

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

NELSON HENRIQUE DA SILVA

**USINAGEM DE FUROS DE PEQUENOS DIÂMETROS NA LIGA DE
TITÂNIO Ti6Al4V EM MÁQUINA DE ELETROEROSÃO POR
PENETRAÇÃO**

CURITIBA

2006

NELSON HENRIQUE DA SILVA

**USINAGEM DE FUROS DE PEQUENOS DIÂMETROS NA LIGA DE
TITÂNIO Ti6Al4V EM MÁQUINA DE ELETROEROSÃO POR
PENETRAÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, como requisito parcial à obtenção ao título de Mestre. Projeto de Graduação apresentado como requisito à obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Fred Lacerda Amorim

CURITIBA

2006

AGRADECIMENTOS

Estas primeiras páginas, e últimas que escrevo nesta dissertação, são para dedicar a todas as pessoas que me aconselharam, motivaram, orientaram, reforçaram, cuidaram, ouviram e colaboraram ao longo desta minha época especial de vida e de trabalho.

Professor Dr. Eng. Fred Lacerda Amorim, orientador científico desta dissertação, agradeço pelo compromisso assumido, pelo empenho que colocou neste trabalho, os níveis de exigência dos desafios que me lançou e os suportes, formais e informais, que disponibilizou, bem como concedeu um vasto leque de documentos que em muito enriqueceram o meu conhecimento e o meu trabalho de investigação. Agradeço ainda, porque foi mesmo muito importante para mim, a análise rigorosa e afetuosa de cada capítulo, as sugestões, os esclarecimentos e os comentários sempre oportunos e que espero ter sabido aproveitar. Para agradecer a confiança e a amizade, as palavras serão sempre poucas.

Ao Professor Ricardo Torres, pela atenção e conselhos preciosos dados durante o desenvolvimento desta dissertação de Mestrado. Por ter sido sempre benevolente todas as vezes, quando consultado.

À Camila, bolsista do LAUS - Laboratório de Usinagem, Wagner, técnico do LAUS e a Ricardo, estagiário do Laboratório de Metrologia, quero expressar o meu mais profundo agradecimento, pois sei, agora melhor do que nunca, como foram importantes todas as ações que desempenharam, desde o recolhimento à compilação dos dados.

A todos os professores, funcionários e alunos do Mestrado em Engenharia de Fabricação da PUCPR, e a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta dissertação, dando-me força, incentivo e principalmente, acreditando ser possível trabalhar o tema Usinagem de Furos de Pequenos Diâmetros na Liga de Titânio Ti6Al4V em Máquina de Eletroerosão por Penetração.

E, especialmente, aos meus pais e amigos Luiz Henrique da Silva e Marize Capella da Silva e ao meu irmão e amigo Luiz Felipe da Silva que sempre acreditaram na conclusão deste trabalho.

RESUMO

A miniaturização de peças tem se caracterizado como uma contínua demanda do ambiente industrial. Porém, a fabricação de peças com tais dimensões e em materiais de difícil processamento tem exigido o desenvolvimento de tecnologias de fabricação inovadoras e mais precisas. Nesses casos, além dos processos convencionais de usinagem, destacam-se particularmente os processos não convencionais de usinagem, dentre eles o processo de eletroerosão (*Electrical Discharge Machining* - EDM). Um dos principais materiais utilizados para a produção de peças diminutas são as ligas de titânio. Esses materiais apresentam como vantagens uma baixa massa específica, uma resistência mecânica similar à dos aços e também alta resistência ao calor e ao desgaste. Por essas características, as ligas de titânio apresentam um número muito maior de aplicação, quando comparado a várias outras ligas especiais. Por esse motivo são materiais muito utilizados na produção de peças e equipamentos nas áreas médica, automobilística, aeroespacial, eletroeletrônica, ótica etc. No entanto, devido à sua baixa condutividade térmica e elevada resistência mecânica, as ligas de titânio são de difícil usinagem. Em particular, a usinagem convencional de furos de pequenos diâmetros e grandes profundidades é bastante complicada. A usinagem por eletroerosão tem demonstrado ser um processo alternativo bastante competitivo. Nesta pesquisa foi analisado experimentalmente o comportamento da EDM na usinagem de furos de pequenos diâmetros utilizando uma máquina de EDM. O objetivo do presente trabalho foi o estabelecimento de parâmetros adequados de EDM para a liga de titânio Ti6Al4V utilizando como materiais de eletrodos o cobre e uma liga de cobre-tungstênio. A pesquisa sugere parâmetros econômicos de EDM para a produção de furos de pequenos diâmetros.

Palavras Chave: eletroerosão, liga de Ti6Al4V, eletrodo de cobre e cobre tungstênio, parâmetros adequados.

ABSTRACT

The manufacturing of small parts has extended the contest at the industrial environment. However the manufacturing of parts with such dimensions and in materials of difficult manufacturing demands the development of new and better accurate manufacturing technologies. Thus, beyond the conventional machining processes, it's emphasized the non conventional machining processes, among them the electrical discharge machining (EDM). One of the materials most used for micro parts production are the titanium alloys. These materials presents as advantages low specific density, mechanical specific strength similar to steel, high heat and wear resistance. By these conditions the titanium alloys are widely employed in many fields when compared to others special alloys. Regarding these reasons they are very used in production of parts and equipments for medicine area, aerospace, eletroeletronic, optical, etc. However, because of their toughness and low thermal conductivity, titanium alloys are materials typically difficult to machine. In particular, the conventional machining of holes with high relation regarding small diameters D and high length L ($D \leq 1$ e $L/D > 10$) is very complicated. The electrical discharge machining has demonstrated to be an well competitive alternative process, despite present practical restrictions on these applications. This research have the primary objective to analyze the conduct from EDM in deep small holes machining using a conventional die sinking EDM machining. The objective is to establish adequate EDM parameters for Ti6Al4V titanium alloy using two materials as electrodes (copper and copper-tungsten), besides that, to investigate the characteristics of superficial integrity of the eletroeroded samples. This work suggests economics EDM parameters for deep small holes production.

Keywords: eletroerosion, titanium (Ti6Al4V), copper and copper-tungsten electrodes, adequated parameters.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Peças de pequenas dimensões fabricadas por EDM (CHARMILLES, 2006).	13
Figura 2: Aplicações do Processo de EDM (AMORIM, 2002).....	14
Figura 3: Circuito de Lazarenko (AMORIM, 2002).....	22
Figura 4: Fases de uma Descarga Elétrica no Processo de EDM (AMORIM, 2002).	26
Figura 5: Representação da Fase de Ignição.....	27
Figura 6: Representação da Fase da Formação do Canal de Plasma.....	28
Figura 7: Representação da Fusão e Evaporação do Canal de Plasma (König & Klocke, 1997).....	29
Figura 8: Representação da Suspensão do Canal de Plasma (König & Klocke, 1997).	31
Figura 9: Evolução da Tensão e Corrente Elétricas durante a Descarga de uma Faísca (AMORIM, 2002).....	32
Figura 10: Lavagem lateral (Rajurkar, 1998).....	36
Figura 11: Lavagem por pressão pelo eletrodo (Rajurkar, 1998).....	36
Figura 12: Conicidade provocada pela lavagem por pressão pelo eletrodo (Rajurkar, 1998).....	37
Figura 13: Lavagem por sucção das partículas através do eletrodo (Rajurkar, 1998).	38
Figura 14: Deformação do fundo da cavidade provocada pela lavagem por pressão através do eletrodo (Rajurkar, 1998).....	39
Figura 15: Vista esquemática superior morsa montada na máquina-ferramenta.....	44
Figura 16: Vista esquemática superior da montagem das duas placas da liga de Ti6Al4V para execução dos furos.....	44
Figura 17: Modelo sistematizado do plano geral de desenvolvimento dos ensaios..	46
Figura 18: Representação dos Tempos de Retração (R) e Eletroerosão (U).....	47
Figura 19: Microscópio de Medição.....	50
Figura 20: Velocidade de linear de penetração (v_p) da liga de titânio em função da variação de t_e utilizando eletrodo-ferramenta de cobre com polaridade positiva.....	54
Figura 21: Desgaste frontal linear relativo (ϑ_{LF}) da liga de titânio em função da variação de t_e utilizando eletrodo-ferramenta de cobre com polaridade positiva.....	56

Figura 22: Velocidade de linear de penetração (v_p) da liga de titânio em função da variação de t_e utilizando eletrodo-ferramenta de cobre com polaridade negativa.....	58
Figura 23: Desgaste frontal linear relativo (ϑ_{LF}) da liga de titânio em função da variação de t_e utilizando eletrodo-ferramenta de cobre com polaridade negativa.....	60
Figura 24: Velocidade de linear de penetração (v_p) da liga de titânio em função da variação de t_e utilizando eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio com polaridade positiva.....	62
Figura 25: Desgaste frontal linear relativo (ϑ_{LF}) da liga de titânio em função da variação de t_e utilizando eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio com polaridade positiva.....	64
Figura 26: Velocidade de linear de penetração (v_p) da liga de titânio em função da variação de t_e utilizando eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio com polaridade negativa.....	66
Figura 27: Desgaste frontal linear relativo (ϑ_{LF}) da liga de titânio em função da variação de t_e utilizando eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio com polaridade negativa.....	68
Figura 28: Velocidade linear de penetração (v_p) da liga de titânio em função da variação de τ para t_e ótimo igual a $12,8\mu s$ utilizando eletrodo-ferramenta de cobre com polaridade positiva.....	71
Figura 29: Desgaste frontal linear relativo (ϑ_{LF}) da liga de titânio em função da variação de τ para t_e ótimo igual a $12,8\mu s$ utilizando eletrodo-ferramenta de cobre com polaridade positiva.....	72
Figura 30: Velocidade linear de penetração (v_p) da liga de titânio em função da variação de τ para t_e ótimo igual a $12,8\mu s$ utilizando eletrodo-ferramenta de cobre com polaridade negativa.....	73
Figura 31: Desgaste frontal linear relativo (ϑ_{LF}) da liga de titânio em função da variação de τ para t_e ótimo igual a $12,8\mu s$ utilizando eletrodo-ferramenta de cobre com polaridade negativa.....	74
Figura 32: Velocidade linear de penetração (v_p) da liga de titânio em função da variação de τ para t_e ótimo igual a $12,8\mu s$ utilizando eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio com polaridade positiva.....	76
Figura 33: Desgaste frontal linear relativo (ϑ_{LF}) da liga de titânio em função da variação de τ para t_e ótimo igual a $12,8\mu s$ utilizando eletrodo-ferramenta de cobre-	

tungstênio com polaridade positiva.....	77
Figura 34: Velocidade linear de penetração (vp) da liga de titânio em função da variação de τ para te ótimo igual a 12,8 μ s utilizando eletrodo-ferramenta de cobre- tungstênio com polaridade negativa.....	78
Figura 35: Desgaste frontal linear relativo (ϑ_{LF}) da liga de titânio em função da variação de τ para te ótimo igual a 12,8 μ s utilizando eletrodo-ferramenta de cobre- tungstênio com polaridade negativa.....	79
Figura 36: Cavidade obtida através da usinagem utilizando eletrodo de cobre com polaridade negativa, ie de 8 [A], te ótimo de 12,8 μ s e τ de 0,5.....	81
Figura 37: Cavidade obtida através da usinagem utilizando eletrodo de cobre- tungstênio com polaridade negativa, ie de 8 [A], te ótimo de 12,8 μ s e τ de 0,5.....	81
Figura 38: Velocidade de linear de penetração (vp) da liga de titânio em função da variação de rpm para τ ótimo igual a 0,5 - te ótimo igual a 12,8 μ s utilizando eletrodo- ferramenta de cobre com polaridade positiva.....	83
Figura 39: Desgaste frontal linear relativo (ϑ_{LF}) da liga de titânio em função da variação de rpm para τ ótimo igual a 0,5 - te ótimo igual a 12,8 μ s utilizando eletrodo- ferramenta de cobre com polaridade positiva.....	85
Figura 40: Velocidade de linear de penetração (vp) da liga de titânio em função da variação de rpm para τ ótimo igual a 0,5 - te ótimo igual a 12,8 μ s, utilizando eletrodo- ferramenta de cobre com polaridade negativa.....	87
Figura 41: Desgaste frontal linear relativo (ϑ_{LF}) da liga de titânio em função da variação de rpm para τ ótimo igual a 0,5 - te ótimo igual a 12,8 μ s utilizando eletrodo- ferramenta de obre com polaridade negativa.....	89
Figura 42: Velocidade linear de penetração (vp) da liga de titânio em função da variação de rpm para τ ótimo igual a 0,5 - te ótimo igual a 12,8 μ s utilizando eletrodo- ferramenta de cobre-tungstênio com polaridade positiva.....	91
Figura 43: Desgaste frontal linear relativo (ϑ_{LF}) da liga de titânio em função da variação de rpm para τ ótimo igual a 0,5 - te ótimo igual a 12,8 μ s utilizando eletrodo- ferramenta de cobre-tungstênio com polaridade positiva.....	93
Figura 44: Velocidade linear de penetração (vp) da liga de titânio em função da variação de rpm para τ ótimo igual a 0,5 - te ótimo igual a 12,8 μ s utilizando eletrodo- ferramenta de cobre-tungstênio com polaridade negativa.....	95
Figura 45: Desgaste frontal linear relativo (ϑ_{LF}) da liga de titânio em função da	

variação de rpm para τ ótimo igual a 0,5 - te ótimo igual a 12,8 μ s utilizando eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio com polaridade negativa.....	97
Figura 46: Comparação geradores velocidade linear de penetração v_p para rotação ótima igual a 50rpm - τ ótimo igual a 0,5 - te ótimo igual a 12,8 μ s utilizando eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio com polaridade negativa.....	99
Figura 47: Comparação geradores desgaste linear frontal relativo $\mathcal{G}_{LF}$ para rotação ótima igual a 50rpm - τ ótimo igual a 0,5 - te ótimo igual a 12,8 μ s utilizando eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio com polaridade negativa.....	100
Figura 48: Foto do melhor resultado da obtido para rotação ótima igual a 50rpm - τ ótimo igual a 0,5 - te ótimo igual a 12,8 μ s utilizando eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio com polaridade negativa.....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química da liga de titânio Ti6Al4V em porcentagem de massa (DEUTSCH TITAN, 2000).....	45
Tabela 2: Composição química da liga de titânio Ti6Al4V em porcentagem de massa (DEUTSCH TITAN, 2000).....	45
Tabela 3: Propriedades Mecânicas da liga de titânio Ti6Al4V (DEUTSCH TITAN, 2000).....	45
Tabela 4: Grandeza dos Parâmetros Testados.....	53

LISTA DE SIMBOLOS

Alfabeto Latino:

D_c	profundidade da cavidade	mm
M_t	tempo de usinagem	min
v_p	velocidade de penetração	[mm/min]
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]
$\bar{U}_e$	tensão média da descarga	[V]
U	tensão média de trabalho	[V]
t_d	tempo de retardo de ignição	[μs]
t_e	duração de descarga	[μs]
t_i	duração do pulso de tensão	[μs]
t_0	tempo de intervalo entre dois sucessivos pulsos de tensão t_i	[μs]
t_p	tempo do período do ciclo de uma descarga	[μs]
$\hat{I}_e$	corrente máxima durante a descarga	[A]
$\bar{I}_e$	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	[μm]

Alfabeto Grego:

τ	relação de contato	
ϑ	desgaste volumétrico relativo	
ϑ_{LF}	desgaste relativo linear frontal	[%]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 Aplicação das ligas de titânio.....	16
2.2 Usinagem da liga de titânio (Ti6Al4V).....	17
2.3 Fundamentos do Processo de Eletroerosão.....	21
3 MÉTODO EXPERIMENTAL E MATERIAIS.....	43
3.1 Esquema experimental geral.....	43
3.2 Técnicas de Quantificação e Caracterização dos Resultados.....	48
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	52
4.1 Planejamento experimental para estabelecimento do melhor te.....	52
4.2 Resultados v_p e ϑ_{LF} para eletrodos de cobre.....	53
4.3 Resultados v_p e ϑ_{LF} para eletrodos de cobre-tungstênio.....	61
4.4 Planejamento experimental para estabelecimento da melhor relação de contato	69
4.5 Resultados v_p e ϑ_{LF} para eletrodos de cobre com variação da relação de contato τ	70
4.6 Resultados v_p e ϑ_{LF} para eletrodos de cobre-tungstênio com variação da relação de contato τ	75
4.7 Planejamento experimental para estabelecimento da melhor rotação.....	82
4.8 Resultados v_p e ϑ_{LF} para eletrodos de cobre com variação da rotação do eletrodo	82
4.9 Resultados v_p e ϑ_{LF} para eletrodos de cobre-tungstênio com variação da rotação do eletrodo.....	90
4.10 Comparação do melhor resultado entre modos do gerador da máquina.....	98
5 CONCLUSÕES.....	102
6 RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105
ANEXOS.....	109

1 INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos no campo da engenharia de manufatura são historicamente dominados por mudanças nos processos de fabricação. Duas das principais causas dessas mudanças são: (i) a exigência da indústria por processos produtivos cada vez mais eficientes e que atendam plenamente as necessidades de toda a cadeia de consumidores, desde os fabricantes até os usuários finais do produto e (ii) a introdução de novos tipos de materiais, que são continuamente desenvolvidos tanto para aplicações rotineiras, assim como para casos especiais (KÖNIG et.al. 1996).

Nesse sentido, observa-se que são relativamente raros os casos em que um único processo de fabricação se apresenta como sendo suficiente para a execução de uma tarefa específica de usinagem. Por exemplo, na usinagem com remoção de cavaco (torneamento, fresamento, etc), a retirada de material da peça ocorre pela ação mecânica da ferramenta de corte. Desta forma, as propriedades mecânicas do material a ser usinado e peças de configurações geométricas altamente complexas restringem, em muitos casos, a potencialidade de aplicação destes e outros processos convencionais de usinagem. Em contrapartida, na usinagem por eletroerosão (*Electrical Discharge Machining* - EDM), que é um processo não convencional de usinagem de alta precisão, não existe contato mecânico entre a ferramenta e a peça a ser confeccionada. A retirada de material decorre principalmente de fenômenos termoelétricos. Sendo assim, a erodibilidade de um material apresenta muito pouca dependência de suas propriedades mecânicas, porém é extremamente influenciada por suas propriedades físicas. Por esse motivo o processo de EDM é bastante utilizado pela indústria na fabricação de peças de variadas dimensões e de elevada complexidade em materiais de difícil usinagem. (KÖNIG & KLOCKE, 1997).

No decorrer dos últimos anos, a miniaturização de peças tem se caracterizado como uma contínua demanda do ambiente industrial (TANIGUCHI, 1983). Peças de diminutas grandezas dimensionais favorecem a incorporação de várias funções em equipamentos portáteis e não portáteis; características essas que elevam o desempenho e versatilidade de aplicação dos produtos. Como exemplos,

podem ser citados os equipamentos utilizados na área médica e nas indústrias automobilística, aeroespacial, eletro-eletrônica, ótica etc. (MASUZAWA, 2000).

No entanto, a fabricação de peças com grandezas dimensionais cada vez menores e em materiais de difícil processamento, de acordo com a Fig. 1, tem exigido o desenvolvimento de tecnologias de fabricação inovadoras e mais precisas. Nestes casos se destacam particularmente os processos de eletroerosão, de ultra-som, de feixe de elétrons, de remoção eletroquímica e o laser, os quais competem entre si em termos de suas limitações tecnológicas práticas (MASUZAWA, 2001).



Figura 1: Peças de pequenas dimensões fabricadas por EDM (CHARMILLES, 2006).

A aplicação da EDM por penetração na usinagem de peças de pequenas dimensões, que representam peças com grandezas da ordem décimos a centésimos de milímetro (micro-EDM), já ocupa a segunda colocação de aplicação desse processo, isto é, 15% do montante total como apresenta a Fig. 2 (AMORIM, 2002).

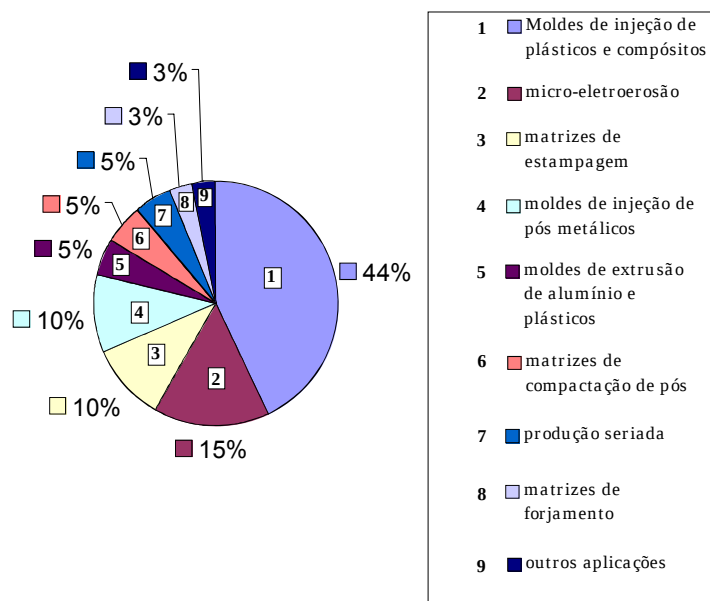


Figura 2: Aplicações do Processo de EDM (AMORIM, 2002).

Um dos principais materiais utilizados para a produção de pequenas peças fabricadas pelos processos supracitados são as ligas de titânio. As ligas de titânio são materiais que apresentam uma baixa massa específica e uma resistência mecânica similar à dos aços. Por causa dessas características, esse material apresenta um número muito maior de aplicações práticas quando comparado a várias outras ligas especiais. Além disso, as ligas de titânio, por possuírem alta resistência ao calor e ao desgaste, são muito aplicadas na indústria aeroespacial, de geração de energia, de exploração oceânica e nas áreas médica e odontológica (DEUTSCH TITAN, 2000).

No entanto, devido à sua baixa condutividade térmica e à elevada tenacidade, as ligas de titânio são de difícil usinagem. Em particular, a operação de usinagem convencional de furos de pequenos diâmetros D e grandes profundidades L - ($D \leq 1\text{mm}$ e $L/D \geq 10$) é bastante complicada.

De acordo com o que foi exposto acima, esta pesquisa teve dois principais objetivos práticos: (i) o estabelecimento de parâmetros adequados de EDM para a produção de furos de pequenos diâmetros na liga de titânio Ti6Al4V e (ii) a comparação da influência de dois tipos de materiais de eletrodos, i.e., o cobre e uma liga de CuW (70% W e 30% Cu) sobre o rendimento da usinagem. Por fim, esta pesquisa visa promover ao ambiente industrial mais uma parcela de conhecimento tecnológico sobre a eletroerosão de peças de pequenas dimensões e também

agregar ao LAUS-PUCPR¹ informações para o desenvolvimento de futuros trabalhos nessa linha de pesquisa.

Na seqüência deste documento, o capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre algumas aplicações das ligas de titânio em variadas áreas industriais. São apresentadas também algumas características do processo de usinagem por eletroerosão de ligas de titânio, e ao final, os fundamentos do processo de EDM em relação aos principais parâmetros de controle do processo.

No capítulo 3, são descritos o método experimental e os materiais adotados. São devidamente detalhadas as variáveis de entrada e saída do processo, os procedimentos e a seqüência dos ensaios, bem como as técnicas de caracterização e quantificação dos resultados do rendimento do processo.

O capítulo 4 se refere à apresentação e avaliação dos resultados obtidos para a liga de titânio Ti6Al4V apresentando discussões sobre os aspectos fundamentais e tecnológicos da usinabilidade destes materiais.

No capítulo 5, são apresentadas as conclusões sobre os resultados alcançados e indicadas algumas sugestões para futuros trabalhos.

¹ Laboratório de Pesquisa em Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda inicialmente algumas considerações sobre as aplicações industriais das ligas de titânio, destacando as vantagens de sua utilização. São descritos alguns exemplos de problemas enfrentados pela indústria na usinagem deste material, sendo expostas pesquisas já desenvolvidas em relação à usinagem de pequenos furos na liga Ti6Al4V pelo processo de EDM. Na sequência, é apresentada uma descrição do funcionamento de uma máquina de EDM, seguida pela apresentação dos fundamentos do fenômeno físico do processo e principais parâmetros elétricos que influenciam no rendimento da usinagem.

2.1 Aplicação das ligas de titânio

Há vários anos, o titânio caracterizado como puro e as ligas de titânio têm sido utilizados na engenharia médica em um vasto campo de aplicações. São utilizados para a reposição de regiões com articulação para quadris, joelhos, ombros, espinha dorsal e cotovelos, como material para fixação de ossos, sendo na forma de pregos, parafusos, porcas e placas. São utilizados também para: implantes dentários e dispositivos para cirurgias odontológicas, alojamento de marca passo para coração e cirurgia de olhos, instrumentos cirúrgicos para cirurgias de coração e cirurgia de olhos e componentes para centrifugação do sangue (DEUTSCH TITAN, 2000).

A massa específica e a resistência à corrosão destas ligas promovem aplicações diversificadas na área cirúrgica. Mais de 1000 toneladas de dispositivos de titânio são implantados nos pacientes de todo o mundo a cada ano. A eficácia e a confiabilidade dos implantes, dos instrumentos e dispositivos médicos e cirúrgicos são um fator essencial nesta área. A implantação representa uma grande mudança na estrutura química, fisiológica e mecânica do corpo humano. Desta maneira, totalmente bio-compatível, o titânio é um dos poucos materiais que combinam naturalmente as exigências para a implantação no corpo humano. As ligas de titânio da classe médica possuem uma resistência significativamente mais elevada quando comparadas aos aços inoxidáveis. As classes de ligas de titânio

disponíveis permitem aos especialistas selecionar os materiais conforme as necessidades da aplicação.

O titânio é usado para tubos e válvulas, para revestimento de instalações químicas, equipamentos petroquímicos e para as partes mais expostas dos navios e em reatores nucleares. Na indústria química, o titânio é utilizado devido à sua resistência à corrosão e ao ataque químico.

Já na indústria naval, o titânio metálico é empregado em equipamentos de submarinos e de dessalinização de água do mar. Na indústria nuclear, é empregado na fabricação de regeneradores de calor em usinas de energia nuclear.

No campo da indústria aeroespacial, o titânio é um material extremamente utilizado, devido à precisão dimensional que se consegue adquirir neste material e a melhor qualidade da superfície, principalmente quando utilizado a usinagem por eletroerosão – EDM.

Outro aspecto da utilização deste material no campo da indústria aeroespacial é devido ao baixo peso e à alta resistência mecânica e excelente resistência à corrosão. No ônibus espacial, é utilizado como proteção para a reentrada na atmosfera terrestre. No campo da indústria automotiva, o titânio é aplicado em sistemas de exaustão, em sistemas de freios, válvulas do motor, conexões de rodas e barras de suspensão.

2.2 Usinagem da liga de titânio (Ti6Al4V)

O titânio, assim como suas ligas, possuem características de usinagem similares às dos aços austeníticos. A usinagem por qualquer método convencional não apresenta maiores problemas, desde que sejam observados os seguintes aspectos:

- a) a aresta de corte da ferramenta é sujeita a altas cargas térmicas devido aos relativamente baixos valores de calor específico, condutividade térmica e densidade do titânio;
- b) o titânio tende a aderir na face da ferramenta.

Desta forma, o titânio deve ser usinado em baixas velocidades de corte e utilizando grandes quantidades de fluido de corte. Deve-se utilizar uma ferramenta de corte bem afiada e sujeita a baixas vibrações. (J. F. KAHLES, 1985).

Devido à sua baixa condutividade térmica e à elevada tenacidade, as ligas de titânio são de difícil usinagem. Em particular, a operação de usinagem convencional de furos de pequenos diâmetros D e grandes profundidades L - ($D \leq 1\text{mm}$ e $L/D \geq 10$) é bastante complexa. Os problemas estão normalmente relacionados à rigidez e ao resfriamento da ferramenta de corte e à retirada de cavacos. Processos como a usinagem por laser e por feixe de elétrons têm se caracterizado como métodos alternativos. Porém, apresentam como principais desvantagens os altos custos de fabricação e uma inadequada precisão dos furos produzidos (ZNIDARSIC & JUNKAR, 1996).

Apesar disso, o processo de eletroerosão (EDM) tem demonstrado ser uma tecnologia alternativa bastante competitiva na usinagem de furos com essas grandezas (ZHAO et al., 2002). As principais vantagens do processo de EDM podem ser resumidamente apresentadas como sendo:

- a) a usinagem é independente da dureza e resistência do material da peça;
- b) é possível fabricar peças pequenas e grandes com alta precisão dimensional;
- c) o acabamento superficial das peças é muito bom;
- d) o grau de automatização da estratégia de usinagem e a segurança da operação são elevadas (AMORIM & WEINGAERTNER, 2004).

O processo de usinagem por eletroerosão (*Electrical Discharge Machining – EDM*) é um dos métodos não convencionais de usinagem amplamente utilizado em materiais eletricamente condutores. É empregado na obtenção de gravuras com um eletrodo devidamente preparado, bem como na perfuração com eletrodos de forma (KAMINSKI, 2003).

No entanto, apesar de ser um processo alternativo e competitivo em relação ao laser e à usinagem por feixe de elétrons, a eletroerosão (EDM) também apresenta alguns problemas na usinagem de peças pequenas e em materiais de difícil processamento, como é o caso da produção por EDM de furos de pequenos diâmetros em ligas de titânio. Isto acontece, porque na EDM de furos destas

proporções a fenda de trabalho é extremamente pequena, assim como também é a área frontal da ferramenta. (ZHAO et. Al., 2002).

Além disso, outros problemas usualmente enfrentados pela eletroerosão para essas condições de usinagem, peças de pequenas dimensões, por exemplo, estão relacionados aos seguintes aspectos práticos (MASUZAWA, 2001):

- a) determinação de parâmetros adequados de EDM para peças com estas dimensões em materiais de difícil processamento;
- b) escolha do material adequado para a ferramenta;
- c) fixação e posicionamento da ferramenta e da peça a ser usinada;
- d) obtenção de pressão adequada do dielétrico na fenda de trabalho;
- e) tipo de dielétrico a ser utilizado;
- f) exatidão micro e macrogeométrica das peças.

Um dos maiores problemas tecnológicos na usinagem de pequenos furos pelo processo de EDM segundo Znidarsic & Junkar (1996), é alcançar na fenda de trabalho uma condição de usinagem eficiente através da lavagem das micro partículas (*debris*) eletroerodidas. A ausência de adequada lavagem destas micro partículas pode ocasionar a formação de arcos e curtos circuitos durante a descarga elétrica, tornando a usinagem instável devido à redução da eficiência das faíscas, resultando em baixo desempenho do processo, sendo um dos aspectos observados a baixa remoção de material e a elevada taxa de desgaste do eletrodo-ferramenta.

Na tentativa de otimizar a limpeza das micro partículas nas cavidades de furações muito pequenas, onde o movimento de pulsação do eletrodo-ferramenta não atua devidamente, métodos alternativos foram desenvolvidos no intuito de expulsar as micro partículas através da aplicação de campos magnéticos, movimento planetário do eletrodo-ferramenta e, por fim, aplicando altas frequências de vibração no eletrodo. Uma extensão da última aplicação é a utilização do método de vibração ultra-sônica em ambos os eletrodos (SONI & CHAKRAVERTI, 1994).

Na indústria, o campo de concentração das pesquisas estava relacionado apenas ao estudo do eletrodo estacionário, e na variação de alguns

parâmetros de usinagem como, por exemplo, corrente de descarga e duração do pulso, sendo dada menos atenção à variação da rotação do eletrodo.

Como observado anteriormente na Fig. 2, a indústria está cada vez mais utilizando a usinagem de peças de diminutas grandezas dimensionais pelo processo de eletroerosão. Desta maneira, quando utilizado este processo de usinagem, são esperados resultados satisfatórios, representados, normalmente, pela alta taxa de remoção de material e pela baixa taxa de desgaste do eletrodo-ferramenta, o que, infelizmente, no meio prático nem sempre ocorre (SONI & CHAKRAVERTI, 1994).

Correlacionado a este contexto, estes problemas estão relacionados à baixa taxa de erosão, ou seja, a cavidade da furação ser muito pequena, não havendo uma alta taxa de remoção de material, resultando desta maneira na instabilidade do processo. A superfície de erosão depende dos parâmetros de pulso. Longos pulsos, baixa frequência de pulso e baixa corrente de descarga permitem uma menor taxa de erosão na superfície (LUO, 1998).

Na usinagem de pequenos furos e grandes profundidades, utilizam-se normalmente valores de descargas elétricas muito baixos, da mesma forma para os intervalos entre estas descargas. A evacuação das micro partículas irá se tornando cada vez mais difícil conforme a relação profundidade/diâmetro for aumentando. Se o fluido dielétrico não for renovado devidamente, as partículas metálicas serão acumuladas na cavidade, resultando em arcos e curtos circuitos. Em decorrência disto, uma segunda descarga pode ocorrer facilmente na parede lateral da cavidade, resultando no afunilamento desta (ZHENLONG, 2000).

Zhenlong (2000) também apresenta outro método alternativo que visa auxiliar na usinagem destas diminutas grandezas dimensionais, através da introdução da vibração ultra-sônica. Segundo seus resultados, pode-se observar uma melhoria na qualidade da usinagem e na eficiência do processo através da emissão de ondas de altas frequências. O fluido dielétrico é pressionado alternadamente, fazendo com que esta alta variação de pressão no líquido melhore o comportamento da sua vazão substancialmente na fenda de trabalho, evitando assim o depósito e a acumulação dos produtos eletroerodidos. Então, os pontos de descarga não poderão ser concentrados em uma mesma localização, resultando em uma grande melhoria na eficiência e na estabilidade da usinagem.

2.3 Fundamentos do Processo de Eletroerosão

2.3.1 Generalidades sobre o Processo de Eletroerosão

De acordo com König & Klocke (1997), foi no período entre a Primeira e a Segunda Guerras Mundiais que as primeiras aplicações envolvendo o princípio da eletroerosão por faíscas teve seu início prático, basicamente sendo utilizado para a remoção de brocas e ferramentas de rosqueamento quebradas. Aqueles eram equipamentos rudimentares de difícil operação, sendo que o controle feito manualmente da distância de trabalho entre os eletrodos ocasionava a geração de arcos e curtos circuitos tendo como resultado a ineficiência do processo.

Segundo Schumacher & Dauw (1989), o fenômeno da ocorrência de descargas elétricas no espaço entre dois materiais foi descrito por Boyle em 1964. Da mesma forma relatam que entre os anos de 1751 e 1766, a remoção de material por descargas elétricas entre dois eletrodos foi respectivamente observada por Benjamin Franklin e Josef Priestley. Posteriormente, no ano de 1881, Meritens aplicou arcos elétricos em operações de soldagem e por volta do ano de 1900, Kohlschütter utilizou descargas elétricas para produzir pó metálico coloidal, sendo assim caracterizada a primeira aplicação de descargas elétricas na usinagem de metais, este físico foi também o primeiro a notificar sobre a ocorrência de desgaste nos eletrodos após o processo.

Com o intuito de eliminar o desgaste de contatos elétricos resultante dos primeiros equipamentos, os quais, segundo relatam König & Klocke (1997) eram extremamente rudimentares, principalmente o controle manual da distância de trabalho entre os eletrodos que resultava na geração de arcos e curtos circuitos, B.R. e N.I. Lazarenko observaram que a capacidade destruidora de uma descarga elétrica poderia ser utilizada para a usinagem dos metais. Sendo assim, realizaram estudos visando ao aumento e controle dessa remoção, para que pudessem então atingir parâmetros satisfatórios do processo. Como resultado desta pesquisa, em 1940 foi apresentada à indústria nacional da então União Soviética a primeira aplicação aperfeiçoada de uma máquina-ferramenta de eletroerosão, que permitia, submersos num meio de trabalho líquido, produzir sucessivas faíscas elétricas entre dois eletrodos por meio de um gerador de descargas elétricas (circuito de relaxação

RC), sendo este dispositivo batizado como circuito Lazarenko conforme destacado pela Fig. 2.4.

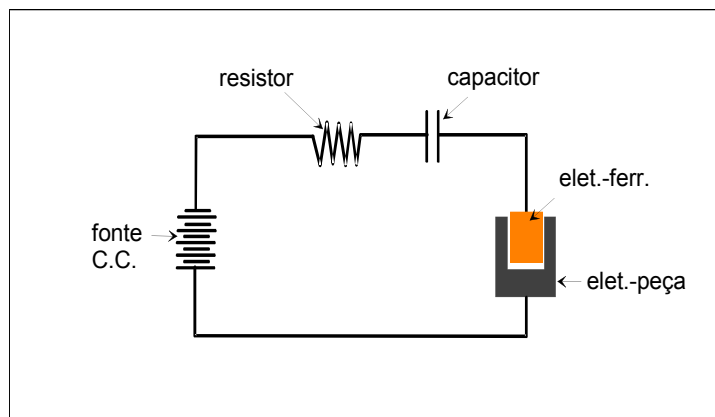


Figura 3: Circuito de Lazarenko (AMORIM, 2002).

Este circuito apresentava como principais vantagens a simplicidade construtiva, boa confiabilidade, baixo custo e a facilidade de usinagem de superfícies com alto grau de acabamento. Pela primeira vez foi possível ter um certo controle do tempo dos pulsos de tensão, fato que auxiliou na constatação de que determinadas distâncias entre os eletrodos resultavam em melhores taxas de remoção de material (CHARMILLES, 1995).

Pode ser verificado também que a introdução de um circuito simples de controle no servo-mecanismo de avanço do eletrodo ferramenta proporcionou o ajuste automático da distância entre os eletrodos conforme a situação da fenda de trabalho, resultando na diminuição ou mesmo na eliminação da formação de arcos elétricos e curtos circuitos entre os eletrodos durante a usinagem.

O gerador de relaxação funciona como um circuito oscilatório, sendo a corrente de descarga e a tensão de trabalho invertidas, periodicamente, até quase o descarregamento completo da energia elétrica armazenada nos capacitores.

Portanto, devido à ausência de cargas elétricas residuais nos eletrodos, o gerador de relaxação auxilia na obtenção de superfícies com alto grau de acabamento, devido à diminuição ou eliminação da formação de arcos elétricos e curtos-circuitos entre os eletrodos durante a usinagem.

O circuito de Lazarenko, hoje em dia, é utilizado somente para algumas aplicações especiais, como a usinagem sob regimes de acabamento muito

precisos, com potência reduzida e pequena relação de contato ou com peças de pequenas superfícies de trabalho, conforme relatam König & Klocke (1997).

No processo de eletroerosão (EDM), existem dois casos básicos de operações, sendo estes caracterizados como a eletroerosão por penetração e a eletroerosão a fio. Na eletroerosão por penetração, o eletrodo ferramenta transfere a sua imagem ao eletrodo peça à medida que avança na cavidade em que está sendo usinado. Este avanço do eletrodo pode ser executado tanto no sentido vertical (eixo Z), como na horizontal (eixos X e Y). No segundo caso, um fio bobinado que se desenrola constantemente durante o processo é utilizado como eletrodo ferramenta, sendo a peça produzida pelo movimento relativo entre o fio e a peça.

Hoje as máquinas-ferramentas de eletroerosão (EDM) são fabricadas com geradores de pulsos estáticos isoenergéticos ou isofreqüentes, podendo ser estabelecida grande variedade de parâmetros de controle, o que significa, respectivamente, o controle da duração do pulso da tensão e o controle da duração da descarga elétrica, sendo em alguns casos, como já descrito anteriormente, adicionado ao gerador o modo de relaxação. Estas máquinas-ferramentas também apresentam grande flexibilidade de programação e sistemas de controles adaptativos que auxiliam na estabilidade do processo de usinagem, proporcionando também uma autonomia sem a necessidade da intervenção do operador (CHARMILLES, 1995).

2.3.2 Principais Constituintes de uma Máquina de Eletroerosão por Penetração

Os principais componentes de uma máquina de eletroerosão por penetração são os sistemas mecânico, elétrico e o sistema do dielétrico:

- a) responsável pelo movimento relativo entre os eletrodos ferramenta/peça, o sistema mecânico é composto por três elementos. O primeiro elemento é constituído pela mesa de trabalho, sendo o posicionamento da peça nos eixos X-Y executados pelo seu movimento manual quando relacionado a máquinas mais antigas. Nas máquinas mais modernas, este posicionamento referido é efetuado pelo movimento do cabeçote, local onde é instalado o eletrodo ferramenta/peça. Este cabeçote pode possuir até quatro eixos programáveis,

sendo o eixo X-Y-Z-C, este último eixo é responsável pela rotação do eletrodo ferramenta em torno do eixo Z. O segundo elemento é constituído pelo servo-mecanismo de avanço e posicionamento do eletrodo ferramenta, sendo este segundo elemento responsável por ajustar o avanço do eletrodo ferramenta e manter uma distância adequada de trabalho entre os eletrodos ferramenta/peça. O terceiro elemento é constituído pela estrutura da máquina;

- b) o sistema elétrico é composto pelo gerador de pulsos estáticos, sistemas de controle do avanço proporcional entre o eletrodo peça e o eletrodo ferramenta e pelos cabos de alimentação de energia. No sistema elétrico, para que o circuito de tensão seja aberto e o circuito de corrente seja fechado, possibilitando desta forma o controle da fonte de corrente trabalhar com a corrente de trabalho e o tempo de descarga que são indicados pelo operador da máquina ferramenta, é necessário no sistema gerador que uma fonte de corrente contínua carregue o capacitor, gerando então um gradiente de campo elétrico entre os eletrodos até o nível de rompimento da tensão do dielétrico;
- c) o sistema dielétrico é composto pelo reservatório, filtros, recipiente de trabalho e moto bomba, sendo este o conjunto encarregado da alimentação do fluido dielétrico durante o processo de usinagem e pela sua limpeza. Este sistema é fundamental para a obtenção de um bom rendimento no processo por eletroerosão.

A usinagem por eletroerosão é aplicada na produção de peças e equipamentos nas áreas: médica, aeronáutica, aeroespacial, eletroeletrônica, ótica etc. De acordo com König (1991), materiais como o cermet, cerâmica e grafita podem ser processados por este processo devido a apresentarem a condutividade elétrica necessária para esta usinagem.

O princípio da remoção de material no processo de EDM está associado ao efeito erosivo produzido por sucessivas descargas elétricas não estacionárias e, aleatoriamente, distribuídas ao longo das superfícies de dois

materiais, sendo o eletrodo-ferramenta e o eletrodo-peça. Estas descargas ocorrem em curtos intervalos de tempo (0,2 a 3200 μ s) entre os dois eletrodos. Os eletrodos trabalham submersos em um meio líquido, sendo separados por uma distância adequada durante a descarga elétrica, sendo esta distância chamada de fenda de trabalho (*gap*), e que, dependendo das condições de usinagem, pode variar de 0,005 até 2mm. Comumente são empregados dielétricos baseados em hidrocarbonetos e água deionizada. Um hidrocarboneto, ou a água deionizada são comumente utilizados como meios dielétricos, tendo como principais funções a concentração da energia do canal de descarga, a evacuação das partículas eletroerodidas por meio de lavagem e o resfriamento dos eletrodos.

Segundo König & Klocke (1997), a energia elétrica liberada pelo gerador provoca a descarga da faísca que, em consequência, promove o aquecimento, a fusão e a evaporação de uma pequena quantidade de material em ambos os eletrodos. É estabelecido um intervalo entre duas faíscas sucessivas, sendo então expulso o material eletroerodido para fora da fenda de trabalho, formando uma pequena cratera em ambos os eletrodos. Este ciclo repete-se até a usinagem completa da peça.

2.3.3 Remoção de Material pelo Fenômeno Físico de uma Descarga

Diversas teorias têm sido formuladas com o intuito de explicar o processo de eletroerosão, o qual é baseado no complexo fenômeno de remoção de material por faíscas elétricas entre dois eletrodos. Para que estas teorias sejam validadas, pesquisas estão sendo desenvolvidas.

A teoria eletromecânica considera que a remoção ocorre por desgaste de partículas do material como resultado do campo elétrico extremamente concentrado, resultante da pequena fenda de trabalho entre os eletrodos ferramenta/peça. Esta teoria não considera nenhum efeito térmico de remoção e propõe que a remoção das pequenas partículas ocorra pelo campo elétrico, pelo fato de exceder as forças de coesão do reticulado cristalino do material. No entanto, a carência de informações experimentais não dá o suporte necessário a esta teoria. (KAHNG, 1977).

A teoria termomecânica considera que a remoção de material é atribuída pela fusão causada pela formação de chamas (*flame jets*), que são

decorrentes de vários efeitos físicos que ocorrem durante a descarga elétrica. Todavia, esta teoria não é validada por resultados experimentais, falhando, assim, em explicar os efeitos de uma descarga elétrica na remoção de material (KAHNG, 1977).

A teoria termoelétrica é a que apresenta atualmente as melhores explicações do fenômeno de remoção de material por descargas elétricas. Esta teoria considera que o ciclo de uma descarga elétrica ocorre em quatro fases consecutivas entre dois eletrodos submersos em um meio líquido de trabalho (KAHNG, 1977).

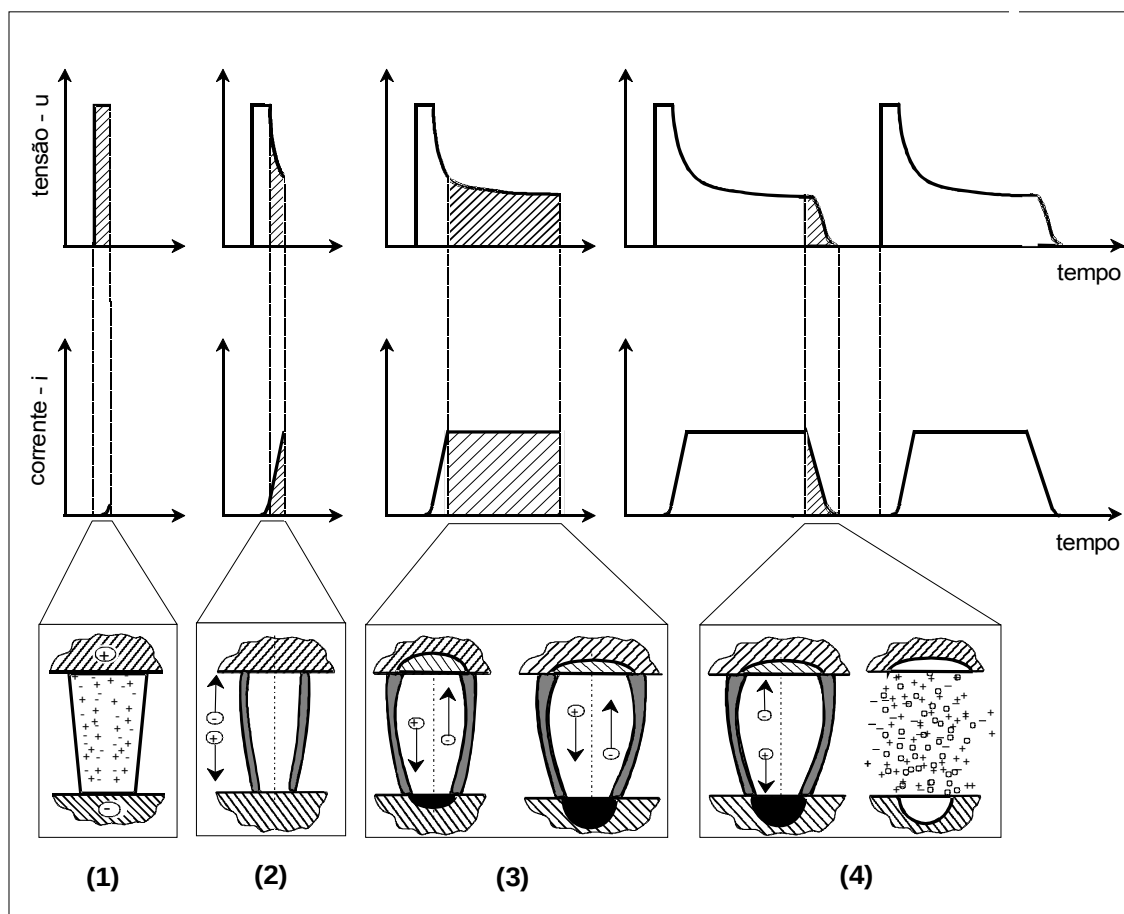


Figura 4: Fases de uma Descarga Elétrica no Processo de EDM (AMORIM, 2002).

(1) Fase de ignição da descarga; (2) Formação do canal de plasma; (3) Fusão e evaporação de material nos eletrodos; (4) Ejeção do material fundido.

2.3.4 Fase de Ignição da Descarga

Inicialmente, os eletrodos são posicionados na máquina e separados entre si de uma pequena distância entre 0,05 a 1mm. Entre os eletrodos é aplicada

uma tensão em aberto (u_i) que pode variar de 60 a 300V, sendo que no princípio não há fluxo de corrente devido à resistência proporcionada pelo fluido dielétrico. Nesse instante, o servomecanismo avança o eletrodo-ferramenta em direção à peça até aproximar-se da distância da fenda de trabalho, resultando em um aumento do campo elétrico (E) entre as superfícies dos eletrodos, dado pela razão entre a tensão e a distância entre eles.

De acordo com a teoria da ionização por impacto, os elétrons primários liberados no cátodo são acelerados pelo campo elétrico e colidem com moléculas do dielétrico provocando a liberação de mais elétrons (conhecidos como secundários) e íons positivos que se encaminham ao cátodo, dando início a uma reação em cadeia de acordo com a Fig. 5.

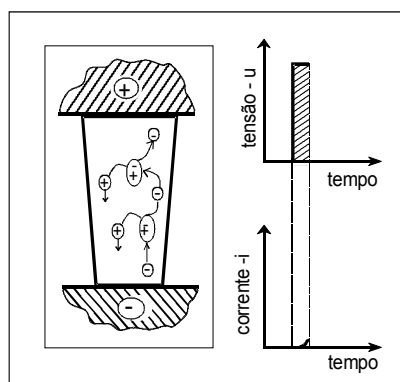


Figura 5: Representação da Fase de Ignição.

2.3.5 Formação do Canal de Plasma

Conforme descrito anteriormente, inicia-se a ionização por impacto, tendo na sequência a multiplicação em altíssima velocidade deste fenômeno, gerando um superaquecimento seguido de evaporação de uma pequena quantidade do dielétrico. Desta maneira é provocado, simultaneamente um aumento da corrente elétrica e um decréscimo da resistência do dielétrico. Podem ser observadas nesse instante a formação e a intensificação de túneis transportadores de energia elétrica (*streamers*) tanto para o anodo quanto para o cátodo, resultando na queda da tensão em aberto (u_i) para a tensão de ruptura do dielétrico, havendo na sequência um grande aumento da corrente elétrica (i_e), até atingir o nível especificado pelo operador como apresenta a Fig. 6

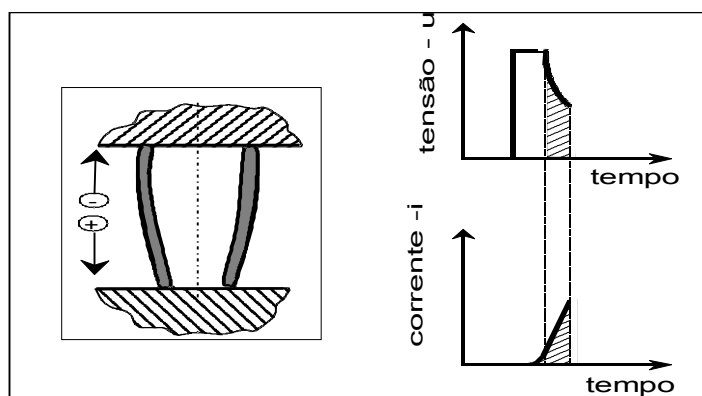


Figura 6: Representação da Fase da Formação do Canal de Plasma.

Como consequência deste processo, ocorre a formação de um canal de plasma contornado por uma bolha de vapor e pelo líquido dielétrico que tende a limitar o crescimento deste 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. Cabe observar que a formação do canal de plasma é também conhecida como o colapso da tensão em aberto (u_i) (*voltage breakdown*), pois é nesse instante em que a tensão (u_i) decai rapidamente para a tensão de ruptura do dielétrico, a qual depende da combinação do material utilizado nos eletrodos ferramenta/peça. O intervalo de tempo entre a aplicação da tensão (u_i) e a formação do canal de plasma é conhecido como tempo de retardo (t_d), o qual pode ser usado para análise da abertura da fenda de trabalho entre os eletrodos.

2.3.6 Fusão e Evaporação de Material nos Eletrodos

O canal de plasma formado é mantido por um período de duração (t_e) conforme especificado pelo operador. Durante a aplicação da descarga, o sistema de controle do servo-mecanismo da máquina controla e mantém em equilíbrio a amplitude da fenda de trabalho a qual depende do nível de energia da corrente de descarga (i_e). Desta forma evita-se a formação de arcos e curtos circuitos. De acordo com a duração da descarga elétrica (t_e), o plasma de alta energia funde continuamente por condução térmica uma certa quantidade de material em ambos os eletrodos, resultando em uma pequena poça de material líquido em ambos, conforme se observa na Fig. 7. No entanto, devido à alta pressão

do plasma muito pouco desse material líquido é evaporado (DIBITONTO, 1989). Isto ocorre porque a densidade de corrente decresce bruscamente com o aumento da profundidade da cavidade a partir da superfície dos eletrodos. É também possível observar na Fig. 7 que durante a duração da descarga elétrica (t_e) ocorre a continuação da fusão de material em ambos os eletrodos e também há um aumento constante do diâmetro do canal de plasma.

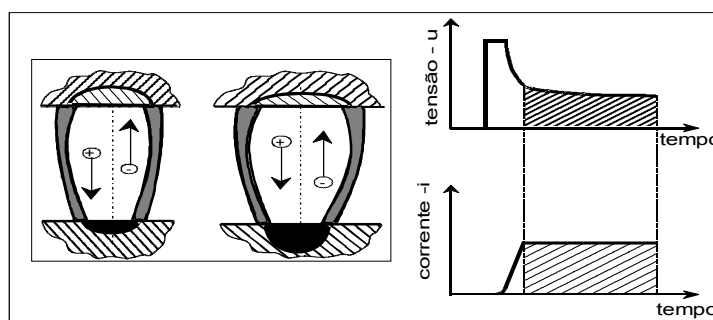


Figura 7: Representação da Fusão e Evaporação do Canal de Plasma (König & Klocke, 1997).

Neste fenômeno de fusão, as superfícies do cátodo e do ânodo são intensamente bombardeadas por elétrons e íons positivos. Portanto pode-se concluir que a energia cinética é transformada em calor a partir do momento em que estes elétrons penetram no ânodo, gerando como resultado a fusão do material. Desta mesma maneira ocorre com os íons positivos que transformam a sua energia cinética em calor ao colidirem com o cátodo. Pode-se concluir que, a corrente de descarga (i_e), a duração de descarga (t_e) utilizadas e as propriedades físicas dos eletrodos estão diretamente relacionados à quantidade de material fundido. Outro aspecto importante é a verificação da influência da mobilidade dos elétrons e dos íons positivos em relação ao início da fusão de material no ânodo e no cátodo.

Devido à maior inércia dos íons positivos, associada a sua maior massa em relação aos elétrons, estes precisam de mais tempo para atingir uma certa velocidade. Desta maneira, quando se inicia a descarga elétrica, ocorre um maior bombardeamento de elétrons no ânodo que o de íons positivos no cátodo, resultando na fusão de material primeiramente no ânodo. A fusão somente ocorrerá no cátodo alguns microssegundos depois, pois conforme descrito no parágrafo acima, o cátodo será mais intensamente bombardeado por íons positivos, transformando sua energia cinética em grande quantidade de calor, tendo como

conseqüência ao longo desta duração de descarga a fusão de ambos os materiais dos eletrodos.

O fenômeno de expansão contínua do diâmetro do canal de plasma ocorre pelo fato de o plasma transferir energia para as regiões radiais vizinhas, assim como para as cavidades fundidas, tendo fundamental influência sobre a quantidade de material fundido em cada um dos eletrodos (EUBANK, 1993). Ao longo da duração de descarga (t_e) a irradiação de energia do plasma provoca a vaporização, a dissociação e a ionização de um pequeno volume de dielétrico líquido que circunda o canal, resultando em um aumento da massa e do diâmetro do plasma e dos gases. Como resultante deste processo há também a queda de pressão e da temperatura que atuam sobre as cavidades fundidas.

Como conseqüência dessa expansão e devido à diminuição do fluxo de energia, a cavidade fundida no ânodo começa a se solidificar. Já a cavidade do cátodo tende a se tornar mais profunda. 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 cátodo, a segunda de 8% destina-se ao ânodo, 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 (DIBITONTO, 1989).

2.3.7 Ejeção do Material Fundido

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 (1993). Durante o tempo de aplicação da descarga, as superfícies das cavidades fundidas nos eletrodos estão superaquecidas, com temperaturas próximas àquelas de ebulição do material, correspondente ao estado de sobrepressão do plasma.

Ao final da duração de descarga (t_e) especificada pelo operador, o sistema de controle do gerador da máquina interrompe instantaneamente a corrente elétrica, estabelecendo um intervalo de tempo (t_0) até o início de um novo ciclo de descarga, como destacado pela Fig. 8.

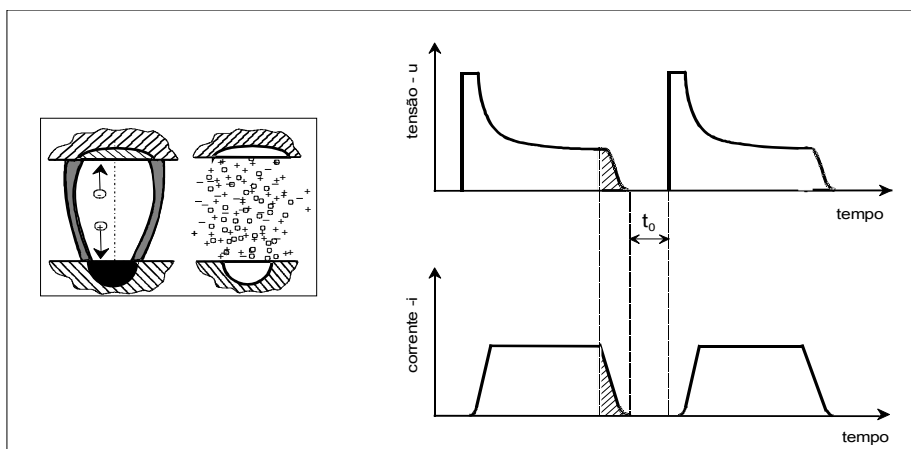


Figura 8: Representação da Suspensão do Canal de Plasma (König & Klocke, 1997).

Durante a duração de descarga, os eletrodos apresentam em suas cavidades superficiais temperaturas próximas às de ebulição dos seus respectivos materiais.

No entanto, pouco material se evapora devido à alta pressão que o plasma exerce sobre estas cavidades. Com a suspensão da descarga, uma pequena cratera é gerada nas superfícies dos eletrodos devido à queda brusca de pressão que resulta na extinção da bolha de gás e do canal de plasma, gerando forças associadas ao fenômeno do superaquecimento suficientes para separar o material fundido das paredes destas cavidades. Parte deste material é expulso pela lavagem do dielétrico para fora da fenda de trabalho, sendo a outra parte deste material solidificada na própria cratera.

2.3.8 Principais Parâmetros de Controle do Processo

De acordo com a Fig. 2.10 estão representados os principais parâmetros de controle do processo, conforme norma VDI 3402 de 1990².

²VDI – Richtlinie 3402, Blatt 1, Elektroerosive Bearbeitung – Definitionen und Terminologie (Electrical Discharge Machining – Definitions and Terminology)

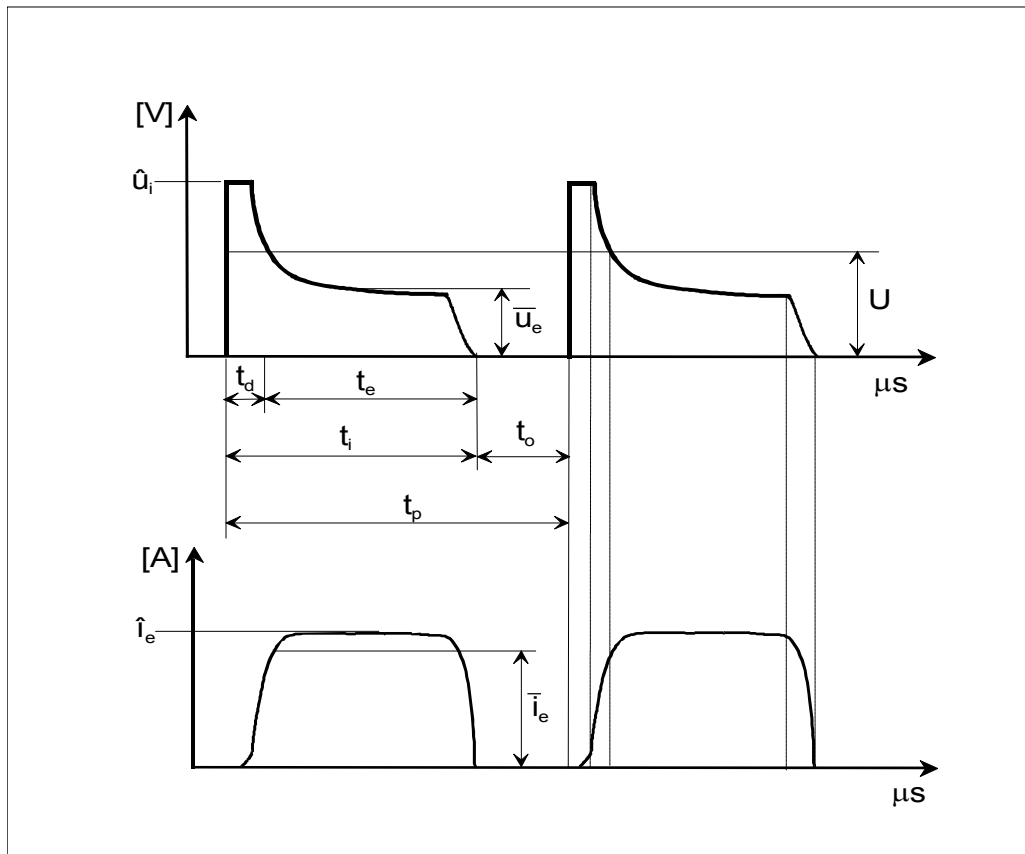


Figura 9: Evolução da Tensão e Corrente Elétricas durante a Descarga de uma Faísca (AMORIM, 2002).

$\hat{u}_i$ - tensão em aberto;

$\bar{u}_e$ - tensão média da descarga;

U - tensão média de trabalho durante a usinagem;

t_d - tempo de retardo de ignição da descarga;

t_e - duração de descarga;

t_i - duração do pulso de tensão ($t_d + t_e$);

t_o - duração do intervalo entre duas sucessivas descargas;

t_p - duração do período do ciclo de uma descarga;

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

$\bar{i}_e$ - corrente média durante a descarga;

τ - relação de contato: representa a razão entre a duração do pulso (t_i) e a duração do período do ciclo da descarga (t_p).

De acordo com o modelo da máquina ferramenta de EDM, os parâmetros acima podem ser regulados dentro de uma ampla faixa de variação. O controle da máquina CHARMILLES ROBOFORM 30 utilizada neste trabalho

conforme descrito anteriormente, pode variar os valores dos parâmetros utilizados para o desenvolvimento dos testes da seguinte maneira: t_e (1 a 3600 μ s), t_o (1 a 3600 μ s), $\hat{u}_i$ (60 a 300 V), $\hat{i}_e$ (1 a 300 A), τ (0,1 a 0,9).

A energia da descarga, que significa a energia transformada durante uma faísca, é representada por:

$$W_e = \bar{u}_e \cdot \bar{I}_e \cdot t_e \quad [\text{J}] \quad (\text{Eq. 01})$$

a qual determina a qualidade do acabamento superficial assim como o volume de material removido por descarga.

Para avaliação do rendimento do processo são usualmente utilizados os seguintes parâmetros:

V_w – taxa de remoção de material: representa o volume de material removido do eletrodo-peça durante o tempo [mm^3/min].

V_e – taxa de desgaste: representa o volume de material que é removido do eletrodo-ferramenta durante o tempo [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.

$$\vartheta = \frac{V_e}{V_w} \times 100 \quad (\text{Eq. 02})$$

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

2.3.9 Influência da Relação de Contato

Para obter um processo ideal que garanta um melhor desempenho da usinagem, faz necessário o conhecimento do princípio físico de remoção de material, dos parâmetros elétricos de controle do gerador e da forma de lavagem da fenda de trabalho. A determinação adequada destes parâmetros pode levar a um comportamento equilibrado da fenda de trabalho, ocasionando a ausência ou a diminuição da ocorrência de arcos ou curto-circuitos resultando em condições

estáveis durante o processo de EDM. A relação de contato é dada pela razão entre a duração do pulso (t_i) e pela duração do período da descarga (t_p), resultando na equação abaixo:

$$\tau = \frac{t_i}{t_i + t_0} \quad (\text{Eq.03})$$

Para se obter uma maior relação de contato, busca-se reduzir o tempo de intervalo entre as descargas (t_0), mantendo constante a duração das descargas (t_e). Como resultado tem-se o aumento da frequência de descargas, resultando em um maior V_w e em contrapartida em um menor η . Porém deve-se ter cautela com o aumento demasiado da relação de contato quando utilizados intervalos muito curtos entre estas descargas, pois pode ocasionar em uma alta contaminação na fenda de trabalho, gerando arcos e curtos circuitos que deixam o processo instável. Deve-se ter cautela também na diminuição demasiada da relação de contato, pois devido ao longo tempo de intervalo de descargas pode ocorrer a baixa remoção de material do eletrodo e um mau aproveitamento da energia. A baixa remoção de material está relacionado à baixa contaminação que haverá na fenda de trabalho devido ao tempo maior de lavagem, e o mau aproveitamento de energia está relacionado à quase ausência de contaminação, que é responsável por um tempo mais longo da ignição da descarga. Para relações de contato acima de 0,9 a deionização entre os eletrodos não mais ocorre, e a descarga seguinte ocorre no mesmo lugar da anterior.

2.3.10 Influência da Lavagem dos Produtos Erodidos

De fundamental importância, a lavagem é determinante para o bom desempenho do processo, sendo estabelecida pelo fluxo do dielétrico através da fenda de trabalho. O dielétrico tem como principais funções reduzir a expansão do canal de plasma auxiliando na concentração da energia da descarga, evacuar as partículas eletroerodidas para fora da fenda de trabalho e de refrigerar os eletrodos ferramenta/peça.

Segundo Stor (1992), quanto menor o volume do canal de plasma, maior será a quantidade de energia irradiada para os eletrodos, resultando desta maneira no melhor rendimento do processo.

Relata König & Klocke (1997) que no processo de EDM, por causa dos altos picos de temperatura é fundamental evitar um aquecimento excessivo dos eletrodos, o qual pode ocasionar acentuada dilatação volumétrica principalmente do eletrodo-ferramenta, gerando deficiência das condições de lavagem, em especial na usinagem de cavidades profundas e estreitas.

Normalmente é utilizado o fluido dielétrico constituído de hidrocarbonetos (Levy, 1989):

1. alcanos;
2. alcenos;
3. benzênicos;
4. acetilênicos.

Por possuir uma grande influência sobre as condições de lavagem e redução da expansão do canal de plasma, o fluido dielétrico age diretamente através da sua viscosidade sobre os índices da taxa de remoção sendo a velocidade de penetração, do desgaste frontal linear relativo e a melhoria do acabamento superficial. A viscosidade recomendada para a utilização do dielétrico deve ser igual ou menor a 3 cSt.

Dependendo da geometria e profundidade da cavidade e do regime de usinagem (desbaste ou acabamento), o fluido dielétrico pode ser direcionado à fenda de trabalho de diversas formas. Serão agora explicadas estas formas de lavagem.

A lavagem lateral apresentada pela Fig. 10, pode ser utilizada de várias maneiras. A usinagem adequada pode ser obtida utilizando jatos laterais direcionados diretamente na abertura da fenda de trabalho. A peça pode estar ou não submersa no meio líquido.

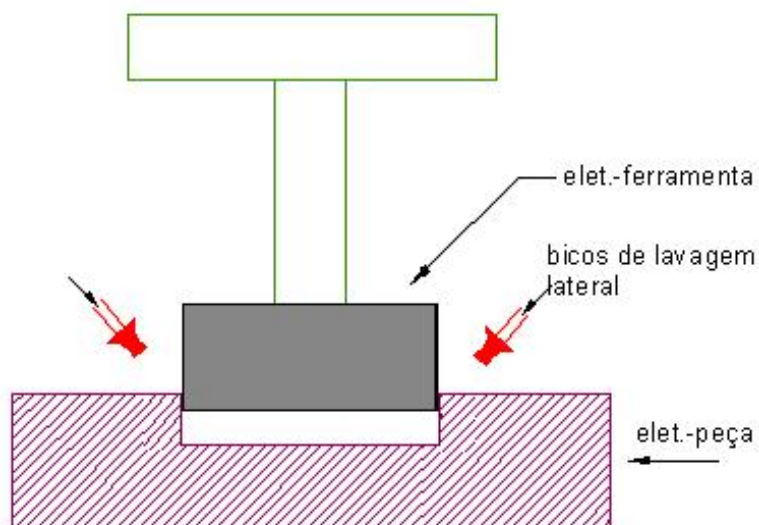


Figura 10: Lavagem lateral (Rajurkar, 1998).

Para cavidades mais profundas 'prática usual direcionar o fluido dielétrico sob pressão na fenda de trabalho através de furos do eletrodo-ferramenta. Os furos para a lavagem são geralmente posicionados em áreas onde resultarão as maiores profundidades de usinagem. Segundo Hajurkar (1998), o espaçamento uniforme entre estas cavidades em relação à borda do eletrodo-ferramenta traz uma melhoria no fluxo do dielétrico.

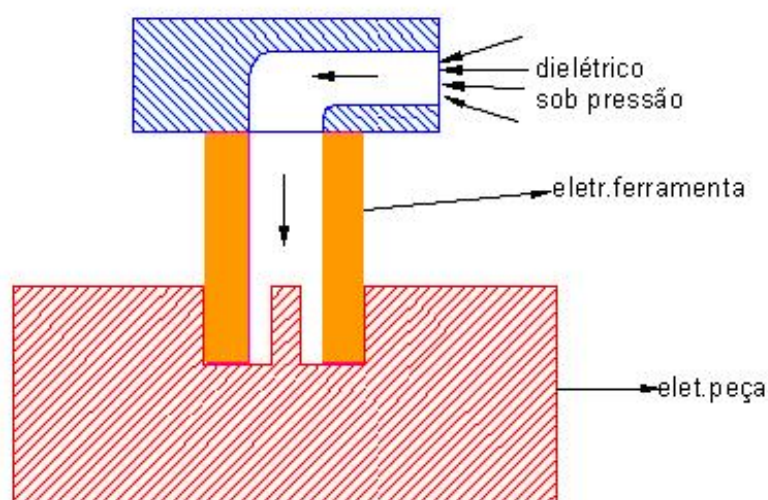


Figura 11: Lavagem por pressão pelo eletrodo (Rajurkar, 1998).

No entanto, a lavagem por pressão pelo eletrodo pode ocasionar alguns aspectos indesejáveis conforme se observa na Fig. 12, sendo por exemplo obtenção de certa conicidade ao longo das paredes laterais do furo. A explicação para esta imprecisão geométrica está relacionada à movimentação das partículas da fenda de trabalho que se dirigem às paredes da cavidade. Isto quer dizer que as partículas que são erodidas (ponto A) precisam passar pelo ponto B, onde estas se concentram facilitando a ocorrência de faíscas indesejáveis próximas do eletrodo (ponto B) resultando na conicidade do furo. Com o tempo, de acordo com o (ponto C), haverá um instante em que a fenda de trabalho entre o eletrodo e as paredes das cavidades atinge uma dimensão que diminuirá ou impossibilitará a ocorrência de faíscas laterais. Pode-se observar a partir deste ponto a redução na formação de conicidade da cavidade (ponto C).

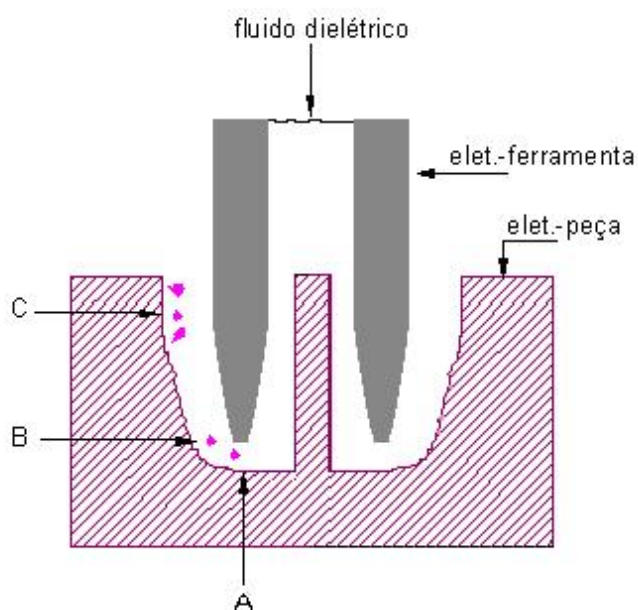


Figura 12: Conicidade provocada pela lavagem por pressão pelo eletrodo (Rajurkar, 1998).

Esta conicidade gerada pela lavagem por pressão pelo eletrodo-ferramenta pode ser reduzida pela utilização da técnica de sucção do dielétrico pelo eletrodo de acordo com a Fig. 13. O fluido dielétrico limpo é alimentado na fenda de trabalho sendo succionadas através dos furos contidos pelo eletrodo as partículas eletroerodidas, reduzindo a possibilidade da ocorrência de faíscas excessivas nas paredes laterais do furo.

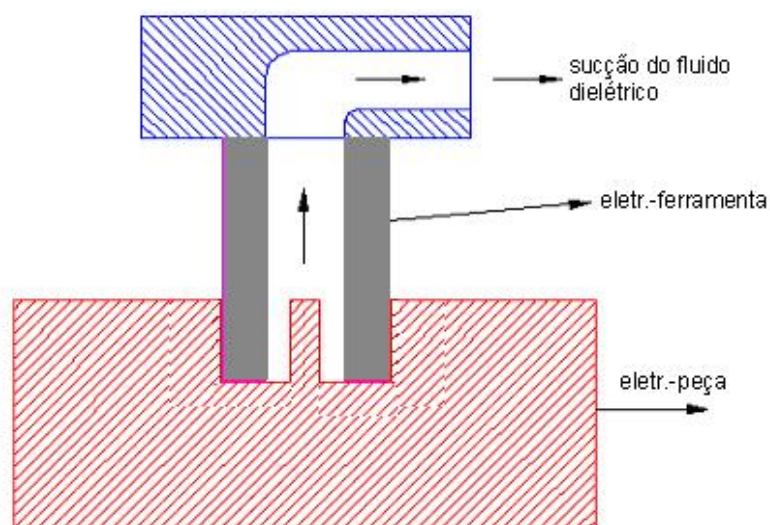


Figura 13: Lavagem por sucção das partículas através do eletrodo (Rajurkar, 1998).

Entretanto, neste processo de lavagem pode haver a deformação do fundo do furo/cavidade e da superfície do eletrodo ferramenta. Isto ocorre devido ao aumento do gradiente de temperatura e da maior concentração das partículas eletroerodidas ocorrendo um menor número de descargas no local de entrada do dielétrico, oposto ao local de saída que pode ser explicado pela sobre concentração de impurezas que reside neste local facilitando a ocorrência de faíscas. Sendo assim, a taxa de remoção de material dada pela velocidade de penetração e o desgaste frontal linear relativo são maiores no local de saída do fluido dielétrico, provocando a deformação do fundo da cavidade como destacado pela Fig. 14.

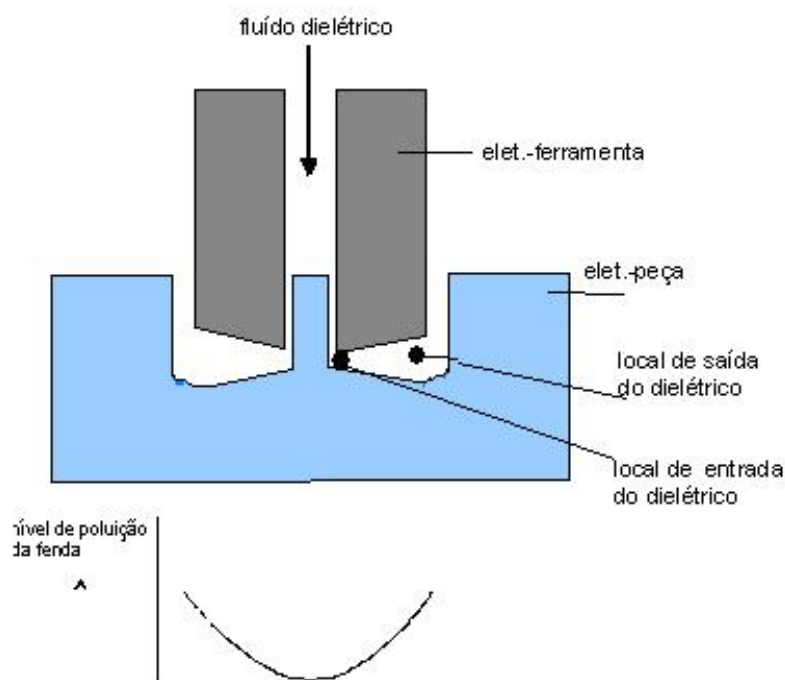


Figura 14: Deformação do fundo da cavidade provocada pela lavagem por pressão através do eletrodo (Rajurkar, 1998).

É de extrema importância observar que, para que sejam obtidas boas condições de lavagem, a pressão e a vazão do dielétrico devem ser controladas rigorosamente pela fenda de trabalho para cada exemplo aqui apresentado a ser utilizado. Para trabalhos de extrema dificuldade de usinagem, é adotado como medida de melhoria da lavagem o movimento de pulsação do eletrodo ferramenta. Este movimento de pulsação na cavidade gera um efeito de bombeamento que facilita na expulsão das partículas eletroerodidas da fenda de trabalho.

2.3.11 Influência do Material do Eletrodo Ferramenta e Eletrodo Peça

O eletrodo-ferramenta é o meio pelo qual a energia elétrica é transportada para o eletrodo-peça. A forma do eletrodo-ferramenta estabelece um modelo/molde no eletrodo-peça através das faíscas elétricas que ocorrem durante o processo. O eletrodo-ferramenta assim transfere a sua imagem ao eletrodo-peça, à medida que avança na cavidade em que está sendo usinado. Um dos requisitos para qualquer material utilizado como eletrodo na eletroerosão é ser condutor de eletricidade, sendo que materiais isolantes não são utilizados. Uma ampla variedade de materiais é utilizada na fabricação de eletrodos-ferramenta, como por exemplo, o

cobre e a grafita para a usinagem de aços e o cobre-tungstênio para a usinagem de carbeto. Cada material é disponível em diferentes classificações ou ligas que podem ser utilizados em necessidades específicas (DRODZA, 1998). As seguintes considerações gerais são para efeito de comparação entre os materiais mais utilizados na EDM.

- Eletrodo de Latão:

O latão é freqüentemente utilizado na EDM como material de eletrodo. Na usinagem de algumas ligas de titânio é utilizado apenas em regime de acabamento. Devido à sua alta taxa de desgaste, o latão não é utilizado em usinagem de peças de formas tri-dimensionais (DRODZA, 1998).

- Eletrodo de Cobre:

O cobre é geralmente classificado como um material puro ou classificado como cobre eletrolítico. É principalmente utilizado quando se precisa obter uma ótima superfície de acabamento. Pode ser polido a uma superfície de acabamento contendo uma rugosidade de $R_a = 0,25\mu\text{m}$ (DRODZA, 1998).

Para alcançar um desgaste reduzido nos eletrodos de cobre é necessário trabalhar com uma baixa pressão do fluido dielétrico. Os eletrodos de cobre também são utilizados na indústria envolvendo alta escala de produção, sendo também utilizado nas produções de geometrias complexas a baixo custo.

Na indústria de equipamentos médicos o cobre apresenta uma grande vantagem sobre a grafita devido à sua capacidade de polimento (DRODZA, 1983-1998).

- Eletrodo de Cobre Tungstênio:

O cobre-tungstênio é recomendado para aplicações que necessitam de alto acabamento e alta precisão. Possui uma ótima resistência ao desgaste térmico e é menos suscetível a rupturas ou fraturas quando usinado em finas lâminas para EDM de cavidades profundas, quando comparado com a grafita. O material cobre-tungstênio está na classe dos materiais mais caros para a produção de eletrodos. A composição deste eletrodo está na de 70% de tungstênio e 30% de cobre. Este material possui alta densidade e alta resistência assim como uma ótima condutividade térmica e elétrica. A alta densidade faz com que este material seja utilizado em aplicações que exijam superfícies com alto acabamento obtendo baixa taxa de desgaste do eletrodo. O cobre-tungstênio possui pior usinabilidade que o

cobre eletrolítico. Utiliza-se este material para obter cavidades em materiais de baixa erodibilidade por descargas elétricas, como por exemplo, metal duro, cerâmicas (DRODZA, 1998).

Como comparativo podemos observar:

- Eletrodo de Grafita:

A grafita transformou-se no material de eletrodo predominante na EDM. As classes da grafita variam entre as de partículas de tamanho superior chegando a 0,20mm contendo baixa densidade e as partículas de tamanho bem inferior chegando a 0,013mm contendo alta densidade. O custo do eletrodo de grafita varia entre valores baixos para as classes de partículas de baixa densidade a valores altos para as classes de partículas de alta densidade. A Grafita constituída de partículas de tamanho superior é utilizada normalmente para usinagem de desbaste na EDM, já para a usinagem de acabamento utiliza-se a grafita constituída de partículas de tamanho inferior (DRODZA, 1998).

Normalmente utilizada para a usinagem de aços, a grafita proporciona alta taxa de remoção de material quando comparado com eletrodos de materiais metálicos, sendo facilmente processado por torneamento, fresamento, furação e retificação. Deve-se ter cuidados especiais ao utilizar o eletrodo de grafita na usinagem, pois apresenta o inconveniente de gerar uma alta quantidade de pó. Sendo assim, as pequenas partículas geradas depositam-se nas guias das máquinas-ferramenta resultando no desgaste e conseqüentemente na redução da vida do equipamento (DRODZA, 1998).

2.3.12 Aspectos de Integridade Superficial

O fenômeno térmico de remoção de material é o princípio físico básico da usinagem por eletroerosão de materiais metálicos. Desta maneira, os materiais processados por eletroerosão sofrem modificações químicas e estruturais em sua superfície. Essas modificações superficiais, provocadas pela EDM por penetração e a fio, afetam o desempenho e também a vida dos produtos (KÖNIG & KLOCKE, 1997).

De acordo com a norma VDI 3402 (1990), diferentes camadas podem ser identificadas em peças eletroerodidas as quais podemos classificar da seguinte maneira:

- a) Camada refundida (*recast layer*) – na superfície das peças observa-se a presença de uma camada decorrente da interrupção da descarga, onde a parte do material não expelido pela lavagem é solidificado na própria cratera e em regiões vizinhas, sendo constituída a camada superficial chamada de *white layer*. Esta camada apresenta mudanças químicas devido à interação com subprodutos do dielétrico e do próprio eletrodo-ferramenta, e modificações na sua estrutura por causa da rápida solidificação do material. Normalmente possui composição e estrutura bastante heterogênea e apresenta propriedades mecânicas completamente diferentes daquelas encontradas no material base da liga. Especialmente em regimes de usinagem de desbaste, observa-se a presença de muitas microtrincas e poros ao longo da camada superficial. As microtrincas normalmente não se propagam até o material base (AMORIM, 2002);
- b) Zona termicamente afetada – Situa-se logo abaixo da camada refundida e da camada que não sofreu fusão. Normalmente é composta por várias camadas difíceis de serem diferenciadas. Devido às altas temperaturas e à difusão atômica, ocorre modificação estrutural e modificação da composição química do material. Dependendo do material da peça, pode haver tensões residuais, poros e trincas;
- c) Zona de tensão residual – O alto gradiente de temperaturas, devido ao ciclo de aquecimento e refrigeração do material durante a eletroerosão, ocasiona a formação de uma zona de tensão residual que parte da camada superficial até áreas bem próximas ao material base da liga. Essas tensões residuais podem causar fissuras que, sob carregamento da ferramenta, podem se propagar até o material base.

3 MÉTODO EXPERIMENTAL E MATERIAIS

Este capítulo apresenta o plano experimental geral elaborado para a realização dos testes de EDM por penetração. Foi desenvolvido um diagrama esquemático com a finalidade de constituir-se como um modelo sistematizado para melhor orientar o desenvolvimento da dissertação. As experiências na liga de titânio Ti6Al4V foram conduzidas no Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LAUS) da pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR, Curitiba-Brasil no período de maio/2005 a junho/2006.

3.1 Esquema experimental geral

A Fig. 15 apresenta esquematicamente o diagrama geral dos ensaios. A escolha das variáveis independentes de entrada foi estabelecida de forma a garantir resultados que proporcionassem um melhor entendimento dos parâmetros de usinagem selecionados e melhor entendimento do fenômeno da eletroerosão sobre o material testado. Após a definição das variáveis de entrada, foram desenvolvidos pré-testes com a liga de titânio Ti6Al4V numa máquina de eletroerosão por penetração CHARMILLES ROBOFORM 30 CNC. O modo de atuação do gerador utilizado foi de pulsos isoenergéticos para a definição dos valores dos parâmetros elétricos (i_e , t_e , t_0 , $\hat{u}_i$), estabelecendo desta maneira uma amplitude adequada da variação destes parâmetros, visando assegurar um ponto de partida para obter um rastreamento geral do comportamento do material para o estabelecimento de resultados representativos sobre o rendimento da usinagem.

Após os testes principais serem realizados, para efeito de comparação, o melhor resultado obtido com o gerador no modo de pulsos isoenergéticos será testado para o gerador no modo de relaxação.

No primeiro bloco, Parâmetros de Processo, estão representadas as variáveis independentes de entrada do processo, sendo:

- Eletrodo-peça: placas da liga de titânio Ti6Al4V, sendo os corpos de provas com dimensões de 10mm de altura por 60mm de comprimento com espessura de 1mm. As placas foram retificadas nas suas superfícies laterais para

prevenir desgastes não uniformes no eletrodo-ferramenta, devido à possível instabilidade durante a furação na forma de arcos e curtos circuitos. As dimensões das amostras foram determinadas de maneira a obter cavidades/furações de adequada profundidade. Em seguida, como destacado pela Fig. 16 e Fig. 17, foram colocadas juntas e forçadas uma contra a outra por placas de apoio. Todo esse conjunto foi montado numa morsa fixada na mesa da máquina-ferramenta.

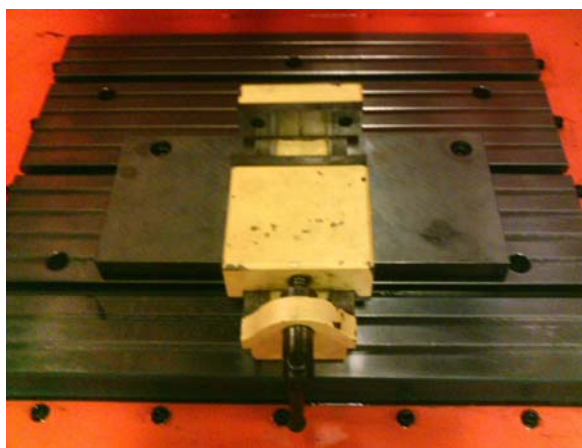


Figura 15: Vista esquemática superior morsa montada na máquina-ferramenta.

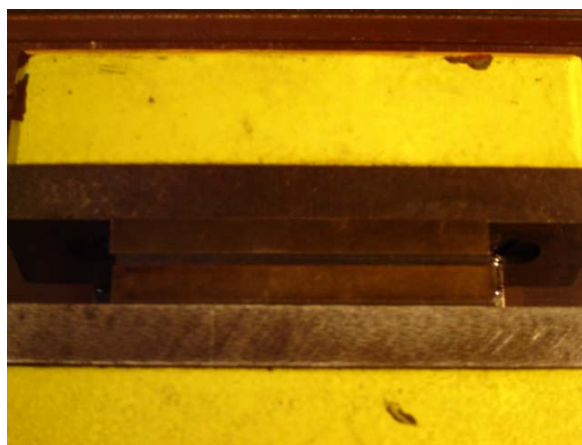


Figura 16: Vista esquemática superior da montagem das duas placas da liga de Ti6Al4V para execução dos furos.

A Tab. 1 apresenta a composição química da liga de titânio Ti6Al4V (DEUTSCH TITAN, 2000).

Tabela 1: Composição química da liga de titânio Ti6Al4V em porcentagem de massa (DEUTSCH TITAN, 2000).

Código DIN		Al	V	Fe	O	H	N	C
Ti6Al4V	máx. mín.	5.5 6.75	3.5 4.5	- 0.30	- 0.20	- 0.015	- 0.05	- 0.08

A Tab. 2 apresenta as propriedades físicas da liga de titânio Ti6Al4V para a temperatura ambiente (DEUTSCH TITAN, 2000).

Tabela 2: Composição química da liga de titânio Ti6Al4V em porcentagem de massa (DEUTSCH TITAN, 2000).

Calor Específico a 20°C J/kg K	Coefficiente. Linear de Expansão Térmica	Condutividade Térmica a 20°C W/m K	Condutividade Elétrica a 20°C mm ² /m
560	9.3	7.1	1.71

A Tab. 3 apresenta as principais propriedades mecânicas da liga de titânio Ti6Al4V (DEUTSCH TITAN, 2000).

Tabela 3: Propriedades Mecânicas da liga de titânio Ti6Al4V (DEUTSCH TITAN, 2000).

Dens. g/cm ²	Resistência a Tração Mpa (N/mm ²) recozido - envelhecido	Dureza Brinell HB 30	Módulo de Elasticidade kN/mm ²
4.43	920 - 110	310	110

- Parâmetros Elétricos do Processo: foram variados: a corrente de descarga (i_e) de 2A até 12A, duração de descarga (t_e) de 3,2μs até 100μs, duração de intervalo (t_0) de 3,2 até 100μs, polaridade do eletrodo-ferramenta (+ e -), tensão em aberto (u_i) de 160V e 200V. Estes parâmetros foram programados através do sistema de informação/controle da máquina de eletroerosão por penetração CHARMILLES ROBOFORM 30 CNC, os quais representam as principais variáveis que influenciam no resultado do rendimento do processo em relação à remoção de material, tanto do eletrodo-ferramenta como do eletrodo-peça, influenciando também nos resultados da integridade superficial. A programação do gerador foi subdividida em duas condições: (i) a primeira é a programação no modo de pulsos isoenergéticos, que proporciona uma rápida elevação da corrente de descarga (i_e) e (ii) a segunda é a programação no modo de relaxação visando à comparação com o melhor resultado proporcionado pelo gerador no modo isoenergético.

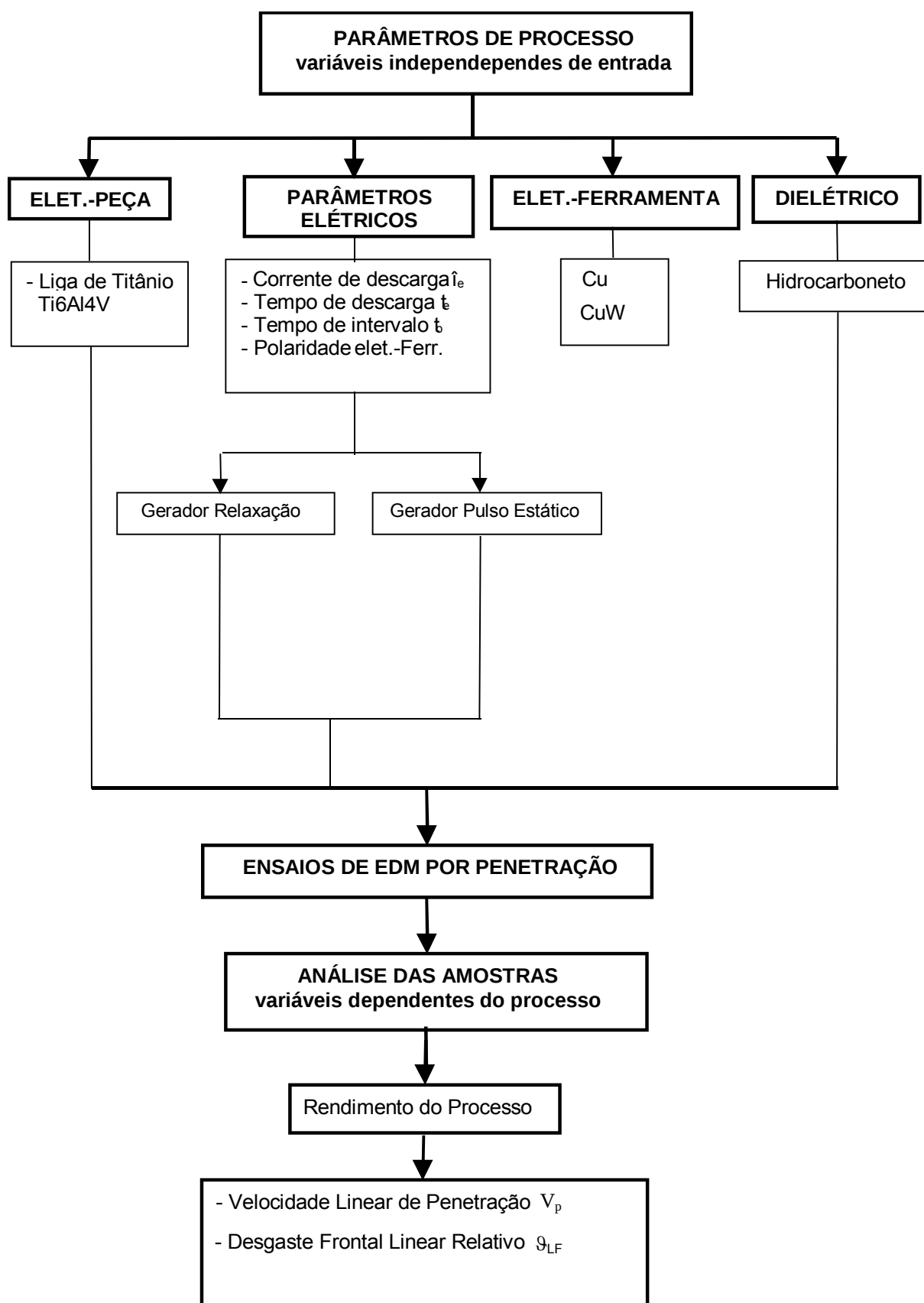


Figura 17: Modelo sistematizado do plano geral de desenvolvimento dos ensaios.

- Eletrodo-ferramenta: (i) barras cilíndricas de cobre de 0,5mm de diâmetro e vazadas axialmente em forma de “oito”, material tradicionalmente adotado como eletrodo e (ii) barras maciças de cobre-tungstênio (70% W e 30% Cu) com 0,5mm de diâmetro, material utilizado por possuir alta resistência ao desgaste térmico.

- Fluido dielétrico e modo de lavagem: foi utilizado um hidrocarboneto convencionalmente adotado na indústria, apresentando viscosidade de 3 cSt a 40°C. Neste trabalho foi aplicada a lavagem lateral para todos os testes principais. Este modo de lavagem foi escolhido porque durante os pré-testes foi observada grande instabilidade da usinagem, que foi possivelmente promovida por insuficiente pressão do dielétrico no fundo da cavidade eletroerodida. A causa para este fato está na elevada perda de carga do dielétrico injetado pelo pequeno furo central do eletrodo-ferramenta, o que causou uma lavagem inadequada das partículas usinadas. No intuito de minimizar este problema foi adotado, juntamente com a lavagem lateral, um movimento de pulsação do eletrodo-ferramenta.

Durante o avanço do eletrodo-ferramenta ocorrem sucessivas descargas e durante o movimento de retração o fornecimento de energia é interrompido. Para todos os testes foram especificados o tempo de retração R igual a 0,2s e o tempo da seqüência de descargas U igual a 0,8s, tendo durante os pré-testes proporcionado bons resultados.

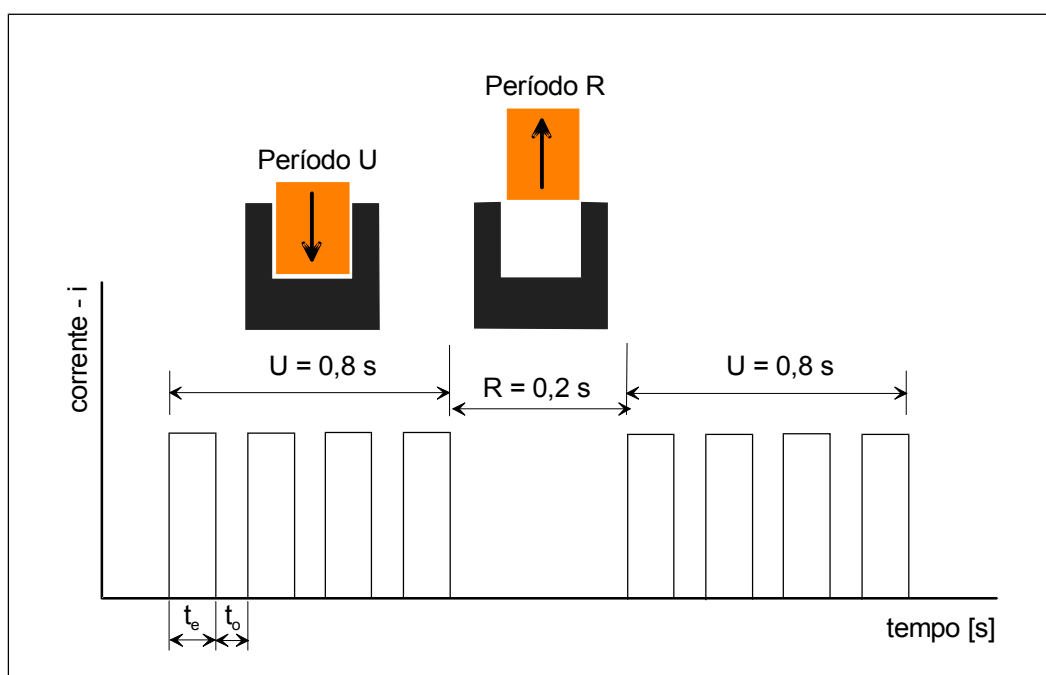


Figura 18: Representação dos Tempos de Retração (R) e Eletroerosão (U).

- **Rendimento do processo:** foram determinados (i) velocidade linear de penetração v_p [mm/min] dado pela razão entre a profundidade da cavidade D_c e o tempo de usinagem M_t e (ii) desgaste frontal linear relativo $\square_{LF}$ [%], dado pela razão entre a diferença dos comprimentos inicial (L_1) e final (L_2) e a profundidade da cavidade D_c .

3.2 Técnicas de Quantificação e Caracterização dos Resultados

Na maioria dos trabalhos experimentais de EDM por penetração é comum avaliar o rendimento do processo pela taxa de remoção de material da peça V_w [mm³/min]. Esta grandeza é normalmente determinada pela medição da massa dos corpos de prova antes e depois do teste. Em seguida, o volume de material removido é obtido dividindo-se a diferença de massa dos corpos de prova pela massa específica do material peça. Finalmente, o valor preciso de V_w é dado pela razão entre o volume medido e o tempo de usinagem do teste.

Neste trabalho, a quantidade de material removido da peça é extremamente baixa. Esta característica de rendimento seria difícil de ser detectada por uma balança normalmente adotada para EDM, que possui resolução usual de 0,0001g. Portanto, optou-se por medir a velocidade de penetração linear do eletrodo na peça v_p [mm/min]. Após cada teste é medida, com o auxílio de um microscópio, a profundidade da cavidade usinada da peça D_c . Em seguida, conforme demonstrado pela Eq. 04, o valor de v_p é dado pela razão entre D_c e tempo de usinagem adotado para o teste M_t .

$$v_p = \frac{D_c}{M_t} \quad \left(\frac{\text{mm}}{\text{min.}} \right) \quad (\text{Eq.04})$$

Em se tratando do desgaste volumétrico $\mathfrak{V}$, 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 utilizado para cavidades convencionais é da mesma forma através de uma balança digital com resolução de 0,0001 [g] para a medição das massas dos eletrodos-ferramenta e das peças, antes e após os

ensaios. Com base na massa específica dos materiais, calcula-se precisamente o volume de material removido. No entanto, para medirmos a taxa de desgaste do eletrodo-ferramenta de diâmetro de 0,5mm e termos como resultados dados mais precisos, foi utilizado a medição do desgaste linear frontal relativo $\mathfrak{g}_{LF}$, através da medição do comprimento longitudinal do eletrodo-ferramenta [mm], o qual é representado pela razão entre a diferença dos comprimentos inicial (L_1) e final (L_2) e a profundidade da cavidade (D_c) medido percentualmente como apresenta a Eq. 05, pois a diferença do volume para o cálculo do desgaste do eletrodo-ferramenta pela diferença entre as massas do desgaste volumétrico seria mínima, ao utilizar-se uma balança digital.

$$\mathfrak{g}_{LF} = \left(\frac{L_1 - L_2}{D_c} \right) \times 100 \quad (\%) \quad (\text{Eq.05})$$

3.2.1 Medições para Início dos Ensaios

Nesta dissertação, para que fossem evitadas distorções de resultados, foi desenvolvido o seguinte método: para a análise da medição do eletrodo, foi considerado um sistema de medição (SM) variável devido a imperfeições geométricas encontradas na face do eletrodo durante a medição do seu comprimento final (após usinagem), fatalmente conduzindo estas medições a diferentes valores, quando medido de uma face até a outra, onde pode ser constatado que se trata de uma característica de um mensurando variável.

Pode-se concluir que um sistema de medição torna-se variável quando as variações dos resultados do mensurando tornam-se maiores que a resolução do sistema de medição. Tratando-se, portanto, de um mensurando variável, foram efetuadas cinco medições visando coletar um número suficiente de indicações que permitissem caracterizar a faixa de variação do mensurando, podendo também trabalhar com a faixa de erro do sistema de medição.

Cada eletrodo utilizado para os ensaios foi cortado no comprimento de 60mm pela máquina de eletroerosão a fio CHARMILLES ROBOFIL 290 CNC, sendo utilizado o superacabamento nesta operação. Os eletrodos foram adequadamente colocados em recipientes (frascos) de numeração 1 a 15. Para

cada teste, no caso de ter o eletrodo deformado por manuseio, foram providenciados eletrodos reservas também armazenados em frascos, por exemplo, de 16 a 20.

Para a análise do comprimento inicial (L_1) e final (L_2) dos eletrodos, foi inicialmente calibrado um bloco padrão situado no laboratório de metrologia da PUCPR. Para se poder trabalhar com o erro do microscópio de medição MM-40 Nikon conforme Fig. 19, foram analisados cinco valores resultantes das medições no sistema de medição, também situado no laboratório de metrologia desta instituição. Para uma melhor visualização da medição foi utilizada uma lente de aumento de 10x. Abaixo, segue foto do microscópio.

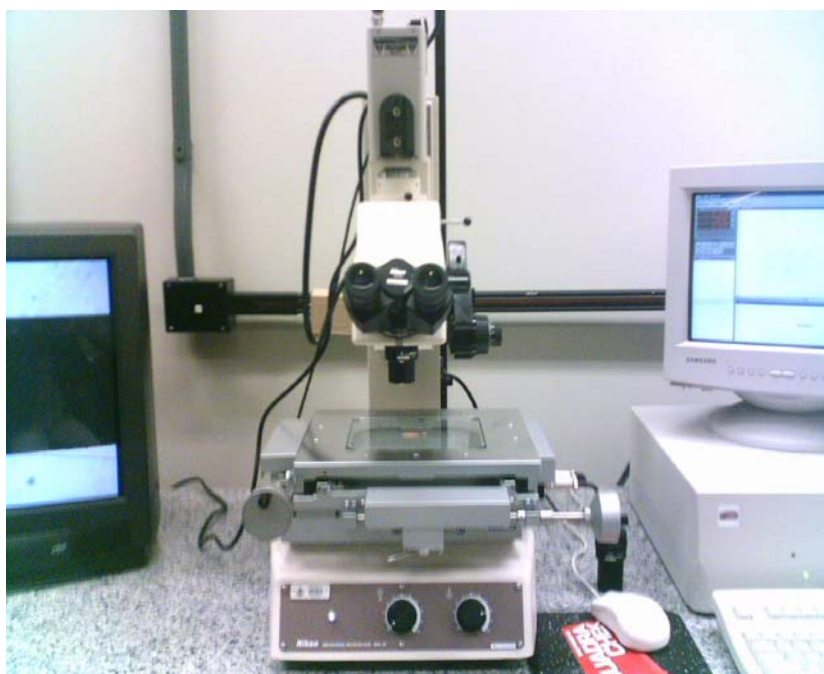


Figura 19: Microscópio de Medição.

Durante a calibração do bloco padrão, o mesmo eletrodo foi fixado, alinhado e medido cinco vezes para ser verificada a repetitividade (R_e) do processo. Para a análise da repetitividade (R_e) de leitura, o mesmo eletrodo foi fixado, alinhado, zerado os valores dos eixos (X,Y) para que se adquirisse um ponto de referência, sendo medido cinco vezes porém não fixando e alinhando novamente o eletrodo.

Feitas essas análises, obteve-se um erro máximo ($E_{m\acute{a}x.}$) de medição do microscópio de $5\mu m$.

Na seqüência, todos os quinze eletrodos utilizados para teste foram medidos da seguinte maneira:

1. Fixação do eletrodo;
2. Alinhamento manual;
3. Zeramento da referência;
4. Análise do comprimento.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta em seis itens os resultados e as discussões dos testes de usinabilidade da liga de titânio Ti6Al4V, utilizando eletrodos ferramenta de cobre e cobre-tungstênio, sendo observados em cada item os parâmetros variados durante o procedimento dos testes para encontrar um resultado satisfatório.

4.1 Planejamento experimental para estabelecimento do melhor t_e

Para cada condição de teste foram realizadas três repetições, sendo o tempo de 15 min. Os parâmetros que mais influenciaram no desempenho do processo de EDM foram investigados de acordo com os valores como apresenta a Tab. 4. Nos pré-testes foi observado que durações de descarga t_e inferiores a $6,4\mu s$ e superiores a $25\mu s$ proporcionam grande instabilidade de usinagem, além disso, para valores muito longos de t_e observa-se que a efetividade de lavagem dos produtos eletroerodidos para fora da fenda de trabalho tende a diminuir, e com isto ocorre a redução na profundidade dos furos. Nos pré-testes, também foram avaliadas as tensões $u_i = 160$ e $200V$. O melhor comportamento do processo foi obtido para o valor de $u_i = 200V$, pois se observou a minimização da ocorrência de arcos e curtos circuitos, pulsos de tensão em vazio, assim como excesso de contaminação da fenda de trabalho, sendo este valor, portanto, utilizado para os testes principais. A relação de contato τ , dada pela razão entre a duração do pulso t_i e o período t_p da descarga, foi mantida inicialmente em 0,5 ($t_i = t_p$) devido a boa estabilidade do processo observada durante os pré-testes. Para todos os testes, o gerador foi programado para atuar no modo isoenergético, que significa duração constante da descarga t_e especificada pelo operador. A fenda de trabalho utilizada entre os eletrodos-ferramenta/peça foi de $0,05mm$. Os ensaios foram conduzidos para polaridade positiva e negativa do eletrodo-ferramenta, com o intuito de comparação dos comportamentos da velocidade linear de penetração v_p e do desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} do eletrodo-ferramenta.

Tabela 4: Grandeza dos Parâmetros Testados.

Corrente Descarga i_e [A]	Relação de Contato τ	Duração da Descarga t_e [μ s]	Duração do Intervalo (t_0)	Polaridade do Eletrodo [+/-]	Modo de Atuação do Gerador
2, 4, 8, 12	0,5; 0,7; 0,8	6,4; 12,8; 25;	6,4; 12,8; 25;	+ e -	Isoenergético e Relaxação

O objetivo dos resultados na usinagem das furações de pequenos diâmetros é atingir uma alta taxa de remoção de material da peça com um baixo índice do desgaste do eletrodo-ferramenta. Para obter condições de processo que garantam um melhor desempenho da usinagem, a determinação do tempo de intervalo t_0 é extremamente importante, pois promove uma adequada lavagem das micro partículas eletroerodidas para fora da fenda de trabalho e proporciona uma boa deionização do dielétrico.

4.2 Resultados v_p e ϑ_{LF} para eletrodos de cobre

4.2.1 Resultados sobre a Velocidade de Penetração v_p e o Desgaste Linear Frontal Relativo ϑ_{LF} utilizando polaridade positiva

Pela Fig. 20 observa-se nitidamente que, para a curva da corrente de descarga i_e de 2 [A] um aumento do tempo de descarga t_e leva a uma diminuição da velocidade linear de penetração. A explicação para o comportamento desta curva está relacionada ao fato de que correntes de descargas de valores baixos trabalham melhor com durações de descargas mais curtas.

A máxima velocidade de penetração 0,03 [mm/min] é atingida para um t_e de 6,4 [μ s]. Para valores superiores ao t_e relacionado, os níveis de v_p decaem continuamente decorrente ao baixo nível de energia fornecido. Sabe-se que durante a aplicação do tempo de descarga t_e ocorre o prosseguimento da fusão de material em ambos os eletrodos e um aumento contínuo do diâmetro do canal de plasma. Porém, 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, à corrente de descarga i_e e à duração de descarga t_e . Portanto para as durações de descarga 12,8 e 25 [μ s] não há a mesma expansão do diâmetro do canal de plasma, havendo desta forma o decréscimo no valor de v_p .

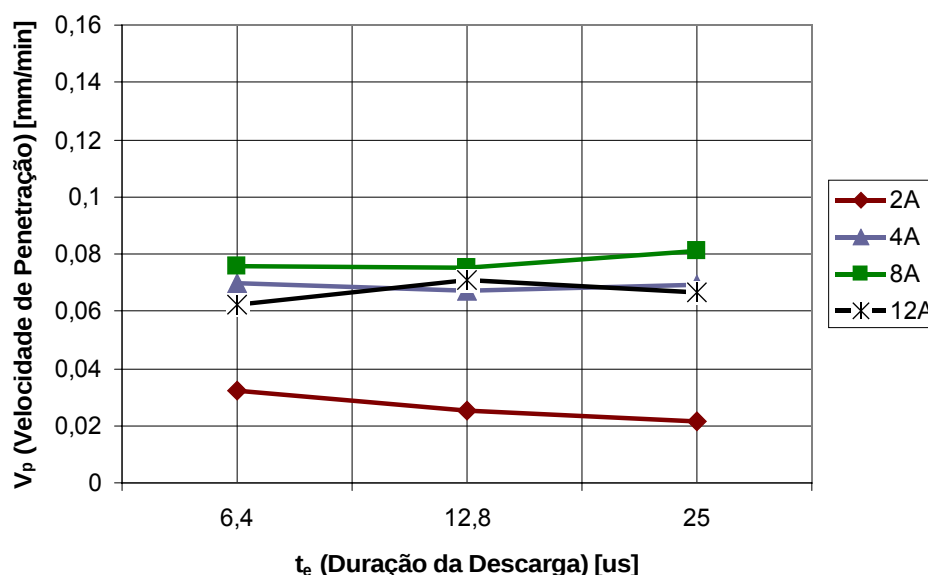


Figura 20: Velocidade de linear de penetração (v_p) da liga de titânio em função da variação de t_e utilizando eletrodo-ferramenta de cobre com polaridade positiva.

Para a corrente de descarga i_e de 4 [A] é praticamente invariável o valor da velocidade linear de penetração v_p . No caso desta corrente de descarga, os níveis de v_p mantêm-se constante pelo fato de a energia fornecida pelo gerador ser maior, auxiliando desta forma no aumento da massa e do diâmetro do canal de plasma e no fenômeno de conversão do dielétrico líquido circundante em plasma, influenciando na quantidade de material fundido em cada um dos eletrodos.

Para i_e de 8 [A], um aumento do tempo de descarga t_e apresenta um aumento da velocidade linear de penetração de 0,075 para 0,081 [mm/min], sendo t_e de 12,8 [μ s] para 25 [μ s]. A explicação para o comportamento desta curva está diretamente relacionada à quantidade de material fundido, às propriedades físicas do par de eletrodos, à corrente de descarga i_e e à duração da descarga t_e .

A curva de 12 [A] apresenta um aumento da velocidade linear de penetração v_p quando há um aumento do tempo de descarga t_e de 6,4 para 12,8 [μ s] de 0,065 [mm/min] para 0,075 [mm/min]. A partir deste valor há um decréscimo de

v_p , quando realizado um aumento da duração de descarga t_e que passa a ter 0,065 [mm/min] em 25 [μ s].

Este decréscimo está relacionado à falta de pressão adequada na lavagem através do eletrodo-ferramenta, resultando em uma maior concentração de micro partículas na fenda de trabalho quando elevada a corrente de descarga i_e para 12 [A]. Por sua vez, esta maior concentração de micro partículas gera a sobre contaminação da fenda de trabalho. A ausência de adequada lavagem destas micro partículas ocasiona a formação de arcos e curtos circuitos durante a descarga elétrica, tornando o processo instável devido a redução da eficiência destas faíscas.

Estas partículas metálicas são compostas do material do eletrodo-peça e do eletrodo-ferramenta, dificultando a remoção adequada de material, o que resulta na diminuição da velocidade linear de penetração.

Estes resultados demonstram que para a usinagem de furos de pequenos diâmetros nem sempre quanto mais elevada é a corrente de descarga i_e maiores são os valores obtidos para a velocidade linear de penetração.

A Fig. 21 apresenta o gráfico do comportamento do desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} em função da variação da duração de descarga t_e . Para a curva da corrente de descarga i_e de 2 [A], observa-se que um aumento do tempo de descarga t_e leva a uma diminuição do desgaste frontal linear relativo, sendo o valor mínimo de ϑ_{LF} de 4% para t_e de 25 [μ s] e 12% para t_e de 6,4 [μ s] sendo para esta duração de descarga o melhor valor de v_p alcançado.

Uma possível hipótese para este comportamento está relacionada ao fato de que uma duração de descarga t_e maior que 6,4 [μ s] tende a causar a queda de ϑ_{LF} devido à baixa energia fornecida pelo gerador que resulta na instabilidade do canal de plasma, não promovendo a sustentação da continuidade de fusão de material na peça (cátodo) e ao mesmo tempo não favorecendo a solidificação do material fundido na cavidade anódica (eletrodo-ferramenta), por não haver a expansão suficiente do diâmetro do canal próximo a esta região.

Para a corrente de descarga i_e de 4 [A] há também um decréscimo no desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} a partir da duração de descarga t_e de 6,4 [μ s]. Neste caso, quanto mais longa for a duração de descarga t_e , menor será o valor de ϑ_{LF} . O valor mínimo de ϑ_{LF} é 16% para t_e de 25 [μ s], sendo para esta duração de descarga o melhor valor de v_p alcançado. Este comportamento se deve à boa

estabilidade do canal de plasma para as durações de descarga t_e mais longas, promovendo a sustentação da continuidade de fusão de material na peça (cátodo) e ao mesmo tempo favorecendo a solidificação do material fundido na cavidade anódica (eletrodo-ferramenta), devido à expansão do diâmetro do canal próximo a esta região. Outro fato que influi na redução do desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} é a melhora da eficiência na limpeza da fenda de trabalho tanto para i_e de 2 [A] como para i_e de 4 [A] sendo mais simples devido às micro partículas serem menores.

Desta forma uma parte do material expulso é carregado pelo fluxo do dielétrico para fora da fenda de trabalho.

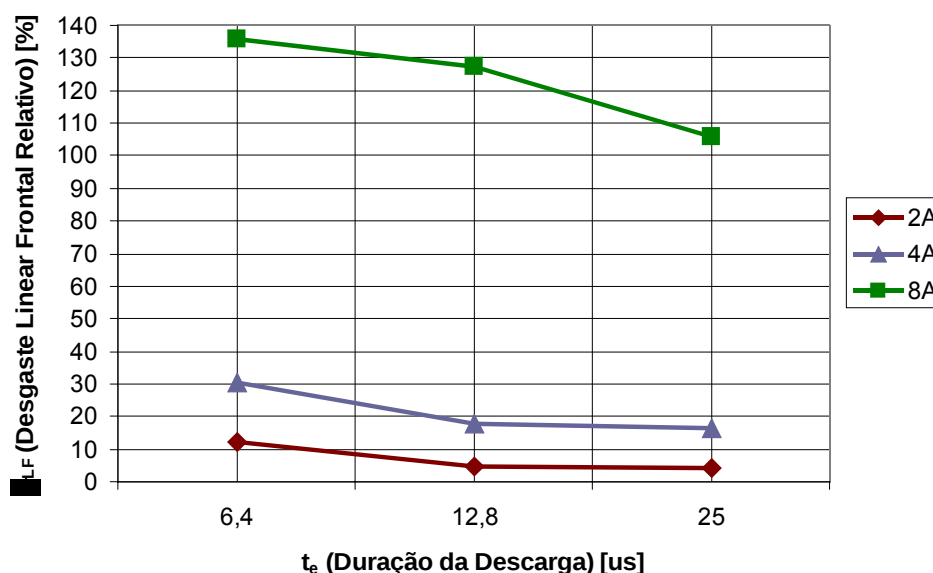


Figura 21: Desgaste frontal linear relativo (ϑ_{LF}) da liga de titânio em função da variação de t_e utilizando eletrodo-ferramenta de cobre com polaridade positiva.

Para i_e de 8 [A], um aumento do tempo de descarga t_e apresenta um decréscimo do desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} de 127% para o valor mínimo de 105% para t_e de 25 [us], sendo para esta duração de descarga o melhor valor de v_p alcançado. Com o aumento da energia fornecida pelo gerador, observaram-se, durante o monitoramento dos testes, poucos pulsos em vazio, assim como uma baixa ocorrência de descargas anômalas e curtos-circuitos. Isto demonstra uma boa amplitude de abertura da fenda de trabalho, assim como um bom aproveitamento da energia aplicada ao processo. Como resultante, isto também significa a ocorrência da melhora da eficiência na lavagem das micro partículas.

Nesta figura o valor de ϑ_{LF} para i_e de 12 [A] foi retirado para propiciar uma melhor visualização dos resultados. Para a duração de descarga t_e de 6,4, 12,8 e 25 [μ s] o valor de ϑ_{LF} para i_e de 12 [A] foi de aproximadamente 802%, 660% e 241%. Com o aumento da energia fornecida pelo gerador, para correntes de descargas i_e maiores, observa-se um maior desgaste para as durações de descargas t_e mais curtas. O aspecto que influencia o aumento do desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} é a baixa eficiência da lavagem para durações de descarga t_e muito curtas. Uma das causas é a queda acentuada de pressão interna do canal, quando o ser implodido pela interrupção da corrente elétrica, não gera forças suficientes para ejetar o material fundido das cavidades anódica e catódica.

4.2.2 Resultados sobre a Velocidade de Penetração v_p e o Desgaste Linear Frontal Relativo ϑ_{LF} utilizando polaridade negativa

Pela Fig. 22 observa-se nitidamente que, para a curva da corrente de descarga i_e de 2 [A] um aumento na duração de descarga t_e leva a uma pequena diminuição da velocidade linear de penetração. Pode-se verificar que, quando invertida a polaridade do eletrodo-ferramenta (cátodo), as correntes de descargas i_e de valores baixos possuem o mesmo rendimento ao trabalhar com durações de descargas t_e curtas e longas.

A máxima velocidade de penetração 0,02 [mm/min] é atingida para um t_e de 6,4 [μ s]. Para valores superiores ao t_e relacionado, os níveis de v_p mantêm-se estáveis. Durante a aplicação do tempo de descarga t_e ocorre o prosseguimento da fusão de material em ambos os eletrodos e um aumento contínuo do diâmetro do canal de plasma. Porém, 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, à corrente de descarga i_e e à duração da descarga t_e . Portanto para as durações de descarga 12,8 e 25 [μ s] há a mesma expansão do diâmetro do canal de plasma quando utilizada a polaridade negativa para o eletrodo-ferramenta, mantendo estável o valor de v_p .

Para a corrente de descarga i_e de 4 [A], observa-se, ao aumentar a duração de descarga t_e de 6,4 [μ s] para 12,8 [μ s], uma diminuição da velocidade linear de penetração v_p de 0,05 para 0,038 [mm/min]. Para a polaridade negativa do

eletrodo-ferramenta houve melhores resultados de v_p , quando utilizadas durações de descargas mais curtas. Ao aumentar a duração de descarga t_e de 12,8 $[\mu s]$ para 25 $[\mu s]$, houve a estabilização do valor de v_p . O comportamento da curva está relacionado à instabilidade que ocorre no canal de plasma quando aumentado o valor da duração de descarga t_e de 6,4 $[\mu s]$ para 12,8 $[\mu s]$. Este aumento ocasiona a perda da continuidade de fusão de material da peça (ânodo) e ao mesmo tempo prejudica a solidificação do material fundido na cavidade catódica (eletrodo-ferramenta). Porém a fusão em ambos os materiais estabiliza-se quando aumentada a duração de descarga t_e para 25 $[\mu s]$.

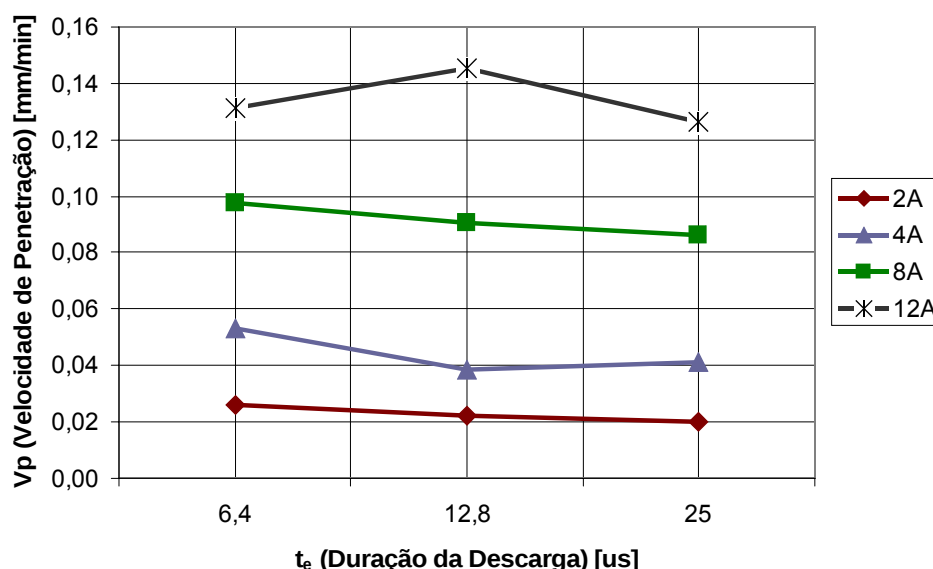


Figura 22: Velocidade de linear de penetração (v_p) da liga de titânio em função da variação de t_e utilizando eletrodo-ferramenta de cobre com polaridade negativa.

Para i_e de 8 [A] um aumento do tempo de descarga t_e apresenta um pequeno decréscimo da velocidade linear de penetração de 0,010 para 0,09 [mm/min] quando aumentado o valor da duração de descarga t_e de 6,4 $[\mu s]$ para 12,8 $[\mu s]$. Após, quando aumentado o t_e de 12,8 $[\mu s]$ para 25 $[\mu s]$ o v_p decresce de 0,09 [mm/min] para 0,085 [mm/min]. Este pequeno decréscimo de v_p durante a variação da duração de descarga não interfere no desempenho do processo, pois observaram-se, durante o monitoramento dos testes, poucos pulsos em vazio, assim como uma baixa ocorrência de descargas anômalas e curtos-circuitos.

A curva de i_e de 12 [A] apresenta um aumento da velocidade linear de penetração v_p quando há um aumento do tempo de descarga t_e de 6,4 para 12,8

[μs] de 0,065 [mm/min] para 0,075 [mm/min]. A partir deste valor há um decréscimo de v_p quando realizado um aumento da duração de descarga t_e que passa a ter 0,065 [mm/min] em 25 [μs].

Este decréscimo está relacionado à falta de pressão adequada na lavagem através do eletrodo-ferramenta, resultando em uma maior concentração de micro partículas na fenda de trabalho quando elevada a corrente de descarga i_e para 12 [A]. Por sua vez, esta maior concentração de micro partículas gera a sobrecontaminação da fenda de trabalho. A ausência de adequada lavagem destas micro partículas ocasiona a formação de arcos e curtos circuitos durante a descarga elétrica, tornando o processo instável devido à redução da eficiência destas faíscas.

Estas partículas metálicas são compostas do material do eletrodo-peça e do eletrodo-ferramenta, dificultando a remoção adequada de material, o que resulta na diminuição da velocidade linear de penetração.

Estes resultados demonstram que, para a usinagem de furos de pequenos diâmetros, nem sempre, quanto mais elevada é a corrente de descarga i_e maiores são os valores obtidos para a velocidade linear de penetração.

A Fig. 23 apresenta o gráfico do comportamento do desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} em função da variação da duração de descarga t_e . Para a curva da corrente de descarga i_e de 2 [A] observa-se que um aumento do tempo de descarga t_e leva ao aumento do desgaste frontal linear relativo, obtendo-se o valor mínimo de ϑ_{LF} de 67% para t_e de 6,4 [μs], sendo para esta duração de descarga o melhor valor de v_p alcançado.

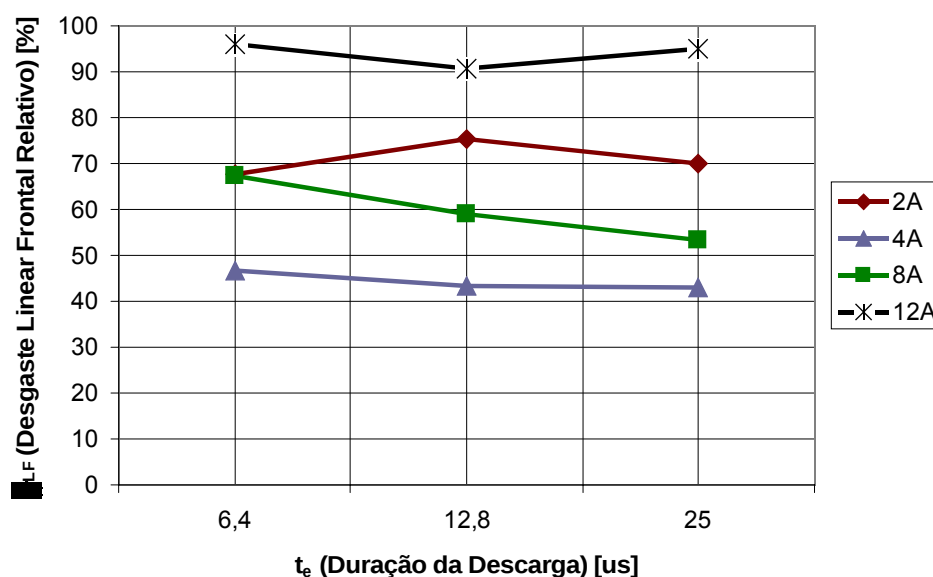


Figura 23: Desgaste frontal linear relativo (ϑ_{LF}) da liga de titânio em função da variação de t_e utilizando eletrodo-ferramenta de cobre com polaridade negativa.

Este comportamento se deve à instabilidade do processo observado durante o monitoramento dos testes desta curva para durações de descargas t_e mais longas de 12,8 e 25 [μs]. Quando utilizada duração de descargas mais longas, a falta de pressão adequada de lavagem faz com que o eletrodo-ferramenta (cátodo) desgaste com mais facilidade. Esta maior concentração de micro partículas gera a sobre- contaminação da fenda de trabalho. Como resultante, ocasiona a formação de arcos e curtos circuitos durante a descarga elétrica, tornando o processo instável devido à redução da eficiência destas faíscas.

Para a corrente de descarga i_e de 4 [A] há também um decréscimo no desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} a partir da duração de descarga t_e de 6,4 [μs]. Neste caso, quanto mais longo for a duração de descarga t_e , menor será o valor de ϑ_{LF} . O valor de ϑ_{LF} decai de 47% para t_e de 6,4 [μs], sendo para esta duração de descarga o melhor valor de v_p alcançado, para o valor mínimo de ϑ_{LF} de 42% para t_e de 25 [μs].

Para i_e de 8 [A] um aumento do tempo de descarga t_e apresenta um decréscimo do desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} de 67% para 53% sendo t_e de 6,4 [μs] para 25 [μs], melhor valor de v_p alcançado. Com o aumento da energia fornecida pelo gerador, observaram-se durante o monitoramento dos testes, poucos pulsos em vazio, assim como uma baixa ocorrência de descargas anômalas e curtos-circuitos.

Isto demonstra uma boa amplitude de abertura da fenda de trabalho, assim como um bom aproveitamento da energia aplicada ao processo. Isto também significa que a falta de adequada lavagem para este caso foi suficiente para uma melhor remoção das micro partículas.

Observa-se para i_e de 12 [A], uma diminuição do desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} de 96% para 90% sendo t_e de 6,4 [μ s] para 12,8 [μ s], melhor valor de v_p alcançado. Quando utilizado t_e de 25 [μ s] observa-se um aumento de ϑ_{LF} para 95%. Novamente, a falta de adequada lavagem para este caso foi suficiente para uma melhor remoção das micro partículas.

4.3 Resultados v_p e ϑ_{LF} para eletrodos de cobre-tungstênio

4.3.1 Resultados sobre a Velocidade de Penetração v_p e o Desgaste Linear Frontal Relativo ϑ_{LF} utilizando polaridade positiva

Pela Fig. 24 observa-se nitidamente que, para a curva da corrente de descarga i_e de 2 [A], um aumento do tempo de descarga t_e leva a um aumento da velocidade linear de penetração de 6,4 [μ s] para 12,8 [μ s].

A máxima velocidade de penetração 0,04 [mm/min] é atingida para um t_e de 12,8 [μ s]. Para valores superiores ao t_e relacionado, os níveis de v_p decaem continuamente decorrente ao baixo nível de energia fornecido. Sabe-se que durante a aplicação do tempo de descarga t_e ocorre o prosseguimento da fusão de material em ambos os eletrodos e um aumento contínuo do diâmetro do canal de plasma.

Porém, o baixo nível de energia disponível da descarga não permite manter elevada a pressão interna do canal de plasma por uma duração mais longa de t_e , promovendo a ocorrência de acentuada instabilidade do canal de plasma.

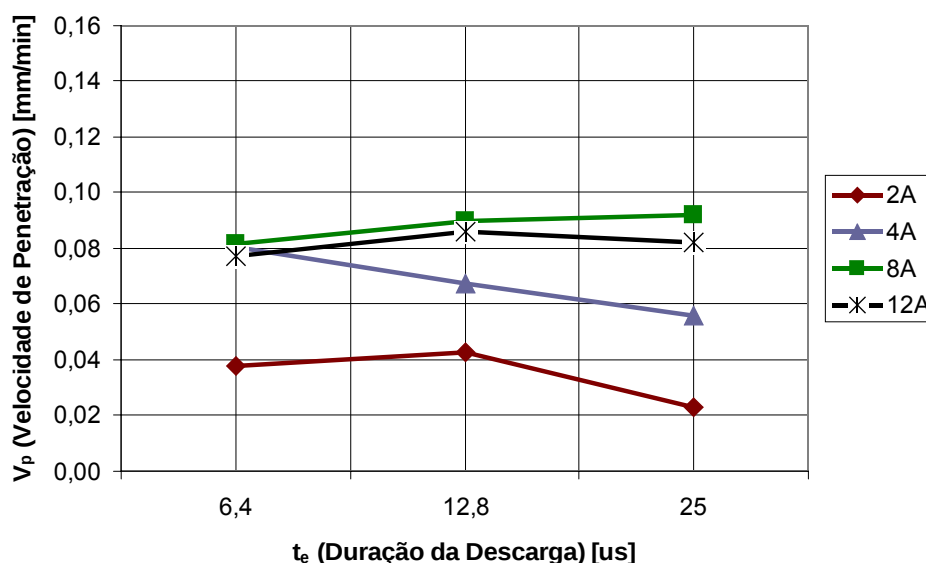


Figura 24: Velocidade de linear de penetração (v_p) da liga de titânio em função da variação de t_e utilizando eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio com polaridade positiva.

Para a corrente de descarga i_e de 4 [A] um aumento do tempo de descarga t_e leva a uma diminuição da velocidade linear de penetração v_p . A explicação para o comportamento desta curva está relacionada à falta de pressão adequada na lavagem, resultando em uma maior concentração de micro partículas na fenda de trabalho quando elevada a duração de descarga t_e . Por sua vez, esta maior concentração de micro partículas gera a sobrecontaminação da fenda de trabalho, o que resulta na instabilidade do processo.

Para i_e de 8 [A] um aumento do tempo de descarga t_e apresenta um aumento constante da velocidade linear de penetração de 0,082 para 0,092 [mm/min], sendo t_e de 6,4 [μs] para 25 [μs]. Observa-se desta maneira que a maior energia disponível da descarga permite manter elevada a pressão interna do canal de plasma por uma duração mais longa de t_e , sem promover a ocorrência de acentuada instabilidade do canal de plasma.

A curva de 12 [A] apresenta um aumento da velocidade linear de penetração v_p quando há um aumento do tempo de descarga t_e de 6,4 para 12,8 [μs] de 0,077 [mm/min] para 0,085 [mm/min]. A partir deste valor há um decréscimo de v_p quando realizado um aumento da duração de descarga t_e que passa a ter 0,082 [mm/min] em 25 [μs].

Este decréscimo está relacionado à falta de pressão adequada na lavagem, resultando em uma maior concentração de micro partículas na fenda de trabalho quando elevada a corrente de descarga i_e para 12 [A]. Por sua vez, esta maior concentração de micro partículas gera a sobrecontaminação da fenda de trabalho. A ausência de adequada lavagem destas micro partículas ocasiona a formação de arcos e curtos circuitos durante a descarga elétrica, tornando o processo instável devido à redução da eficiência destas faíscas.

Estas partículas metálicas são compostas do material do eletrodo-peça e do eletrodo-ferramenta, dificultando a remoção adequada de material, o que resulta na diminuição da velocidade linear de penetração.

A Fig. 25 apresenta o gráfico do comportamento do desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} em função da variação da duração de descarga t_e . Para a curva da corrente de descarga i_e de 2 [A] observa-se que um aumento do tempo de descarga t_e leva a uma diminuição do desgaste frontal linear relativo, sendo o valor mínimo de ϑ_{LF} de 24% para t_e de 25 [μ s] e 28% para t_e de 12,8 [μ s] sendo para esta duração de descarga o melhor valor de v_p alcançado.

Uma possível hipótese para este comportamento está relacionado ao fato de que uma duração de descarga t_e maior que 6,4 [μ s] tende a causar a queda de ϑ_{LF} devido à baixa energia fornecida pelo gerador que resulta na instabilidade do canal de plasma, não promovendo a sustentação da continuidade de fusão de material na peça (cátodo) e ao mesmo tempo não favorecendo a solidificação do material fundido na cavidade anódica (eletrodo-ferramenta), por não haver a expansão suficiente do diâmetro do canal próximo a esta região.

Para a corrente de descarga i_e de 4 [A] há aumento no desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} a partir da duração de descarga t_e de 6,4 [μ s]. Neste caso, para o eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio, quanto mais longa for a duração de descarga t_e , maior será o valor de ϑ_{LF} . O valor mínimo de ϑ_{LF} é 32% para t_e de 6,4 [μ s], sendo para esta duração de descarga o melhor valor de v_p alcançado. Este comportamento se deve à boa estabilidade do canal de plasma para as durações de descarga t_e mais curtas quando utilizado o eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio, o contrário para quando utilizado o eletrodo-ferramenta de cobre. Esta boa estabilidade do canal de plasma promove a sustentação da continuidade de fusão de material na peça (cátodo) e ao mesmo tempo favorecendo a solidificação do

material fundido na cavidade anódica (eletrodo-ferramenta), devido à expansão do diâmetro do canal próximo a esta região.

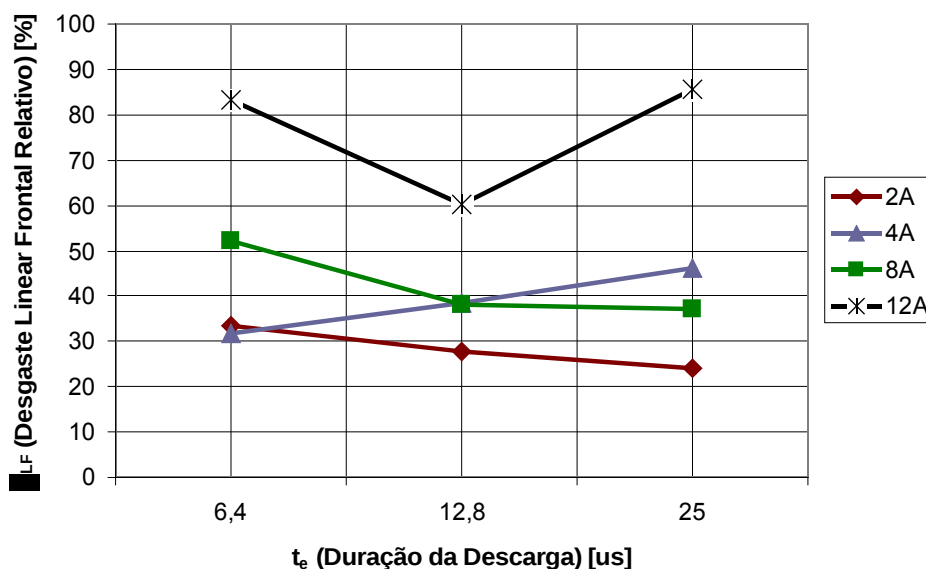


Figura 25: Desgaste frontal linear relativo (ϑ_{LF}) da liga de titânio em função da variação de t_e utilizando eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio com polaridade positiva.

Para i_e de 8 [A] um aumento do tempo de descarga t_e apresenta um decréscimo do desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} de 52% para o valor mínimo de 37% para t_e de 25 [μ s], sendo para esta duração de descarga o melhor valor de v_p alcançado. Com o aumento da energia fornecida pelo gerador, observaram-se durante o monitoramento dos testes, poucos pulsos em vazio, assim como uma baixa ocorrência de descargas anômalas e curtos-circuitos. Isto demonstra uma boa amplitude de abertura da fenda de trabalho, assim como um bom aproveitamento da energia aplicada ao processo. Como resultante, isto também significa a ocorrência de melhoria da lavagem das micro partículas.

Para i_e de 12 [A] um aumento do tempo de descarga t_e apresenta um acentuado decréscimo do desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} de 83% para o valor mínimo de 60% para t_e de 12,8 [μ s], sendo para esta duração de descarga o melhor valor de v_p alcançado. Com o aumento da energia fornecida pelo gerador, para correntes de descargas i_e maiores, observa-se um maior desgaste para as durações de descargas acima de 12,8 [μ s]. O aspecto que influi no aumento do desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} é a baixa eficiência da lavagem para durações de descarga

t_e muito curtas. Uma das causas é a queda acentuada de pressão interna do canal, onde ao ser implodido pela interrupção da corrente elétrica não gera forças suficientes para ejetar o material fundido das cavidades anódica e catódica.

Observa-se também, que na polaridade positiva, para correntes de descargas menores como i_e de 2 e 4 [A], o eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio demonstra um desgaste mais acentuado, quando comparado com o eletrodo-ferramenta de cobre. Já em relação a correntes de descargas maiores, como i_e de 8 e 12 [A], o eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio demonstra um desgaste menos acentuado, quando comparado com o eletrodo-ferramenta de cobre.

4.3.2 Resultados sobre a Velocidade de Penetração v_p e o Desgaste Linear Frontal Relativo $\mathfrak{G}_{LF}$ utilizando polaridade negativa

Pela Fig. 26, observa-se nitidamente que para a curva da corrente de descarga i_e de 2 [A] um aumento do tempo de descarga t_e leva a uma diminuição da velocidade linear de penetração v_p . Pode-se verificar que, quando invertida a polaridade do eletrodo-ferramenta (cátodo), as correntes de descargas i_e de valores baixos não possuem o mesmo rendimento ao trabalhar com durações de descargas t_e longas, acima de 6,4 [μ s], conforme observado para o eletrodo-ferramenta de cobre. A máxima velocidade linear de penetração 0,017 [mm/min] é atingida para um t_e de 6,4 [μ s].

Durante a aplicação do tempo de descarga t_e ocorre o prosseguimento da fusão de material em ambos os eletrodos e um aumento contínuo do diâmetro do canal de plasma. Porém, 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, à corrente de descarga i_e e à duração da descarga t_e . Portanto, para as durações de descarga 12,8 e 25 [μ s], não há a mesma eficiência da expansão do diâmetro do canal de plasma, quando utilizada a polaridade negativa para o eletrodo-ferramenta, mantendo instável o valor de v_p .

Para a corrente de descarga i_e de 4 [A], observa-se ao aumentar o tempo de descarga t_e de 6,4 para 12,8 [μ s] a permanência do valor de v_p de 0,075 [mm/min]. Quando aumentado o valor de t_e de 12,8 para 25 [μ s], observa-se o

decréscimo do valor de v_p para 0,070 [mm/min]. Para a polaridade negativa do eletrodo-ferramenta houve melhores resultados de v_p , quando utilizadas durações de descargas abaixo de 25 [μs]. Ao aumentar a duração de descarga t_e de 6,4 [μs] para 12,8 [μs], houve a estabilização do valor de v_p . O comportamento da curva está relacionado à instabilidade que ocorre no canal de plasma quando aumentado o valor da duração da descarga t_e de 12,8 [μs] para 25 [μs]. Este aumento ocasiona a perda da continuidade de fusão de material da peça (ânodo) e ao mesmo tempo prejudica a solidificação do material fundido na cavidade catódica (eletrodo-ferramenta). Porém há fusão em ambos os materiais.

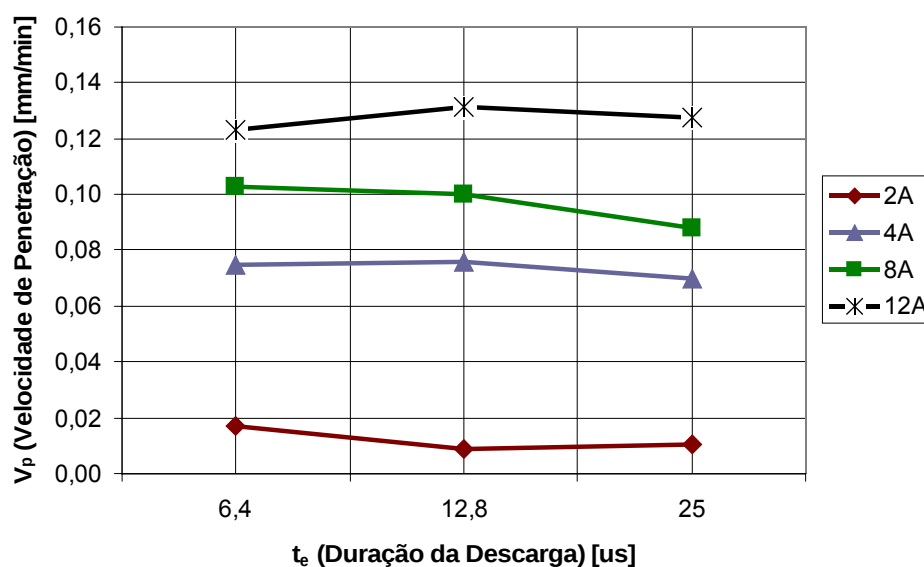


Figura 26: Velocidade de linear de penetração (v_p) da liga de titânio em função da variação de t_e utilizando eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio com polaridade negativa.

Para i_e de 8 [A], um aumento do tempo de descarga t_e apresenta um pequeno decréscimo da velocidade linear de penetração de 0,010 para 0,09 [mm/min]. O comportamento da curva está relacionado à instabilidade que ocorre no canal de plasma, quando aumentado o valor da duração da descarga t_e de 6,4 [μs] para 12,8 [μs]. Este aumento ocasiona a perda da continuidade de fusão de material da peça (ânodo) e ao mesmo tempo prejudica a solidificação do material fundido na cavidade catódica (eletrodo-ferramenta). Esta instabilidade continua, quando aumentado o t_e de 12,8 [μs] para 25 [μs] sendo v_p de 0,09 [mm/min] para 0,08 [mm/min]. Outro aspecto que provoca o decréscimo no valor de v_p nesta curva é a

falta de pressão adequada na lavagem, que ao trabalhar com um t_e mais longo gera uma maior concentração de micro partículas na fenda de trabalho, ocasionando a sobre contaminação da fenda de trabalho. Portanto, na usinagem de pequenos furos, se o fluido dielétrico não for renovado devidamente e não possuir pressão adequada, estas partículas metálicas serão acumuladas na cavidade, originando arcos e curto circuitos durante a descarga elétrica, tornando a usinagem instável devido à redução da eficiência das faíscas, resultando no baixo desempenho do processo.

A curva de i_e de 12 [A] apresenta um aumento da velocidade linear de penetração v_p , quando há um aumento do tempo de descarga t_e de 6,4 para 12,8 [μ s] de 0,123 [mm/min] para 0,131 [mm/min]. A partir deste valor há um decréscimo de v_p , quando realizado um aumento da duração de descarga t_e que passa a ter 0,127 [mm/min] em 25 [μ s].

Para durações de descargas mais longas, há uma melhoria na eficiência do processo, pois a corrente de descarga i_e de 12 [A] permite para este caso manter elevada a pressão interna do canal de plasma por uma duração mais longa de t_e , sem promover a ocorrência de acentuada instabilidade do canal de plasma.

A Fig. 27 apresenta o gráfico do comportamento do desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} em função da variação da duração de descarga t_e . Para a curva da corrente de descarga i_e de 2 [A] observa-se que um aumento do tempo de descarga t_e leva ao aumento do desgaste frontal linear relativo, obtendo-se o valor mínimo de ϑ_{LF} de 67% para t_e de 6,4 [μ s], sendo para esta duração de descarga o melhor valor de v_p alcançado.

Este comportamento se deve à instabilidade do processo observado durante o monitoramento dos testes desta curva para durações de descargas t_e mais longas de 12,8 e 25 [μ s]. Quando utilizada duração de descargas mais longas, a falta de pressão adequada de lavagem faz com que o eletrodo-ferramenta (cátodo) desgaste com mais facilidade. Esta maior concentração de micro partículas gera a sobre- contaminação da fenda de trabalho. Como resultante, ocasiona a formação de arcos e curtos circuitos durante a descarga elétrica, tornando o processo instável devido à redução da eficiência destas faíscas.

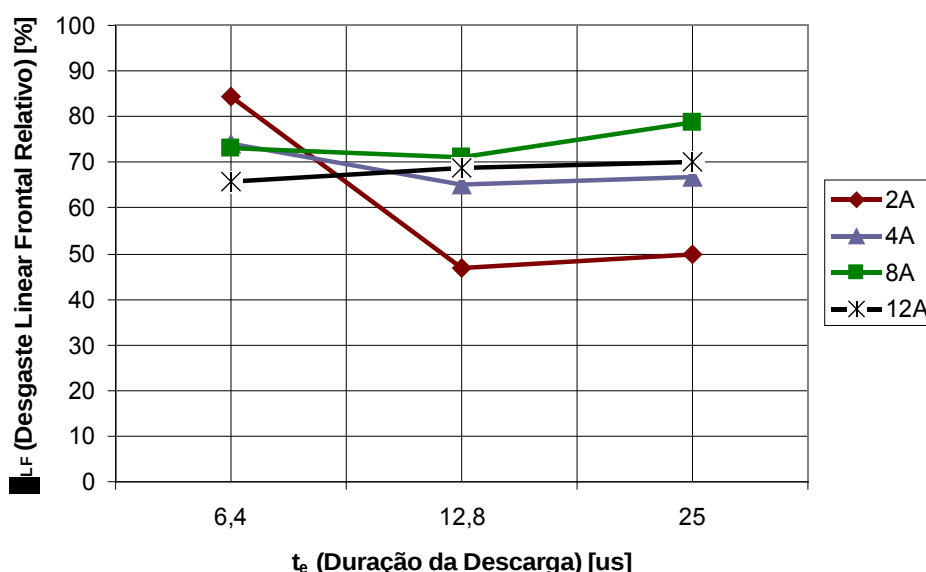


Figura 27: Desgaste frontal linear relativo (ϑ_{LF}) da liga de titânio em função da variação de t_e utilizando eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio com polaridade negativa.

Para a corrente de descarga i_e de 4 [A] há também um decréscimo no desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} a partir da duração de descarga t_e de 6,4 [μs] de 73% para 65% em 12,8 [μs]. Após a duração de descarga de 12,8 [μs] há um pequeno aumento no desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} de 65% para 67% em 25 [μs]. O valor mínimo de ϑ_{LF} é 65% para t_e de 12,8 [μs], sendo para esta duração de descarga o melhor valor de v_p alcançado. A probabilidade de haver um pequeno aumento em ϑ_{LF} é devido à falta de pressão adequada na lavagem, gerando a instabilidade da usinagem.

Para i_e de 8 [A], um aumento do tempo de descarga t_e apresenta um decréscimo do desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} de 73% para 71% sendo t_e de 6,4 [μs] para 12,8 [μs]. A duração de descarga para o melhor valor de v_p alcançado foi t_e de 6,4 [μs]. Após t_e de 12,8 [μs], houve um aumento de ϑ_{LF} 71% para 79%. Com o aumento da energia fornecida pelo gerador, observou-se durante o monitoramento dos testes, um aumento nos pulsos em vazio, assim como uma alta ocorrência de descargas anômalas e curtos-circuitos. Isto demonstra uma má amplitude de abertura da fenda de trabalho, assim como um baixo aproveitamento da energia aplicada ao processo. Isto também significa que a falta de adequada lavagem para este caso foi insuficiente para uma melhor remoção das micro partículas.

Observa-se para i_e de 12 [A] um aumento do desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} de 66% para 69% sendo t_e de 6,4 [μ s] para 12,8 [μ s], sendo para esta duração de descarga o melhor valor de v_p alcançado. Quando utilizado t_e de 25 [μ s] observa-se um pequeno aumento de ϑ_{LF} para 70%. A falta de adequada lavagem para este caso foi suficiente para uma melhor remoção das micro partículas.

Observa-se também, que na polaridade negativa, para correntes de descargas menores como i_e de 2, 4 e 8 [A], o eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio demonstra um desgaste mais acentuado quando comparado com o eletrodo-ferramenta de cobre. Já em relação a correntes de descargas maiores, como i_e de 12 [A] o eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio demonstra um desgaste menos acentuado quando comparado com o eletrodo-ferramenta de cobre.

Visando à um aspecto global, ao analisar o melhor resultado da velocidade linear de penetração v_p com o menor valor do desgaste linear frontal relativo ϑ_{LF} , conclui-se que o melhor resultado encontrado para uma duração ótima da descarga t_e de 12,8 [μ s] para o eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio na polaridade negativa, é utilizar uma corrente de descarga i_e de 12 [A], sendo os melhores resultados obtidos de v_p igual a 0,13 [mm/min] e ϑ_{LF} igual a 68%. Este resultado se deve principalmente ao alto ponto de fusão e densidade desta liga, justamente pela presença do tungstênio.

4.4 Planejamento experimental para estabelecimento da melhor relação de contato

Após a definição de um t_e ótimo e com o intuito de otimizar a velocidade linear de penetração v_p e reduzir o desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} foram testados dois níveis diferentes do valor inicial de relação de contato τ de 0,7 e 0,8 para as correntes de descarga i_e de 2, 4, 8 e 12 [A], utilizando polaridade positiva e negativa para os eletrodos-ferramenta de cobre e cobre-tungstênio. A utilização de valores de τ inferiores a 0,5, ou seja, a utilização de duração de intervalo t_0 muito longos, gera uma baixa frequência de descargas, o que provém de um mau aproveitamento da energia fornecida ao processo na unidade de tempo.

Cabe acrescentar que um aumento demasiado na relação de contato τ pode ocasionar uma concentração excessiva de micro partículas na fenda de trabalho, resultando em uma remoção de material não uniforme ao longo das superfícies frontais de ambos os eletrodos, bem como um possível aumento da rugosidade.

4.5 Resultados v_p e ϑ_{LF} para eletrodos de cobre com variação da relação de contato τ

4.5.1 Resultados sobre a Velocidade de Penetração v_p e o Desgaste Linear Frontal Relativo ϑ_{LF} utilizando polaridade positiva

Pela Fig. 28, observa-se que na usinagem com τ igual a 0,5 o máximo valor alcançado para a velocidade linear de penetração v_p foi de 0,075 [mm/min] com corrente de descarga i_e de 8 [A]. Com a elevação da relação de contato para 0,7 obteve-se um decréscimo no máximo valor alcançado de v_p para 0,070 [mm/min] com corrente de descarga i_e de 4 [A]. Pode-se notar através do comportamento das curvas que existe pouca diferença entre os resultados de v_p para usinagem com τ igual a 0,5 e 0,7. Em contrapartida, nos testes com relação de contato de 0,8 a velocidade linear de penetração v_p atingiu o valor máximo de 0,051 [mm/min] com corrente de descarga i_e de 4 e 8 [A].

Desta forma, é possível constatar que, para a usinagem de furos de pequenos diâmetros, a elevação da relação de contato acarreta um decréscimo de v_p , quando utilizado o eletrodo-ferramenta de cobre na polaridade positiva. A explicação para este decréscimo no valor de v_p , está relacionado à redução da duração de intervalo t_0 que promove uma utilização menos eficiente da energia fornecida, proporcionando o aumento do tempo da ignição da descarga t_d e com isto um pior aproveitamento da energia liberada pelo gerador.

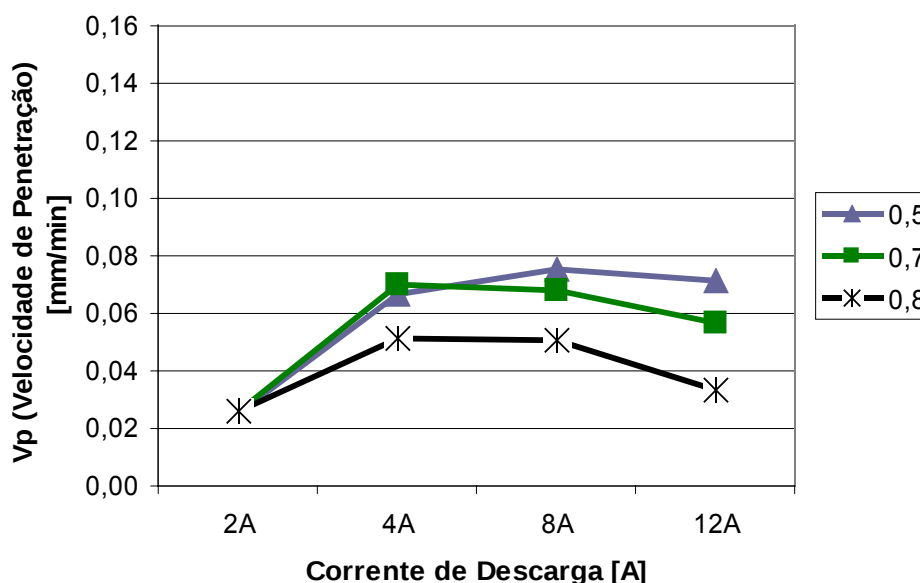


Figura 28: Velocidade linear de penetração (v_p) da liga de titânio em função da variação de τ para t_e ótimo igual a $12,8\mu s$ utilizando eletrodo-ferramenta de cobre com polaridade positiva.

Observou-se, durante o monitoramento dos testes de relação de contato de 0,8, uma grande instabilidade do processo na forma de arcos e curtos circuitos. Provavelmente, o tempo de intervalo utilizado entre as sucessivas descargas não foi suficiente para promover uma adequada lavagem dos subprodutos da usinagem, causando desta forma a sobre contaminação da fenda de trabalho.

Na Fig. 29 o valor de ϑ_{LF} para i_e de 12 [A] foi retirado para propiciar uma melhor visualização dos resultados. Para a relação de contato τ de 0,5; 0,7; 0,8 o valor de ϑ_{LF} para i_e de 12 [A] foi de aproximadamente 660%, 687% e 1211%.

Para τ igual a 0,5, o valor mínimo alcançado para o desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} foi de 4,5% com corrente de descarga i_e de 2 [A]. Com a elevação da relação de contato para 0,7 obteve-se um aumento no valor mínimo do desgaste alcançado para 35% com corrente de descarga i_e de 2 [A]. Nos testes com relação de contato de 0,8, o desgaste atingiu o valor mínimo de 7,5% com corrente de descarga i_e de 2 [A]. Nota-se, pelo comportamento das curvas, que existe pouca diferença entre os resultados de ϑ_{LF} para usinagem com τ igual a 0,5 e 0,8.

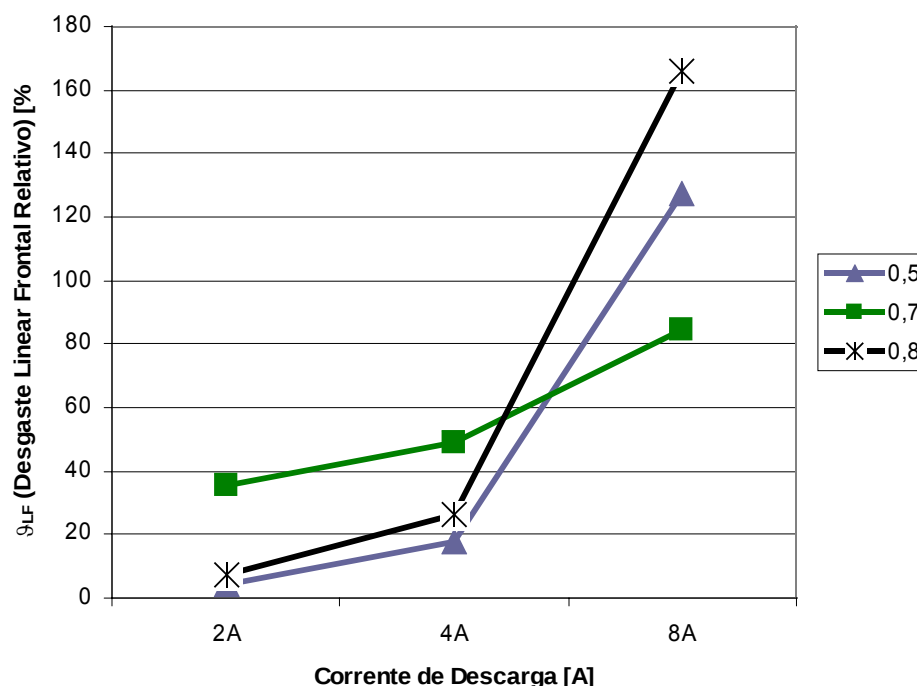


Figura 29: Desgaste frontal linear relativo (ϑ_{LF}) da liga de titânio em função da variação de τ para t_e ótimo igual a $12,8\mu s$ utilizando eletrodo-ferramenta de cobre com polaridade positiva.

Observa-se claramente que, para usinagem com eletrodo de cobre na polaridade positiva, quanto mais alta a corrente de descarga i_e maiores são os valores de ϑ_{LF} , independente da relação de contato.

O baixo desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} para a corrente de descarga i_e de 2 [A] e relação de contato τ de 0,5 e 0,8 pode ser explicado da seguinte forma: A energia liberada pelo gerador da máquina é muito baixa, resultando em uma baixa velocidade linear de penetração v_p . Assim, a lavagem lateral utilizada durante a usinagem foi suficiente para a renovação do fluido dielétrico e para auxiliar na expulsão das micro partículas na fenda de trabalho, não havendo a formação de arcos e curtos circuitos, mantendo desta maneira a estabilidade do processo. Observou-se também que, quando utilizada a relação de contato igual a 0,7 para correntes de descarga i_e menores, como no caso de 2 e 4 [A], houve um desgaste maior do eletrodo-ferramenta quando comparado a τ igual a 0,5 e 0,8.

4.5.2 Resultados sobre a Velocidade de Penetração v_p e o Desgaste Linear Frontal Relativo $\mathcal{G}_{LF}$ utilizando polaridade negativa

Pela Fig. 30, observa-se que na usinagem com τ igual a 0,5, o máximo valor alcançado para a velocidade linear de penetração v_p foi de 0,145 [mm/min] com corrente de descarga i_e de 12 [A]. Com a elevação da relação de contato para 0,7, obteve-se um decréscimo no máximo valor alcançado de v_p para 0,121 [mm/min] com corrente de descarga i_e de 12 [A]. Quando elevada a relação de contato para 0,8, obteve-se um decréscimo no máximo valor alcançado de v_p para 0,111 [mm/min] com corrente de descarga i_e de 12 [A]. Pode-se notar através do comportamento das curvas que existe pouca diferença entre os resultados de v_p para usinagem com τ igual a 0,5; 0,7 e 0,8.

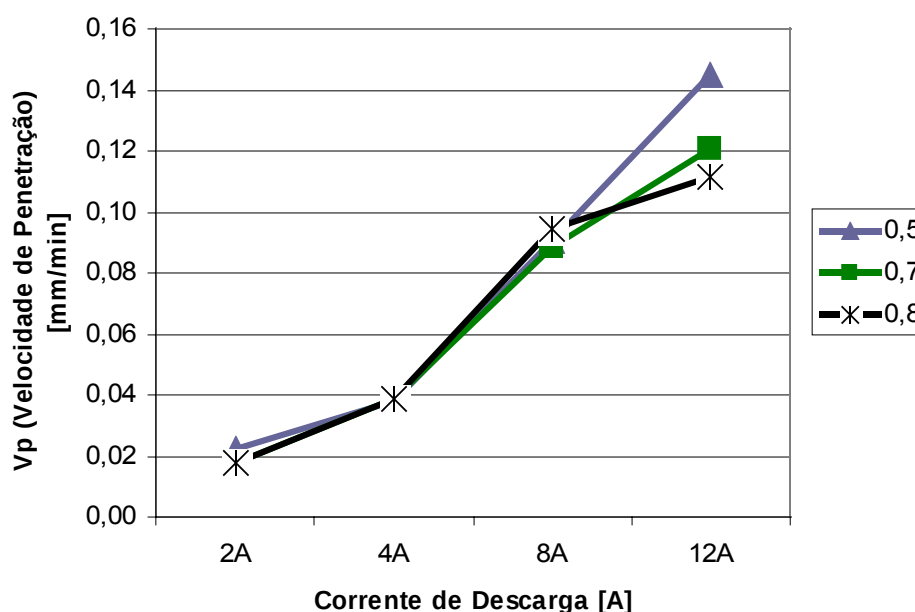


Figura 30: Velocidade linear de penetração (v_p) da liga de titânio em função da variação de τ para t_e ótimo igual a 12,8 μ s utilizando eletrodo-ferramenta de cobre com polaridade negativa.

Desta forma, é possível constatar que, para a usinagem de furos de pequenos diâmetros, a elevação da relação de contato acarreta um decréscimo de v_p , quando utilizado o eletrodo-ferramenta de cobre na polaridade negativa. A explicação para este decréscimo no valor de v_p está relacionado à redução da duração de intervalo t_0 que promove uma utilização menos eficiente da energia

fornecida, proporcionando o aumento do tempo da ignição da descarga t_d e com isto um pior aproveitamento da energia liberada pelo gerador.

Para a polaridade negativa do eletrodo-ferramenta, observou-se, quando utilizada a relação de contato igual a 0,8, melhor estabilidade do processo na forma de arcos e curtos circuitos. Provavelmente, a duração de intervalo t_0 adotada entre as sucessivas descargas, teve melhor efeito quando utilizada a polaridade negativa do eletrodo-ferramenta do que quando utilizada a polaridade positiva. Desta maneira, houve uma menor concentração de micro partículas, sem ocasionar a sobrecontaminação da fenda de trabalho, diminuindo a formação de arcos e curtos circuitos durante a descarga elétrica, o que tornou o processo mais estável.

Na Fig. 31, observa-se que, na usinagem com τ igual a 0,5, o valor mínimo alcançado para o desgaste frontal linear relativo $\mathcal{G}_{LF}$ foi de 43% com corrente de descarga i_e de 4 [A]. Com a elevação da relação de contato para 0,7, obteve-se um aumento no valor mínimo do desgaste alcançado para 48% com corrente de descarga i_e de 4 [A]. Nos testes com relação de contato de 0,8 o desgaste atingiu o valor mínimo de 60% com corrente de descarga i_e de 4 [A].

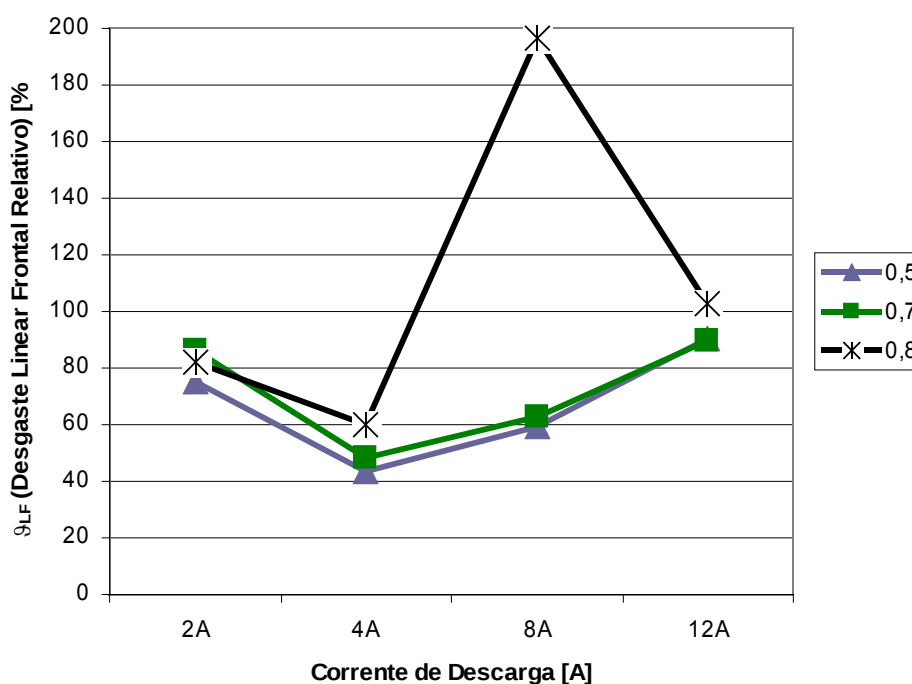


Figura 31: Desgaste frontal linear relativo ($\mathcal{G}_{LF}$) da liga de titânio em função da variação de τ para t_e ótimo igual a 12,8 μ s utilizando eletrodo-ferramenta de cobre com polaridade negativa.

Nota-se, pelo comportamento das curvas, que existe pouca diferença entre os resultados de ϑ_{LF} para usinagem com τ igual a 0,5; 0,7 e 0,8; menos para a corrente de descarga i_e de 8 [A].

A diferença do ϑ_{LF} para a corrente de 8 [A] está relacionada à grande instabilidade do processo na forma de arcos e curtos circuitos. Provavelmente, as curtas durações de intervalo t_0 adotadas entre as sucessivas descargas, não foram suficientes para promover uma lavagem dos subprodutos da usinagem, causando por sua vez a sobre contaminação da fenda de trabalho. Isto ocasiona a perda da continuidade de fusão de material da peça (ânodo) e, ao mesmo tempo, prejudica a solidificação do material fundido na cavidade catódica (eletrodo-ferramenta).

4.6 Resultados v_p e ϑ_{LF} para eletrodos de cobre-tungstênio com variação da relação de contato τ

4.6.1 Resultados sobre a Velocidade de Penetração v_p e o Desgaste Linear Frontal Relativo ϑ_{LF} utilizando polaridade positiva

Pela Fig. 32, observa-se que na usinagem com τ igual a 0,5, o máximo valor alcançado para a velocidade linear de penetração v_p foi de 0,090 [mm/min] com corrente de descarga i_e de 8 [A]. Com a elevação da relação de contato para 0,7, obteve-se um decréscimo no máximo valor alcançado de v_p para 0,084 [mm/min] com corrente de descarga i_e de 8 [A]. Pode-se notar através do comportamento das curvas que existe pouca diferença entre os resultados de v_p para usinagem com τ igual a 0,5 e 0,7. Em contrapartida, nos testes com relação de contato de 0,8, a velocidade linear de penetração v_p atingiu o valor máximo de 0,072 [mm/min] com corrente de descarga i_e de 12 [A].

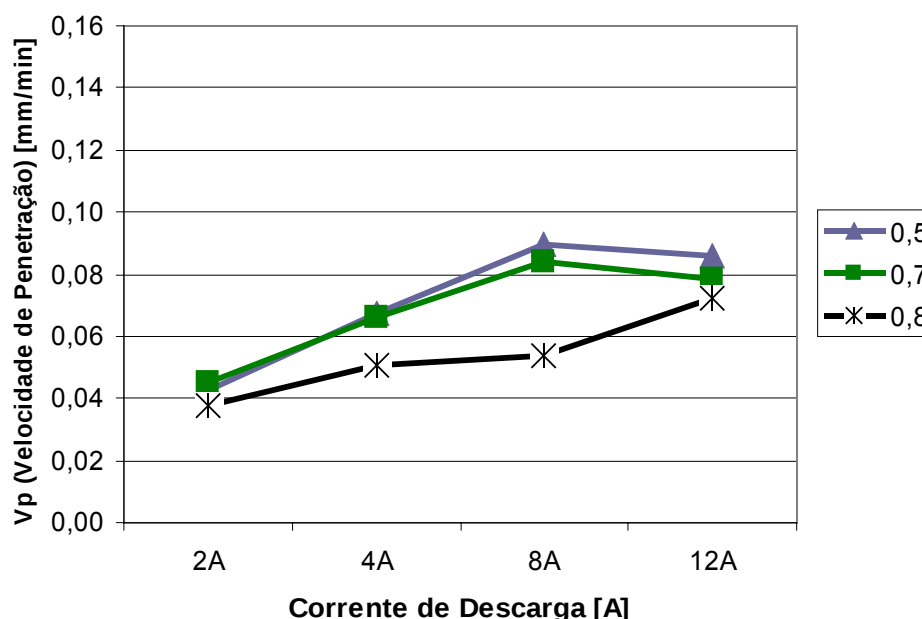


Figura 32: Velocidade linear de penetração (v_p) da liga de titânio em função da variação de τ para t_e ótimo igual a $12,8\mu s$ utilizando eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio com polaridade positiva.

Desta forma, é possível constatar que, para a usinagem de furos de pequenos diâmetros, a elevação da relação de contato acarreta um decréscimo de v_p , quando utilizado o eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio na polaridade positiva. A explicação para este decréscimo no valor de v_p , está relacionado à redução da duração de intervalo t_0 que promove uma utilização menos eficiente da energia fornecida, proporcionando o aumento do tempo da ignição da descarga t_d e com isto um pior aproveitamento da energia liberada pelo gerador.

Na Fig. 33, observa-se que na usinagem com τ igual a 0,5, o valor mínimo alcançado para o desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} foi de 27,7% com corrente de descarga i_e de 2 [A]. Com a elevação da relação de contato para 0,7 obteve-se um decréscimo no valor mínimo do desgaste alcançado para 3% com corrente de descarga i_e de 4 [A]. Nos testes com relação de contato de 0,8, o desgaste atingiu o valor mínimo de 16,3% com corrente de descarga i_e de 4 [A].

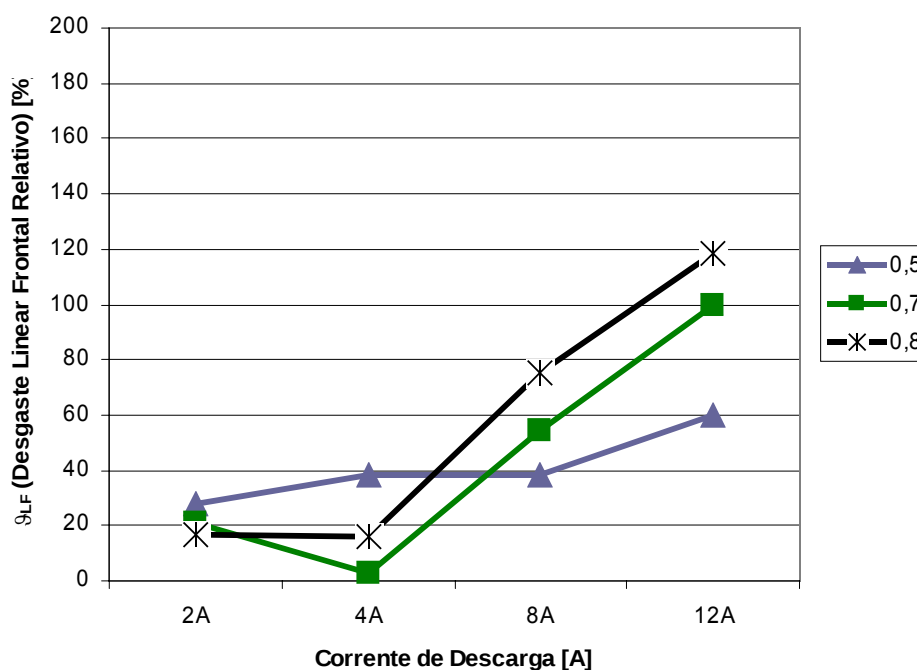


Figura 33: Desgaste frontal linear relativo (ϑ_{LF}) da liga de titânio em função da variação de τ para t_e ótimo igual a $12,8\mu s$ utilizando eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio com polaridade positiva.

Pode-se observar também que, para o eletrodo de cobre-tungstênio na polaridade positiva, quando utilizado correntes de descargas i_e acima de 2 e 4 [A], o desgaste tende a aumentar de forma brusca para τ de 0,7 e 0,8. Uma explicação para este acontecimento está relacionado ao fato de que na usinagem de pequenos furos, quando utilizado relação de contato maior que 0,5 e correntes de descargas mais elevadas, o desgaste tende a aumentar devido justamente à instabilidade do canal de plasma, observada para estas condições de usinagem. Da mesma forma, este desgaste tende a aumentar pelo fato de não haver a continuação do processo de solidificação do material fundido na cavidade anódica, não gerando a sobre expansão do canal de plasma nesta região, e, conseqüentemente, um aumento contínuo do fluxo de energia para o eletrodo-ferramenta (ânodo).

4.6.2 Resultados sobre a Velocidade de Penetração v_p e o Desgaste Linear Frontal Relativo ϑ_{LF} utilizando polaridade negativa

Pela Fig. 34, observa-se que, na usinagem com τ igual a 0,5, o máximo valor alcançado para a velocidade linear de penetração v_p foi de 0,131

[mm/min] com corrente de descarga i_e de 12 [A]. Com a elevação da relação de contato para 0,7 obteve-se um decréscimo no máximo valor alcançado de v_p para 0,100 [mm/min] com corrente de descarga i_e de 8 [A]. Pode-se notar, através do comportamento das curvas, que existe pouca diferença entre os resultados de v_p para usinagem com τ igual a 0,5 e 0,7. Em contrapartida, nos testes com relação de contato de 0,8, a velocidade linear de penetração v_p atingiu o valor máximo de 0,086 [mm/min] com corrente de descarga i_e de 12 [A].

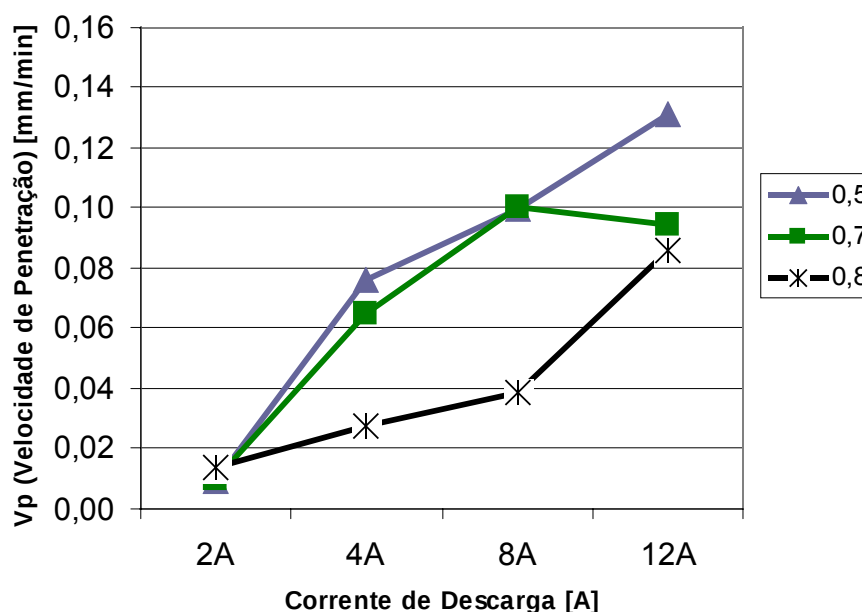


Figura 34: Velocidade linear de penetração (v_p) da liga de titânio em função da variação de τ para t_e ótimo igual a $12,8\mu s$ utilizando eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio com polaridade negativa.

Desta forma, é possível constatar que, para a usinagem de furos de pequenos diâmetros, a elevação da relação de contato acarreta um decréscimo de v_p , quando utilizado o eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio na polaridade negativa. A explicação para este decréscimo no valor de v_p , está relacionado à redução da duração de intervalo t_0 que promove uma utilização menos eficiente da energia fornecida, proporcionando o aumento do tempo da ignição da descarga t_d e, com isto, um pior aproveitamento da energia liberada pelo gerador.

Outro aspecto que influi na redução da velocidade linear de penetração para valores abaixo da corrente de descarga i_e de 12 [A], quando

comparado os resultados de τ igual a 0,8 com os resultados de v_p das curvas de τ igual a 0,5 e 0,7 é a baixa eficiência da lavagem para durações de intervalo muito curtas, ocasionando a queda acentuada da pressão interna do canal, o qual, ao ser implodido pela interrupção da corrente elétrica, não gera forças suficientemente adequadas para ejetar o material fundido das cavidades anódica e catódica.

Na Fig. 35, observa-se que na usinagem com τ igual a 0,5, o valor mínimo alcançado para o desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} foi de 47% com corrente de descarga i_e de 2 [A]. Com a elevação da relação de contato para 0,7, obteve-se um aumento no valor mínimo do desgaste alcançado para 71% com corrente de descarga i_e de 8 [A]. Nos testes com relação de contato de 0,8, o desgaste atingiu o valor mínimo de 46% com corrente de descarga i_e de 8 [A].

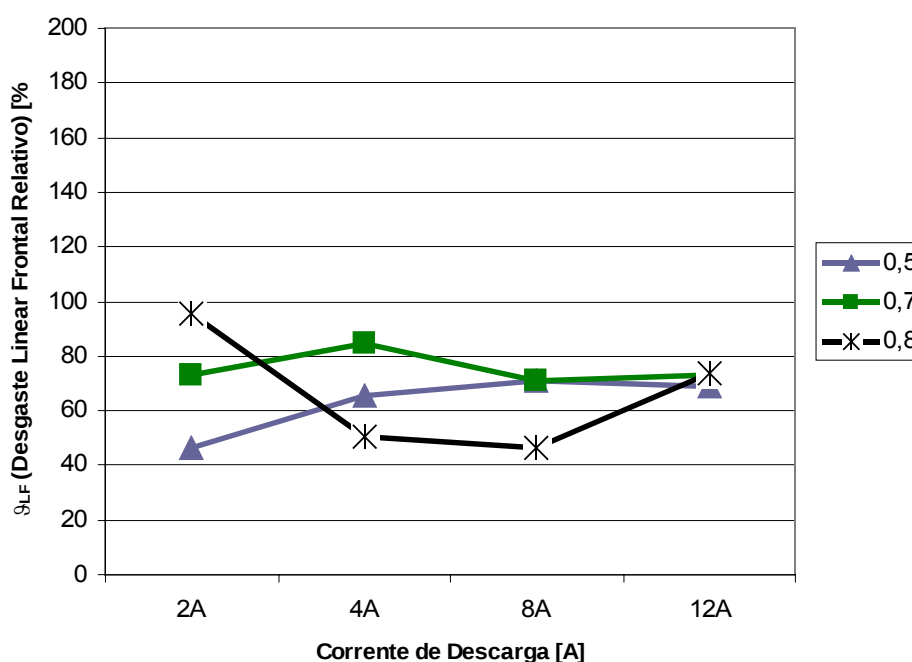


Figura 35: Desgaste frontal linear relativo (ϑ_{LF}) da liga de titânio em função da variação de τ para t_e ótimo igual a $12,8\mu s$ utilizando eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio com polaridade negativa.

Na usinagem de furos convencionais, o desgaste do eletrodo-ferramenta, geralmente, tende a diminuir para a liga WCu (70% W e 30% Cu), pelo fato de possuir maior resistência ao desgaste térmico. Esta maior resistência está correlacionada às propriedades termofísicas da liga, proporcionada pelo alto ponto de fusão do tungstênio disperso na matriz de cobre.

Porém, provavelmente, as curtas durações de intervalo t_0 adotadas entre as sucessivas descargas não foram suficientes para promover uma lavagem dos subprodutos da usinagem, causando por sua vez a sobre contaminação da fenda de trabalho. Isto ocasiona a perda da continuidade de fusão de material da peça (ânodo) e, ao mesmo tempo, prejudica a solidificação do material fundido na cavidade catódica (eletrodo-ferramenta).

Na usinagem de furo de pequenos diâmetros, observa-se de acordo com os resultados obtidos, que os testes com valores de τ superiores a 0,5 mostraram-se bastante ineficientes para o eletrodo-ferramenta de cobre, por favorecer a ocorrência de arcos e curtos circuitos no decorrer do processo devido à dificuldade de lavagem dos subprodutos da remoção, pois para esta usinagem, trabalha-se com uma fenda de trabalho muito pequena. Em consequência, ocorre uma excessiva concentração desses produtos, gerando instabilidade do processo e inadequada dispersão das descargas elétricas ao longo da superfície dos eletrodos.

Para a usinagem com eletrodos de cobre-tungstênio, pelos mesmos motivos expostos para o eletrodo-ferramenta de cobre, constatou-se, pelos resultados dos ensaios, que também não é adequada a utilização da relação de contato acima de 0,5 para a usinagem de furos de pequenos diâmetros.

Visando a um aspecto global, ou seja, analisando o melhor resultado da velocidade linear de penetração v_p com o menor valor do desgaste linear frontal relativo $\mathcal{G}_{LF}$, pode-se concluir que o melhor resultado encontrado para a variação da relação de contato τ foi o valor de $\tau = 0,5$ para o eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio na polaridade negativa, utilizando uma corrente de descarga $i_e = 12$ [A], sendo os melhores resultados obtidos de $v_p = 0,131$ [mm/min] e $\mathcal{G}_{LF} = 68\%$. Os ensaios mostraram que o eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio permanece cônico ao longo da superfície lateral no final da usinagem.

Observou-se, após os ensaios durante a análise das amostras, a conicidade dos eletrodos-ferramenta, conforme demonstrado nas Fig. 36 e 37, sendo estas amostras do melhor resultado obtido para ambos os eletrodos-ferramenta. Esta conicidade é devida, principalmente, a falta de lavagem adequada durante o processo. Em decorrência disto, uma segunda descarga ocorre na parede lateral da cavidade, resultando no afunilamento desta.

Nas Fig. 36 e 37, observa-se a diferença das cavidades usinadas com eletrodos de cobre e cobre-tungstênio.

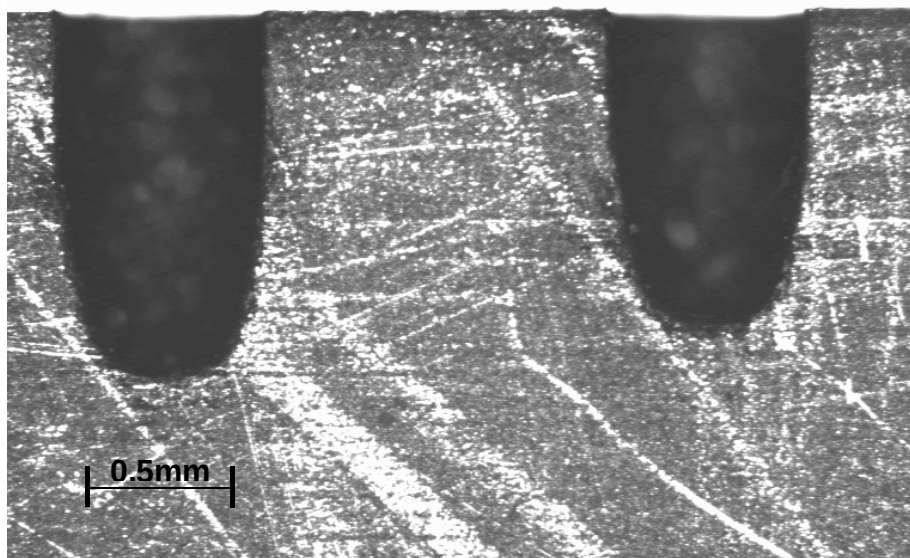


Figura 36: Cavidade obtida através da usinagem utilizando eletrodo de cobre com polaridade negativa, i_e de 8 [A], t_e ótimo de 12,8 μ s e τ de 0,5.

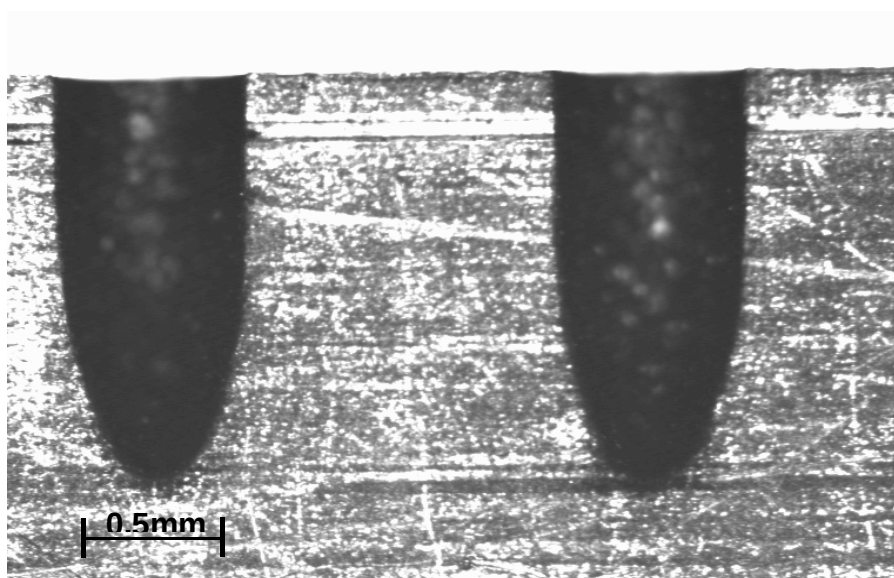


Figura 37: Cavidade obtida através da usinagem utilizando eletrodo de cobre-tungstênio com polaridade negativa, i_e de 8 [A], t_e ótimo de 12,8 μ s e τ de 0,5.

4.7 Planejamento experimental para estabelecimento da melhor rotação

Após a definição de um τ ótimo, foram utilizados valores de rotação de 25, 50 e 100rpm. Cabe acrescentar que a rotação do eletrodo-ferramenta exerce grande influência na expulsão das micro partículas na fenda de trabalho, pois de acordo com Soni & Chakraverti (1993) ao ser acionada, um número maior de pequenas micro partículas são produzidas, facilitando a lavagem.

4.8 Resultados v_p e ϑ_{LF} para eletrodos de cobre com variação da rotação do eletrodo

4.8.1 Resultados sobre a Velocidade de Penetração v_p e o Desgaste Linear Frontal Relativo ϑ_{LF} utilizando polaridade positiva

Pela Fig. 38, observa-se que para a curva da corrente de descarga i_e de 2 [A] um aumento da rotação leva a uma pequena diminuição da velocidade linear de penetração, sendo a máxima velocidade de penetração atingida de 0,024 [mm/min]. Portanto, esta curva nos mostra que correntes de descargas de valores baixos trabalham melhor com rotações baixas, mantendo a estabilidade do canal de plasma ,quando utilizada a rotação de 25rpm, promovendo uma adequada ejeção do material fundido da cavidade catódica, gerando uma melhor eficiência na lavagem dos produtos eletroerodidos para fora da fenda de trabalho.

Para a corrente de descarga i_e de 4 [A], é praticamente invariável o valor da velocidade linear de penetração v_p . A máxima velocidade de penetração atingida foi de 0,024 [mm/min] para a rotação de 50rpm.

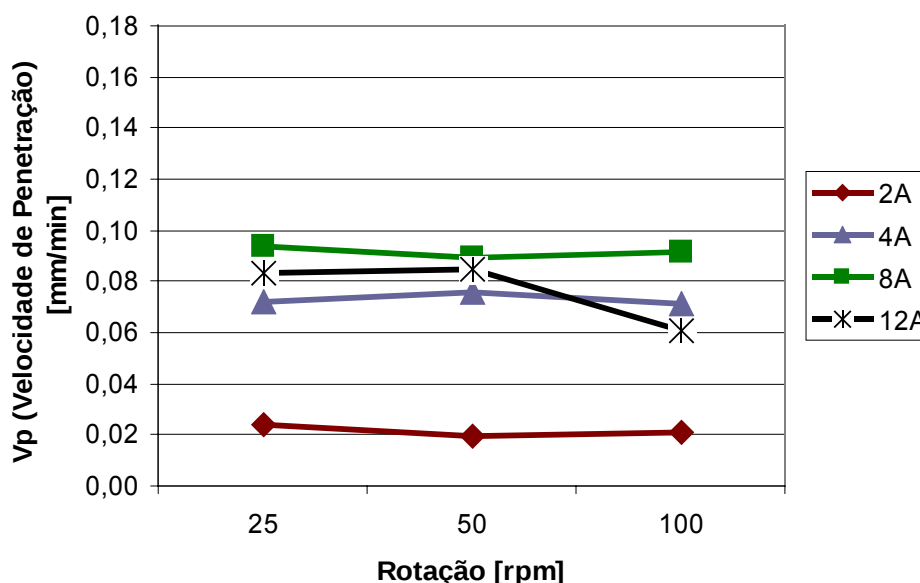


Figura 38: Velocidade de linear de penetração (v_p) da liga de titânio em função da variação de rpm para τ ótimo igual a 0,5 - t_e ótimo igual a 12,8 μ s utilizando eletrodo-ferramenta de cobre com polaridade positiva.

Para i_e de 8 [A], um aumento da rotação de 25 para 50rpm apresenta uma diminuição da velocidade linear de penetração de 0,093 para 0,089 [mm/min], sendo estabilizada em 0,091 [mm/min], quando aumentada para 100rpm. Com o aumento da energia fornecida pelo gerador e com o auxílio da rotação, observou-se durante o monitoramento dos testes uma diminuição de arcos e curtos circuitos, diminuindo a sobre contaminação da fenda de trabalho. Como consequência, isto também resulta na melhoria da lavagem, o que auxilia na estabilidade do processo.

A curva de 12 [A] apresenta um aumento da velocidade linear de penetração v_p quando há um aumento da rotação de 25 para 50rpm, sendo de 0,083 [mm/min] para 0,085 [mm/min]. A partir deste valor há um decréscimo de v_p , quando realizado um aumento da rotação que passa a ter 0,061 [mm/min] em 100rpm.

Neste caso, a rotação não consegue auxiliar da melhor forma na lavagem, resultando em uma maior concentração de micro partículas na fenda de trabalho, quando elevada a corrente de descarga i_e para 12 [A]. Por sua vez, esta maior concentração de micro partículas gera a sobrecontaminação da fenda de trabalho. A ausência de adequada lavagem destas micro partículas ocasiona a formação de arcos e curtos circuitos durante a descarga elétrica, tornando o processo instável devido à redução da eficiência destas faíscas.

Estas partículas metálicas são compostas do material do eletrodo-peça e do eletrodo-ferramenta, dificultando a remoção adequada de material, o que resulta na diminuição da velocidade linear de penetração.

Estes resultados demonstram que, para a usinagem de furos de pequenos diâmetros, nem sempre, quanto mais elevada é a corrente de descarga i_e , maiores são os valores obtidos para a velocidade linear de penetração.

A Fig. 39 apresenta o gráfico do comportamento do desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} em função da variação da rotação. Para a curva da corrente de descarga i_e de 2 [A], observa-se que um aumento da rotação leva a um aumento do desgaste frontal linear relativo, sendo o valor mínimo de ϑ_{LF} de 6% para 25rpm, sendo para esta rotação o melhor valor de v_p alcançado.

Uma possível hipótese para este comportamento está relacionada ao fato de que uma rotação maior que 25rpm tende a causar a queda de ϑ_{LF} , devido à baixa energia fornecida pelo gerador que resulta na instabilidade do canal de plasma, não promovendo a sustentação da continuidade de fusão de material na peça (cátodo) e, ao mesmo tempo, não favorecendo a solidificação do material fundido na cavidade anódica (eletrodo-ferramenta), por não haver a expansão suficiente do diâmetro do canal próximo a esta região.

Para a corrente de descarga i_e de 4 [A] há, um aumento no desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} de 25rpm para 50rpm de 33% para 50%, sendo estabilizado o desgaste para 32%, quando utilizada a rotação de 100rpm, sendo para esta rotação o melhor valor de v_p alcançado. Este comportamento se deve à instabilidade do canal de plasma para a rotação de 50rpm, não promovendo a sustentação da continuidade de fusão de material na peça (cátodo) e, ao mesmo tempo, não favorecendo a solidificação do material fundido na cavidade anódica (eletrodo-ferramenta), pois não há a expansão do diâmetro do canal próximo a esta região.

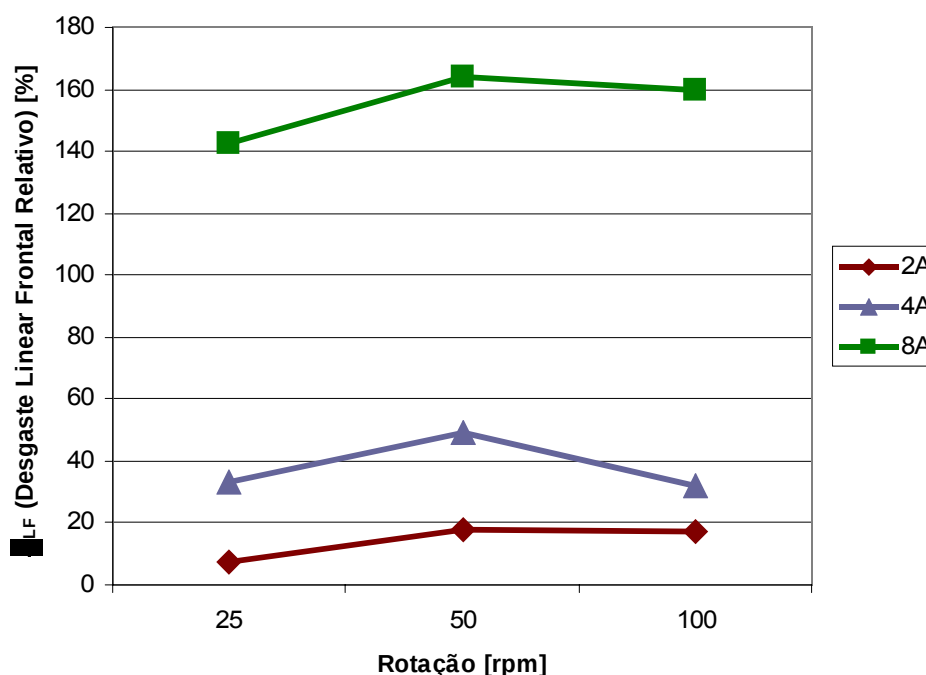


Figura 39: Desgaste frontal linear relativo (ϑ_{LF}) da liga de titânio em função da variação de rpm para τ ótimo igual a 0,5 - te ótimo igual a 12,8 μ s utilizando eletrodo-ferramenta de cobre com polaridade positiva.

Para i_e de 8 [A], um aumento da rotação apresenta um aumento do desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} de 142% em 25rpm, para 164% 50rpm, havendo posteriormente um decréscimo para 159% em 100rpm, sendo o melhor valor de v_p alcançado. Com o aumento da energia fornecida pelo gerador e da rotação, observou-se durante o monitoramento dos testes uma diminuição de arcos e curtos circuitos, diminuindo a sobre contaminação da fenda de trabalho.

Nesta figura, o valor de ϑ_{LF} para i_e de 12 [A] foi retirado para propiciar uma melhor visualização dos resultados. Para a rotação de 25, 50 e 100rpm, o valor de ϑ_{LF} para i_e de 12 [A] foi de aproximadamente 776%, 666% e 1117%. Com o aumento da energia fornecida pelo gerador, para correntes de descargas i_e maiores, observa-se um maior desgaste para a rotação de 100rpm. O aspecto que influi no aumento do desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} é a baixa eficiência da lavagem, quando aumentada a energia fornecida pelo gerador para o eletrodo-ferramenta de cobre. Como consequência, resulta na queda acentuada de pressão interna do canal, onde ao ser implodido pela interrupção da corrente elétrica não gera forças suficientes para ejetar o material fundido das cavidades anódica e catódica.

4.8.2 Resultados sobre a Velocidade de Penetração v_p e o Desgaste Linear Frontal Relativo $\mathcal{G}_{LF}$ utilizando polaridade negativa

Pela Fig. 40, observa-se nitidamente que, para a curva da corrente de descarga i_e de 2 [A], um aumento da rotação leva a um pequeno aumento da velocidade linear de penetração. Pode-se verificar que, quando invertida a polaridade do eletrodo-ferramenta (cátodo), as correntes de descargas i_e , de valores baixos, possuem o mesmo rendimento ao trabalhar com as rotações estabelecidas.

A máxima velocidade de penetração 0,012 [mm/min] é atingida para 100rpm. Durante a aplicação do tempo de descarga t_e ocorre o prosseguimento da fusão de material em ambos os eletrodos e um aumento contínuo do diâmetro do canal de plasma. Porém, 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, à corrente de descarga i_e e à duração de descarga t_e . Portanto, para as rotações de 25 e 50rpm, há a mesma expansão do diâmetro do canal de plasma, quando utilizada a polaridade negativa para o eletrodo-ferramenta, sendo que a rotação para este caso influi muito pouco no valor de v_p .

Para a corrente de descarga i_e de 4 [A], observa-se, ao aumentar a rotação de 25 para 50rpm, um pequeno aumento da velocidade linear de penetração v_p de 0,022 para 0,027 [mm/min]. Ao aumentar a rotação de 50 para 100rpm, houve um pequeno decréscimo no valor de v_p para 0,024 [mm/min]. O comportamento da curva está relacionado à pequena instabilidade que ocorre no canal de plasma, quando aumentado o valor da rotação de 50 para 100rpm. Este aumento ocasiona uma pequena perda da continuidade de fusão de material da peça (ânodo) e, ao mesmo tempo, prejudica a solidificação do material fundido na cavidade catódica (eletrodo-ferramenta). Porém, a fusão em ambos os materiais estabiliza-se, quando aumentada a rotação para 100rpm.

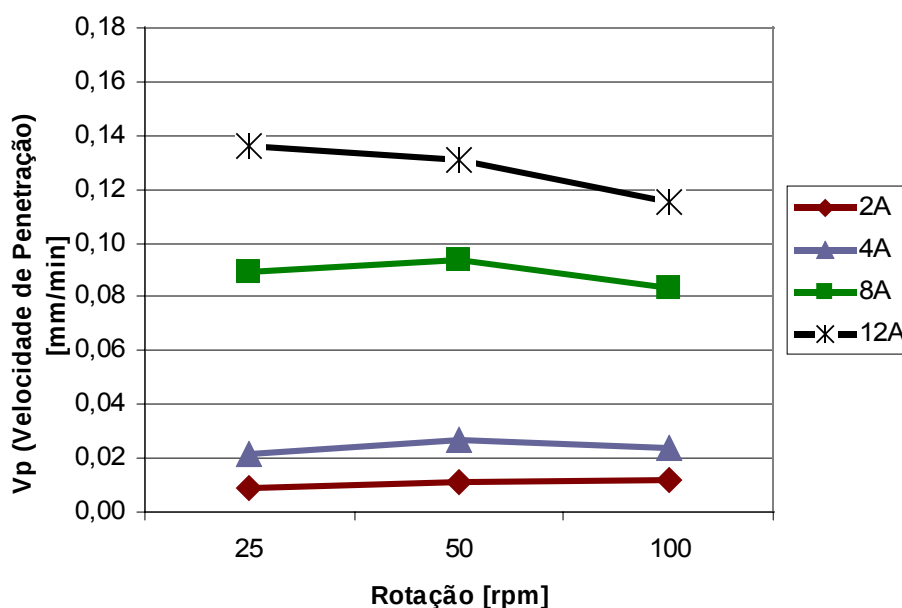


Figura 40: Velocidade de linear de penetração (v_p) da liga de titânio em função da variação de rpm para τ ótimo igual a 0,5 - t_e ótimo igual a 12,8 μ s, utilizando eletrodo-ferramenta de cobre com polaridade negativa.

Para i_e de 8 [A], um aumento na rotação apresenta uma diminuição da velocidade linear de penetração de 0,089 para 0,094 [mm/min]. O comportamento da curva está relacionado à estabilidade que ocorre no canal de plasma, quando aumentado o valor da rotação de 25 para 50rpm. Este aumento ocasiona a continuidade de fusão de material da peça (ânodo) e ao mesmo tempo auxilia na solidificação do material fundido na cavidade catódica (eletrodo-ferramenta). Porém há instabilidade, quando aumentada a rotação de 50 para 100rpm sendo v_p de 0,094 para 0,083 [mm/min]. O que provoca o decréscimo no valor de v_p nesta curva é a ineficiência da rotação em auxiliar a lavagem, pois ao aumentar a energia de descarga, há uma maior concentração de micro partículas, as quais são maiores que as micro partículas geradas pelas correntes de descarga i_e de 2 e 4 [A] na fenda de trabalho, ocasionando a sobrecontaminação da fenda de trabalho. Portanto, na usinagem de pequenos furos, se o fluido dielétrico não for renovado devidamente e não possuir pressão adequada, estas partículas metálicas serão acumuladas na cavidade, originando arcos e curto circuitos durante a descarga elétrica, tornando a usinagem instável devido à redução da eficiência das faíscas, resultando no baixo desempenho do processo.

A curva de i_e de 12 [A] apresenta um decréscimo constante da velocidade linear de penetração v_p , quando há um aumento na rotação de 25 para 100rpm de 0,136 [mm/min] para 0,115 [mm/min].

Este decréscimo está relacionado, da mesma forma, na ineficiência da rotação em auxiliar a lavagem, observando-se que, quanto maior esta, maior a instabilidade do processo gerada, resultando em uma maior concentração de micro partículas na fenda de trabalho, quando elevada a corrente de descarga i_e para 12 [A]. Por sua vez, esta maior concentração de micro partículas gera a sobre contaminação da fenda de trabalho. A ausência de adequada lavagem destas micro partículas ocasiona a formação de arcos e curtos circuitos durante a descarga elétrica, tornando o processo instável devido à redução da eficiência destas faíscas.

Estas partículas metálicas são compostas do material do eletrodo-peça e do eletrodo-ferramenta, dificultando a remoção adequada de material, o que resulta na diminuição da velocidade linear de penetração.

Estes resultados demonstram que, para a usinagem de furos de pequenos diâmetros, nem sempre quanto mais elevada é a corrente de descarga i_e , maiores são os valores obtidos para a velocidade linear de penetração.

A Fig. 41 apresenta o gráfico do comportamento do desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} em função da variação da rotação. Para a curva da corrente de descarga i_e de 2 [A], observa-se que um aumento da rotação leva ao aumento do desgaste frontal linear relativo, obtendo-se o valor mínimo de ϑ_{LF} de 85% para 100rpm, sendo para esta rotação o melhor valor de v_p alcançado.

Este comportamento se deve à instabilidade do processo observado durante o monitoramento dos testes desta curva para as rotações de 25 e 50rpm. Quando utilizada a rotação de 100rpm, esta auxilia melhor a lavagem na limpeza das micro partículas na fenda de trabalho, fazendo assim com que o eletrodo-ferramenta (cátodo) desgaste com menos facilidade.

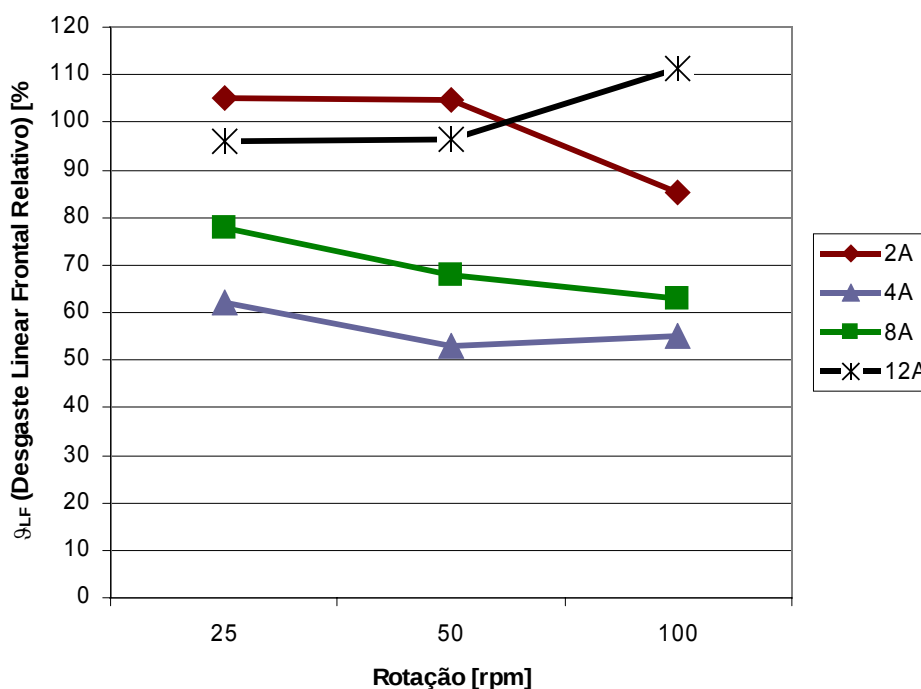


Figura 41: Desgaste frontal linear relativo (ϑ_{LF}) da liga de titânio em função da variação de rpm para τ ótimo igual a 0,5 - te ótimo igual a 12,8 μ s utilizando eletrodo-ferramenta de obre com polaridade negativa.

Para a corrente de descarga i_e de 4 [A] há também um decréscimo no desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} a partir da rotação de 25rpm. O valor mínimo de ϑ_{LF} é 52% para 50rpm, sendo para esta rotação o melhor valor de v_p alcançado. Este comportamento se deve à boa estabilidade do canal de plasma gerada pela rotação de 50rpm, promovendo a sustentação da continuidade de fusão de material na peça (ânodo) e, ao mesmo tempo, favorecendo a solidificação do material fundido na cavidade catódica (eletrodo-ferramenta), devido à expansão do diâmetro do canal próximo a esta região.

Para i_e de 8 [A], um aumento da rotação apresenta um decréscimo constante do desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} de 78% para 63% sendo a rotação de 25 para 100rpm. O desgaste frontal linear relativo para o melhor valor de v_p alcançado foi de 68% para a rotação de 50rpm. Com o aumento da energia fornecida pelo gerador e com o aumento da rotação, observou-se durante o monitoramento dos testes poucos pulsos em vazio, assim como uma baixa ocorrência de descargas anômalas e curtos-circuitos. Isto demonstra uma boa amplitude de abertura da fenda de trabalho, assim como um bom aproveitamento da

energia aplicada ao processo. Isto também significa que, a falta de adequada lavagem para este caso, foi suficiente para uma melhor remoção das micro partículas.

Observa-se para i_e de 12 [A] uma estabilidade no desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} de 25 para 50rpm, sendo o desgaste de 96% na rotação de 25rpm o melhor valor de v_p alcançado. Quando utilizada a rotação de 100rpm observa-se um aumento de ϑ_{LF} para 111%. Portanto para este caso a rotação de 100rpm não foi suficiente para promover uma melhor lavagem, sendo insuficiente para uma melhor remoção das micro partículas.

4.9 Resultados v_p e ϑ_{LF} para eletrodos de cobre-tungstênio com variação da rotação do eletrodo

4.9.1 Resultados sobre a Velocidade de Penetração v_p e o Desgaste Linear Frontal Relativo ϑ_{LF} utilizando polaridade positiva

Pela Fig. 42, observa-se nitidamente que, para a curva da corrente de descarga i_e de 2 [A], um aumento na rotação leva a um pequeno decréscimo da velocidade linear de penetração de 25 para 100rpm.

A máxima velocidade de penetração 0,035 [mm/min] é atingida para 25rpm. Para valores superiores à rotação relacionada, os níveis de v_p decaem continuamente decorrente ao baixo nível de energia fornecido. Sabe-se que, durante a aplicação do tempo de descarga t_e , ocorre o prosseguimento da fusão de material em ambos os eletrodos e um aumento contínuo do diâmetro do canal de plasma.

Porém, o baixo nível de energia disponível da descarga não permite manter elevada a pressão interna do canal de plasma por uma duração de t_e igual a 12,8 [μ s], promovendo a ocorrência da instabilidade do canal de plasma.

Para a corrente de descarga i_e de 4 [A], um aumento da rotação leva a um constante aumento da velocidade linear de penetração v_p . Nesta curva observa-se que a rotação é eficiente no auxílio da lavagem, resultando em uma menor concentração de micro partículas na fenda de trabalho. Por sua vez, esta

menor concentração de micro partículas gera a contaminação da fenda de trabalho, o que resulta na estabilidade do processo.

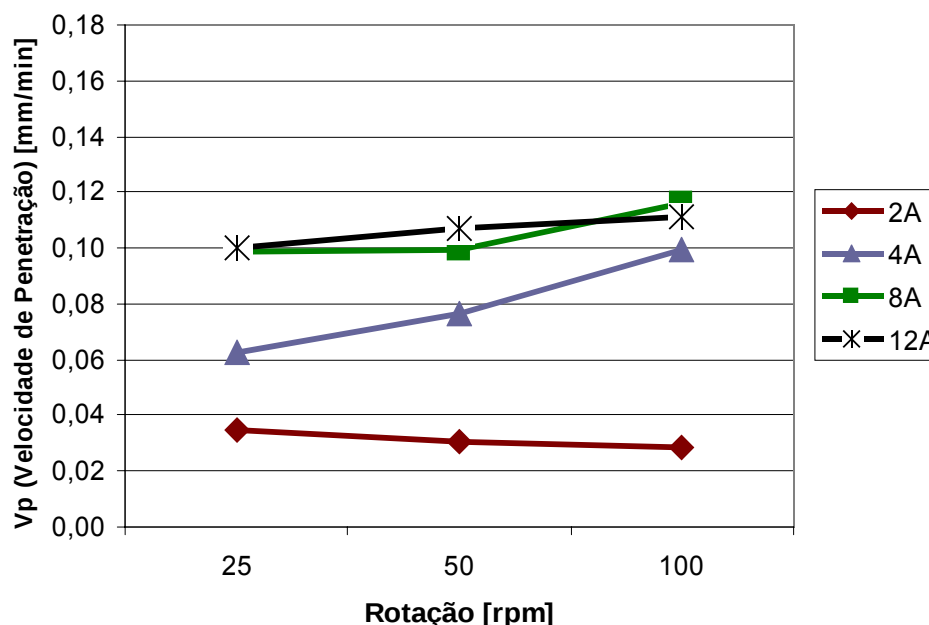


Figura 42: Velocidade linear de penetração (vp) da liga de titânio em função da variação de rpm para τ ótimo igual a 0,5 - t_e ótimo igual a 12,8 μ s utilizando eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio com polaridade positiva.

Para i_e de 8 [A], um aumento da rotação apresenta um aumento constante da velocidade linear de penetração de 0,100 para 0,116 [mm/min], sendo constante de 25 para 50rpm e aumentando de 50 para 100rpm. Observa-se desta maneira que, a maior energia disponível da descarga e a elevação da rotação do eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio na polaridade positiva permite manter elevada a pressão interna do canal de plasma por uma duração de t_e igual a 12,8 [μ s], sem promover a ocorrência de acentuada instabilidade do canal de plasma.

Na curva de 12 [A] ocorre o mesmo procedimento apresentado pela curva de 8 [A]. Um aumento da rotação apresenta um aumento constante da velocidade linear de penetração de 0,100 para 0,107 [mm/min], de 25 para 50rpm e aumentando de 0,107 para 0,111 [mm/min] sendo a rotação de 50 para 100rpm. Observa-se da mesma forma que a maior energia disponível da descarga e a elevação da rotação do eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio na polaridade positiva permite manter elevada a pressão interna do canal de plasma por uma

duração de t_e igual a 12,8 [μ s], sem promover a ocorrência de acentuada instabilidade do canal de plasma.

A Fig. 43 apresenta o gráfico do comportamento do desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} em função da variação da rotação. Para a curva da corrente de descarga i_e de 2 [A], observa-se que um aumento do tempo de descarga t_e leva a uma diminuição do desgaste frontal linear relativo, sendo o valor mínimo de ϑ_{LF} de 28% para 50rpm, sendo o melhor valor de v_p alcançado de 37,4% para 25rpm. Devido ao baixo nível de energia disponível da descarga para a rotação de 100rpm, esta não consegue auxiliar a lavagem resultando na sobrecontaminação da fenda de trabalho, não permitindo desta maneira manter elevada a pressão interna do canal de plasma por uma duração de t_e igual a 12,8 [μ s], promovendo a ocorrência da instabilidade do canal de plasma e, em decorrência, o aumento do desgaste frontal linear relativo.

Para a corrente de descarga i_e de 4 [A] há um pequeno decréscimo no desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} a partir do aumento da rotação de 25 para 50rpm, alcançando o valor mínimo de 42% para 50rpm. Ao aumentar-se a rotação de 50 para 100rpm, observa-se um aumento de ϑ_{LF} de 42% para 50%, sendo para esta rotação o melhor valor de v_p alcançado. A boa estabilidade do canal de plasma promove a sustentação da continuidade de fusão de material na peça (cátodo) e ao mesmo tempo favorecendo a solidificação do material fundido na cavidade anódica (eletrodo-ferramenta), devido à expansão do diâmetro do canal próximo a esta região. Por isso que para a rotação de 100rpm há um maior desgaste frontal linear relativo, pois para a curva de 4 [A], esta rotação obteve o melhor valor de v_p alcançado.

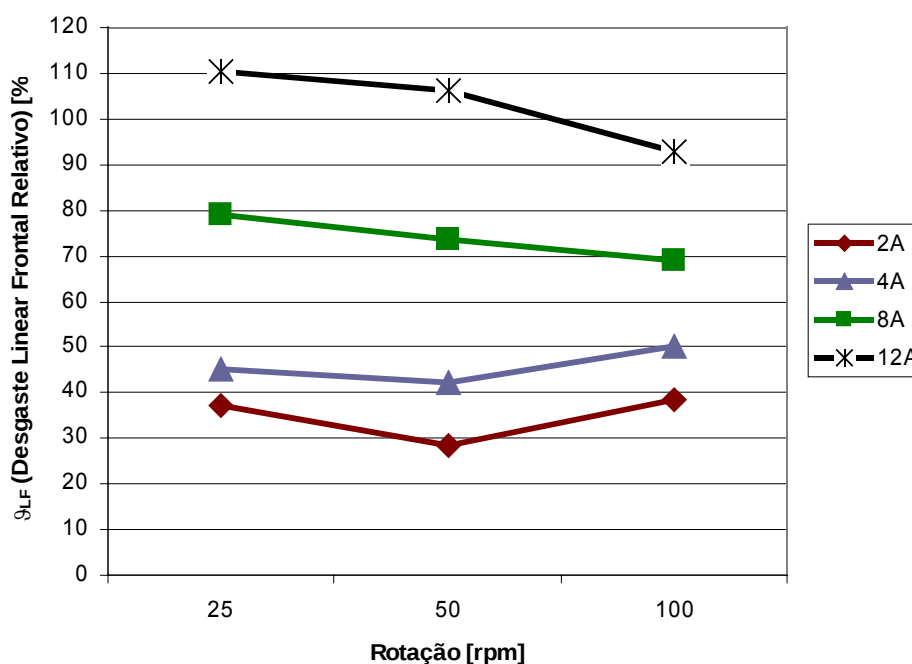


Figura 43: Desgaste frontal linear relativo (ϑ_{LF}) da liga de titânio em função da variação de rpm para τ ótimo igual a 0,5 - t_e ótimo igual a 12,8 μ s utilizando eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio com polaridade positiva.

Para i_e de 8 [A] um aumento na rotação apresenta um decréscimo constante do desgaste frontal linear relativo de 25rpm para 100rpm, que seria ϑ_{LF} de 79% para o valor mínimo de 69%, sendo para esta rotação o melhor valor de v_p alcançado. Com o aumento da energia fornecida pelo gerador, observaram-se, durante o monitoramento dos testes, poucos pulsos em vazio, assim como uma baixa ocorrência de descargas anômalas e curtos-circuitos. Isto demonstra que a rotação de 100rpm auxilia na eficiência e estabilidade da usinagem, gerando uma boa amplitude de abertura da fenda de trabalho, assim como um bom aproveitamento da energia aplicada ao processo. Como resultante, isto também significa a ocorrência de melhoria da lavagem das micro partículas.

Para i_e de 12 [A], um aumento na rotação apresenta um decréscimo constante do desgaste frontal linear relativo de 25rpm para 100rpm, que seria ϑ_{LF} de 111% para o valor mínimo de 93%, sendo o melhor valor de v_p alcançado. Para esta curva ocorre o mesmo procedimento apresentado pela curva de 8 [A]. Com o aumento da energia fornecida pelo gerador, observaram-se durante o monitoramento dos testes, poucos pulsos em vazio, assim como uma baixa ocorrência de descargas anômalas e curtos-circuitos. Isto demonstra que a rotação

de 100rpm auxilia na eficiência e estabilidade da usinagem, gerando uma boa amplitude de abertura da fenda de trabalho, assim como um bom aproveitamento da energia aplicada ao processo. Como resultante, isto também significa a ocorrência de melhoria da lavagem das micro partículas.

4.9.2 Resultados sobre a Velocidade de Penetração v_p e o Desgaste Linear Frontal Relativo $\mathfrak{G}_{LF}$ utilizando polaridade negativa

Pela Fig. 44, observa-se nitidamente que, para a curva da corrente de descarga i_e de 2 [A], um aumento da rotação mantém o valor da velocidade linear de penetração v_p constante. Pode-se verificar que o aumento da rotação não influi quando invertida a polaridade do eletrodo-ferramenta (cátodo). A corrente de descarga i_e de 2 [A] possui o mesmo rendimento ao trabalhar com a duração de descarga igual a 12,8 [μ s]. A máxima velocidade linear de penetração 0,007 [mm/min].

Para a corrente de descarga i_e de 4 [A], observa-se ao aumentar a rotação de 25 para 100rpm o aumento do valor de v_p de 0,057 para 0,078 [mm/min]. Da mesma forma que, para o eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio na polaridade positiva, observa-se ao inverter a polaridade do eletrodo-ferramenta que a rotação é eficiente no auxílio da lavagem, resultando em uma menor concentração de micro partículas na fenda de trabalho. Por sua vez, esta menor concentração de micro partículas gera uma correta contaminação da fenda de trabalho, o que resulta na estabilidade do processo.

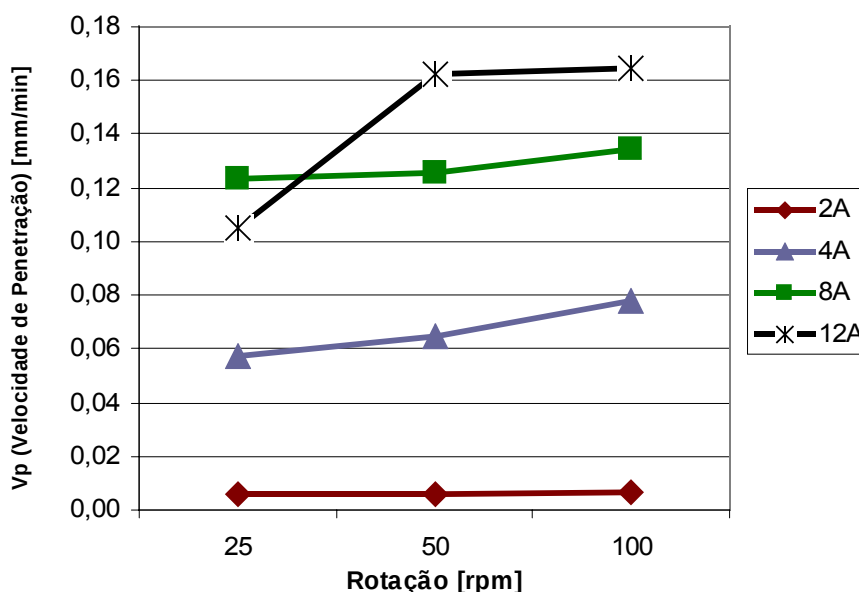


Figura 44: Velocidade linear de penetração (v_p) da liga de titânio em função da variação de rpm para τ ótimo igual a 0,5 - t_e ótimo igual a 12,8 μ s utilizando eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio com polaridade negativa.

Para i_e de 8 [A], um aumento na rotação apresenta um aumento da velocidade linear de penetração de 0,123 para 0,125 [mm/min]. O comportamento da curva está relacionado à estabilidade que ocorre no canal de plasma, quando aumentado o valor da rotação de 25 para 50rpm. Este aumento ocasiona no auxílio da continuidade de fusão de material da peça (ânodo) e ao mesmo tempo auxilia na solidificação do material fundido na cavidade catódica (eletrodo-ferramenta). Esta estabilidade continua, quando aumentado o valor da rotação do eletrodo-ferramenta de 50 para 100rpm sendo v_p de 0,125 [mm/min] para 0,134 [mm/min]. Outro aspecto que provoca o aumento no valor de v_p nesta curva é a eficiência da rotação no auxílio da lavagem, que diminui a concentração de micro partículas na fenda de trabalho, não permitindo uma maior sobrecontaminação da fenda de trabalho. Portanto, na usinagem de pequenos furos, se o fluido dielétrico for renovado devidamente, mesmo não possuindo a pressão adequada, estas partículas metálicas não serão acumuladas na cavidade, não originando arcos e curto circuitos durante a descarga elétrica, tornando a usinagem mais estável devido ao aumento da eficiência das faíscas, resultando em um bom desempenho do processo.

Para i_e de 12 [A], um aumento na rotação apresenta um aumento da velocidade linear de penetração de 0,105 para 0,162 [mm/min]. Da mesma forma que ocorre para a curva de 8 [A], o comportamento da curva está relacionado à estabilidade que ocorre no canal de plasma, quando aumentado o valor da rotação de 25 para 50rpm. Este aumento ocasiona no auxílio da continuidade de fusão de material da peça (ânodo) e ao mesmo tempo auxilia na solidificação do material fundido na cavidade catódica (eletrodo-ferramenta). Esta estabilidade continua, quando aumentado o valor da rotação do eletrodo-ferramenta de 50 para 100rpm sendo v_p de 0,162 [mm/min] para 0,165 [mm/min]. Outro aspecto que provoca o aumento no valor de v_p , nesta curva, é a eficiência da rotação no auxílio da lavagem, que diminui a concentração de micro partículas na fenda de trabalho, não permitindo uma maior sobrecontaminação da fenda de trabalho. Portanto, na usinagem de pequenos furos, se o fluido dielétrico for renovado devidamente, mesmo não possuindo a pressão adequada, estas partículas metálicas não serão acumuladas na cavidade, não originando arcos e curto circuitos durante a descarga elétrica, tornando a usinagem mais estável devido ao aumento da eficiência das faíscas, resultando em um bom desempenho do processo.

A Fig. 45 apresenta o gráfico do comportamento do desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} em função da variação rotação. Para a curva da corrente de descarga i_e de 2 [A], observa-se que um aumento da rotação leva ao decréscimo do desgaste frontal linear relativo, obtendo-se o valor mínimo de ϑ_{LF} de 64% para 50rpm, sendo para esta rotação o melhor valor de v_p alcançado.

Quando aumentada a rotação para 100rpm, a ineficiência da rotação para com a lavagem faz com que o eletrodo-ferramenta (cátodo) desgaste com mais facilidade. Esta maior concentração de micro partículas gera a sobrecontaminação da fenda de trabalho. Como resultante, ocasiona a formação de arcos e curtos circuitos durante a descarga elétrica, o que torna o processo instável, devido à redução da eficiência destas faíscas.

Para a corrente de descarga i_e de 4 [A], há um aumento no desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} a partir do aumento da rotação de 25 para 50rpm, sendo ϑ_{LF} de 75% para 80%. Com o aumento da rotação para 100rpm, o desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} decresce de 80% para 72%, sendo o ϑ_{LF} para o melhor valor de v_p alcançado. Este comportamento se deve à boa estabilidade do canal de plasma para

a rotação de 100rpm, promovendo a sustentação da continuidade de fusão de material na peça (ânodo) e, ao mesmo tempo, favorecendo a solidificação do material fundido na cavidade catódica (eletrodo-ferramenta), devido à expansão do diâmetro do canal próximo a esta região.

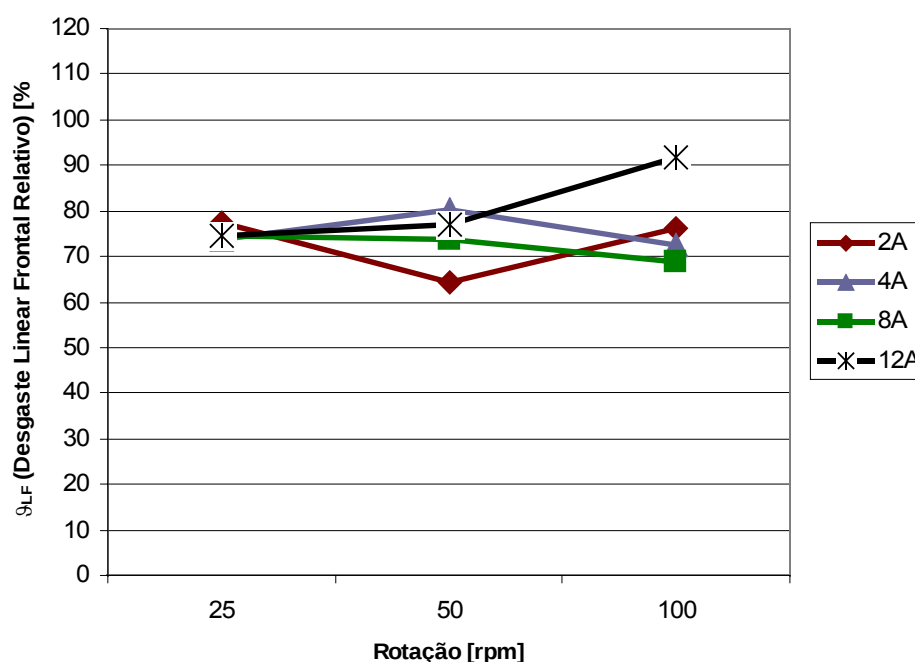


Figura 45: Desgaste frontal linear relativo (ϑ_{LF}) da liga de titânio em função da variação de rpm para τ ótimo igual a 0,5 - te ótimo igual a 12,8 μ s utilizando eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio com polaridade negativa.

Para i_e de 8 [A], um aumento na rotação do eletrodo-ferramenta apresenta um decréscimo do desgaste frontal linear relativo de 25rpm para 50rpm, sendo ϑ_{LF} de 75% para 73%. Com o aumento da rotação para 100rpm, houve um decréscimo de ϑ_{LF} 73% para 68%, sendo o melhor valor de v_p alcançado. Com o aumento da energia fornecida pelo gerador, observou-se, durante o monitoramento dos testes, uma diminuição nos pulsos em vazio, assim como uma baixa ocorrência de descargas anômalas e curtos-circuitos. Isto demonstra uma boa amplitude de abertura da fenda de trabalho, assim como um bom aproveitamento da energia aplicada ao processo.

Observa-se para i_e de 12 [A] um aumento do desgaste frontal linear relativo quando aumentado a rotação de 25 para 50rpm, sendo ϑ_{LF} de 75% para

77%. Com o aumento da rotação para 100rpm, houve um outro aumento de ϑ_{LF} 77% para 92%, sendo para esta rotação o melhor valor de v_p alcançado.

Visando a um aspecto global, ou seja, analisando o melhor resultado da velocidade linear de penetração v_p com o menor valor do desgaste linear frontal relativo ϑ_{LF} , conclui-se que o melhor resultado encontrado para uma duração ótima da descarga t_e de 12,8 [μ s], uma relação de contato ótima τ de 0,5, foi para o eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio na polaridade negativa, utilizando uma corrente de descarga i_e de 12 [A] e uma rotação de 100rpm, sendo que o melhor resultado obtido para v_p foi igual a 0,134 [mm/min] e ϑ_{LF} igual a 68%.

4.10 Comparação do melhor resultado entre modos do gerador da máquina

É possível observar pela Fig. 45 o comportamento da usinagem de melhor resultado utilizando o modo do gerador em isoenergético. Cabe acrescentar que modo isoenergético significa duração constante da duração de descarga t_e especificada pelo operador. A máxima remoção obtida pela velocidade linear de penetração foi de 0,162 [mm/min] para uma corrente de descarga $i_e = 12$ [A] e rotação de 50rpm.

Como resultado comparativo, observa-se o comportamento da usinagem de melhor resultado utilizando o modo do gerador em relaxação. Cabe acrescentar que o modo de relaxação é utilizado em usinagem de acabamento muito fino com potência reduzida e pequena relação de contato ou superfície de trabalho pequena. A máxima remoção obtida pela velocidade linear de penetração foi de 0,042 [mm/min] para uma corrente de descarga $i_e = 12$ [A] e rotação de 50rpm.

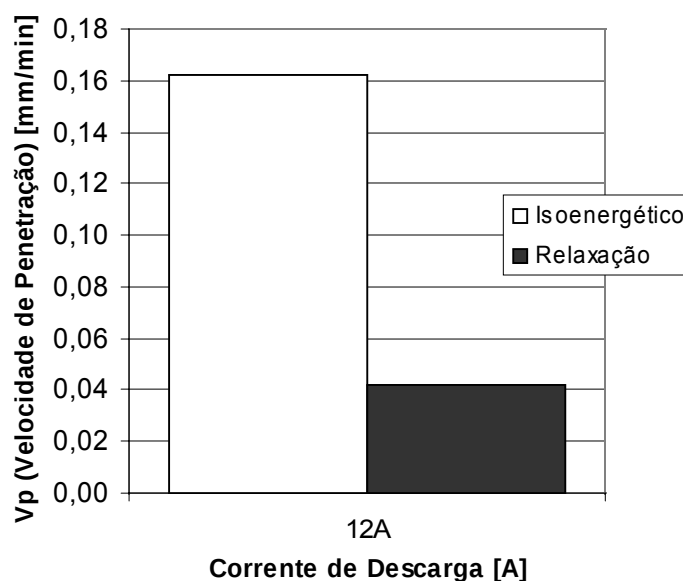


Figura 46: Comparação geradores velocidade linear de penetração v_p para rotação ótima igual a 50rpm - τ ótimo igual a 0,5 - t_e ótimo igual a 12,8 μ s utilizando eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio com polaridade negativa.

É possível observar pela Fig. 46 o comportamento da usinagem de melhor resultado utilizando o modo do gerador em isoenergético, onde se alcançou respectivamente, para $\mathcal{G}_{LF}$ níveis mínimos aproximadamente de 77% para uma corrente de descarga $i_e = 12$ [A] utilizando a rotação de 50rpm.

Como resultado comparativo, pode ser observado da mesma forma o comportamento da usinagem de melhor resultado utilizando o modo do gerador em relaxação, onde se alcançou respectivamente para $\mathcal{G}_{LF}$ níveis mínimos aproximadamente de 11% para uma corrente de descarga $i_e = 12$ [A] utilizando a rotação de 50rpm.

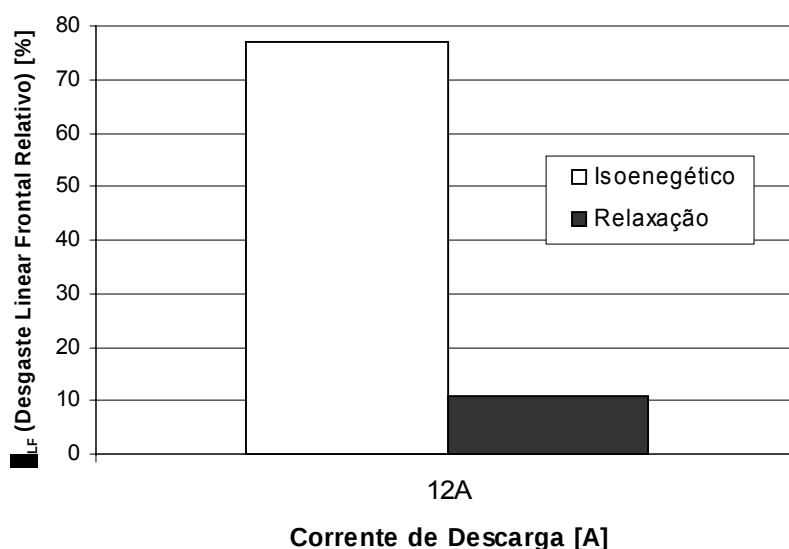


Figura 47: Comparação geradores desgaste linear frontal relativo ϑ_{LF} para rotação ótima igual a 50rpm - τ ótimo igual a 0,5 - t_e ótimo igual a 12,8 μ s utilizando eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio com polaridade negativa.

Quando modificado o modo do gerador de isoenergético para relaxação observou-se, durante o monitoramento dos testes, um aumento nos pulsos em vazios, assim como no aumento de descargas anômalas e curtos-circuitos.

São gerados, em consequência, arcos e curtos circuitos que aumentam o desgaste do eletrodo-ferramenta.

Porém, mesmo possuindo um desgaste baixo do eletrodo-ferramenta, não foi possível obter a mesma remoção do eletrodo-peça através da velocidade linear de penetração, sendo o valor muito baixo, quando comparado com o gerador no modo isoenergético.

Para efeitos gerais de comparação, foi escolhido como melhor resultado o gerador no modo isoenergético.

Na Fig.48 abaixo, está indicada a cavidade do melhor resultado obtido após os ensaios realizados.

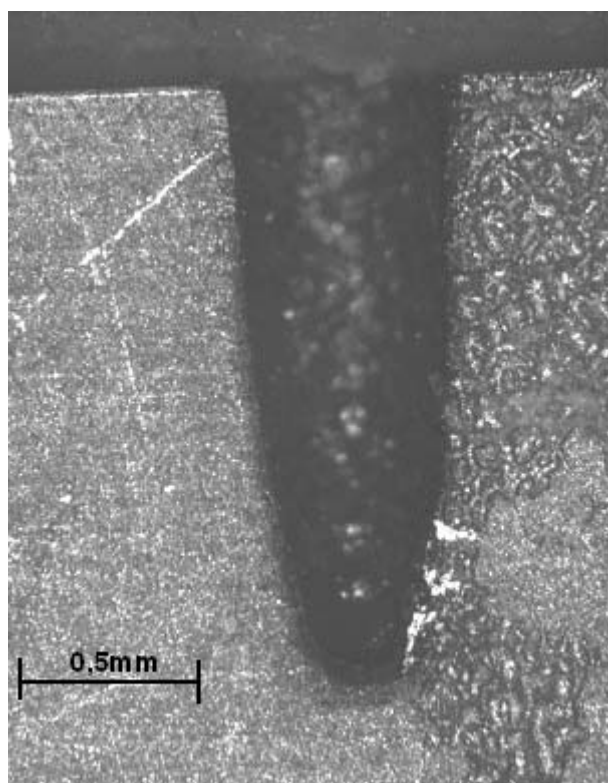


Figura 48: Foto do melhor resultado da obtido para rotação ótima igual a 50rpm - τ ótimo igual a 0,5 - te ótimo igual a 12,8 μ s utilizando eletrodo-ferramenta de cobre-tungstênio com polaridade negativa.

5 CONCLUSÕES

Nesta dissertação de mestrado, observaram-se, durante a investigação da usinabilidade da liga de titânio Ti6Al4V, aspectos que foram a causa de dois sérios problemas: (i) uma grande dificuldade de lavagem das partículas eletroerodidas para fora da fenda de trabalho e (ii) uma inadequada dispersão das descargas ao longo da superfície frontal da ferramenta.

Desta maneira, a operação de EDM desses furos é bastante instável, ou seja, observa-se que a velocidade linear de penetração v_p é bastante baixa e o desgaste frontal linear relativo ϑ_{LF} é muito elevado.

Observou-se que para a obtenção de um resultado satisfatório, deve-se trabalhar com durações de descargas bem curtas, assim como nas durações do intervalo entre estas descargas, pois do contrário, apresentará uma forte tendência no surgimento de arcos e curtos circuitos, quando a duração das descargas for longa, assim como nas durações do intervalo entre estas descargas. Estes arcos aparecem devido à instabilidade da fenda de trabalho.

Outro aspecto que desenvolveu grande influência é a falta de pressão adequada na lavagem através do eletrodo-ferramenta, resultando em uma maior concentração de micro partículas na fenda de trabalho resultando na sobre contaminação da fenda de trabalho.

Certamente, pode-se concluir que a estabilidade da usinagem da liga de titânio (Ti6Al4V) foi afetada por não haver a pressão adequada para este tipo de usinagem, sendo um fator determinante na relação entre os níveis de desgaste do material a ser usinado através da velocidade linear de penetração v_p e do desgaste linear frontal relativo ϑ_{LF} .

A elevação da relação de contato τ de 0,5 para 0,7 e 0,8 na usinagem da liga de titânio (Ti6Al4V) para uma corrente de descarga $i_e = 2, 4, 8, 12$ [A] proporcionou uma diminuição da velocidade linear de penetração v_p e um aumento do desgaste linear frontal relativo ϑ_{LF} . Desta maneira, observou-se que os melhores resultados foram obtidos para o valor de τ igual a 0,5 com a polaridade negativa do eletrodo-ferramenta. Os testes com valores de τ superiores a 0,5 demonstraram resultados bastante insatisfatórios, gerando grande instabilidade do processo.

A instabilidade do processo foi bastante reduzida, a partir do momento em que foi acionada a rotação do eletrodo-ferramenta durante a usinagem. Dos valores de rotação testados, o melhor resultado foi obtido para a rotação de 50rpm na polaridade negativa do eletrodo-ferramenta com cobre-tungstênio.

O gerador no modo de relaxação em comparação com o modo isoenergético apresentou resultados inferiores para a velocidade linear de penetração v_p , porém apresentou resultados superiores para o desgaste linear frontal relativo ϑ_{LF} .

Foram estabelecidos os parâmetros adequados de EDM para a produção de furos de pequenos diâmetros na liga de titânio Ti6Al4V, sendo estes:

- a) corrente de descarga $i_e = 12$ [A];
- b) tensão em aberto $\hat{u}_i = 200$ [V];
- c) duração de descarga $t_e = 12,8$ [μ s];
- d) relação de contato $\tau = 0,5$;
- e) polaridade do eletrodo-ferramenta = negativa;
- f) rotação = 50 [rpm].

6 RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Em função do aprendizado obtido pelo desenvolvimento deste trabalho de dissertação, é possível neste momento, sugerir alguns tópicos para futuros trabalhos de complementação, visando à investigação tecnológica e fundamental do processo de EDM aplicado a liga de titânio Ti6Al4V:

- a) Recomenda-se desenvolvimento de um dispositivo para lavagem, melhorando a pressão do dielétrico na fenda de trabalho;
- b) Testar maiores rotações do eletrodo-ferramenta e sua influência sobre a velocidade linear de penetração v_p e o desgaste linear frontal relativo ϑ_{LF} ;
- c) Analisar aspectos de integridade superficial como, por exemplo, trincas, poros, espessura da camada fundida e micro-dureza da seção transversal usinada com o intuito de se obter um entendimento mais criterioso do comportamento da influência do processo de eletroerosão sobre estes aspectos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, F.L. **Tecnologia de Eletroerosão por Penetração da Liga de Alumínio AMP 8000 e da Liga de Cobre CuBe para Ferramentas de Moldagem de Materiais Plásticos. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica).** Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 147f, 2002.

AMORIM, F.L.; WEINGAERTNER, W.L. **Influence of Duty Factor on the Die-Sinking Electrical Discharge Machining of High-Strength Copper-Based Alloy for Injection Molds**, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, vol. 26, No. 2, pp. 137-144, 2004.

ASM **Handbook, Metallography and Microstructures**, vol. 9. Metals Park, OH: ASM International; 1995.

CONTROLE GEOMÉTRICO – www.labmetro.ufsc.br/disciplinas/EMC5222. Capítulos 01, 02, 03, 04 e 05.

CHARMILLES TECHNOLOGIES, **Manual de Formação da Máquina Roboform 30**. 1995. Lausanne. Suíça.

CHARMILLES TECHNOLOGIES, **Photos**. <http://www.agie-charmilles.com/> Acessado em 2006.

CHEONG, M. **Identification and Control for Micro-Drilling Productivity Enhancement**, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 39, pp. 1539-1561, 1999.

DEUTSCHE TITAN. **Titanium: Applications, Technical Info, Processing**. Available: www.deutschetitan.de [10 jan 2005].

DIBITONTO, D.D. et al. **"Theoretical models of the electrical discharge machining process I: a simple cathode erosion model"**, Journal of Applied Physics, Vol. 66, No. 9, pp. 4095-4103, 1989

DROZDA, Thomas J. **Tool and Manufacturing Engineers Handbook: A Reference Book for Manufacturing Managers, and Technicians**, Chapter 14, Electrical Discharge Machining (EDM).

ERDEN, A. **Role of Dielectric Flushing on EDM Performance**, Proceedings 23th International Machina Tool Design and Research Conference, p. 283, Manchester, 1982.

EUBANK, P.T. et al. **"Theoretical models of the electrical discharge machining process III: the variable mass, cylindrical plasma model"**, Journal of Applied Physics, Vol. 73, No. 11, pp. 7900-7909, 1993

FARUQUI, M.A.; MISHRA, P. **Studies on the Effect of Superposition of Hydrostatic Pressure in Electric Discharge Machining**, Proceedings of 8th AIMTDR Conference, pp. 520, Bombay, 1977

KAHLES, J.F. et al. **"Machining of Titanium Alloys"** Journal of Metals (april 1985), p. 27/35

KAHNG, C.H.; RAJURKAR, K. P. **"Fundamental theories of the parameters of EDM process"**, SME Technical Paper MR77-285, 1977

KAMINSKI, P. **Micro Hole Machining by Conventional Penetration Electrical Discharge Machine**, International Journal of Machine Tools & Manufacture vol. 43, pp. 1143-1149, 2003.

KONIG, W. **"Advanced ceramics - sparks machine ceramics"**, pmi, vol. 23, no.2, pp.96-100, 1991

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **The Electrical Machining Processes – What Demands will they Face in the Future**. International Journal of Electrical Machining, vol. 1, pp. 3-7, Japan, 1996.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **"Fertigungsverfahren - 3: Abtragen und Generieren"**, Springer, Berlin, 1997

KLOCKE, F. **The Process Sequence in Tool and Diemarking**. Proceedings of 12th International Symposium for Eletromachining, vol.1, pp.65-97, Germany, 1998.

LASCOE, O.D. **Handbook of Fabrication Process**, 1 ed, Ohio, USA: Carnes Publication Services Inc., pp. 401-425, 1988.

LEVY, G.N. **"The proper choice of hydrocarbon dielectric fluid for EDM applications, a comprehensive comparison"**, Proceedings of the IX International Symposium for Electromachining, vol. 1 pp. 9-13, 1989

LUO, Y.F. **An Investigation into Actual EDM off-time in SEA Machining**, Journal of Materials Processing Technology vol. 74, pp. 61-68, 1998.

MASUZAWA, T. **State of the Art of Micromachinig**. Annals of CIRP, 49, 2, pp. 473-488, 2000.

MASUZAWA, T. **Kenoyte Paper: Micro EDM**, Proceedings of 13th International Symposium for Eletromachining, vol. 1. pp.3-18, Spain, 2001.

RAJURKAR, K.P., **Fundamental Theories of the Parameters of EDM Processes**.

REISSIG, L.; VÖLKL. R. **Investigation of near surface structure in order to determine process-temperatures during different machining processes of Ti6Al4V**, Scripta Materialia, 50, pp. 121-126, 2004.

ROETHEL, F.; JUNKAR, M.; ZNIDARSIC, M. **The Influnce of Dielectric luids on EDM Process Control**, Proceeding of the 3th International Machinery Monitoring & Diagnostic Conference, Dec. pp.9-12, pp. 20-24, Las Vegas, USA, 1994.

SCHUMACHER, B.M.; DAUW, D.F. **"Milestones of Worldwide EDM Research Activities"** Proceedings of 9th International Symposium for Electromachining, vol.1, pp.240-254, 1989

SCHUMACHER, B.M. **About the Role of Debris in the Gap during Electrical Discharge Machining**, Annals of the CIR, Vol. 39/1. pp. 197-199, 1990.

SODICK REPORT. **Study of High Efficiency EDM to Titanium Alloy**, Vol. 3, pp. 6-9, 1995.

SONI, J.S.; CHAKRAVERTI, G. **Machining Characteristics of Titanium with Rotary Electro-Discharge Machining**, Wear, pp.51-58, 1994.

SONI, J.S.; CHAKRAVERTI, G. **Production of Surface finish and accuracies with rotating electrode in electro-discharge machining**, Proceedings of 14th AIMTDR Conference, pp.297, 1990.

SONII, J.S.; CHAKRAVERTI, G. **Experimental Investigation on Migration of Material during EDM of Die Steel (T 215 Cr12)**, Proceedings AMPT 1993 Conference, p. 755, 1993, Dublin – Ireland.

STOR, M. **"New dielectric medium-isonoplus IME-MH"** Proceedings of the X International Symposium for Electromachining, vol. 1 pp. 161-169, 1992

TANIGUCHI, N. **Current Status in and Future Trends of Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing**, Annals of CIRP, 32, 2, pp. 573-582, 1983.

VAN DIJCK, F. **Physico-mathematical analysis of the electrodischarge machining process**, doctoral thesis, faculty of applied sciences, Department of Mechanics, K.U. Leuven, Belgium, 1973

VDI 3402 **"Elektroerosive bearbeitung - definitionen und terminologie"** VDI - handbuch Betriebstechnik, 1976

VOORT, V. **METALLOGRAPHY Principles and Practice**

ZHAO, W. et al. **Ultrasonic and Electric Discharge Machining to Deep and Small Hole on Titanium Alloy**, Journal of Materials Processing Technology, vol. 120, pp. 101-106, 2002.

ZNIDARSIC, M.; JUNKAR, M. **Deep Small Hole Drilling with EDM**, Proceedings of 4th International Conference and Advanced Manufacturing Systems and Technology, vol1, pp. 527-533, 1996.

ANEXOS

Máquina Ferramenta Utilizada:

