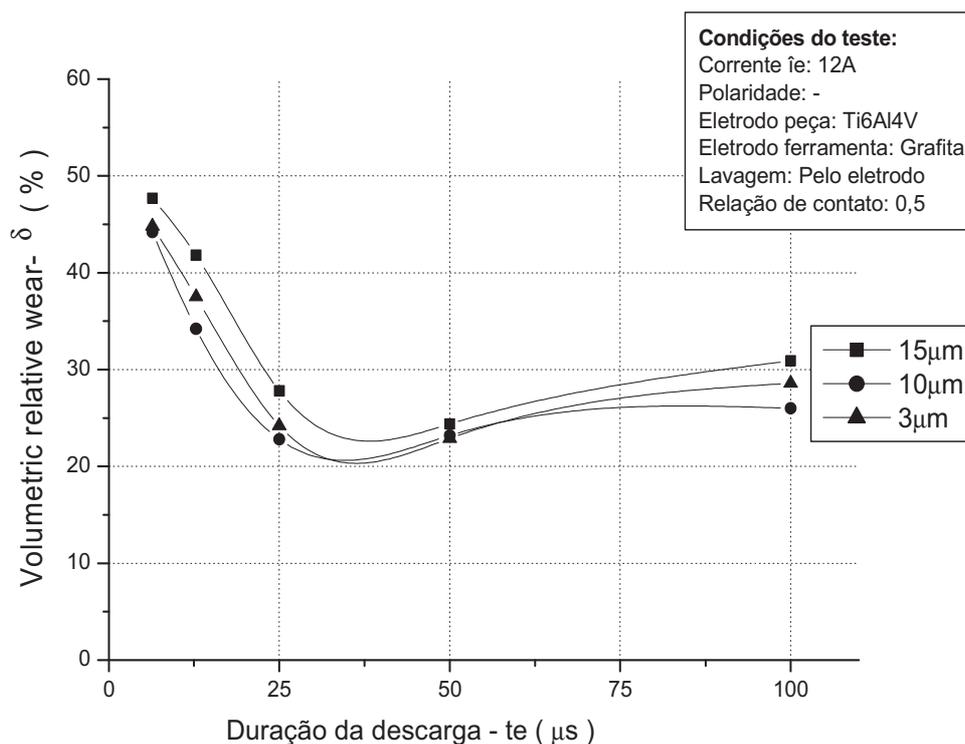


Figura 5.8 – Desgaste relativo ϑ da liga Ti6Al4V para corrente $i_e = 12 \text{ A}$ para usinagem com polaridade negativa do eletrodo-ferramenta de grafita.

Em função dos resultados apresentados pelos ensaios para as correntes de descarga $i_e = 12 \text{ A}$, recomenda-se que seja utilizada a polaridade negativa do eletrodo-ferramenta para usinagem da liga Ti6Al4V, pelo fato desta condição ter proporcionado as melhores taxas V_w e os menores índices de ϑ . Em ensaios preliminares com polaridade positiva do eletrodo ferramenta, houve baixos níveis de taxa de remoção e altos índices de desgaste relativo.

5.4.2 Rugosidade das amostras obtidas por EDM em regime de semi-acabamento

Na Figura 5.9 está representado o comportamento da rugosidade para remoção por EDM da liga Ti6Al4V com eletrodo-ferramenta com polaridade negativa e tamanhos de partícula de 3,10 e 15 μm para o regime de acabamento, $i_e = 12 \text{ A}$. Quanto a rugosidade R_a , observa-se pequena diferença para usinagem com tamanhos de partícula de 3, 10 e 15 μm nas condições de ótima duração de descarga t_e , que no caso foi de $t_e = 50 \mu\text{s}$. Nestas condições a rugosidade média R_a para as correntes de descarga $i_e = 12 \text{ A}$ apresentou valores de 7,8; 7,3 e 7,5 μm para tamanhos de partículas de 3; 10 e 15 μm respectivamente. As menores rugosidades foram para uma duração de descarga $t_e = 6,4 \mu\text{s}$ onde os valores encontrados foram de 4,1; 4,3 e 4,6 μm para tamanho de partícula de 3, 10 e 15 μm respectivamente, porém nesta duração de descarga a taxa de remoção e desgaste relativo não apresentaram bons resultados.

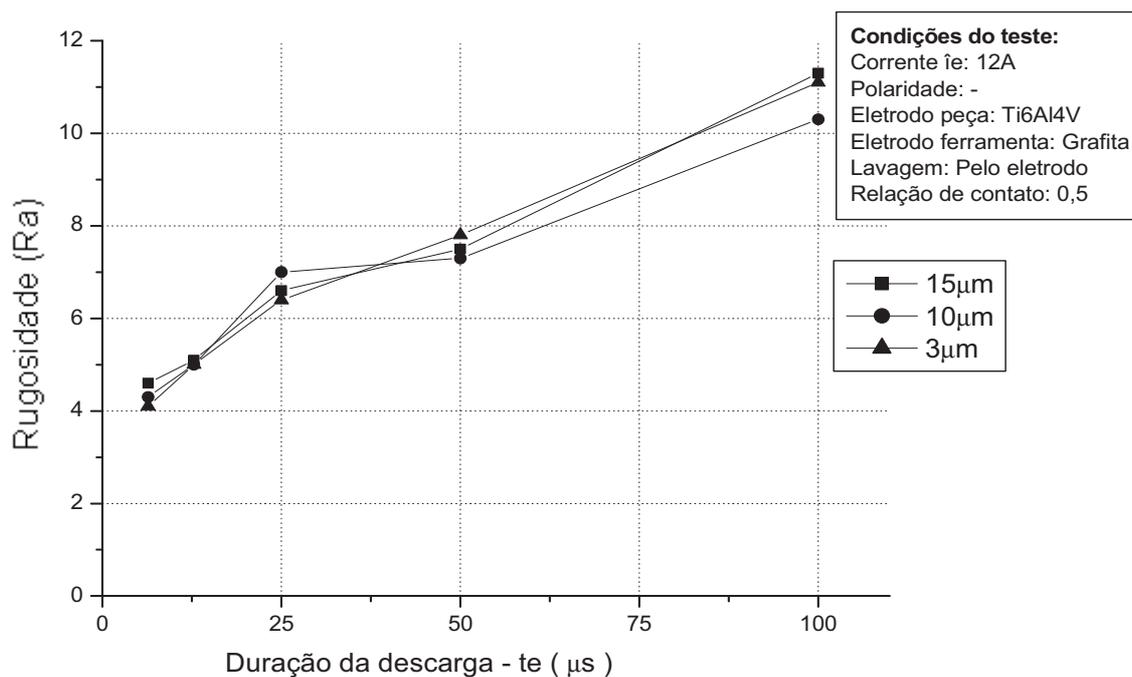


Figura 5.9 – Comportamento da rugosidade das amostras após EDM em função da variação da duração da descarga para corrente de 12 A.

5.4.3 Integridade da superfície das amostras após EDM de semi-acabamento

A Figura 5.10 apresenta a micrografia da seção transversal de uma amostra de Ti6Al4V usinada em condições de semi-acabamento. Pode-se nitidamente observar na micrografia a presença da camada ressolidificada. Não se verifica a presença de microfissuras. Observa-se que a camada branca não apresenta uniformidade de espessura. Esta camada não é presente em toda a superfície usinada. No que diz respeito à espessura da camada ressolidificada constatou-se pelas medições de espessura pela micrografia das amostras que o valor máximo de camada branca foi de aproximadamente 20 μm obtido para usinagem de desbaste nas condições de $i_e = 12 \text{ A}$ e $t_e = 50 \mu\text{s}$ para eletrodo de grafita de tamanho de partícula 3, 10 e 15 μm .

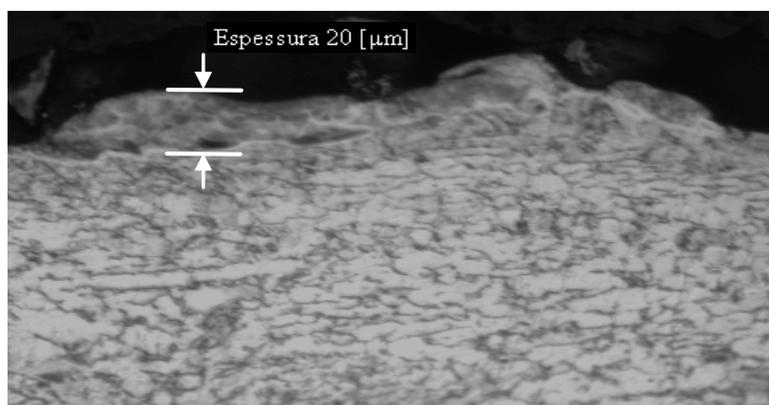


Figura 5.10 - Micrografia da seção transversal de uma amostra da liga de titânio Ti6Al4V usinada em condição de semi-acabamento

Foram executadas seis medições de microdureza $HV_{0,05}$ em intervalos espaçados de 35 μm a partir da primeira medição realizada na camada ressolidificada (profundidade 0) da amostra como apresentado na Tabela 5.4. As amostras medidas foram as que apresentaram melhor desempenho, ou seja, peças usinadas com os parâmetros ótimos de processo para usinagem de semi-acabamento. Os diferentes tamanhos de partículas dos eletrodos de grafita (3, 10 e 15 μm) apresentaram a mesma variação de dureza em função da profundidade no sentido do material base. Pela Figura 5.11 é possível observar a redução da dureza no sentido do material base da liga. É possível perceber que para uma corrente de descarga i_e de 12A não houve grande variação da dureza. Apesar de não ser perceptível pela micrografia óptica, esta variação de dureza comprova a existência de uma camada afetada termicamente, mesmo que de pequenas dimensões quando comparada a correntes de descarga maiores, como por exemplo, $i_e = 32\text{A}$. Na camada ressolidificada observou-se uma dureza de 366 HV e algo em torno de 352 HV no material base da liga.

Tabela 5.4 – Microdureza [HV] para a liga Ti6Al4V usinado sob condições ótimas de semi-acabamento.

Profundidade de medição [μm]	Dureza [HV] $i_e = 12 \text{ A}$
0	366
35	362
70	358
105	355
140	353
175	352

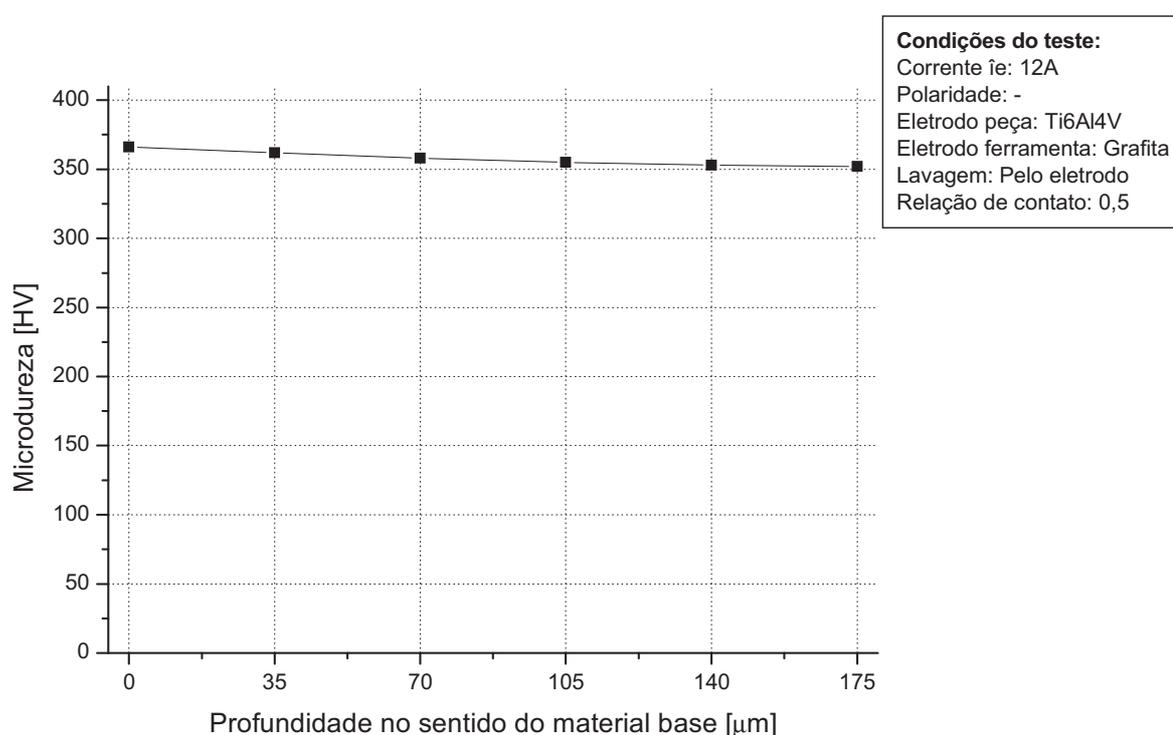
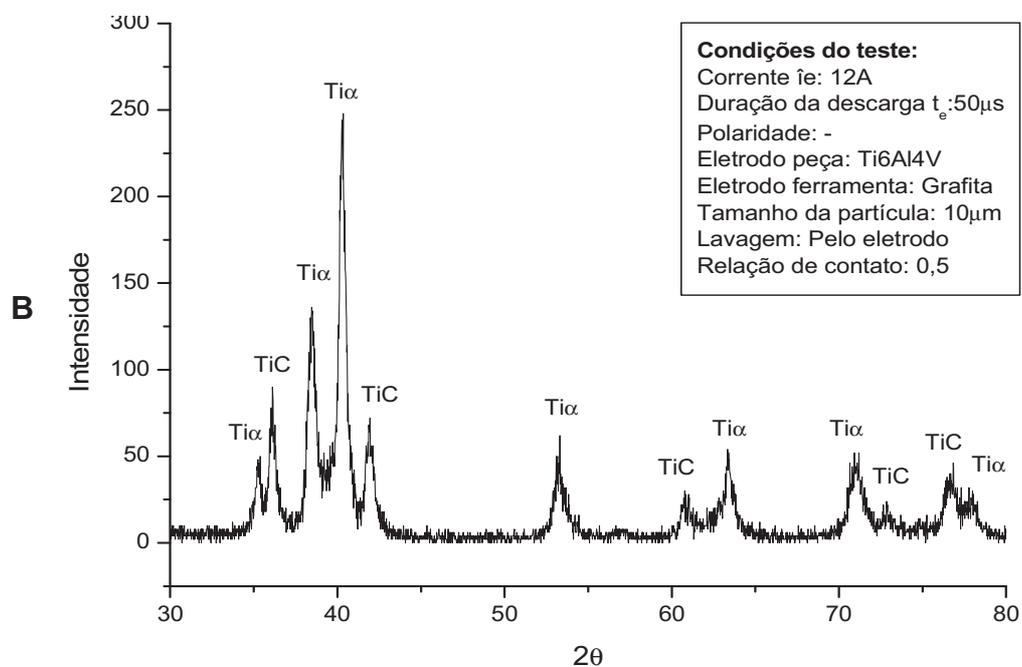
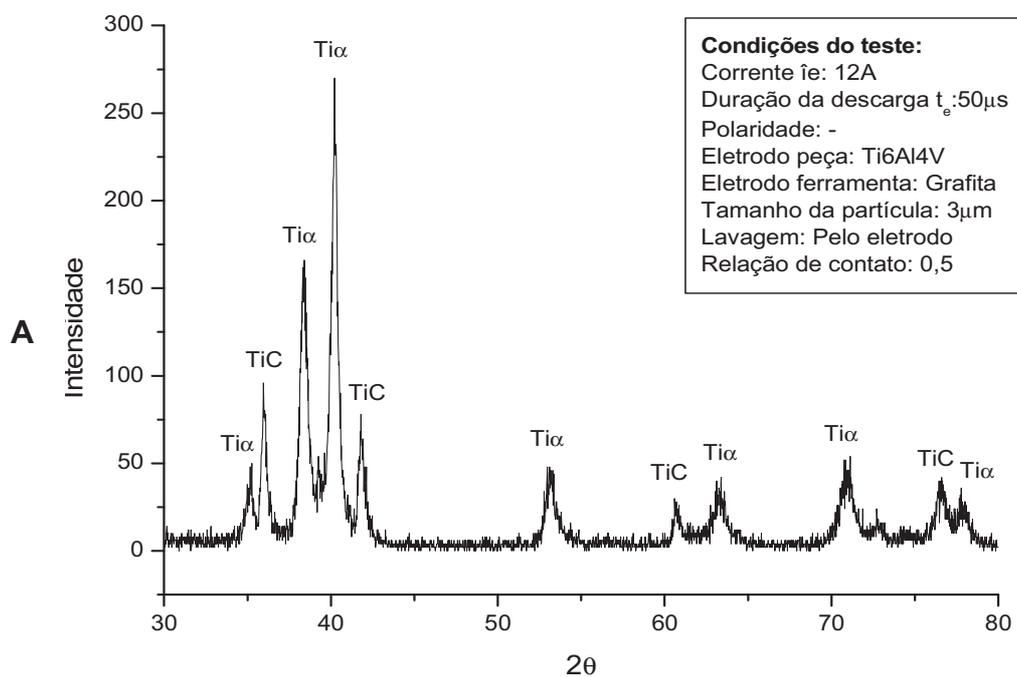


Figura. 5.11 – Comportamento da microdureza Vickers [HV] na usinagem de semi-acabamento da liga Ti6Al4V a partir da camada limite até o material base da liga, com corrente de descarga de 12 A e eletrodos de grafita com 3, 10 e 15 μm .

5.4.4 XRD das amostras após EDM de semi-acabamento

As amostras analisadas foram as que apresentaram melhores resultados de taxa de remoção e desgaste relativo, ou seja, com os parâmetros ótimos de usinagem de semi-acabamento. As análises foram realizadas utilizando os mesmos equipamentos das análises do Capítulo 5.2.4. Também foram utilizados os mesmos padrões de JCPDS. Na Figura 5.12 pode-se

observar os padrões de difração das amostras de Ti6Al4V após EDM de semi-acabamento.



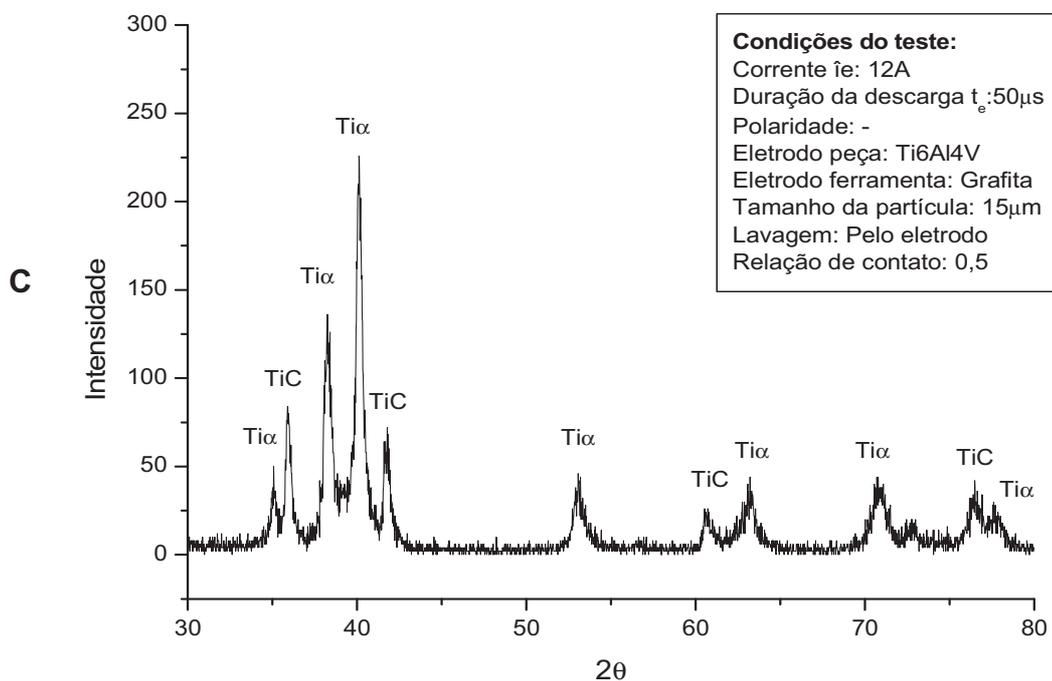


Figura 5.12 Difratoograma de RX das amostras de Ti6Al4V após EDM de semi-acabamento. (A) Eletrodo de grafita de 3 μ m, (B) Eletrodo de grafita de 10 μ m e (C) Eletrodo de grafita de 15 μ m.

A indexação confirmou a presença da fase α (hcp) representada nos padrões de difração como $Ti\alpha$. Na liga Ti6Al4V evidenciou-se a presença da fase α (hcp) representada nos padrões de difração como $Ti\alpha$. Após a EDM da liga Ti6Al4V existe a formação de carbeto de titânio, representada nos padrões de difração como TiC. O pico mais intenso foi verificado em 2θ com valor de 40,18 (Cu $K\alpha$), o que corresponde a Ti (1 0 1). Este pico é o mais intenso em todos os padrões de difração para a EDM em regime de desbaste. Os picos de carbeto de titânio das superfícies usinadas por eletrodo de grafita indicam a formação de carbeto Ti_8C_5 . A variação do tamanho de partícula do eletrodo de grafita, não modificou o difratograma das amostras, ou seja, não houve picos de difração em intensidades diferentes as do carbeto de titânio TiC e do titânio $Ti\alpha$, o que significa que não houve identificação de diferentes fases ou diferentes materiais.

5.5 Planejamento experimental para o regime de acabamento da liga Ti6Al4V

Na usinagem de acabamento um dos principais objetivos é reduzir ao máximo a textura superficial da peça e ao mesmo tempo alcançar da melhor maneira possível às tolerâncias geométricas especificadas pelo projetista. Os ensaios de acabamento da liga Ti6Al4V foram divididos conforme apresentado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Parâmetros elétricos de processo para os ensaios sob condições de usinagem de acabamento da liga Ti6Al4V.

Corrente de descarga i_e [A]	Relação de contato τ	Duração da descarga t_e [μ s]	Tempo de intervalo t_o [μ s]	Polaridade do eletrodo ferramenta	Tamanho da partícula de grafita [μ m]
3	0,5	6,4; 12,8; 25; 50; 100;	6,4; 12,8; 25; 50; 100;	negativa (-)	3; 10; 15

A relação de contato τ foi mantida em 0,5 para garantir a estabilidade do processo, pois para o nível de corrente de descarga i_e especificado 3 A, espera-se que as melhores taxas de remoção e de textura superficial sejam obtidas para pequenos tempos de duração da descarga t_e . A tensão em aberto \hat{u}_i foi aumentada para 160 V para que seja mantida uma abertura da fenda de trabalho com dimensões que possibilitem boa evacuação das partículas eletroerodidas. O gerador foi programado para atuar no modo de pulsos retangulares e os ensaios foram conduzidos para polaridade negativa do eletrodo-ferramenta, com o intuito de se comparar os comportamentos da taxa de remoção de material V_w e do desgaste volumétrico relativo. A pressão de lavagem por alimentação do dielétrico pelo furo central do eletrodo-ferramenta também foi estabelecida em 0,01 MPa.

5.6 Erodibilidade da liga Ti6Al4V sob condições de acabamento

5.6.1 Taxa de remoção V_w e desgaste volumétrico relativo ϑ

Na Figura 5.13 estão representados os valores de V_w em função da variação da duração da descarga t_e para usinagem com polaridade negativa do eletrodo-ferramenta. Os gráficos da Fig. 5.13 demonstram um bom comportamento de ascensão e queda das curvas das taxas de remoção V_w para a polaridade negativa do eletrodo, assim como uma caracterização clara das durações ótimas das descargas t_e , aspectos estes que evidenciam uma boa estabilidade do processo de EDM. A máxima taxa V_w obtida foi de aproximadamente $2,6 \text{ mm}^3/\text{min}$ com o eletrodo de grafita com tamanho de partícula = $10\mu\text{m}$ e t_e ótimo de $25 \mu\text{s}$, sendo este valor de t_e o mesmo observado para os outros tamanhos de partícula, 3 e $15 \mu\text{m}$.

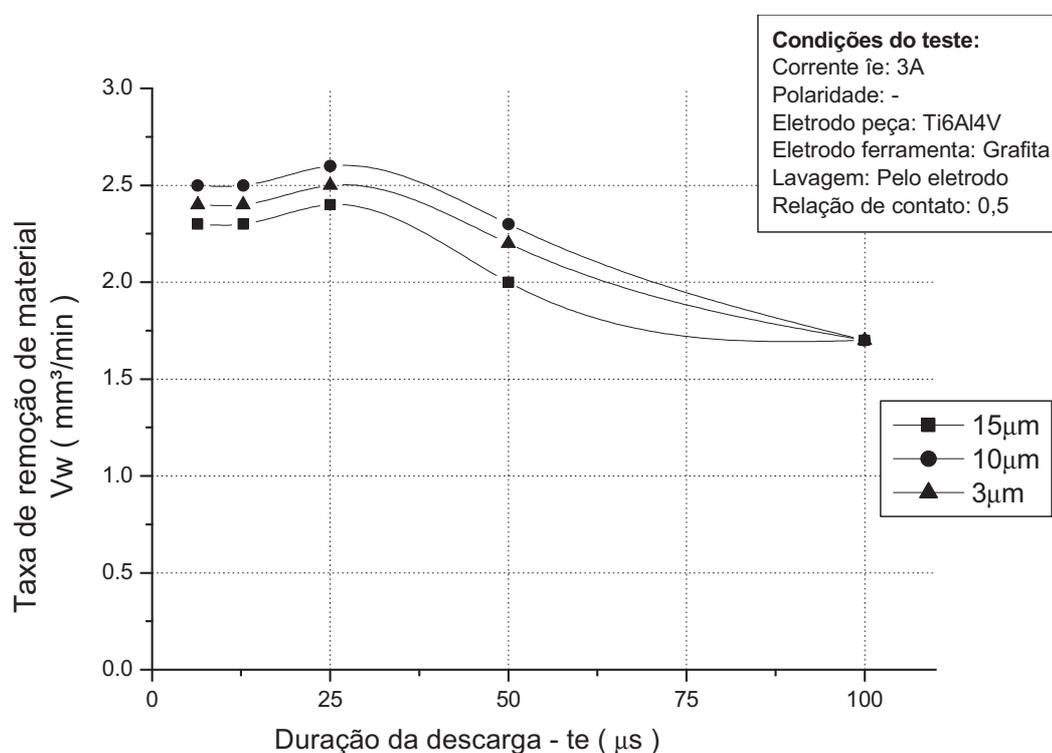


Figura 5.13 - Taxa de remoção V_w da liga Ti6Al4V para corrente $i_e = 3 \text{ A}$, para usinagem com polaridade negativa do eletrodo-ferramenta e tamanho de partícula de 3, 10 e $15\mu\text{m}$.

As taxas de remoção V_w alcançadas para usinagem com polaridade negativa do eletrodo-ferramenta são bastante superiores às obtidas para usinagem com polaridade positiva do eletrodo. A usinagem com a ferramenta positivamente carregada demonstrou grande instabilidade do processo para todas as correntes testadas, apresentando características quase

nulas de remoção de material da peça.

A evolução do desgaste volumétrico relativo ϑ em função da variação da duração da descarga e do tamanho de partícula do eletrodo-ferramenta para os ensaios da liga Ti6Al4V está apresentada na Figura 5.14. Pela comparação das curvas apresentadas na figura, existe certa influência do tamanho de partícula sobre os índices de desgaste relativo ϑ , os quais apresentaram uma variação em torno de 2,3 a 2,8 % para a mesma condição de duração ótima da descarga de 25 μs na corrente de descarga $i_e = 3 \text{ A}$. A diminuição gradual do desgaste relativo demonstra um comportamento estável da usinagem.

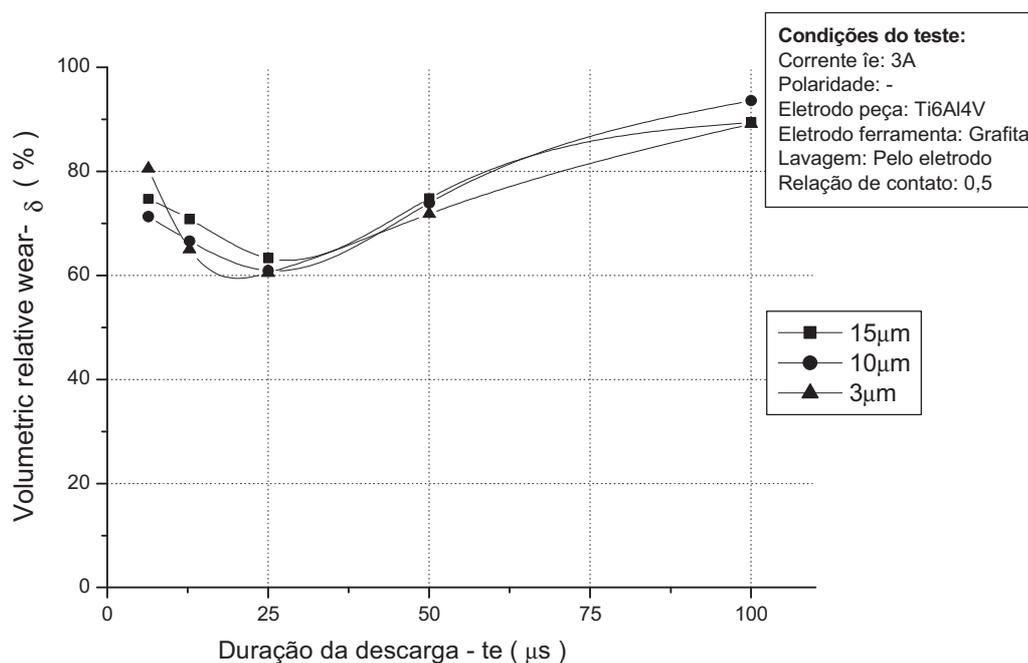


Figura 5.14 – Desgaste relativo ϑ da liga Ti6Al4V para corrente $i_e = 3 \text{ A}$ para usinagem com polaridade negativa do eletrodo-ferramenta de grafita.

Em função dos resultados apresentados pelos ensaios para as correntes de descarga $i_e = 3 \text{ A}$, recomenda-se que seja utilizada a polaridade negativa do eletrodo-ferramenta para usinagem da liga Ti6Al4V, pelo fato desta condição ter proporcionado as melhores taxas V_w e os menores índices de ϑ .

5.6.2 Rugosidade das amostras após EDM de acabamento

Na Figura 5.15 está representado o comportamento da rugosidade para usinagem da liga Ti6Al4V com eletrodo-ferramenta com polaridade negativa e tamanho de partícula de 3,10 e 15 μm para o regime de acabamento, $i_e = 3 \text{ A}$. Quanto aos níveis de rugosidade R_a observa-se diferença de até 18% para usinagem com tamanhos de partícula de 3, 10 e 15 μm nas condições de ótima duração de descarga t_e , que no caso foi de $t_e = 25 \mu\text{s}$. Nestas condições a rugosidade média R_a para as correntes de descarga $i_e = 3 \text{ A}$ apresentou valores de 3,7, 3,2 e 3,8 μm para tamanhos de partículas de 10, 3 e 15 μm respectivamente. As menores rugosidades foram para uma duração de descarga $t_e = 6,4 \mu\text{s}$ onde os valores encontrados foram de 2,4; 2,2 e 2,9 μm para tamanho de partícula de 3, 10 e 15 μm respectivamente, porém nesta duração de descarga a taxa de remoção e desgaste relativo, não apresentaram bons resultados.

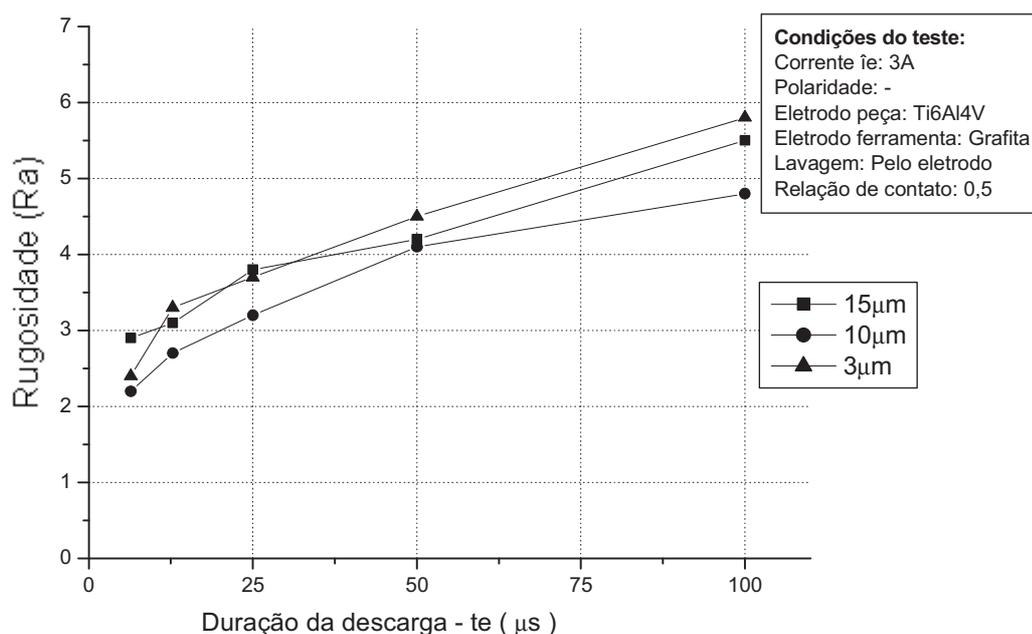


Figura 5.15 – Comportamento da rugosidade das amostras após EDM em função da variação da duração da para corrente de 3A.

5.6.3 Integridade da superfície das amostras após EDM de acabamento

A Figura 5.16 apresenta a micrografia da seção transversal de uma amostra de Ti6Al4V usinada em condições de acabamento. Pode-se nitidamente observar na micrografia a presença da camada ressolidificada. Nota-se que não existe a presença de microfissuras, tipicamente formada como, por exemplo, nos aços. Observa-se que a camada ressolidificada não apresenta uniformidade de espessura. Esta camada não é presente em toda a superfície usinada. No que diz respeito à espessura da camada ressolidificada constatou-se pelas medições de espessura pela micrografia das amostras que o valor máximo de camada branca foi de aproximadamente 10 μm obtido para usinagem de desbaste nas condições de $i_e = 3 \text{ A}$ e $t_e = 25 \mu\text{s}$ para eletrodo de grafita de tamanho de partícula 3, 10 e 15 μm .

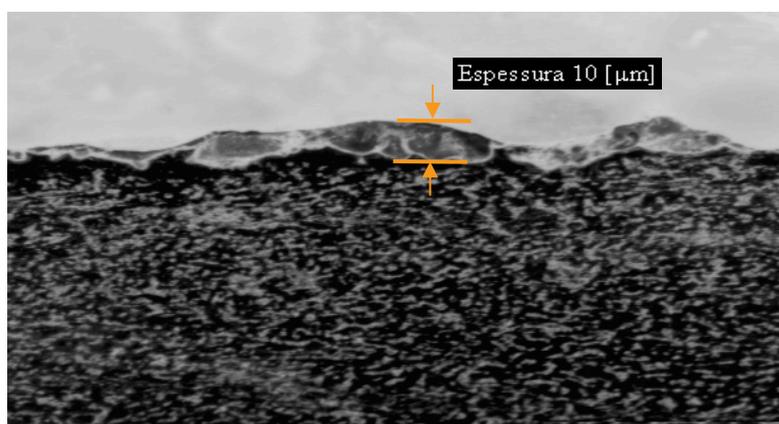


Figura 5.16 - Micrografia da seção transversal de uma amostra da liga de titânio Ti6Al4V usinada em condição de acabamento.

A Figura 5.17 apresenta a micrografia da seção transversal de uma amostra de Ti6Al4V usinada em condições de acabamento que apresentou a melhor rugosidade R_a . Pode-se nitidamente observar na micrografia a presença da camada ressolidificada. Nota-se que não existe a presença de microfissuras. Observa-se que a camada branca não apresenta uniformidade de espessura. Esta camada não é presente em toda a superfície usinada. No que diz respeito à espessura da camada ressolidificada constatou-se pelas medições de espessura pela micrografia das amostras que o valor máximo de camada branca foi de aproximadamente 5 μm obtido para usinagem de acabamento nas condições de $i_e = 3 \text{ A}$ e $t_e = 6,4 \mu\text{s}$ para eletrodo de grafita de tamanho de partícula 10 μm .

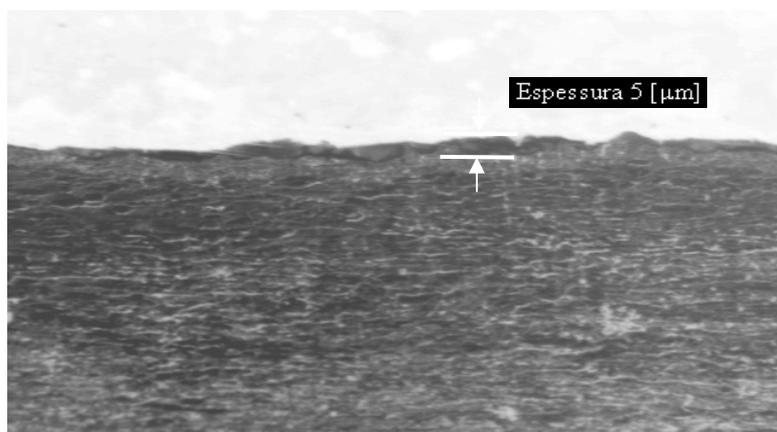


Figura 5.17 - Micrografia da seção transversal de uma amostra da liga de titânio Ti6Al4V usinada em condição de acabamento com melhor rugosidade.

Foram executadas seis medições de microdureza $HV_{0,05}$ em intervalos espaçados de 35 μm a partir da primeira medição realizada na camada ressolidificada (profundidade 0) da amostra como apresentado na Tabela 5.6. A amostra medida foi a que apresentou menor rugosidade $R_a = 1,7 \mu\text{m}$ com os parâmetros de processo $i_e=3A$ $t_e= 6,4\mu\text{s}$ e eletrodo de grafita com tamanho de partícula de $10\mu\text{m}$. Pela Figura 5.18 é possível observar a redução da dureza no sentido do material base da liga. Apesar de não ser perceptível pela micrografia óptica, esta variação de dureza comprova a existência de uma camada afetada termicamente. Na camada ressolidificada observou-se uma dureza de 369 HV e algo em torno de 335 HV no material base da liga.

Tabela 5.6 - Microdureza [HV] para a liga Ti6Al4V usinado sob condições de melhor Rugosidade R_a .

Profundidade de medição [μm]	Dureza [HV] $i_e = 3 A$
0	369
5	353
70	345
105	340
140	337
175	335

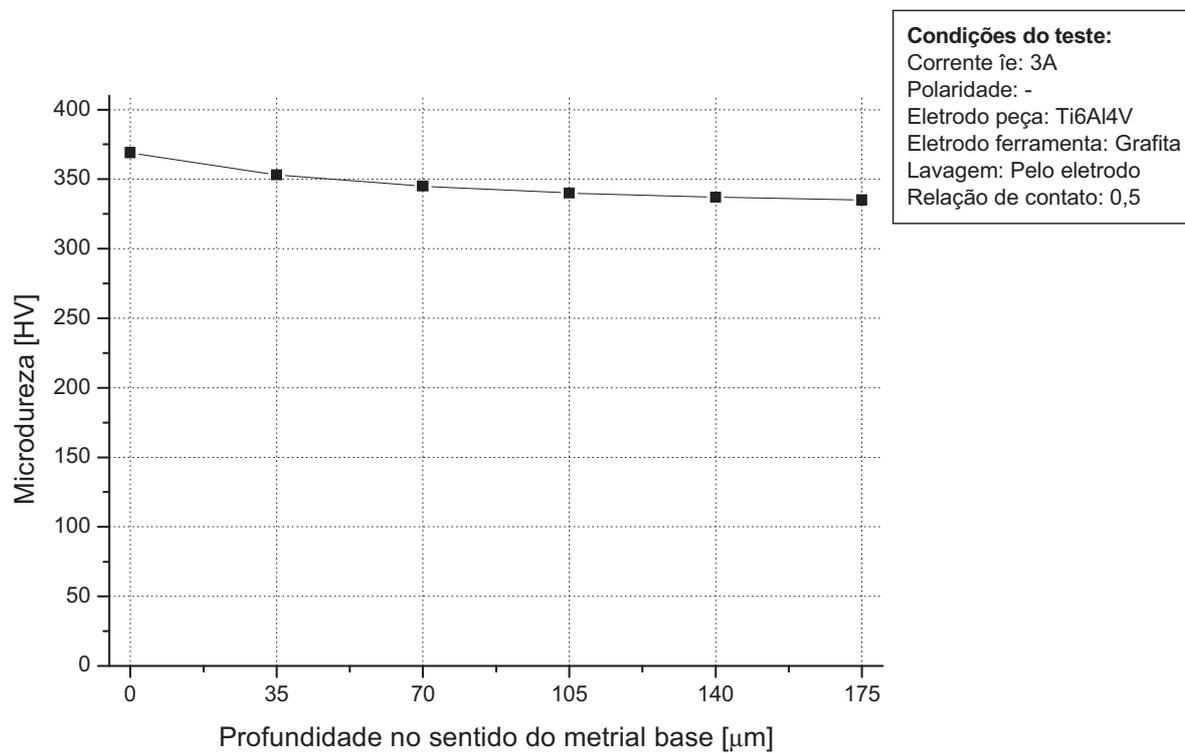
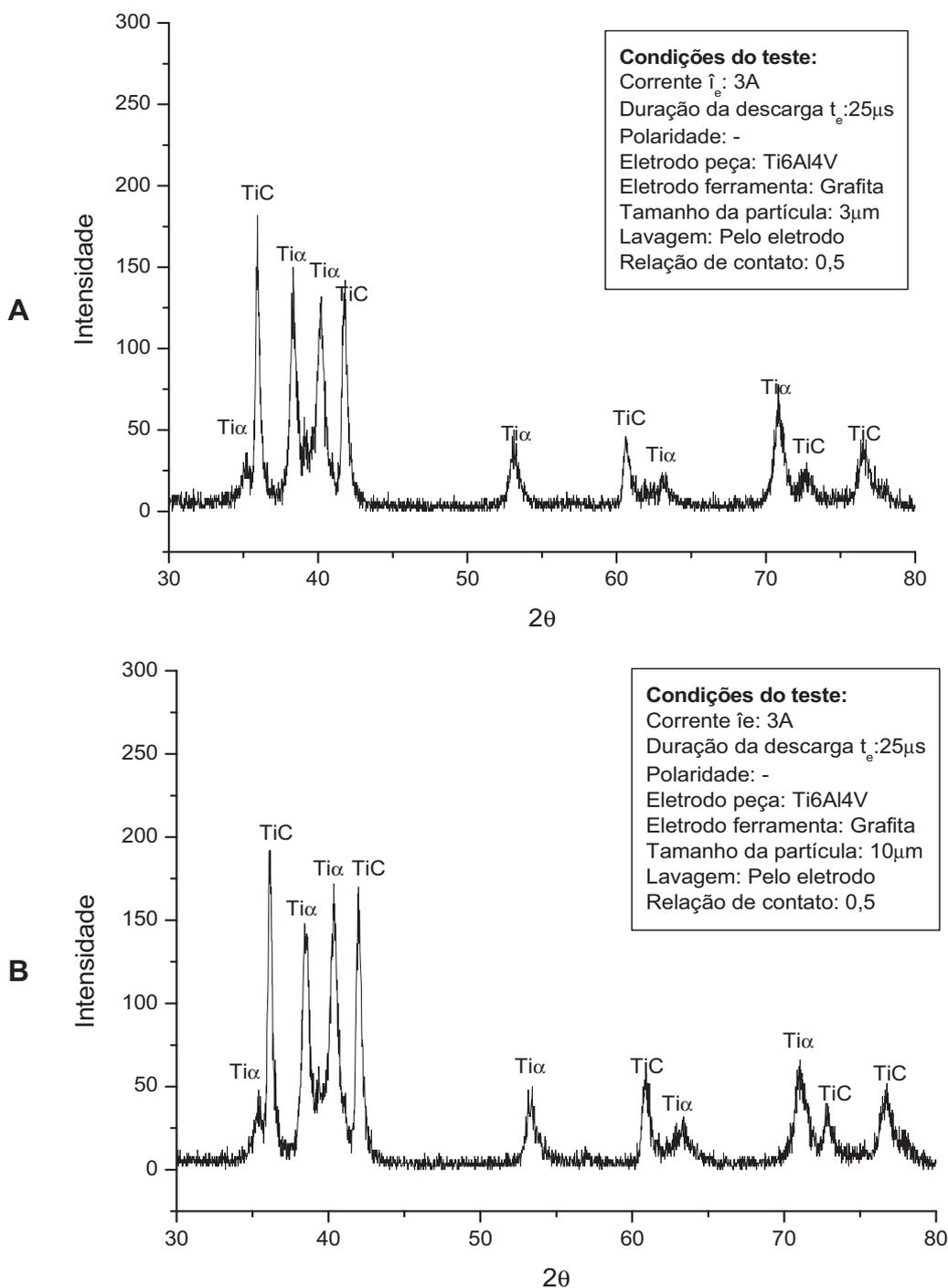


Figura 5.18 – Comportamento da microdureza Vickers [HV] na usinagem de acabamento da liga Ti6Al4V a partir da camada limite (ressolidificada) até o material base da liga, com corrente de descarga de 3 A, duração da descarga $t_e=6,4$ e eletrodo de grafita com $10\mu\text{m}$.

5.6.4 XRD das amostras após EDM de acabamento

As amostras analisadas foram as que apresentaram melhores resultados de taxa de remoção e desgaste relativo, ou seja, com os parâmetros ótimos de usinagem de acabamento. Também foi analisada a amostra com o melhor acabamento da superfície erodida Ra após usinagem. As análises foram realizadas utilizando os mesmos equipamentos das análises do capítulo 5.2.4. Também foram utilizados os mesmos arquivos de JCPDS.

Na Figura 5.19 pode-se observar os padrões de difração das amostras de Ti6Al4V após EDM de acabamento.



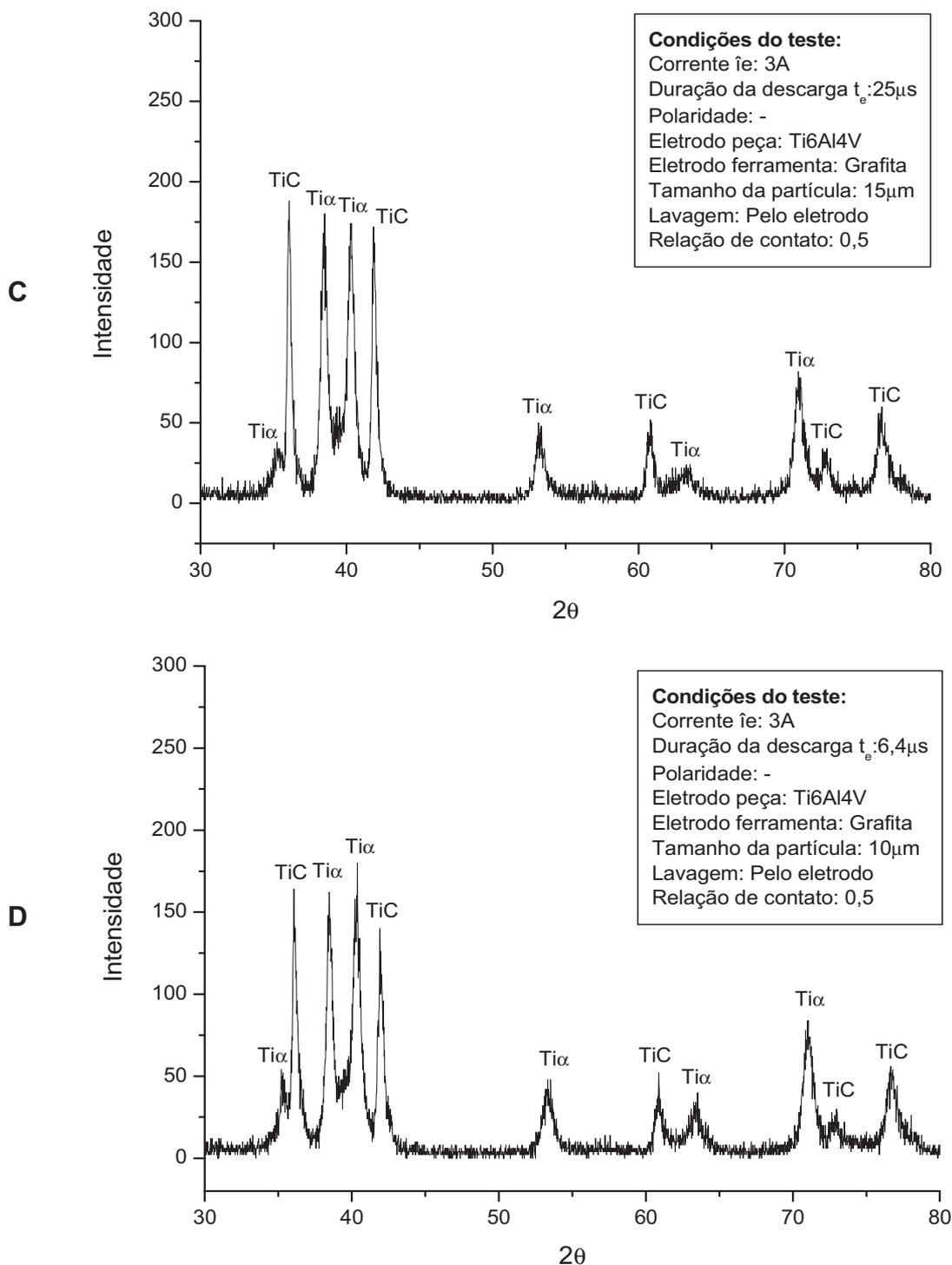


Figura 5.19 - Difratoograma de RX das amostras de Ti6Al4V após EDM de acabamento. (A) Eletrodo de grafita de 3µm, (B) Eletrodo de grafita de 10µm, (C) Eletrodo de grafita de 15µm e (D) Amostra com melhor acabamento da superfície erodida - Ra.

A partir da determinação dos valores obtidos e da comparação com o JCPDS, as fases presentes nas ligas foram identificadas. Na liga Ti6Al4V evidenciou-se a presença da fase α (hcp) representada nos padrões de difração como $Ti\alpha$. Após a EDM da liga Ti6Al4V existe a formação

de carbeto de titânio, representada nos padrões de difração como TiC. O pico mais intenso foi verificado para as amostras usinadas com parâmetros ótimos de processo foi 2θ com valor de 36 (Cu $K\alpha$), o que corresponde a TiC (2 0 2). Este pico é o mais intenso em todos os padrões de difração para a EDM em regime acabamento para amostras usinadas com parâmetros ótimos de processo. O difratograma das amostras usinadas com os melhores parâmetros de processo em usinagem de acabamento, difere-se dos difratogramas de semi-acabamento e acabamento, por apresentar o pico mais intenso de carbeto de titânio e não de Ti α . Isto acontece pela utilização de baixas correntes, pressões menores no canal de plasma e polaridade negativa do eletrodo ferramenta. No lado do anodo (+), a ressolidificação começa durante a descarga devido a expansão do canal de plasma. Portanto, apenas uma pequena porção de material fundido é expelida quando se compara com o catodo (-). Após, partículas que foram ejetadas do catodo, e que ficam em suspensão no dielétrico, podem alcançar, o anodo. É suposto que, devido a temperatura maior no anodo, as partículas que entram em contato com o anodo fundem-se parcialmente ficando aderidas. Quando a próxima descarga ocorre, as partículas e a camada ressolidificada são refundidas e misturadas, podendo criar ligas. [STEVES, 1998]

Para o padrão de difração da amostra com melhor acabamento superficial, o pico mais intenso foi verificado em 2θ com valor de 40,18 (Cu $K\alpha$), o que corresponde a Ti (1 0 1). Este pico é o mais intenso em todos os padrões de difração para a EDM em regime de desbaste. Os picos de carbeto de titânio das superfícies usinadas por eletrodo de grafita indicam a formação de carbeto Ti₈C₅. A variação do tamanho de partícula do eletrodo de grafita, não modificou o difratograma das amostras, ou seja, não houve picos de difração em intensidades diferentes as do carbeto de titânio TiC e do titânio Ti α , o que significa que não houve identificação de diferentes fases ou diferentes materiais. Entretanto é possível perceber uma variação na intensidade dos picos de difração quando comparamos o padrão de difração D com os outros padrões também representados na Figura 5.20.

CAPÍTULO VI

Conclusões

Este trabalho teve por objetivo investigar a usinabilidade da liga de titânio submetida ao processo de eletroerosão por penetração, utilizando eletrodos de grafita com tamanho de partículas de 3, 10 e 15 μm , tendo como focos principais os seguintes aspectos:

- O estabelecimento de parâmetros adequados de usinagem sob condições de desbaste, de semi-cabamento e de acabamento do processo de EDM. Foram vastamente rastreados e apresentados graficamente os dois principais fatores representativos do rendimento do processo, os quais são representados pela taxa de remoção de material V_w e pelo desgaste volumétrico relativo ϑ .
- A análise de características relacionadas à integridade superfície erodida por EDM das peças, com destaque para a rugosidade, espessura da camada superficial, qualificação da zona termicamente afetada pela EDM, formação de carbeto, assim como a existência de poros e microfissuras.

Em se tratando do objetivo proposto, considera-se que os resultados alcançados são representativos e constituem-se como novas fontes de informações para a usinagem da liga de titânio Ti6Al4V investigada.

6.1 Erodibilidade da liga Ti6Al4V utilizando eletrodos-ferramenta de grafita de diferentes tamanhos de partículas.

- A liga Ti6Al4V demonstra boa estabilidade pelo processo de remoção por EDM.
- O eletrodo de grafita de 10 μm de tamanho de partícula proporcionou os melhores resultados de taxa de remoção V_w e do desgaste volumétrico relativo ϑ para a remoção por EDM em regime de desbaste da liga de Ti6Al4V.

Os melhores resultados foram obtidos para o valor de $t_e = 50\mu\text{s}$ e polaridade negativa do eletrodo-ferramenta, como apresenta a Tab. 6.1

Tabela 6.1 – Condições ótimas dos parâmetros para regime de desbaste.

Condições ótimas dos parâmetros de processo – Regime de desbaste				
i_e [A]	t_e [μ s]	τ	V_w [mm ³ /min]	ϑ [%]
32	50	0,5	150	17,4

- Na usinagem de desbaste observa-se a presença de um filme negro, proveniente de subprodutos da desintegração do fluido dielétrico, aderido sobre a superfície das cavidades usinadas. Com a redução da energia fornecida ao processo, isto é, na usinagem de acabamento, a quantidade de material aderido tende a diminuir.

- Para condições de semi-acabamento do processo com $i_e = 12A$ os melhores resultados apresentados para as taxas V_w e ϑ foram obtidos para o eletrodo de grafita de 10 μ m de tamanho de partícula, como mostra a Tab. 6.2.

Tabela 6.2 – Condições ótimas dos parâmetros para regime de semi-acabamento

Condições ótimas dos parâmetros de processo – Regime de semi-acabamento				
i_e [A]	t_e [μ s]	τ	V_w [mm ³ /min]	ϑ [%]
12	25	0,5	50,9	23,2

- Para condições de acabamento do processo com $i_e = 3A$ os melhores resultados apresentados para as taxas V_w e ϑ foram obtidos para o eletrodo de grafita de 10 μ m de tamanho de partícula, como mostra a Tab. 6.3.

Tabela 6.3 – Condições ótimas dos parâmetros para regime de acabamento

Condições ótimas dos parâmetros de processo – Regime de acabamento				
i_e [A]	t_e [μ s]	τ	V_w [mm ³ /min]	ϑ [%]
3	25	0,5	2,6	60,9

- O melhor índice da rugosidade média R_a - aproximadamente 2,2 μ m - foi obtido para usinagem com o eletrodo-ferramenta de grafita de 10 μ m de tamanho de partícula carregado negativamente na condição de um t_e de 6,4 μ s e $i_e = 3A$

- Para usinagem de desbaste, semi-acabamento e acabamento, não se observa na camada superficial das amostras usinadas poros e microfissuras. A máxima espessura observada na camada superficial foi de aproximadamente 25 [μm] para usinagem nas condições de $i_e = 32 \text{ A}$, $t_e = 50 \mu\text{s}$ e eletrodo ferramenta de grafita com tamanho de partícula = $10\mu\text{m}$. A menor espessura verificada foi de 5 μm nas condições de $i_e = 3 \text{ A}$, $t_e = 6,4 \mu\text{s}$ e eletrodo ferramenta de grafita com tamanho de partícula = $10\mu\text{m}$. Isto também demonstra que quanto menor a energia utilizada no processo menor a espessura da camada superficial.

- Apesar de não ser possível a identificação clara, ao microscópio óptico, da zona termicamente afetada pelo processo de EDM, a existência da mesma é constatada pelo decréscimo gradual da dureza na medida em se aprofunda da camada superficial até o material base.

- A duração de descarga t_e com valores mais baixos proporciona os melhores níveis do acabamento superficial.

- Menores valores de corrente i_e promovem a obtenção de melhor rugosidade das peças.

- Mínima rugosidade $R_a = 1,7 \mu\text{m}$ foi atingida sob os seguintes parâmetros: $i_e = 3 \text{ A}$, polaridade negativa da ferramenta $t_e = t_o = 6,4 \mu\text{s}$ e tamanho de partícula do eletrodo de grafita = $10\mu\text{m}$

- Em todas as amostras usinadas por EDM e analisadas por Raio X (XRD) identificou-se a presença de carbeto de titânio Ti_8C_5 .

- Para a corrente de descarga $i_e=3\text{A}$ a quantidade de carbeto de titânio formada após a EDM foi maior do que para as outras correntes de descarga testadas (12 e 32A).

6.2 Recomendações para futuros trabalhos de pesquisa

Em função do aprendizado obtido pelo desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, é possível, neste momento, sugerir alguns tópicos para futuros trabalhos de investigação tecnológica e fundamental do processo de EDM aplicados à liga Ti6Al4V

- Realização de experiências com eletrodos-ferramenta de grafita com tamanho de partícula de 10 μm na usinagem da liga Ti6Al4V sob condições de desbaste, semi-acabamento e acabamento com utilização de polaridade negativa, variando a relação de contato τ afim de identificar o comportamento da taxa de remoção V_w , do desgaste volumétrico relativo ϑ e a integridade superficial.

- Investigar e comparar o acabamento superficial e o desvio de planicidade no fundo de cavidades usinadas em regimes de acabamento, semi-acabamento e desbaste, bem como o comportamento de desgaste de canto externo do eletrodo-ferramenta, nas seguintes condições:

- Lavagem por pressão pelo eletrodo-ferramenta.

- Lavagem somente pelo movimento de pulsação do eletrodo-ferramenta.

- Investigação detalhada da influência do processo de eletroerosão sobre as modificações estruturais e composição química da camada superficial e das zonas termicamente afetadas, com o intuito de se obter um entendimento mais criterioso do comportamento da dureza da seção transversal das amostras na medida em que se direciona ao material base da liga.

CAPÍTULO VII

Referências Bibliográficas

A. COUTO et al. Caracterização microestrutural da liga Ti6Al4V comercial utilizada como biomaterial. CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 17, 2006, Foz do Iguaçu, **Proceedings...** Foz do Iguaçu: [2006]. 1v.

AHNMET HASÇAHK, ULAS ÇAYDAS, Electrical discharge machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V). **Applied surface science**, Turkey, v. xx, p. xxx-xxx, maio 2007.

AMORIM, F. **Tecnologia de eletroerosão por Faíscas de Penetração para a Liga de Alumínio AMP 8000 e liga de Cobre (Cu Be) para ferramentas de Moldagem de Materiais Plásticos.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), 2002, 164f. Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Santa Catarina.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM) **Metals Handbook** 1993, v.9 USA.

B.F. YON TURKOVICH, D.R. DURHAM, **Advanced Processing Methods for Titanium 18** (1982) 257-274.

CHARMILLES TECHNOLOGIES, **“Manual de formação da máquina Roboform 30”**. [s.n], 1995. 320 p.

DIBITONTO, D. D. et al. Theoretical models of the electrical discharge machining process I: a simple cathode erosion mode. **Journal of Applied Physics**, USA, v. 66, n. 9, p. 4095-4103, nov. 1989.

DOMACHIE, M.J., **Titanium: A Technical Guide**. ASM International Metals Park, USA, 1988.

DROZDA, T. J. **“Tool and manufacturing engineers handbook”** machining. Chapter 14, Dearborn, USA, SME 1983 5v..

E.O. EZUGWU, Z.M. WANG, Titanium alloys and their machinability- a review. **Journal of Materials Processing Technology**, UK, v. 68, p. 262-274, out. 1995.

EUBANK, P. T. et al. Theoretical models of the electrical discharge machining process III: the variable mass, cylindrical plasma mode. **Journal of Applied Physics**, USA, v. 73, n. 11, p. 7900-7909, jun. 1993.

H.C. CHILD, A.F. DALTON, IS! Special Report 94, London, 1968, pp. 139-142

HEAT TECH. **Tecnologia em Tratamento Térmico e Engenharia de Superfície**. Disponível em: <<http://www.heattech.com.br>>. Acesso em: junho 2009.

K. H. Ho, S.T. NEWMAN, State of the art electrical discharge machining (EDM). **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, UK, v.43, p. 1287-1300, 2003.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren - 3: abtragen und generieren**. Berlin: Springer, 1997. 3 v.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F.; LENZEN, R. The electrical machining processes - what demands will they face in the future. **International Journal of Electrical Machining**, Japan, v.1, n.1, p. 3-7, 1996.

LHIUBET, C.; MEYER, R. M. Method of indirect determination of the anodic and cathodic voltage drops in short high-current electric discharges in a dielectric liquid. **Journal of Applied Physics**, USA, v. 52, n. 6, p.3929-3934, 1981.

MOHRI N., SUZUKI M., SAITO N. Time dependence of electrode wear in EDM. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM FOR ELECTROMACHINING, 11, 1995, Lausanne, **Proceedings...Lausanne: [s.n.], [1995 ?].** 1 v. p.447-454.

MALLOY, R.A. **Plastic part design for injection molding**. 1. ed. USA: Hanser Publication, 1994. 1 v.

N. ZLATIN, Modern Math. Shop 42 (12)1970~ 139-144.

OARMOLDWORKS. **Copper versus graphite**. Disponível em: <<http://www.oarmolds.com>>. Acesso em: março 2009.

POCO GRAPHITE INC.. **EDM - Technical Manual**. 1. ed. USA: [s.n],1994. 1 v.

STEVENS, L. **Improvement of surface quality in die-sinking EDM**. 1988. 1 v. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Department of Mechanical Engineering, K.U. Leuven, Belgium.

VAN DIJCK, F. et al. Some results of physical research in EDM. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM FOR ELECTROMACHINING, 4, 1974, Bratislava. **Proceedings...** Bratislava: [s.n.], [1974 ?]. 1 v. p.68-85.

W. KONIG, 47th Meeting of AGARD Structural and Materials Panel, Florence, Sept. 1978, AGARD, CP256, London, 1979, **Proceedings...** London: [1979]. pp. 1.1-1.10.

APÊNDICE 1

Máquina Utilizada



Figura 1.1 - Máquina Roboform 30 CNC.

1.1 - Máquina de Eletroerosão por Penetração

- Fabricante: CHARMILLES TECHNOLOGIES
 - Modelo: ROBOFORM 30 CNC (Fig. I.1)
 - Movimentos
- Cursos: - X - 350 mm
- Y - 250 mm
- Z - 300 mm
- C - 360°
- Dimensões máximas da peça: 350 X 840 X 560 mm
 - Dimensões da mesa: 500 X 400 mm
 - Resolução de medida: 0,5 μm
 - Incremento de posicionamento: 1 μm
 - Velocidade máxima (modo manual): 900 mm/min
 - Velocidade máxima de rotação do eixo C: 100 rpm
 - Cuba de trabalho:

- dimensões: 370 X 940 X 590 mm
- capacidade: 200 l
- nível mínimo/máximo: 100/350 mm
 - Reservatório de dielétrico:
 - dimensões: 330 X 920 X 1460 mm
 - capacidade mínima/máxima: 325/350 l
 - sistema de filtragem: 3 filtros de papel
- Lavagem:
 - injeção: pela peça, lateral e pelo eletrodo.
 - sucção: pela peça

1.2 - Parâmetros do Gerador

- Modo de atuação: pulso estático e relaxação.
- Polaridade do eletrodo-ferramenta: positiva e negativa.
- Abaixo estão alguns parâmetros de controle do gerador:

Corrente de descarga i_c [A]	0,5	1	2	3	4	6	8	12	16	24	32
-----------------------------------	-----	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----

Duração de t_c [μ s]	0,2	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8	25	50	100	200	400	800	1600	3200
-----------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	------	----	----	-----	-----	-----	-----	------	------

Duração de t_o [μ s]	0,2	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8	25	50	100	200	400	800	1600	3200
-----------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	------	----	----	-----	-----	-----	-----	------	------

Tensão em aberto (\hat{u}_i) [V]	80	120	160	200
--------------------------------------	----	-----	-----	-----

Movimento de pulsação R e U [s]	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,4	12,8
---------------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------

APÊNDICE 2

Balança Analítica

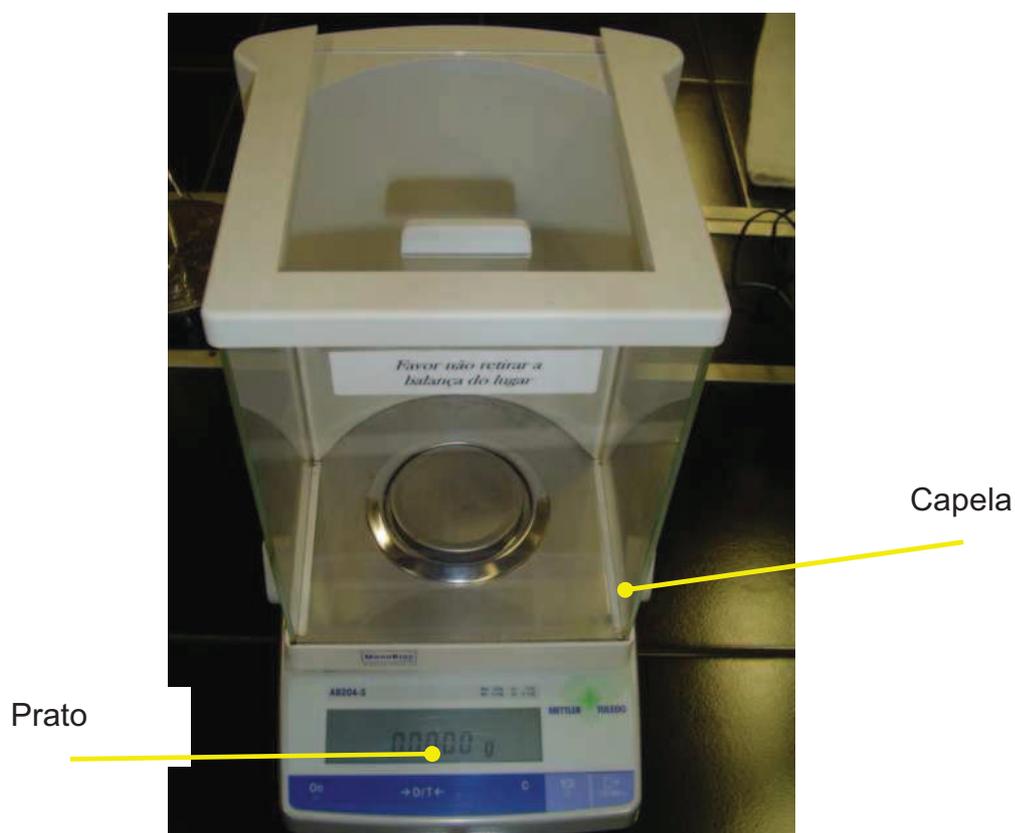


Figura 2.1 Balança Analítica

1.1 Balança Analítica

- Fabricante: METTLER TOLEDO
- Modelo: AB204 – S (Fig. 1.1)
- Massa: máx. 220 [g]
Min. 10 [mg]
- Resolução: 0,0001 [g]
- Dimensão: Capela: 200 X 200 X 250 [mm]
Prato: Ø 180 [mm]

APÊNDICE 3

Rugosímetro



Figura 3.1 Rugosímetro + Softwer

1.1 Rugosímetro + Software

- Fabricante: TAYLOR HOBSON
- Modelo: TAYLSURF SERIES 2 50i (Fig. 1.1)
- Movimentos: X = 50 [mm] Z = 450 [mm]
- Resolução: 0,001 μm
- Cut off: 5
- Comprimento da medida: 5 [mm]
- Modelo do cabeçote: 112/2564 - 870

APÊNDICE 4

Análise Micrográfica da Liga de Titânio Ti6Al4V

1. Objetivos

Determinar a espessura da camada termicamente afetada dos materiais, assim como obter fotografias da região transversal das amostras para a observação da existência de possíveis microfissuras e poros.

2. Preparação das amostras

Foram seguidas cinco etapas para a preparação das amostras do alumínio e do aço, como apresentadas a seguir:

- CORTE

As amostras foram retiradas utilizando-se uma máquina de eletroerosão a fil CHARMILLES ROBOFIL 290, conforme mostra a Fig. 2.1.

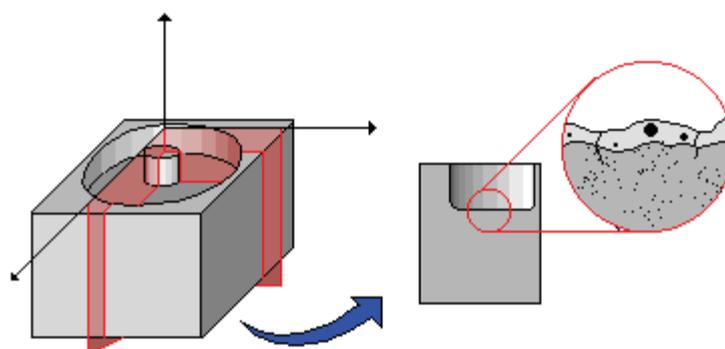


Figura 4.1 - Representação esquemática da peça eletroerodida e detalhe transversal da amostra para análise micrográfica.

- EMBUTIMENTO

Um exemplar das partes cortadas da amostra foi embutido para facilitar o manuseio nas etapas posteriores. O embutimento ocorre da seguinte forma: junta-se com vaselina o êmbolo da prensa para melhor acomodar a amostra. Em seguida a mesma é posicionada centralizada no êmbolo de forma a expor adequadamente a parte que será analisada, sendo em seguida pressionada para devida acomodação.

- LIXAMENTO:

Após o embutimento, os corpos de prova passam pelo processo de lixamento que consiste em retirar o material encruado pelo corte. Foi utilizada uma lixadeira metalográfica dupla STRUERS LABOPOL-21 com lixas de granulometria de 220, 320, 400 e 600. Quanto maior a granulometria, mais fina a retirada de material.

- POLIMENTO

Foram utilizados os seguintes equipamentos e materiais: politriz metalográfica marca STRUERS e modelo LABOPOL-5 com bandeja de 200 mm de diâmetro, e álcool etílico como lubrificante. O processo deve ser feito da seguinte maneira: com o suporte da bandeja da politriz sob média rotação, translada-se a amostra em sentido contrário a movimentação do suporte, exercendo razoável pressão contra a bandeja.

- ATAQUE QUÍMICO:

O ataque químico na liga de titânio foi feito com uma solução denominada Kroll: 1-3ml de ácido fluorídrico, 2-6ml de ácido nítrico e 100ml de água destilada. O tempo de exposição ideal foi de aproximadamente 10 segundos. Para o encerramento do ataque foi necessário esfregar na peça atacada álcool etílico embebido em algodão, a fim de limpar totalmente a superfície da amostra, que, em seguida, foi devidamente secada com jato de ar, para que posteriormente no microscópio o álcool etílico não atrapalhasse na identificação das fases presentes.

- EXAME MICROGRÁFICO

As amostras foram ampliadas 500 vezes e observadas por meio do analisador de imagens VIEWSONIC G-771 com programa OMNIMET ADVANTAGE. Depois de encontradas regiões adequadas para análise. Neste mesmo equipamento foram também executadas as medições da espessura da camada superficial.

A Fig. 4.2 apresenta um exemplo de micrografia da seção transversal de uma amostra de titânio Ti6Al4V usinada sob os parâmetros: $i_e = 3 \text{ A}$, $t_e = 25 \text{ } [\mu\text{s}]$, polaridade negativa do eletrodo-ferramenta e relação de contato $\tau = 0,5$. A espessura média da camada superficial é de $10 \text{ } [\mu\text{m}]$. É possível observar claramente que não há a presença poros e microfissuras



Figura 4.2 - Micrografia da seção transversal de uma amostra de Ti6Al4V.

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

LEANDRO JOSÉ STEDILE

**Avaliação de Classes de Eletrodo de Grafita
na Eletroerosão por Penetração da Liga Ti6Al4V**

**MESTRADO EM
ENGENHARIA MECÂNICA
PUCPR**

**CURITIBA
DEZEMBRO - 2009**

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

LEANDRO JOSÉ STEDILE

**Avaliação de Classes de Eletrodo de Grafita
na Eletroerosão por Penetração da Liga Ti6Al4V**

Dissertação apresentada como requisito parcial à
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica,
do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica, do Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia,
da Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR.

Orientador: Prof. Dr.Eng. Fred Lacerda Amorim

Co-Orientador: Prof. Ricardo Diego Torres, Ph.D.

CURITIBA

DEZEMBRO – 2009

LEANDRO JOSÉ STEDILE

**Avaliação de Classes de Eletrodo de Grafita
na Eletroerosão por Penetração da Liga Ti6Al4V**

Dissertação apresentada como requisito parcial à
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica,
do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica, do Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia,
da Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr.Eng. Fred Lacerda Amorim (Orientador)
Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR

Prof. Ricardo Diego Torres, Ph.D (Co - Orientador)
Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR

Prof. Dr.-Ing. Irionson Antônio Bassani
Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR

Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner
Universidade Federal de Santa Catarina -UFSC

Curitiba, 17 de Dezembro de 2009

*Aos meus pais,
Ana Maria G. Stedile e Ambrosio Stedile,
que sempre me deram apoio para trilhar este caminho.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por terem me proporcionado à oportunidade de estudar e darem apoio em todas as etapas de minha vida. Sempre me incentivaram a nunca desistir de meus sonhos mesmo quando pareciam impossíveis.

A minha irmã, Francielen Stedile, por ter estado ao meu lado nestes 26 anos.

A minha namorada Mariana de Abreu Rocco, por ter tido paciência e ter partilhado momentos de conversas e carinhos.

Agradeço a Elidia F. Gelinski e a José Gelinski, meus avós queridos. Onde quer que estejam, tenho certeza que estão sempre orando por mim.

Agradeço ao prof. Dr. Fred Lacerda Amorim por ter dedicado tempo, atenção e esforço para me auxiliar durante a elaboração desta dissertação.

Agradeço também aos professores do curso de Mestrado da PUC-PR, prof. Dr. Irionson Bassani, prof. Dr. Ricardo Diego Torres e ao prof. Dr. Paulo César Soares Júnior, pelas aulas e conhecimentos que me foram transmitidos.

Agradeço ao coordenador do PPGEM prof. Dr. Nathan Mendes, Jane Marques da Rocha. e a todos os funcionários da PUCPR que me ajudaram direta ou indiretamente na conclusão desta dissertação.

*“Queira! Basta ser sincero e desejar profundo.
Você será capaz de sacudir o mundo.” Raul Seixas*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
SIMBOLOGIA	xiii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
1. Introdução	1
2. Titânio	3
2.1 Titânio e Ligas de Titânio	3
2.2 Ligas de Titânio $\alpha + \beta$	4
2.3 Aplicações da liga de Titânio Ti6Al4V	6
2.4 Usinabilidade das ligas de titânio	8
3. Fundamentos do processo de eletroerosão	9
3.1 Fundamentos do fenômeno físico de uma descarga	9
3.1.1 Fase de ignição	10
3.1.2 Formação do canal de plasma	10
3.1.3 Fusão e evaporação de material nos eletrodos	11
3.1.4 Ejeção do material fundido	12
3.2 Principais parâmetros de controle do Processo	14
3.2.1 Influência dos parâmetros do processo	15
3.2.3 Materiais para Eletrodos na EDM por penetração	16
4. Procedimento experimental	20
4.1 Esquema experimental geral	20
4.2 Técnicas de quantificação e caracterização dos resultados	25
4.2.1 Taxa de remoção de material V_w e desgaste volumétrico relativo ϑ	25
4.2.2 Avaliação da integridade da superfície de trabalho	26
5. Resultados	28
5.1 Planejamento experimental para o regime de desbaste da liga Ti6Al4V	28
5.2 Erodibilidade da liga Ti6Al4V sob condições de desbaste	29
5.2.1 Taxa de remoção V_w e o desgaste volumétrico relativo ϑ	29
5.2.2 Rugosidade das amostras obtidas por EDM em regime de desbaste	33
5.2.3 Integridade da superfície das amostras após EDM de desbaste	34
5.2.4 XRD das amostras após EDM de desbaste	37
5.3 Planejamento experimental para o regime de semi-acabamento da liga Ti6Al4V	40

5.4 Erodibilidade da liga Ti6Al4V sob condições de semi-acabamento.....	41
5.4.1 Taxa de remoção V_w e o desgaste volumétrico relativo ϑ	41
5.4.2 Rugosidade das amostras obtidas por EDM em regime de semi-acabamento	43
5.4.3 Integridade da superfície das amostras após EDM de semi-acabamento.....	44
5.4.4 XRD das amostras após EDM de semi-acabamento	45
5.5 Planejamento experimental para o regime de acabamento da liga Ti6Al4V	48
5.6 Erodibilidade da liga Ti6Al4V sob condições de acabamento	49
5.6.1 Taxa de remoção V_w e o desgaste volumétrico relativo ϑ	49
5.6.2 Rugosidade das amostras após EDM de acabamento	51
5.6.3 Integridade da superfície das amostras após EDM de acabamento	51
5.6.4 XRD das amostras após EDM de acabamento	55
6. Conclusões	58
6.1 Erodibilidade da liga Ti6Al4V utilizando eletrodos-ferramenta de grafita de diferentes tamanhos de partículas.....	58
6.2 Recomendações para futuros trabalhos de pesquisa.....	61
7. Referências Bibliográficas	62
APÊNDICE 1	65
APÊNDICE 2	67
APÊNDICE 3	68
APÊNDICE 4	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Componentes fabricados com Ti6Al4V.....	7
Figura 3.1 - Fases de uma descarga elétrica no processo de EDM	10
Figura 3.2 - Representação esquemática da faísca elétrica, destacando a forma do canal de plasma. O fluxo de calor nas superfícies do catodo e do anodo está representado por q_c e q_a , sendo r_a e r_c os raios das cavidades fundidas no anodo e catodo.....	12
Figura 3.3 – Micrografia ótica de aço <i>White layer</i>	13
Figura 3.4 - Evolução da tensão e corrente elétricas durante a descarga de uma faísca, apresentando em destaque os principais parâmetros de controle do processo	14
Figura 4.1 - Modelo esquematizado do plano geral de desenvolvimento dos ensaios	21
Figura 4.2 - Esquema do comportamento da corrente de descarga segundo o modo de atuação do gerador de pulsos retangulares	23
Figura 5.1 - Taxa de remoção V_w da liga Ti6Al4V para usinagem de desbaste com i_e de 32 A e utilização de eletrodo-ferramenta de grafita de 3; 10 e 15 μm de tamanho de partícula	30
Figura 5.2 - Comportamento do desgaste relativo ϑ da liga Ti6Al4V sob usinagem de desbaste com eletrodos-ferramenta de grafita	32
Figura 5.3 – Comportamento da rugosidade das amostras após EDM em função da variação da duração da descarga e da relação de contato para corrente de 32 A	33
Figura 5.4 - Micrografia da seção transversal de uma amostra da liga de titânio Ti6Al4V usinada em condição de desbaste	35
Figura. 5.5 – Comportamento da microdureza Vickers [HV] na usinagem de desbaste da liga Ti6Al4V a partir da camada limite material base da liga, com corrente de descarga de 32 A e eletrodos de grafita com 3, 10 e 15 μm	36
Figura 5.6 Difratoograma de RX das amostras de Ti6Al4V após EDM de desbaste. (A) Eletrodo de grafita de 3 μm , (B) Eletrodo de grafita de 10 μm e (C) Eletrodo de grafita de 15 μm	38
Figura 5.7 - Taxa de remoção V_w da liga Ti6Al4V para corrente $i_e = 12$ A, para usinagem com polaridade negativa do eletrodo-ferramenta e tamanho de partícula = 3, 10 e 15 μm	41

Figura 5.8 – Desgaste relativo ϑ da liga Ti6Al4V para corrente $i_e = 12$ A para usinagem com polaridade negativa do eletrodo-ferramenta de grafita.....	42
Figura 5.9 – Comportamento da rugosidade das amostras após EDM em função da variação da duração da descarga para corrente de 12 A	43
Figura 5.10 - Micrografia da seção transversal de uma amostra da liga de titânio Ti6Al4V usinada em condição de semi-acabamento	44
Figura 5.11 – Comportamento da microdureza Vickers [HV] na usinagem de semi-acabamento da liga Ti6Al4V a partir da camada limite até o material base da liga, com corrente de descarga de 12 A e eletrodos de grafita com 3, 10 e 15 μ m.....	45
Figura 5.12 Difratoograma de RX das amostras de Ti6Al4V após EDM de semi-acabamento. (A) Eletrodo de grafita de 3 μ m, (B) Eletrodo de grafita de 10 μ m e (C) Eletrodo de grafita de 15 μ m	47
Figura 5.13 - Taxa de remoção V_w da liga Ti6Al4V para corrente $i_e = 3$ A, para usinagem com polaridade negativa do eletrodo-ferramenta e tamanho de partícula = 3, 10 e 15 μ m	49
Figura 5.14 – Desgaste relativo ϑ da liga Ti6Al4V para corrente $i_e = 3$ A para usinagem com polaridade negativa do eletrodo-ferramenta de grafita.....	50
Figura 5.15 – Comportamento da rugosidade das amostras após EDM em função da variação da duração da para corrente de 3A	51
Figura 5.16 - Micrografia da seção transversal de uma amostra da liga de titânio Ti6Al4V usinada em condição de acabamento	52
Figura 5.17 - Micrografia da seção transversal de uma amostra da liga de titânio Ti6Al4V usinada em condição de acabamento	53
Figura 5.18 – Comportamento da microdureza Vickers [HV] na usinagem de acabamento da liga Ti6Al4V a partir da camada limite até o material base da liga, com corrente de descarga de 3 A e eletrodos de grafita com 3, 10 e 15 μ m.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Elementos de liga (α e β estabilizante)	5
Tabela 2.2 - Composição química da liga de titânio Ti6Al4V	6
Tabela 2.3 - Propriedades físicas do Ti6Al4V	6
Tabela 2.4 - Propriedades mecânicas do Ti6Al4V	6
Tabela 3.1 - Classificação da grafita de acordo com o tamanho de grão	18
Tabela 4.1 – Parâmetros elétricos utilizados nos ensaios de rendimento	23
Tabela 4.2 – Propriedades físicas e termofísicas da grafita	24
Tabela 5.1 – Parâmetros elétricos de processo para os ensaios sob condições de usinagem de desbaste da liga Ti6Al4V	28
Tabela 5.2 – Microdureza [HV] para a liga Ti6Al4V usinado sob condições ótimas de desbaste.....	36
Tabela 5.3 – Parâmetros elétricos de processo para os ensaios sob condições de usinagem de semi-acabamento da liga Ti6Al4V.....	45
Tabela 5.4 - Microdureza [HV] para a liga Ti6Al4V usinado sob condições ótimas de semi-acabamento	48
Tabela 5.5 – Parâmetros elétricos de processo para os ensaios sob condições de usinagem de acabamento da liga Ti6Al4V.....	48
Tabela 5.6 – Microdureza [HV] para a liga Ti6Al4V usinado sob condições de melhor Rugosidade R_a	53
Tabela 6.1 – Condições ótimas dos parâmetros para regime de desbaste.....	59
Tabela 6.2 – Condições ótimas dos parâmetros para regime de semi-acabamento.....	59
Tabela 6.3 – Condições ótimas dos parâmetros para regime de acabamento.....	59

SIMBOLOGIA

Alfabeto Latino

W_e	energia utilizada	[J]
V_w	taxa de remoção de material	[mm ³ /min]
V_e	taxa de desgaste	[mm ³ /min]
\hat{u}_i	tensão em aberto	[V]
u_e	tensão média da descarga	[V]
U	tensão média de trabalho	[V]
t_d	tempo de retardo de ignição	[μ s]
t_e	duração da descarga	[μ s]
t_i	duração do pulso de tensão	[μ s]
t_o	tempo de intervalo entre dois sucessivos pulsos de tensão t_i	[μ s]
t_p	tempo do período do ciclo de uma descarga	[μ s]
i_e	corrente média durante a descarga	[A]
R_a	média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade, em relação à linha média, dentro do percurso de medição	[μ m]
R_z	média aritmética dos cinco valores da rugosidade parcial Z_i	[μ m]

Alfabeto Grego

τ	relação de contato
ϑ	desgaste volumétrico relativo

RESUMO

O titânio e suas ligas apresentam uma crescente aplicação no ambiente industrial devido as suas excelentes propriedades como, por exemplo, alta resistência à corrosão, resistência a altas temperaturas e elevada resistência ao desgaste. Deste modo, as ligas de titânio são amplamente utilizadas nas áreas aeroespacial, biomédica, ambientes altamente corrosivos etc. Porém, o titânio e suas ligas apresentam alta reatividade química com a maioria das ferramentas de corte de geometria definida, além disso, possui baixa condutividade térmica e alta resistência mecânica. Estas características fazem com que as ligas de titânio sejam difíceis de serem trabalhadas pelos processos convencionais de usinagem. A eletroerosão (*Electrical Discharge Machining* – EDM) é um processo de usinagem não convencional que utiliza a conversão de energia elétrica em energia térmica para a remoção de material da peça. Deste modo, as propriedades mecânicas do material da peça não exercem influência na usinagem por eletroerosão. Porém, as propriedades termofísicas do material são extremamente influentes no rendimento da usinagem por EDM. Este trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho de eletrodos de grafita, com diferentes tamanhos de grão (3, 10 e 15 μm), no processo de eletroerosão por penetração em regime de desbaste, semi-acabamento e acabamento da liga de titânio Ti6Al4V. Como variáveis independentes de entrada foram avaliadas a duração da descarga, a corrente de descarga e a polaridade do eletrodo. O rendimento do processo foi avaliado pela taxa de remoção do material da peça, desgaste volumétrico relativo e rugosidade das peças. Aspectos da integridade da superfície das peças eletroerodidas em se tratando de espessura da camada ressolidificada (*recast layer*), micro fissuras, poros e microdureza foram também analisados. O presente trabalho sugere condições econômicas de usinagem para EDM da Liga Ti6Al4V para as classes de grafita ensaiadas sob condições usinagem de desbaste, semi-acabamento e acabamento.

ABSTRACT

The titanium and its alloys have an increasing application in industrial environment due to its excellent properties such as high resistance to corrosion, resistance to high temperatures and high wear resistance. Thus, the titanium alloys are widely used in the aerospace, biomedical, highly corrosive environments. However, titanium and its alloys have high chemical reactivity with most of the tools for cutting geometry set, in addition, has low thermal conductivity and high mechanical strength. These characteristics mean that the titanium alloys are difficult to be worked by conventional machining processes. The Electrical Discharge Machining - EDM is a non-conventional machining process that uses the conversion of electrical energy into heat energy to remove material from the piece. The mechanical properties of the material of the piece does not influence the machining by EDM. However, the properties of the material are extremely influential in the efficiency of the machining by EDM. This study aimed to evaluate the performance of graphite electrodes with different grain sizes (3, 10 and 15 μm) in the process of penetration by EDM under finishing, semi-finishing and roughing of the titanium alloy Ti6Al4V. As independent variables were assessed for entry to the duration of discharge, and discharge current of the electrode polarity. The efficiency of the process was evaluated by the rate of removal of material, volumetric relative wear and surface roughness. Aspects of surface integrity in the case of thickness of surface recast layer, micro cracks, pores and micro hardness were also analyzed. This paper suggests economic conditions for EDM machining of Ti6Al4V Alloy for classes of graphite tested under roughing machining, semi-finishing and finishing.