

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

Eng. Eli Jorge da Cruz Junior

A INFLUÊNCIA DO TAMANHO DE GRÃO FERRÍTICO NA INTEGRIDADE SUPERFICIAL DE PEÇAS ERODIDAS

Ilha Solteira

2015

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS ILHA SOLTEIRA

Eng. Eli Jorge da Cruz Junior

**A INFLUÊNCIA DO TAMANHO DE GRÃO FERRÍTICO DA
PEÇA NA INTEGRIDADE SUPERFICIAL DE PEÇAS
ERODIDAS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP - Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.
Área de conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação.

Prof. Dr. Alessandro Roger Rodrigues

Orientador

Prof. Dr. Hidekasu Matsumoto

Coorientador

Ilha Solteira

2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C957a Cruz Junior, Eli Jorge da.
A influência do tamanho de grão ferrítico na integridade superficial de peças erodidas / Eli Jorge da Cruz Junior. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2015
49 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estrutura, 2015

Orientador: Alessandro Roger Rodrigues

Co-orientador: Hidekasu Matsumoto

Inclui bibliografia

1. Processos de Fabricação. 2. Eletroerosão. 3. Integridade superficial.
4. Camada branca.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

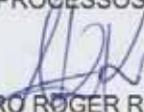
TÍTULO: Influência do tamanho de grão ferrítico na integridade superficial de peças erodidas

AUTOR: ELI JORGE DA CRUZ JUNIOR

ORIENTADOR: Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. HIDEKASU MATSUMOTO

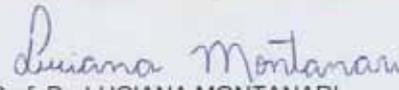
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica ,
Área: MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES

Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos


Prof. Dr. WYSER JOSE YAMAKAMI

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. LUCIANA MONTANARI

Departamento de Engenharia Mecânica / Escola de Engenharia de São Carlos-Usp

Data da realização: 25 de junho de 2015.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, fonte de toda sabedoria e conhecimento.

Ao Prof. Dr. Alessandro Roger Rodrigues pela orientação do trabalho e pela oportunidade de trabalharmos juntos desde o primeiro ano de graduação.

Ao Prof. Dr. Hidekasu Matsumoto, pela coorientação do trabalho e também por todo suporte e apoio não apenas na área acadêmica. Palavras não são suficientes para agradecer todo apoio.

Ao Prof. Dr. Juno Gallego por todo suporte ao longo do trabalho.

Aos amigos Adriana Bruno Norcino e Fernando Brandão de Oliveira pela amizade. O amigo em todo tempo ama e na angustia faz-se um irmão. Seremos sempre um tripé

A toda família do Grupo de Pesquisa em Usinagem pelo apoio incondicional, amizade, companhia, churrascos. Pelo crescimento intelectual e profissional que me proporcionaram. Vocês marcaram minha história.

Agradeço aos técnicos Marino e Diego por todo o auxílio de laboratório na utilização dos aparelhos e dos materiais necessários. E por sempre estarem dispostos a ajudar no andamento do trabalho.

Aos meus amigos Daniel de Carvalho Secco e Flávio Henrique Manareli. Suas colaborações foram muito importantes.

A minha esposa Taiele Rodrigues da Silva Cruz por estar sempre ao meu lado me apoiando e incentivando mesmo nas horas mais difíceis.

Aos meus pais Eli Jorge da Cruz e Vanda Maria Fogaça Rosa da Cruz. Pelo legado que me deixaram. Tudo o que sou devo a vocês.

Aos meus segundos pais Paulino e Perpétua, por todo apoio.

Aos meus irmãos e minhas cunhadas Daniel Rosa da Cruz, Samuel Rosa da Cruz, Alessandra Cruz e Fernanda Cruz. Obrigado por tudo.

A toda minha família da Igreja Batista Central em Ilha Solteira por me acolherem e tornarem minha estadia em Ilha Solteira mais agradável.

A todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta para o desenvolvimento deste trabalho e que, por descuido, tenha esquecido de mencionar.

“O temor do Senhor é o princípio da Sabedoria”

RESUMO

Eletroerosão é um processo não convencional de usinagem que se baseia na remoção de material por sucessivas descargas elétricas. Durante a descarga, as temperaturas podem atingir 12.000°C, seguidas de um rápido resfriamento, criando uma zona termicamente afetada na superfície da peça. Essa zona possui propriedades diferentes com relação ao material base como: dureza superior, composição microestrutural e ainda podem existir microtrincas que afetarão o desempenho da peça usinada. Este trabalho estudou a influência do tamanho de grão da peça usinada na integridade superficial resultante. Para os ensaios utilizou-se um aço baixo carbono comercialmente conhecido como COS AR 60 com tamanhos de grãos ferríticos distintos. Avaliou-se a integridade superficial a partir de um perfil de microdureza e imagens da microestrutura resultante. Também foi avaliada a formação de microtrincas, bem como suas espessuras. Verificou-se que a condição de desbaste resulta em camadas brancas de maiores espessuras e ainda que os materiais com grãos ultrafinos usinados sob mesma condição que aqueles com grãos convencionais apresentam camadas brancas menores. A microdureza é maior na camada branca quando comparada com as outras camadas. Os materiais com grãos ultrafinos apresentam uma transição de microdureza mais suave quando comparada a dos grãos convencionais, podendo melhorar o desempenho da peça em serviço sob a óptica da propagação de trincas.

Palavras-chave: Integridade superficial. Eletroerosão. Camada branca. Aços com grãos ultrafinos.

ABSTRACT

Electrical Discharge Machining (EDM) is a non-conventional machining process which is based on material removal by successive electrical discharges. During each discharge temperatures can reach 12,000 °C, followed by rapid cooling, creating a heat-affected zone on the workpiece surface. This zone has different properties with respect to the base material (bulk) such as higher hardness, microstructural composition and may still exist microcracks that will affect the performance of the machined part. This research determined the influence of workpiece grain size on the machined surface integrity. Low carbon steel named commercially as COS AR 60 with different ferritic grain sizes was applied to machining tests. Surface integrity of the machined subsurface (white layer, heat-affected zone and bulk) was evaluated by considering microhardness gradient, microstructure composition and microcracks formation. The results show that the roughing condition increases the white layer but it is smaller for ultrafine-grained material. The hardness is highest in white layer when compared to other layers. The materials with ultrafine grains present a softer microhardness transition as compared with the conventional grains, which may improve the performance of the part in service from the standpoint of crack propagation.

Palavras-chave: Surface Integrity. Electrical discharge machining. White layer. Ultrafine-grained steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos processos de fabricação.....	11
Figura 2 - Circuito RC de Lazarenko.	14
Figura 3 - Fenômeno de eletroerosão.	15
Figura 4 - Início da centelha	16
Figura 5 - Perfil de um pulso.	17
Figura 6 - Efeito da corrente de pico	18
Figura 7 - Efeito da polaridade.	20
Figura 8 - GAP frontal e lateral.....	21
Figura 9 - Comparativo entre parâmetros de usinagem convencional e de eletroerosão.....	22
Figura 10 - Classificação da integridade superficial.	24
Figura 11 - Camadas características geradas na peça pela eletroerosão.....	25
Figura 12 - Microtrinca na camada branca de uma peça erodida.	26
Figura 13 - Fixação do corpo de prova na máquina de eletroerosão	30
Figura 14 - Micrografia do COS AR 60 (a) “como recebido” e (b) grãos ultrafinos	32
Figura 15 - Corpo de prova do aço com grãos ultrafinos.....	32
Figura 16 - Ferramenta de cobre eletrolítico.	33
Figura 17 - Amostra embutida para análise da microdureza e microestrutura da superfície erodida.....	34
Figura 18 - Esquema de medição da camada branca e microdureza.	35
Figura 19 - Microestrutura para condição C1 a) CR b) GUF.	36
Figura 20 - Microestrutura para condição C2 a) CR b) GUF.	37
Figura 21 - Variação da camada branca com os fatores de controle	39
Figura 22 - Interação entre a microestrutura do material da peça e as condições de usinagem sobre a profundidade da camada branca.....	40
Figura 23 - Microdureza para condição C1 - CR	41
Figura 24 - Microdureza para condição C1 - GUF.....	41
Figura 25 - Variação da microdureza com o material	43
Figura 26 - Microtrincas para condição C1 a) CR b) GUF	44
Figura 27 - Incrustação na camada branca para condição C1-GUF	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condições de Usinagem.	29
Tabela 2 - Especificação química do aço COS AR 60 utilizado nos testes de usinagem (% em peso).....	31
Tabela 3 - Espessuras das camadas brancas.....	36
Tabela 4 - Quadro ANOVA sobre a resposta espessura da camada branca ($R^2 = 92,15\%$)	38
Tabela 5 - Quadro ANOVA sobre o incremento de microdureza entre o <i>bulk</i> e a camada branca ($R^2 = 55,40\%$).....	42

SUMÁRIO

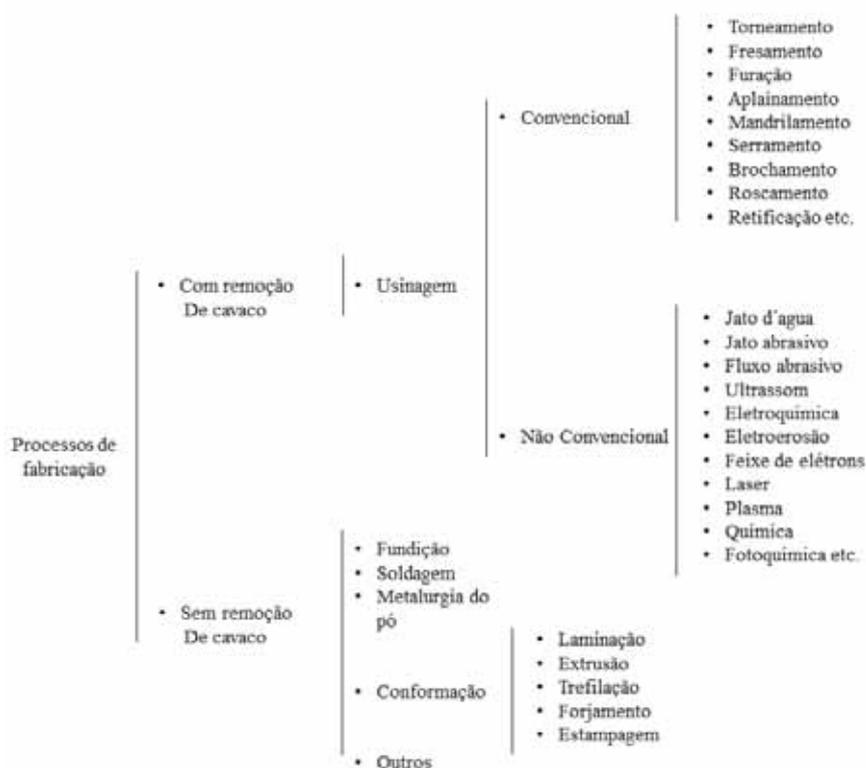
1	INTRODUÇÃO	11
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	13
2.1	ELETROEROSÃO	13
2.1.1	Estado da arte.....	13
2.1.2	Fenomenologia.....	14
2.1.3	Parâmetros.....	17
2.1.4	Comparação usinagem convencional e eletroerosão	22
2.1.5	Relações básicas.....	22
2.2	INTEGRIDADE SUPERFICIAL.....	24
2.2.1	Camadas afetadas.....	24
2.2.2	Influência da microestrutura na eletroerosão.....	27
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	29
3.2	BANCO DE ENSAIOS	30
3.3	CORPOS DE PROVA.....	31
3.4	FERRAMENTA	33
3.5	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	33
3.5.1	Ensaio de usinagem	33
3.5.2	Microdureza e microestrutura.....	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1	MICROESTRUTURA	36
4.2	MICRODUREZA	40
4.3	MICROTRINCAS.....	44
5	CONCLUSÕES	46
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

Em países industrializados, a atividade manufatureira corresponde por 20% a 30% do Produto Interno Bruto (KALPAKJIAN, 1995 citado por MACHADO et al., 2009). Pode-se entender por manufatura processos de transformação de matérias-primas em produtos acabados seguindo planos bem organizados em todos os aspectos (MACHADO et al., 2009). O conceito de fabricação refere-se aos processos envolvidos na manufatura.

A usinagem pode ser definida como um processo de fabricação onde uma porção de material é removida da peça, por cisalhamento, na forma de cavaco (FERRARESI, 1970). Outra definição mais abrangente seria apenas um processo de fabricação com remoção de cavaco, visto que em alguns processos não convencionais de usinagem, o material removido não sofre cisalhamento. A Figura 1 ilustra a classificação de processos de usinagem.

Figura 1 – Classificação dos processos de fabricação



Fonte: Machado et al. (2009).

Os processos não convencionais de usinagem passaram a se desenvolver de forma significativa a partir da década de 1940. Dentre as vantagens desses processos está a capacidade de produzir peças de geometria complexa em materiais de difícil usinabilidade (MACHADO et al., 2009).

O processo de eletroerosão tem ganho bastante popularidade, visto que podem ser obtidas peças com geometrias bastante complexas as quais seriam muito difíceis serem obtidas por processos convencionais (MAHARDIKA, 2008). Durante o processo de eletroerosão, as alterações superficiais da peça, como rugosidade e camadas termicamente afetadas, podem ser controladas. Pode-se ainda, com um grau elevado de precisão, determinar as tolerâncias geométricas e dimensionais que serão alcançadas (JEONG, 2007).

Algumas características da eletroerosão permanecem incertas por se tratar de um processo relativamente recente quando comparado a outros processos de usinagem convencionais. Pode-se, por exemplo, citar a influência de propriedades mecânicas e da microestrutura do material da peça sobre a integridade superficial da peça, visto que usualmente são utilizadas apenas propriedades térmicas e elétricas para prever o comportamento de peças erodidas (MAHARDIKA, 2008).

Sabendo-se que poucos autores estudaram a influência da microestrutura da peça no processo de eletroerosão, este trabalho tem como objetivo determinar experimentalmente a influência do tamanho de grão ferrítico do material sobre as camadas afetadas de cavidades erodidas, tanto em condições de desbaste quanto de acabamento. Deseja-se observar alterações tanto na espessura das camadas, quanto nas suas configurações microestruturais.

O trabalho é composto de uma revisão da literatura seguido pelos materiais e métodos, resultados e discussão e, por fim, as conclusões observadas ao longo do trabalho. Também são apresentadas sugestões de trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 ELETROEROSÃO

A eletroerosão, ou usinagem por descargas elétricas (*Electrical Discharge Machining* – EDM) é um dos processos não convencionais de usinagem mais utilizados (SRIVASTAVA, 2013). Baseia-se na remoção de material por sucessivas descargas elétricas. Materiais de qualquer dureza podem ser usinados, contanto que sejam condutores elétricos (BERI et al., 2014). Durante o processo, a ferramenta não entra em contato com a peça, eliminando problemas característicos da usinagem convencional como vibrações e dificuldades de fixação.

Nas últimas quatro décadas, o processo de eletroerosão evoluiu tornando-se um dos principais processos da indústria para fabricação de peças de alta complexidade e materiais de difícil usinabilidade (AMORIN, 2006). Suas maiores aplicações são: fabricação de matrizes para estampagem, forjamento, feiras para trefilação, extrusão, moldes para injeção de plástico, enfim, para o setor de ferramentaria em geral.

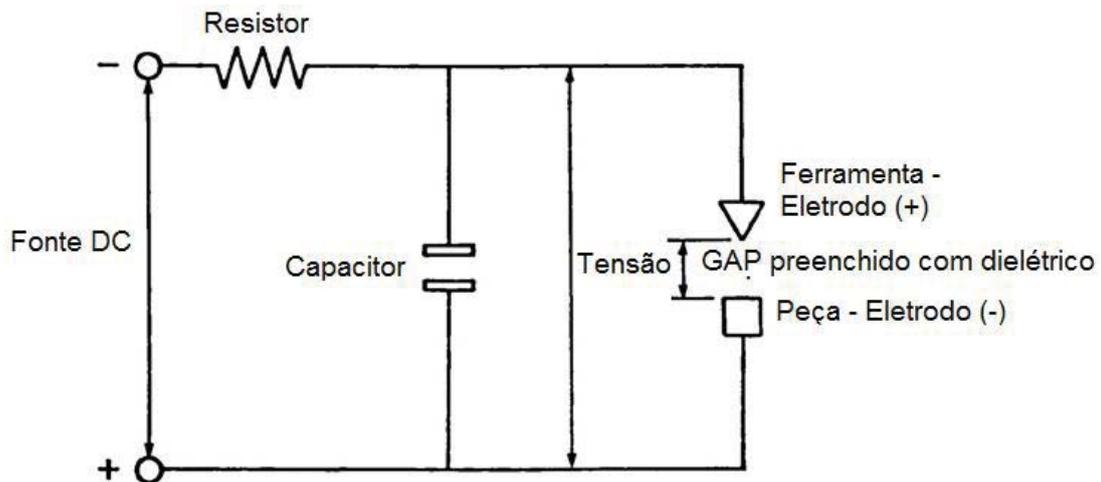
2.1.1 Estado da arte

Os primeiros estudos sobre eletroerosão datam de antes de 1770, quando o químico inglês Joseph Priestly observou o efeito erosivo causado por descargas elétricas sobre um material condutor. Por volta de 1930, foram feitas algumas tentativas de usinar metais e diamantes com descargas elétricas. Consistia de um sistema alimentado por uma fonte de corrente contínua (DC). O processo não era muito preciso devido ao superaquecimento da peça (HO, 2003).

Somente em 1943, na Universidade de Moscou, começou-se a aplicar os efeitos observados por Priestly. Eles desenvolveram um processo de usinagem controlado para materiais de difícil usinabilidade através da vaporização de material na superfície do metal. Eles utilizaram um sistema resistivo-capacitivo (RC) como fonte de energia. Esse modelo serviu de base

para diversos outras pesquisas. A Figura 2 mostra o circuito RC utilizado por Lazarenko.

Figura 2 – Circuito RC de Lazarenko



Fonte: HO (2003).

Na mesma época, os Estados Unidos começaram a aplicar a eletroerosão para remover brocas quebradas em válvulas hidráulicas. Baseados nesses conceitos, desenvolveu-se a máquina de eletroerosão por tubo de vácuo. Eles também desenvolveram um circuito eletrônico para controlar de forma eficiente o espaçamento entre a ferramenta e a peça, conhecida como *gap*.

Na década de 1980, com o advento do controle numérico computadorizado (CNC), finalmente alcançou-se um avanço significativo nos processos de eletroerosão. Atualmente, trata-se de um processo bastante estável e possível de ser controlado (SANJEEV et al., 2009).

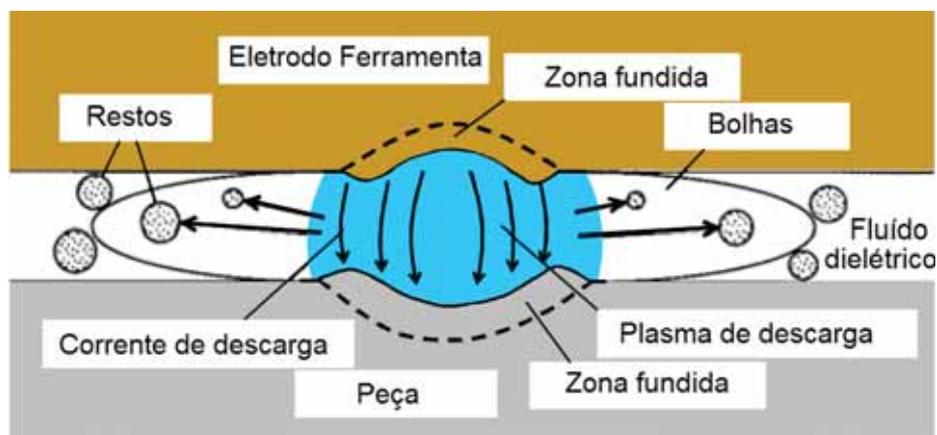
2.1.2 Fenomenologia

O mecanismo de remoção de material no processo de eletroerosão baseia-se na transformação de energia elétrica em energia térmica ao longo de

sucessivas descargas elétricas (centelhas). Elas ocorrem entre uma ferramenta, chamada eletrodo, e uma peça imersos em um fluido dielétrico. Como já citado, denomina-se *gap* o espaçamento entre o eletrodo e a peça (TSAI, 2003).

A energia térmica cria um canal de plasma entre o catodo e o anodo (eletrodo e a peça) com temperaturas entre 8.000 e 12.000 °C, podendo em alguns casos atingir 20.000 °C. Parte do material da superfície, tanto do eletrodo quanto da peça, aquece e funde (e/ou vaporiza). Quando a fonte de corrente direta é desligada, o canal de plasma é quebrado, a frequência com que a fonte liga e desliga varia entre 20.000 e 30.000 Hz. Quando o canal de plasma é quebrado, a temperatura cai abruptamente (HO, 2003). Parte do material é removida pelo fluxo do fluido dielétrico e parte solidifica novamente sobre a superfície (KUNIEDA et al., 2005). O formato do eletrodo é simétrico ao da superfície requerida da peça. A Figura 3 ilustra esquematicamente o princípio de remoção de material pelo processo de eletroerosão.

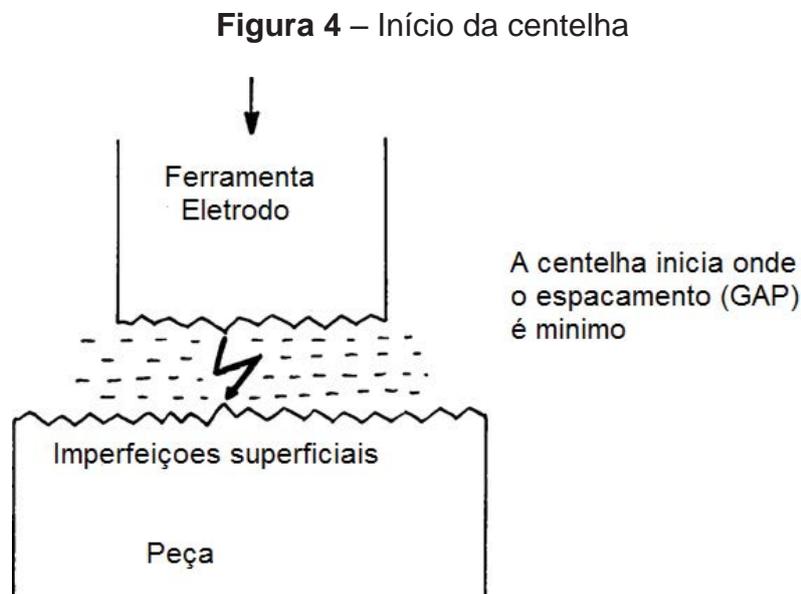
Figura 3 – Fenômeno de eletroerosão



Fonte: Kunieda et al. (2005).

O efeito isolante do dielétrico é importante, pois ajuda a evitar a eletrólise do eletrodo durante o processo de eletroerosão. A centelha inicia no ponto onde o espaçamento entre eletrodo e peça é mínimo, conforme Figura 4. A alta tensão quebra o efeito isolante do dielétrico. O fluido dielétrico concentra a energia de descarga em uma área bastante pequena. Ele também resfria o

eletrodo e ainda remove o material fundido sobre a superfície da peça, o qual sai no formato aproximado de esferas (SANJEEV et al., 2009).



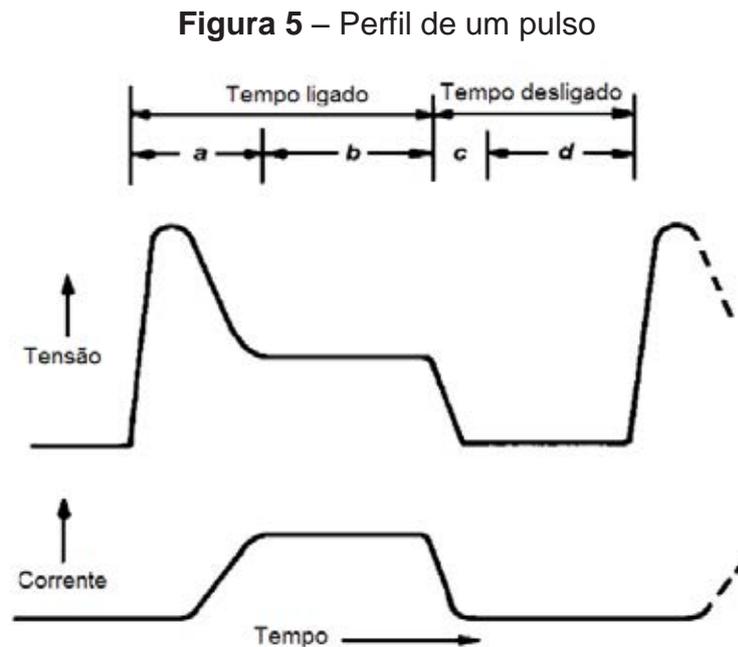
Fonte: HO (2003).

Quando se utilizava apenas um circuito RC, não se obtinha uma boa taxa de remoção de material. A maior parte do tempo de usinagem era gasto recarregando o capacitor entre as sucessivas descargas. No início da centelha, ocorria um pico de corrente seguido de uma queda abrupta. A temperatura resultante do pico de corrente era muito maior do que aquela necessária para remover material, resultando em danos a superfícies da peça e do eletrodo (HO, 2003).

Nos processos atuais, utiliza-se um gerador de pulsos controlado. Esse sistema permite controlar o pico de corrente e a duração do pulso melhorando a eficiência do processo. Ainda pode-se ajustar parâmetros, ou condições de usinagem, que possibilitem o resultado esperado.

Quando o eletrodo se afasta da peça, a tensão é aquela referente ao circuito aberto. Conforme o eletrodo se aproxima da peça, em um determinado momento o dielétrico começa a ionizar, a tensão diminui chegando a um patamar intermediário e a corrente começa a aumentar. Durante o pulso, a corrente e a tensão permanecem em patamares definidos. Após o pulso, ainda

há uma fase de desionização na qual a corrente e a tensão vão para zero e permanecem por um curto período de tempo (HO, 2003). A Figura 5 apresenta uma função mais detalhada da tensão e da corrente ao longo de cada pulso, sendo: (a) tempo de ionização, (b) tempo da descarga, (c) tempo de desionização e (d) tempo inativo.



Fonte: HO (2003).

2.1.3 Parâmetros

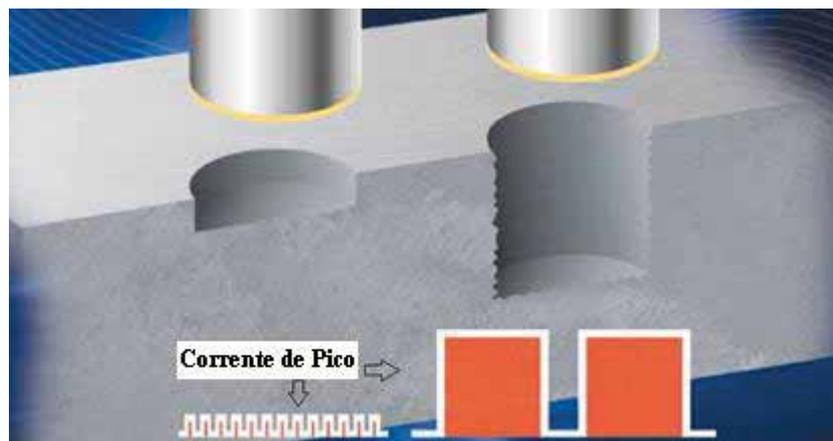
Tensão de Descarga

A tensão de descarga está relacionada ao *gap* e à capacidade isolante do fluido dielétrico. Durante a centelha, a tensão decresce até um patamar intermediário. Essa tensão irá determinar o *gap* entre o eletrodo e a peça. Maiores tensões aumentam o *gap*, melhorando o processo de lavagem e estabilizando o corte (KANSAL et al., 2005). A taxa de remoção de material, a taxa de desgaste do eletrodo e a rugosidade também aumentam, pois incrementando a tensão, ocorre maior aporte energético imposto sobre a peça.

Corrente de Pico

É a quantidade de energia utilizada durante o processo de eletroerosão medidos em Ampère (A); este é o principal parâmetro no processo. Durante a descarga, a corrente aumenta até um patamar que será a corrente de pico, que deve ser proporcional à área de corte. Altas correntes são utilizadas em operações de desbaste ou em superfícies com área de corte grande. Aumentando-se a corrente, aumenta-se a taxa de remoção de material, porém obtém-se superfícies extremamente rugosas e grande taxa de desgaste do eletrodo (STORR, 2007). A Figura 6 esquematiza a relação entre amplitude de corrente, rugosidade e tolerâncias da superfície erodida.

Figura 6 – Efeito da corrente de pico



Fonte: Storr (2007).

A cavidade será uma réplica espelhada do eletrodo; se este desgastar de forma excessiva, haverá problemas quanto a tolerâncias dimensionais e geométricas do processo (HO, 2003). Uma combinação entre uma boa taxa de remoção de material e mínimo desgaste é possível com o ajuste de diversos parâmetros como corrente, frequência e polaridade.

Duração do Pulso e Tempo de Pausa (T_{on} e T_{off})

Cada ciclo é composto por um tempo onde o pulso está ligado e outro desligado, tempos expressos em microssegundos (μs). Todo o processo de

erosão ocorre durante o tempo onde o pulso está ligado. A duração do pulso e o número de ciclos por segundo (frequência) são muito importantes. A taxa de remoção de material é diretamente proporcional à energia aplicada durante o tempo de pulso ligado (SINGH, 2005). Essa energia é controlada pela corrente de pico e a duração do pulso. Quanto maior for a duração do pulso, maior a quantidade de material fundido e/ou vaporizado da superfície do material. Aumentando-se a duração do pulso, maior será a quantidade de energia (calor) transferida para peça; isso significa que afeta uma camada maior no material. As camadas afetadas serão abordadas no item 2.2.

A duração do pulso não deve ultrapassar um determinado limite, obtidos experimentalmente, dependendo das condições de usinagem, material da ferramenta, peça etc. Assim, deve-se encontrar qual é o tempo mais otimizado para o material a ser usinado, a operação a ser feita e o material do eletrodo. Quando o tempo ultrapassa esse limite, a taxa de remoção começa a diminuir, ou seja, se o tempo for muito longo, o processo perde eficiência. Isso se deve ao fato de que a taxa de remoção de material não é constante ao longo do pulso. Ela aumenta e depois passa a diminuir. O ideal, portanto, é fazer um ajuste entre tempo de pulso e frequência para obter-se uma boa eficiência no processo (KLOCKE et al., 2004).

O tempo de pulso desligado irá afetar a velocidade do processo e a estabilidade da usinagem. Em teoria, quanto menor esse tempo, mais veloz o processo, porém se este for muito pequeno, o material fundido sobre a superfície do material não será expelido. Esse efeito dificulta a desionização do fluido, fazendo com que a centelha fique instável.

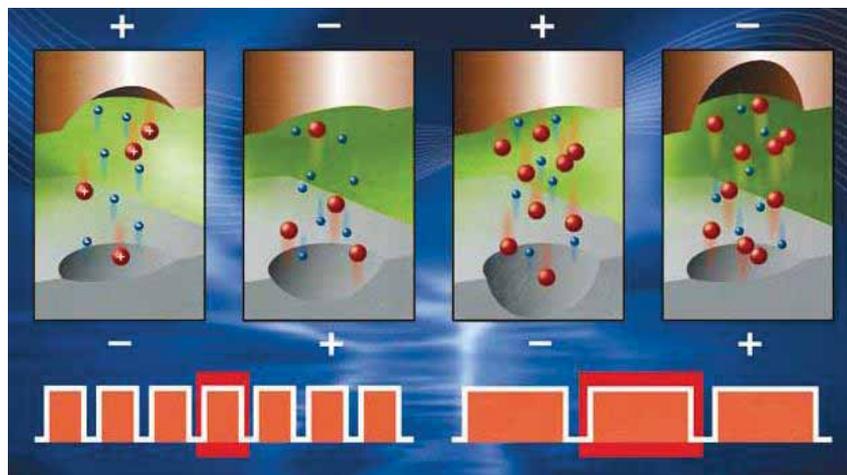
Forma de Onda do Pulso

A forma de onda do pulso mais usual é a retangular, porém com o avanço tecnológico nos geradores de pulso é possível alterar essa forma. Outros tipos de geradores de pulso introduzem um primeiro pulso com alta tensão e baixa corrente poucos microssegundos antes do pulso principal a fim de facilitar a ignição (SANJEEV et al., 2009).

Polaridade

A polaridade do eletrodo pode ser tanto positiva quanto negativa. O canal de plasma formado é composto por íons e elétrons (representados em vermelho e azul, respectivamente, conforme Figura 7). Como o elétron possui uma massa muito menor do que a do íon, ele apresenta uma reação mais rápida, assim o eletrodo ligado ao polo positivo sofre uma perda de massa maior. No caso de operações de acabamento, liga-se o polo negativo à peça e trabalha-se com pulsos de pequena duração.

Figura 7 – Efeito da polaridade



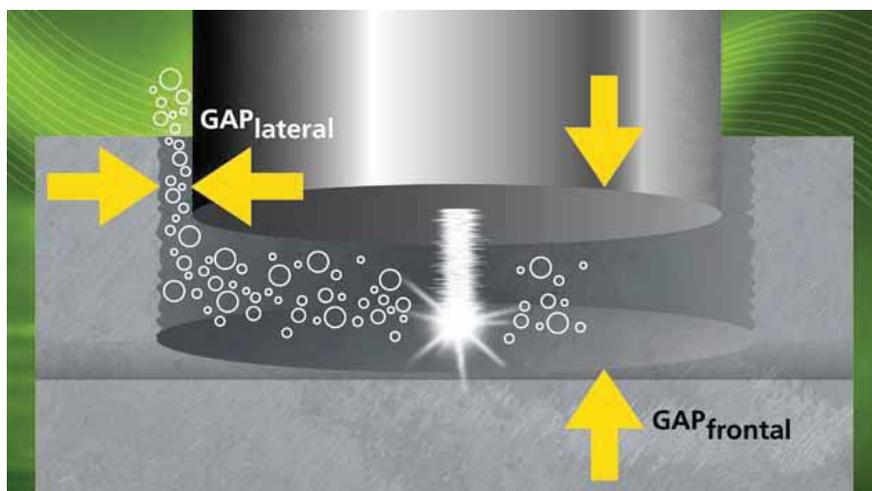
Fonte: Storr (2007).

Quando se trabalha com pulsos de longa duração a situação inverte, uma vez que a proporção do fluxo de íons aumenta com o aumento do tempo de pulso. Em geral, a polaridade é determinada através de experimentos e depende do material do eletrodo e da ferramenta. Algumas máquinas modernas alternam a polaridade dos pulsos ao longo do processo. Por exemplo, a cada quinze pulsos com uma polaridade tem-se um pulso na polaridade invertida (HO, 2003).

Gap do Eletrodo

Denomina-se *gap* o espaçamento que existe entre a ferramenta e a peça, o qual é preenchido com fluido dielétrico. Os servomecanismos da máquina são de grande importância no processo de eletroerosão; suas funções são controlar de forma precisa o *gap* ajustado. Para que o processo seja eficiente, é importante que se tenha estabilidade e velocidade de reação no sistema. Folgas nos mecanismos de deslocamento são indesejadas. Na Figura 8 nota-se a distinção entre o chamado *gap* frontal e o *gap* lateral.

Figura 8 – Gap frontal e lateral



Fonte: Storr (2007).

Tipo de Lavagem

As características básicas de um fluido dielétrico são: Alto poder isolante (dielétrico), rápida recuperação após a ionização, alta severidade e capacidade de lavagem (baixa viscosidade). A taxa de remoção de material e a taxa de desgaste da ferramenta são afetadas pelo tipo de fluido dielétrico e pelo processo de aplicação.

A maioria dos fluidos dielétricos é composta por hidrocarbonetos ou água desionizada. Esta última é bastante utilizada em eletroerosão de corte a fio (*wire EDM*) ou em processos de penetração de alta precisão devido à sua

baixa viscosidade. O fluido dielétrico escoia através do *gap* removendo as partículas sólidas decorrentes da eletroerosão ao longo do processo. Ele resfria a região onde ocorre a centelha controlando a temperatura da peça.

2.1.4 Comparação entre usinagem convencional e eletroerosão

Fazendo-se um comparativo entre os parâmetros de usinagem de um processo convencional (por exemplo, torneamento) e os da eletroerosão, nota-se que o número de variáveis a ser controlado na eletroerosão é muito maior, tornando o processo mais complexo, conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Comparativo entre parâmetros de usinagem convencional e de eletroerosão

Usinagem Convencional	Eletroerosão
Velocidade de corte	Tensão de descarga
Profundidade de usinagem	Corrente de pico
Avanço por rotação	Duração do pulso
	Tempo de pausa
	Forma de onda
	Polaridade
	<i>Gap</i> do eletrodo
	Tipo de Lavagem

Fonte: Próprio autor

2.1.5 Relações básicas

A polaridade, o tempo de pulso ligado e desligado e a corrente de pico são os principais parâmetros de processo. Eles podem ser expressos em relações como fator de serviço (*duty factor*), frequência de pulso (*pulse frequency*) e corrente média (*average current*).

Fator de Serviço

O fator de serviço é a relação entre a duração do pulso e o tempo total do ciclo medido em porcentagem (eq.1). Em geral, quanto maior o fator de serviço, maior a eficiência do processo (taxa de remoção de material). O tempo total do ciclo consiste na soma da duração do pulso e o tempo de pausa.

$$Fator\ de\ Serviço\ (\%) = \frac{Duração\ do\ pulso\ (\mu s)}{Tempo\ total\ do\ ciclo\ (\mu s)} \quad (1)$$

Frequência de Pulso

A frequência de pulso é o número de pulsos (centelhas) produzido durante um segundo (eq. 2). Maiores frequências geram superfícies com melhor acabamento. Aumentando-se o número de ciclos por segundo, diminui-se o tempo de pulso ligado. Pequenos pulsos removem uma quantidade muito pequena de material e criam pequenas cavidades sobre a superfície do material. Esses fenômenos fazem com que o acabamento superficial seja melhor.

$$Frequência\ de\ Pulso\ (kHz) = \frac{1000}{Tempo\ total\ do\ ciclo\ (\mu s)} \quad (2)$$

Corrente média

A corrente média é a corrente disponível para cada pulso a partir da fonte de alimentação (eq. 3). Ela é a média da corrente da centelha medida ao longo de todo ciclo.

$$Corrente\ Média\ (A) = Fator\ de\ Serviço\ (\%) \times Corrente\ de\ Pico\ (A) \quad (3)$$

2.2 INTEGRIDADE SUPERFICIAL

O termo integridade superficial é utilizado para descrever a qualidade da superfície; desta forma engloba um grande número de alterações sofridas por ela. Porém, o estudo não está limitado apenas à superfície, mas também à camada mais interna do material (MACHADO et al., 2009). A Figura 10 ilustra um quadro resumo das variáveis relacionadas à integridade superficial.

Figura 10 – Classificação da integridade superficial



Fonte: Machado et al. (2009).

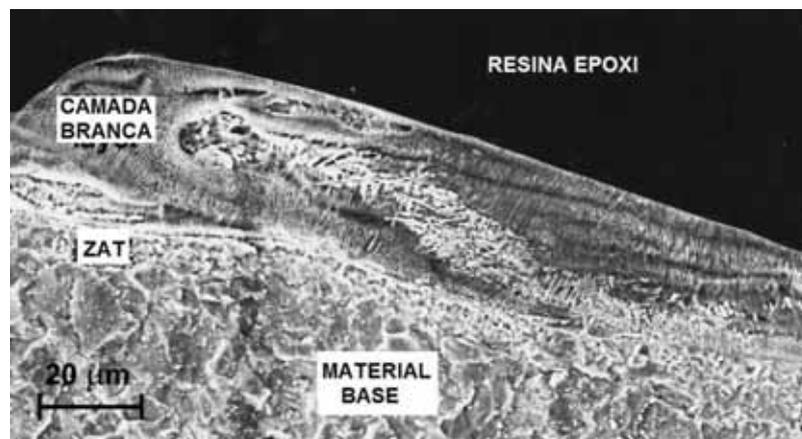
Pensando-se nas principais aplicações da eletroerosão, torna-se importante avaliar a integridade superficial. Em um molde, por exemplo, a integridade superficial é de suma importância. Do ponto de vista do acabamento, a rugosidade do molde será transferida para o produto dele fabricado. Quanto às alterações subsuperficiais, trincas e tensões residuais de tração diminuem a vida útil do molde, devido a carregamentos cíclicos e fadiga. A eletroerosão altera não somente a superfície do material, mas também a subsuperfície (BERI, 2014).

2.2.1 Camadas afetadas

Por ser um processo de remoção térmica em altíssimas temperaturas, a camada superficial do material é influenciada devido às transformações

metalúrgicas. Superfícies submetidas à eletroerosão apresentam regiões características, das quais podem-se destacar a camada fundida e solidificada novamente, ou camada branca, a zona afetada termicamente (ZAT) e o material de base não afetado termicamente. Cada uma dessas zonas possui propriedades distintas, e o conhecimento dessas propriedades é de suma importância para o bom desempenho da peça em serviço. A Figura 11 ilustra as camadas características geradas na peça pela eletroerosão.

Figura 11 - Camadas características geradas na peça pela eletroerosão.



Fonte: Cusanelli et al. (2003).

Diferentes condições de usinagem afetam diretamente a espessura da camada afetada e, conseqüentemente, a qualidade superficial do material (ARANTES, 2001).

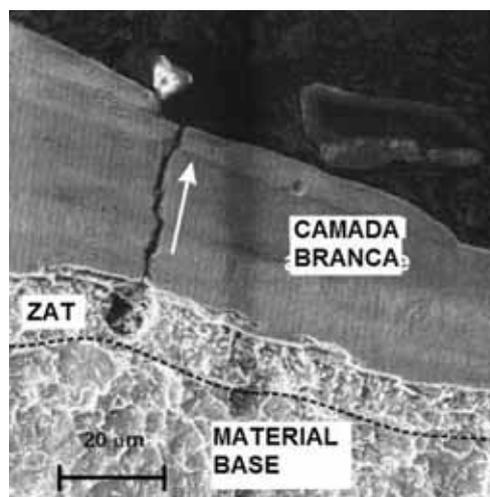
Camada Branca

A camada branca é resultado do material que fundiu na superfície e não foi expelido, solidificando novamente. Recebe esse nome devido a sua resistência à corrosão em materiais ferrosos. Ela é composta por várias camadas metalúrgicas e sua composição e espessura dependem das condições de usinagem, tipo de fluido dielétrico, material da peça etc (EKMEKCI, 2007).

A camada branca é composta por subcamadas com microestrutura dendrítica e colunar com diferentes tamanhos (GHANEM, 2003). Ela consiste basicamente de austenita retida com algumas subcamadas de martensita (BLEYS, 2006).

Dentre as características da camada branca, pode-se destacar a alta dureza e resistência à corrosão. Porém, ao longo da camada branca podem surgir microtrincas, consequência do resfriamento rápido, que afetarão o funcionamento de peças erodidas. Outra explicação é que o volume da martensita é superior ao da austenita, assim ao longo do resfriamento devido à configuração das fases, as trincas surgem na interação entre austenita e martensita. Ainda pode-se citar como desvantagem tensões residuais de tração que tendem a propagar as microtrincas (CUSANELLI et al. , 2003). A Figura 12 apresenta uma microtrinca na camada branca.

Figura 12 - Microtrinca na camada branca de uma peça erodida



Fonte: Cusanelli et al. (2003).

Quanto à composição química da camada branca, ocorre um aumento no percentual de carbono decorrente do fluido dielétrico que normalmente é composto por hidrocarbonetos. A microdureza dessa camada é bem elevada devido ao alto teor de carbono presente, fazendo com que a microestrutura resultante também seja modificada.

A espessura da camada branca é influenciada principalmente pelo tempo de duração do pulso. Maior duração do pulso resulta em camadas brancas mais espessas. Isso é explicado pelo fato de que a quantidade de material fundido que pode ser removida pelo fluxo de fluido dielétrico atinge um valor máximo. A partir desse ponto o material fundido não é removido e, conseqüentemente, solidifica novamente sobre a superfície (ZEILMANN, 2014).

Zona Afetada Termicamente

A zona afetada termicamente consiste do material que não fundiu, porém aqueceu e resfriou rapidamente ao longo do processo. Ela se localiza logo abaixo da camada branca. Essa camada possui características distintas do material base e também da camada branca. É composta basicamente de martensita e alguns autores sugerem como origem das microtrincas observadas na superfície (CUSANELLI et al.,2003).

Dependendo dos parâmetros de usinagem utilizados, pode-se diminuir drasticamente a camada branca, porém a zona afetada termicamente nunca pode ser eliminada (HO, 2003).

2.2.2 Influência da microestrutura da peça na eletroerosão

Poucos autores estudaram o efeito da microestrutura do material da peça sobre o desempenho da eletroerosão; são mais comuns trabalhos que abordam efeito da microestrutura da ferramenta sobre o processo. Klocke et al. (2013) estudaram o efeito do tamanho de grão em eletrodos de grafite sobre o processo de eletroerosão, porém não encontraram uma relação direta de influência. Beri et al. (2014) estudaram modificações na integridade superficial em peças erodidas à partir de eletrodos obtidos por metalurgia do pó. Observaram alterações na microdureza e nas fases que compõem a camada branca.

Dentre trabalhos onde o foco do estudo foi o efeito da microestrutura do material na integridade superficial na eletroerosão, destaca-se Li et al. (2012),

que estudaram o efeito da microestrutura da peça sobre o desempenho em processos de microeletroerosão. Os autores afirmam que, em processos de microeletroerosão, a microestrutura da peça tem efeito sobre o desempenho do processo, visto que a microestrutura e a ferramenta estão na mesma escala de grandeza. Porém, afirmam que, no processo de eletroerosão convencional, este efeito não é observado, podendo o material ser considerado como homogêneo. Define-se microeletroerosão quando trabalha-se com ferramentas com área da seção transversal de até 1 mm². Entre 1 e 10 mm² classifica-se como mesoeletroerosão e acima como eletroerosão convencional (MARADIA et al., 2012).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

São descritos neste item o planejamento experimental da pesquisa, o banco de ensaios, os corpos de prova, as ferramentas de usinagem e os procedimentos experimentais destinados aos ensaios de usinagem e às medições das variáveis de saída, como microestrutura e microdureza das peças erodidas.

3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Trabalhou-se com um aço carbono com dois tamanhos de grãos ferríticos distintos (maiores detalhes no item 3.3). Pré-testes de usinagem foram realizados visando definir os parâmetros de usinagem e garantir a isenção do efeito do desgaste do eletrodo nas variáveis de saída. Sendo assim, duas condições distintas de usinagem foram estabelecidas: desbaste e acabamento. As condições de usinagem de ambas as operações são apresentadas na Tabela 1. A condição de desbaste é denominada C1 e a de acabamento, C2.

Tabela 1 – Condições de usinagem

Condição	T_{on} [μs]	T_{off} [μs]	I [A]	Fator de Serviço [%]	Frequência de Pulso [kHz]	Corrente Média [A]
C1	1800	130	64	93	0,52	59,69
C2	240	75	14,2	76	3,17	10,82

Fonte: Próprio autor

Não foi analisado o efeito de cada parâmetro de usinagem individualmente. Foi tomado como variável de entrada o conjunto de parâmetros de compõe cada uma das duas condições.

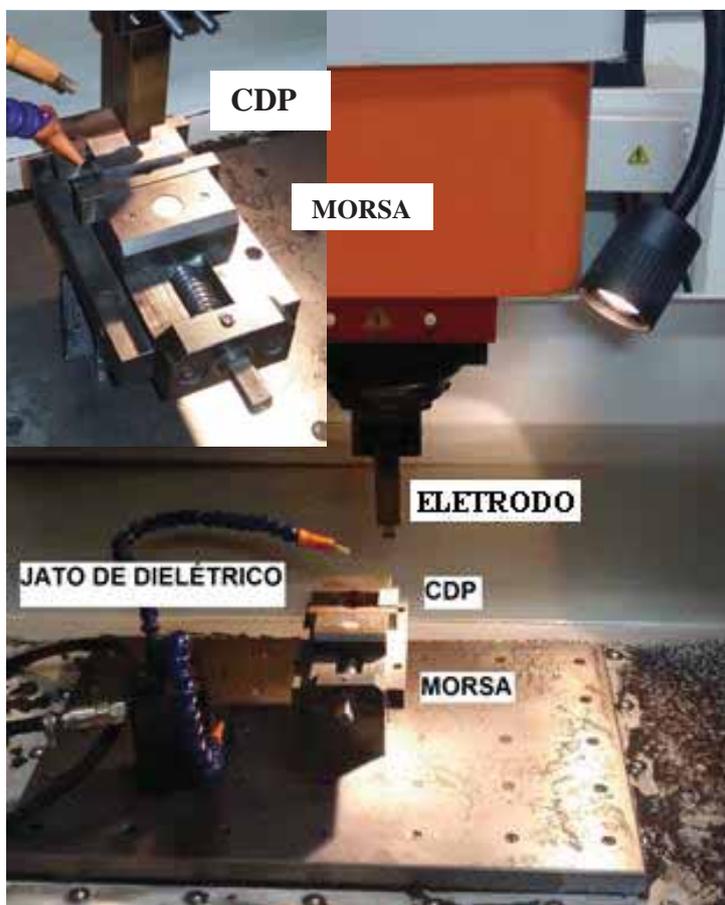
Como foram utilizadas duas variáveis, material da peça e condição de usinagem, variando em dois níveis cada uma, tem-se um total de quatro corpos de prova. Considerando duas réplicas, a matriz experimental totalizou oito corpos de prova. Optou-se por uma matriz reduzida devido o tempo gasto no

processo de eletroerosão. Em condições de acabamento, o tempo de usinagem era superior a três horas.

3.2 BANCO DE ENSAIOS

Os ensaios foram realizados em uma máquina de eletroerosão por penetração AgieCharmilles® SP 1U. O fluido dielétrico utilizado, homologado pela AgieCharmilles®, foi o Eletron da Archem®. A Figura 13 apresenta os detalhes de fixação dos corpos de prova ao longo do ensaio de usinagem.

Figura 13 - Fixação do corpo de prova na máquina de eletroerosão.



Fonte: Próprio autor

O perfil de microdureza subsuperficial foi obtido utilizando um ultramicrodurômetro Shimadzu, modelo DUH-211. A caracterização microestrutural das amostras foi realizada recorrendo-se ao microscópio óptico

que compõe o ultramicrodurômetro. As imagens foram obtidas com o auxílio de uma câmera digital marca Sony, modelo Cyber-Shot DSC- W80 (7,2 mega pixels de resolução).

3.3 CORPOS DE PROVA

O material empregado neste trabalho foi proveniente de uma parceria entre o Grupo de Pesquisa em Usinagem (GPU) e o Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa), da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). O material comercialmente chamado de COS AR 60, denominado neste trabalho como CR, foi fornecido pela Usiminas S/A. A composição química pode ser vista na Tabela 2.

Tabela 2 - Especificação química do aço COS AR 60 utilizado nos testes de usinagem (% em peso).

C	Mn	Si	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	V	Ti
0,16	1,49	0,27	0,046	0,005	0,276	0,008	0,048	0,044	0,016

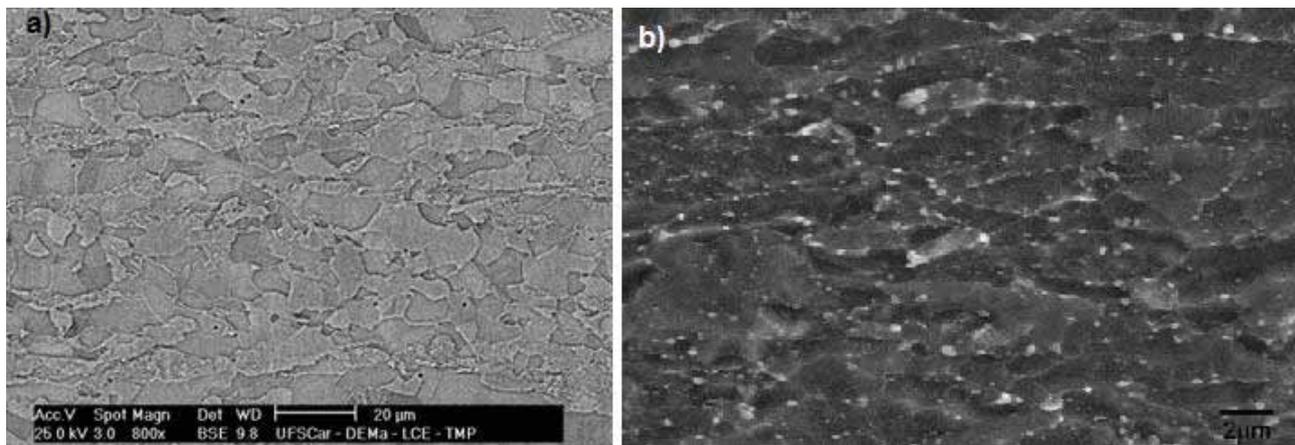
Fonte: Montanari et al. (2011).

Um tratamento termomecânico foi realizado em parte dos corpos de prova para obtenção de uma estrutura de grãos ultrafinos, denominado neste trabalho como GUF (grãos ultrafinos). Os corpos de prova com dimensões 25x25x100 mm, extraídos da chapa grossa por usinagem, foram austenizados a 900 °C em forno de resistência elétrica por 30 minutos com posterior resfriamento em água. Após o processo de têmpera, as peças foram reaquecidas a 740 °C e laminadas em três passes com retorno ao forno entre os passes para manutenção da temperatura de laminação a morno e, ao final, as peças foram resfriadas ao ar (RODRIGUES et al., 2011).

As diferenças de microestrutura podem ser observadas na Figura 14 na qual em (a) tem-se o material “como recebido” apresentando um tamanho de grão médio da ferrita de $10,8 \pm 3,8 \mu\text{m}$ e em (b) os grãos ultrafinos, com tamanho de grão médio da ferrita de $0,9 \pm 0,5 \mu\text{m}$, medidos através da norma ASTM E 112-96, conforme Montanari et al. (2011). Pela Figura 14, nota-se a

redução no tamanho de grão que o material COS AR 60 apresenta após o tratamento termomecânico.

Figura 14 - Micrografia do COS AR 60 (a) “como recebido” e (b) grãos ultrafinos.



Fonte: Montanari et al. (2011).

O material com grãos ultrafinos estava no formato de barras bem irregulares com aproximadamente 15 x 30 x 190 mm. Os corpos de prova utilizados nos ensaios de eletroerosão foram retirados dessas barras e pré-usinados com dimensões de 10 x 20 x 25 mm. A Figura 15 apresenta a barra irregular (após processamento) e o corpo de prova final após a pré-usinagem.

Figura 15 – Corpo de prova do aço com grãos ultrafinos.



Fonte: Próprio autor

3.4 FERRAMENTA

A ferramenta utilizada nos ensaios foi uma barra de cobre eletrolítico, com seção quadrada de 20 mm, fornecido pela AgieCharmilles®. Uma das extremidades do eletrodo foi usinada de forma a reduzir a seção transversal para 10 mm, conforme apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Ferramenta de cobre eletrolítico



Fonte: Próprio autor

3.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Esse item apresenta os procedimentos empregados nos ensaios de usinagem, nas medições de microdureza e na avaliação da microestrutura.

3.5.1 Ensaio de usinagem

Para cada uma das condições, desbaste e acabamento, foi criado um programa de erosão automática. A profundidade total das cavidades foi de 4 mm. As mangueiras de fluido dielétrico foram mantidas sempre na mesma posição. Ao final de cada ensaio, a extremidade do eletrodo foi fresada para remover a camada carbonizada que se formava no eletrodo.

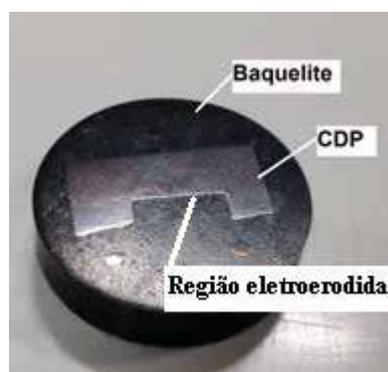
3.5.2 Microdureza e microestrutura

A análise da microdureza consistiu em avaliar as variações de dureza do material, em finas camadas da seção transversal à superfície usinada. Deste modo, foi possível obter o perfil da microdureza para diferentes profundidades. No caso da eletroerosão, pode-se identificar a espessura da camada que foi afetada termicamente e também o perfil de dureza resultante.

A avaliação da microestrutura, por sua vez, permitiu verificar as diferentes camadas provenientes do processo de eletroerosão, bem como sua espessura e constituintes. As amostras embutidas foram utilizadas para análise da microestrutura e microdureza, uma vez que o procedimento foi o mesmo para ambos os casos.

O embutimento das amostras foi realizado em uma embutidora a quente, com carga de 120 kgf/cm² e uso de baquelite. As amostras foram cortadas na seção transversal à cavidade erodida. O lixamento das amostras ocorreu de forma manual, alternando em 90° a posição a cada troca de lixa. A granulação das lixas obedeceu a sequência 220, 320, 400, 600, 1000 e 1200. Recorreu-se ao polimento das amostras com alumina de partícula 1 e 0,3 µm, respectivamente. Para verificar as diferentes camadas presentes no material, após o polimento, fez-se um ataque com uma solução de Nital 2%. O corpo de prova pronto para análise é apresentado na Figura 17.

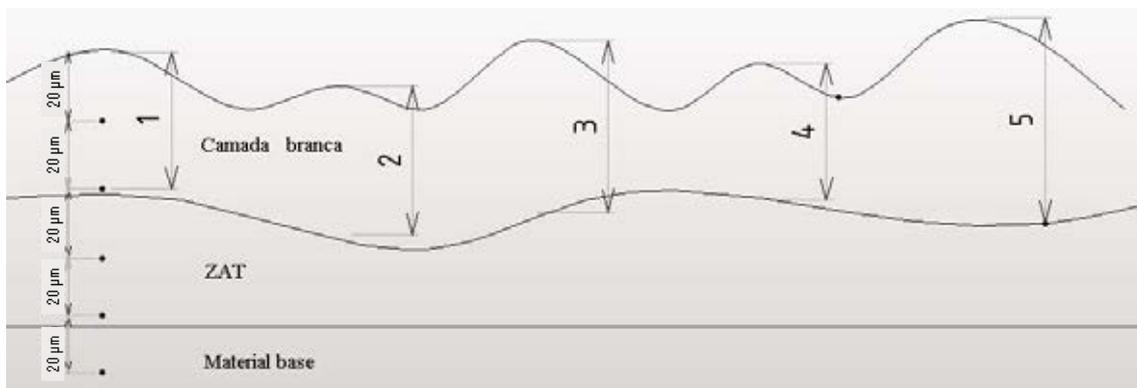
Figura 17 – Amostra embutida para análise da microdureza e microestrutura da superfície erodida.



Fonte: Próprio autor

Mediu-se a espessura da camada branca com o auxílio de um micrômetro acoplado ao ultramicrodurômetro. Como a camada branca não foi uniforme ao longo da peça, optou-se por medir as cinco maiores regiões e depois fazer a média das medições. As microdurezas foram obtidas em cada uma das regiões citadas. Mediu-se o primeiro ponto 20 μm a partir da superfície e os demais em intervalos também de 20 μm em direção ao centro da amostra. As medições eram realizadas até a dureza medida ser aquela do material base. Um esquema das medições é apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Esquema de medição da camada branca e microdureza



Fonte: Próprio autor

A escala utilizada para medir a microdureza foi à escala Vickers e o método de ensaio empregado foi de carregamento/descarregamento. O método consiste em aumentar a força até um valor pré-determinado, mantendo constante por um determinado tempo e após esse tempo, ocorre o descarregamento. A carga utilizada foi de 100 mN.

A Análise de Variância (ANOVA) foi empregada para avaliar a influência do tamanho de grão do material da peça e das condições/operações de usinagem na espessura da camada branca, bem como na variação de dureza entre o material base e a camada branca. Adotando uma confiabilidade de 95%, ou equivalente, um nível de significância de 5%, foi possível gerar o assim denominado QUADRO ANOVA dos fatores de controle. O *software* estatístico Minitab® 16.1.1 foi utilizado nos cálculos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados em três tópicos: microestrutura, microdureza e, por fim, microtrincas.

4.1 MICROESTRUTURA

As espessuras das camadas brancas medidas a partir da microestrutura são apresentadas na Tabela 3.

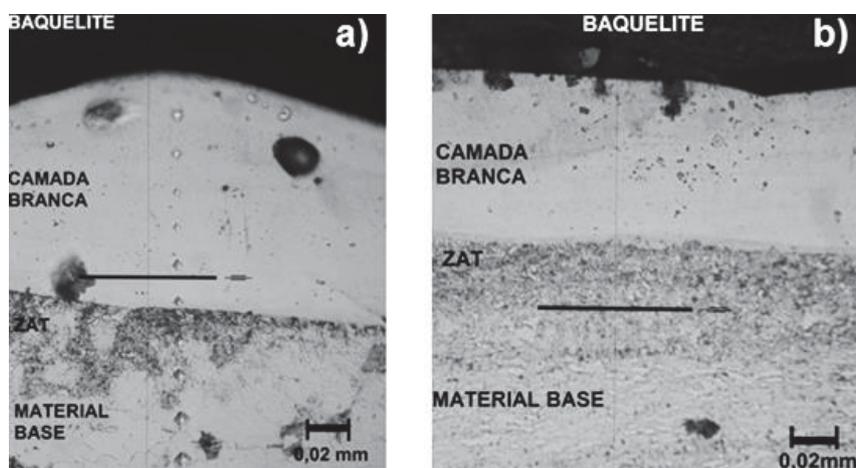
Tabela 3 – Espessuras das camadas brancas.

Condição de Usinagem	Tamanho de Grão da Peça [μm]	
	CR	GUF
C1 (Desbaste)	100 \pm 12	64 \pm 17
C2 (Acabamento)	19 \pm 5	15 \pm 4

Fonte: Próprio autor

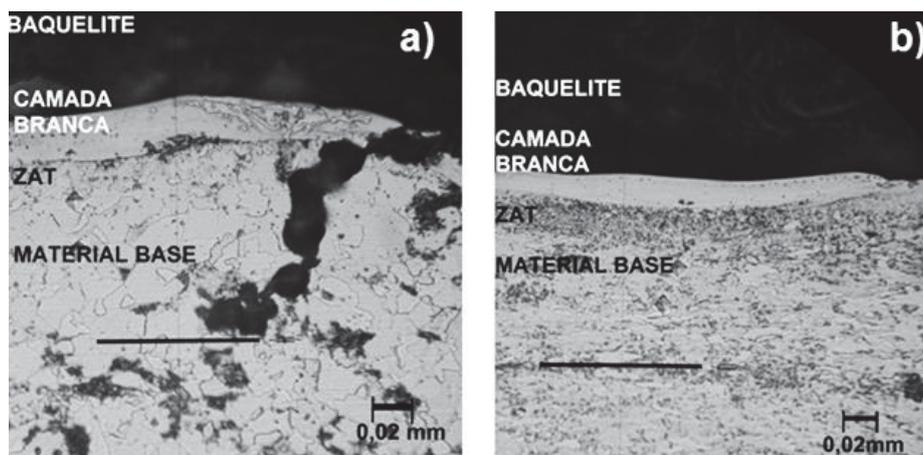
Nota-se que, tanto para o desbaste quanto para o acabamento, houve reduções nas espessuras da camada branca quando se usinou o GUF, sendo 36% e 21%, respectivamente. As Figuras 19 e 20 apresentam imagens da microestrutura.

Figura 19 – Microestrutura para condição C1 (desbaste): a) CR b) GUF



Fonte: Próprio autor

Figura 20 – Microestrutura para condição C2 (acabamento): a) CR b) GUF



Fonte: Próprio autor

Nota-se que, para mesma condição, diminuindo-se o tamanho de grão ferrítico do material da peça, houve queda na espessura da camada branca. Por se tratar de um tema relativamente novo, poucos autores investigaram o efeito da microestrutura da peça sobre a eletroerosão, porém, pode-se recorrer à fenomenologia do processo para explicar esse efeito.

A temperatura de fusão dos contornos de grão é superior àquela do interior do grão (LI et al., 2013). Quando submetido a um aporte térmico, os contornos funcionam como barreiras à propagação do calor, de maneira análoga à relação entre discordâncias e deformação plástica. O processo de eletroerosão é um processo bem pontual, ou seja, o efeito total é a soma do efeito de cada centelha (princípio da superposição dos efeitos). Pensando na ação de uma centelha sobre o material da peça, aquele que possui grãos menores tende a concentrar a energia em menores volumes de material, resultando em poças de metal fundido menores sobre a superfície. Como já visto, a quantidade de material removido pelo fluxo dielétrico tem um limite, a partir do qual não se remove mais material (ZEILMANN, 2013). Com poças de metal fundido menores sobre a superfície, a quantidade de material que se ressolidifica será menor, resultando em uma camada branca menor.

Tem-se ainda que, ao longo do processo de eletroerosão, parte do material vaporiza devido às altas temperaturas (HO, 2003). Novamente, tomando como base uma centelha agindo sobre material, aquele que possui

grãos menores concentra essa energia em volumes menores de material, favorecendo a vaporização. Quanto maior a quantidade de material vaporizado, menor será a quantidade que se ressolidifica sobre a superfície, formando a camada branca.

Para avaliar a influência da condição de usinagem e do tamanho de grão do material da peça sobre a espessura da camada branca, foi utilizada a Análise de Variância (ANOVA), tal como descrito no item 3. A Tabela 4 traz o quadro ANOVA.

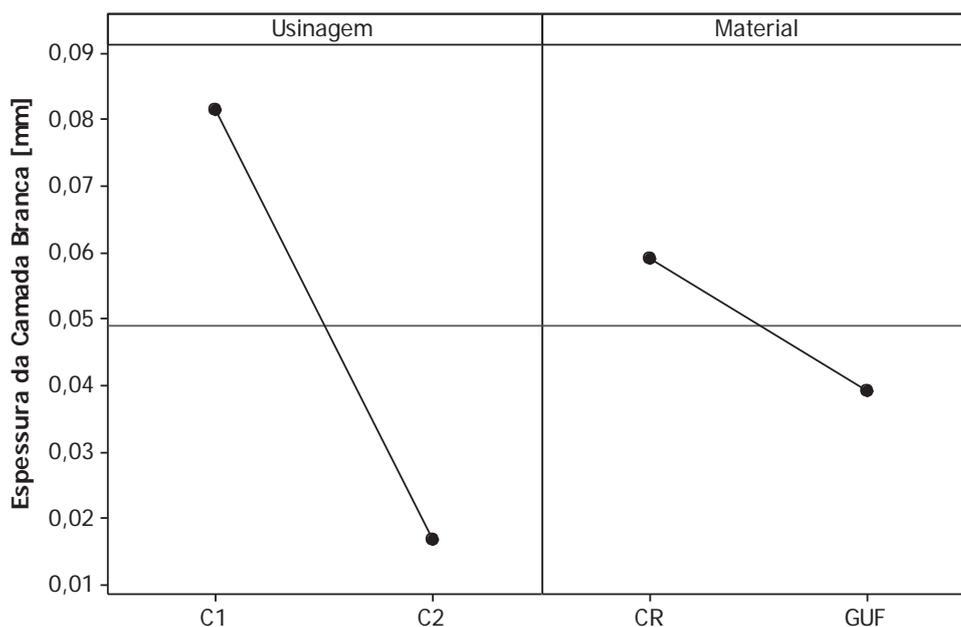
Tabela 4 – Quadro ANOVA sobre a resposta espessura da camada branca ($R^2 = 92,15\%$).

Fator de controle	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	Teste F	Valor P
Usinagem	1	0,041926	0,041926	365,67	0,000
Material	1	0,003901	0,003901	34,02	0,000
Usinagem × Material	1	0,002641	0,002641	23,03	0,000
Erro	36	0,004127	0,00115		
Total	39	0,052594			

Fonte: Próprio autor

A interpretação do quadro ANOVA é feita através da análise do valor da probabilidade P. Níveis menores que o de significância estabelecido previamente ($\alpha = 0,05$ ou 5%) indicam que a hipótese inicial de variâncias iguais para esses casos foi rejeitada, ou seja, esses fatores causaram significativa variação na resposta, isto é, espessura da camada branca. Assim, analisando os resultados, tem-se que tanto a condição de usinagem quanto o material influem na espessura da camada branca.

Quando analisada a interação desses dois fatores, nota-se que ainda continua a ser influente sobre a resposta. Também é possível notar que a condição de usinagem é o fator mais influente na espessura, uma vez que o valor do teste F é bem superior aos demais fatores de controle. Uma interpretação gráfica gerada a partir do quadro ANOVA pode ser observada na Figura 21.

Figura 21 – Variação da camada branca com os fatores de controle

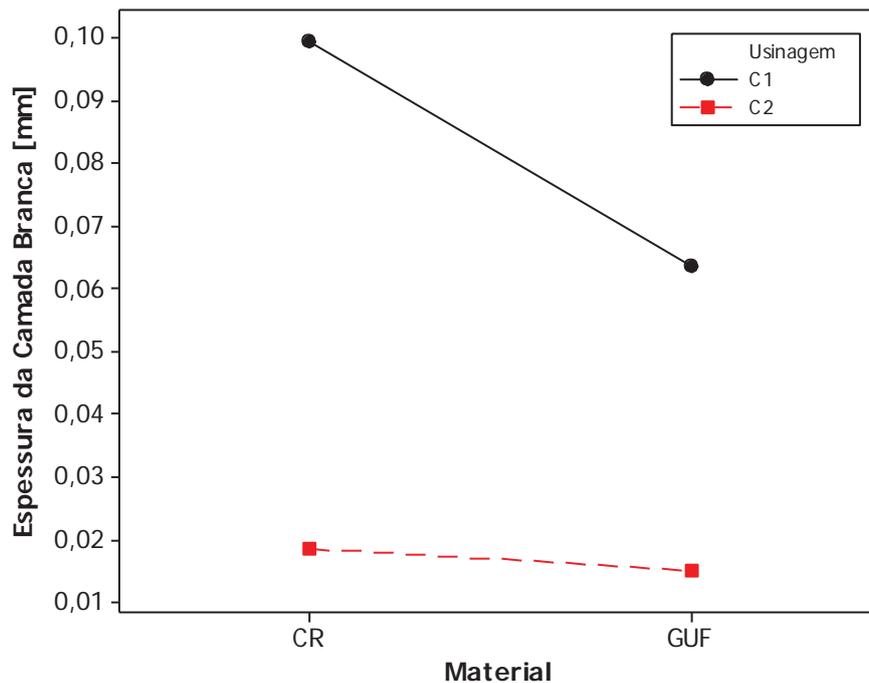
Fonte: Próprio autor

Avaliando a Figura 21, nota-se que a condição de usinagem é o fator de maior influência sobre a espessura da camada branca, pois a resposta apresentou maior variação em torno do valor médio. Além disso, a usinagem de acabamento diminuiu a espessura da camada branca, em função do menor aporte térmico decorrente dos parâmetros de usinagem empregados. Pode-se constatar também que o material da peça com grãos ultrafinos (GUF) tende, de fato, a minimizar a espessura da camada branca.

A Figura 22 mostra ainda a interação entre os fatores de controle (condição de usinagem e microestrutura do material da peça) sobre a resposta (espessura da camada branca). Observa-se que, de fato, ocorreu interação entre os fatores, na medida em que a variação da espessura da camada branca é diferente, quando se varia do nível mais baixo para o mais alto de cada fator de controle. Em outras palavras, a influência de um dos fatores (por exemplo, material da peça) na espessura da camada branca depende do nível do outro fator (neste, caso a condição de usinagem). Sob o prisma da fenomenologia da usinagem por eletroerosão, a condição de desbaste (C1), como já mencionado, introduz maior calor ao processo e, por conseguinte, maior espessura da camada branca, porém esta espessura depende do

tamanho de grão do material da peça, sendo o material CR (maior tamanho de grão) agente amplificador ou colaborador para o aumento da espessura da camada branca.

Figura 22 – Interação entre a microestrutura do material da peça e as condições de usinagem sobre a espessura da camada branca.

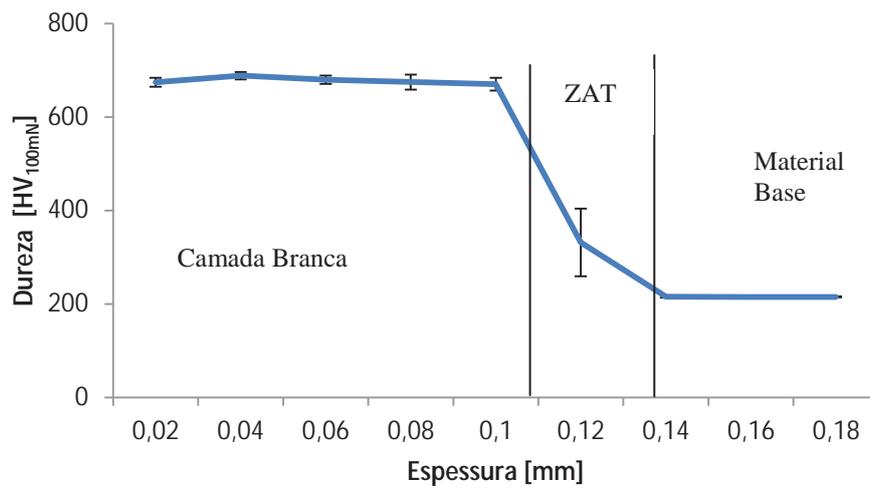


Fonte: Próprio autor

4.2 MICRODUREZA

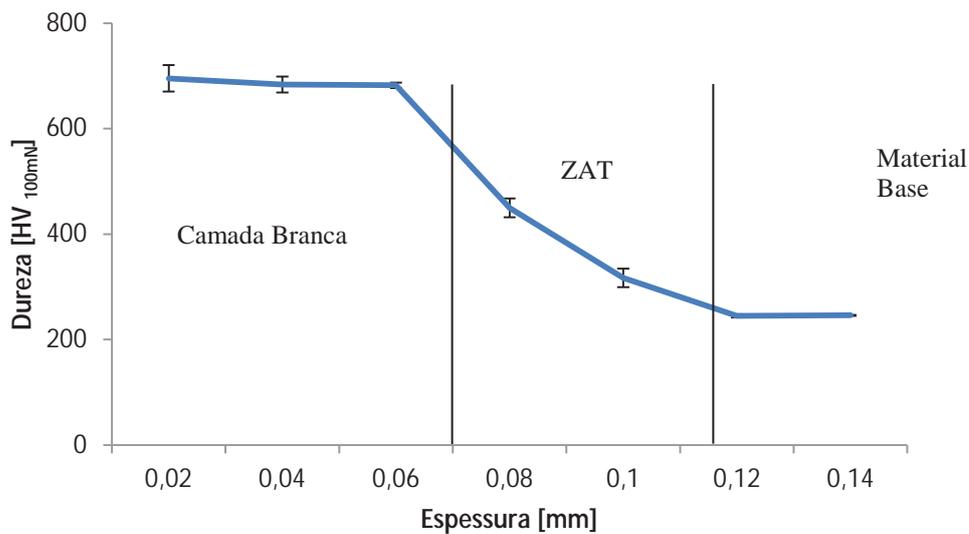
As Figuras 23 e 24 apresentam os gráficos do perfil de microdureza. Apresentou-se apenas os resultados para condição de desbaste, pois no acabamento as camadas foram inferiores a 20 μm , sendo mais difícil medir a dureza dentro delas.

Figura 23 – Microdureza para condição C1 (desbaste) e material CR



Fonte: Próprio autor

Figura 24 – Microdureza para condição C1 (desbaste) e material GUF



Fonte: Próprio autor

Foram traçadas duas linhas delimitando as camadas brancas com base nos valores medidos através da microestrutura. Pelos gráficos, nota-se claramente a existência de camadas distintas na superfície erodida, sendo mais superficial a camada branca do GUF. Como os intervalos entre os pontos de medição foram de 20 μm , não foi possível obter um perfil mais detalhado ao

longo da ZAT, mas não haveria razão para a dureza apresentar perfil diferente do decaimento, tal como mostrado nas Figuras 23 e 24.

Considerando a camada afetada total como a somatória da camada branca e da ZAT, o material com grãos convencionais apresentou valores maiores, ou seja, o efeito da eletroerosão sobre a microdureza foi maior no material com grãos convencionais com relação ao de grãos ultrafinos.

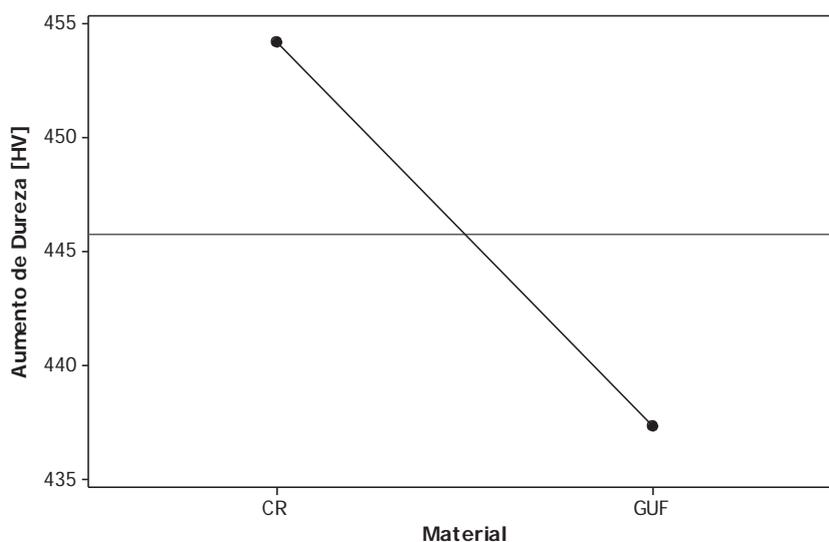
Novamente, recorre-se à ANOVA para avaliar a influência do tamanho de grão do material da peça sobre o incremento de dureza entre o *bulk* (material base) e a camada branca (superfície), ou seja, na ZAT. Como já discutido, apresenta-se os valores apenas para a condição de desbaste, uma vez que as espessuras das camadas brancas para o acabamento são inferiores a 20 μm . A Tabela 5 traz o quadro ANOVA.

Tabela 5 – Quadro ANOVA sobre o incremento de microdureza entre o *bulk* e a camada branca ($R^2 = 55,40\%$).

Fator de controle	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	Teste F	Valor P
Material	1	708,50	708,50	9,94	0,014
Erro	8	570,43	71,30		
Total	9	1272,93			

Fonte: Próprio autor

Nota-se que o tamanho de grão do material da peça foi significativo no aumento da microdureza, uma vez que a probabilidade P foi menor que o nível de significância adotado ($P = 0,014 < \alpha = 0,05$). O material com granulometria maior (CR) apresenta um maior incremento de dureza quando comparado com o do material com microestrutura refinada (GUF), como atesta a Figura 25 (interpretação gráfica do quadro ANOVA).

Figura 25 – Variação da microdureza com o material

Fonte: Próprio autor

Fazendo-se uma associação dos resultados de espessuras das camadas brancas e variações das microdurezas, verifica-se que o material CR apresentou uma ZAT de 40 μm , ao passo que o GUF, 60 μm , porém, analisando-se a taxa de aumento (razão da variação da microdureza pela espessura da camada branca), encontra-se 11,4 HV/ μm para o CR e 7,3 HV/ μm para GUF. Esses valores mostram que o GUF apresenta uma transição de microdureza mais suave ao longo da ZAT quando comparada a do CR.

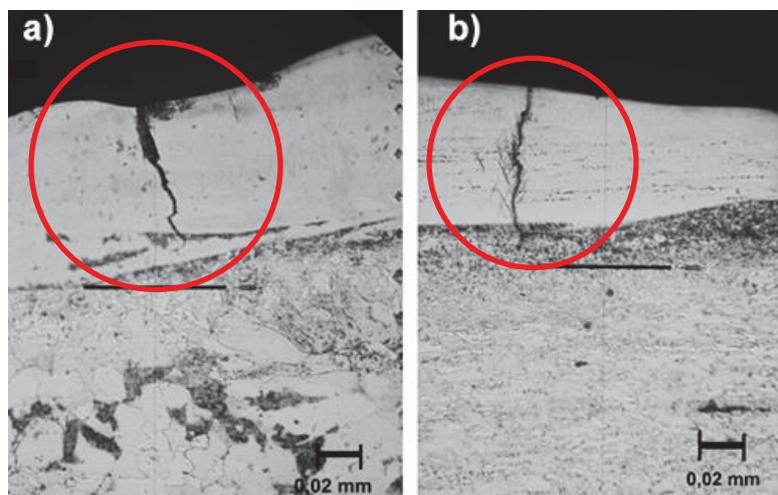
Considerando a aplicação de peças produzidas pelo processo de eletroerosão, esse último resultado deve ser destacado como muito importante. Já foi apresentado que as trincas surgem a partir da interação entre fases martensíticas e austeníticas, o que normalmente ocorre no limítrofe da ZAT com a camada branca, e se propagam para a superfície da peça (atravessando a camada branca). Entretanto, caso haja trincas remanescentes de processos de eletroerosão de acabamento, não eliminadas em processos subsequentes, como polimento, as trincas podem facilmente se propagar para o interior do material, passando pela ZAT, quando a peça estiver em serviço, sobretudo sob carregamento cíclico, como é o caso, por exemplo, de moldes para injeção de plástico.

Sob a óptica da propagação dessas trincas, pelo fato de o GUF apresentar uma transição mais suave, pode-se inferir que este apresenta uma zona plástica crescente na ponta da trinca (frente de propagação) à medida que a trinca avança no interior da ZAT (em direção ao material base). Em outras palavras, a trinca tenderia a ter propagação estável com sua evolução, pois com o decaimento da dureza na ZAT, o material da peça exerceria sua plasticidade de forma crescente, freando ou dificultado o avanço da trinca. Com transições de dureza mais abruptas na ZAT, esta não serviria como barreira de maior plasticidade à propagação de trincas, de modo que sua velocidade de propagação seria maior, podendo ocorrer de forma instável na ZAT e em camadas mais profundas do material base, mesmo este sendo mais plástico (dúctil). Este fato poderia comprometer mais a integridade superficial e estrutural da peça, diminuindo sua vida em serviço.

4.3 MICROTRINCAS

A Figura 26 apresenta exemplares de microtrincas para condição de desbaste em ambos os materiais. Optou-se pela condição de desbaste, pois as microtrincas são mais evidentes.

Figura 26 – Microtrincas para condição C1 (desbaste): a) CR b) GUF



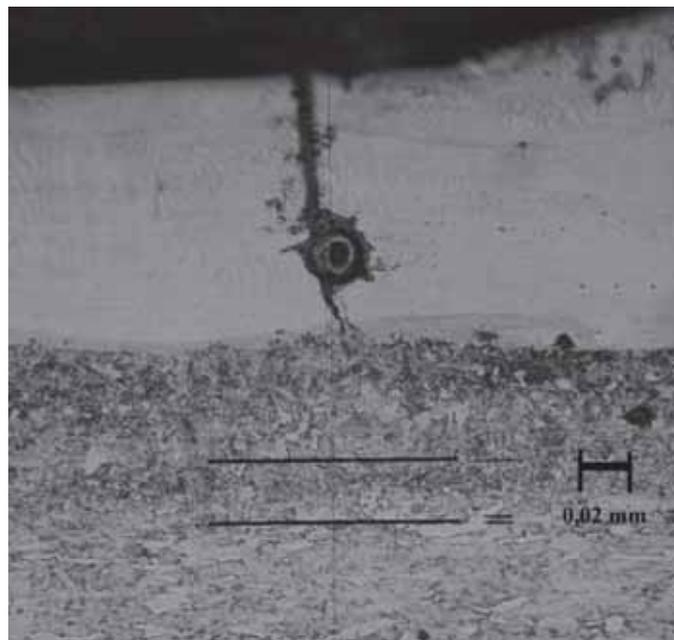
Fonte: Próprio autor

As microtrincas na camada branca são características do processo de eletroerosão. Não foi possível encontrar nenhuma relação direta da microestrutura do material com o surgimento das microtrincas. Sabe-se que elas surgem durante o processo de ressolidificação da camada branca, ou seja, em condições de não equilíbrio. Assim, seu comportamento é bastante aleatório.

Observou-se que em ambos os materiais e condições de usinagem, as trincas surgem na interação entre a martensita e austenita, e se propaga ao longo de toda camada branca, ou seja, elas surgem do interior do material e se propagam em direção à superfície. Como no material com grãos refinados a espessura da camada branca é menor, conseqüentemente as espessuras das trincas são menores.

Ao longo do processo de ressolidificação da camada branca, partículas provenientes do eletrodo ou outras impurezas no dielétrico podem migrar para essa região, resultando em pequenas incrustações (BLEYS, 2006). Trincas também podem surgir próximas delas, conforme apresentado na Figura 27.

Figura 27 – Incrustação na camada branca para condição C1-GUF



Fonte: Próprio autor

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados, pode-se delinear as seguintes conclusões:

- A microestrutura do material da peça erodida tem influência sobre sua integridade superficial, mesmo em uma condição de macro eletroerosão;
- A espessura da camada branca depende, principalmente, das condições de usinagem, sendo que o desbaste resulta em uma espessura maior;
- O material com grãos ferríticos ultrafinos quando erodido sob mesma condição de usinagem, apresenta uma camada branca menor, comparada à do material com grãos ferríticos convencionais;
- A ZAT do GUF apresentou maior espessura do que a do CR, porém a transição da microdureza ao longo da dessa camada é mais suave, o que pode favorecer a integridade superficial e estrutural da peça em serviço.

Como trabalhos futuros recomendam-se:

- Avaliar outras variáveis da integridade superficial como, por exemplo, a rugosidade da peça erodida;
- Levantar as propriedades termofísicas do material com grãos ultrafinos, verificando as hipóteses de transferência de calor apresentadas no trabalho;
- Desenvolver um modelo térmico do processo de eletroerosão validando os resultados encontrados empiricamente.

REFERÊNCIAS

AMORIM, F. L. Desempenhos de eletrodos de grafita e de cobre no acabamento de aço ferramenta. **Máquinas e Metais**, São Paulo, v. 42, n. 485, p. 124-143, 2006.

ARANTES, L. J. **Avaliação do desempenho de fluidos dielétricos no processo de usinagem por descargas elétricas**. 2001. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2001.

BERI, N. et al. Surface quality modification using powder metallurgy processed CuW electrode during electrical discharge machining of Inconel 718. **Material Science**, Malásia, v. 5, p. 2629-2634, 2014.

BLEYS et al. Surface and sub-surface quality of steel after EDM. **Advanced Engineering Material**, Weinheim, v. 8, n.1 - 2, p. 15-25, 2006.

CUSANELLI et al. Microstructure at submicron scale of the white layer produced by EDM technique. **Journal of Materials Processing Technology**, Edimburgo, v. 149, n. 1 - 3, p. 289-295, 2004.

EKMEKCI, B. Residual stresses and white layer in electric discharge. **Applied Surface Science**, Breda, v. 253, n. 23, p. 9234–9240, 2007.

FERRARESI, D. **Fundamento da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1970. 800 p.

GHANEM, F.; BRAHAM, C.; SIDHOM, H. Influence of steel type on electrical discharge machine surface integrity, **Journal of Materials Process and Technology**, Dortmund, v. 142, n. 1, p. 163-173, 2003.

HO, K. H; , NEWMAN, S. T. State of the art electrical discharge. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Birmingham, v. 43, n. 13, p. 1287-1300, 2003

JEONG, Y. H., MIN, B. K. Geometry prediction of EDM-drilled holes and tool electrode shapes of micro-EDM process using simulation, **International Journal of Machine Tools and Manufacturing**, Birmingham, v. 47, n. 12 - 13, p. 1817-1826, 2007

KALPAKJIAN, S. **Manufacturing engineering and technology**. 3. ed. Nova York: Adisson-Wesley Publishing, 1995. 450 p.

KANSAL, H.K. et al. Application of Taguchi method for optimization of powder mixed electric discharge machining. **International Journal of Management and Manufacturing Technology**, Reino Unido, v. 7, n. 2 - 4, p. 329-341, 2005.

KLOCKE, F. et al. The effects of powder suspended dielectrics on the thermal influenced zone by electrodischarge machining with small discharge energies, **Journal of Materials Processing Technology**, Dortmund, v. 149, n. 1 - 3, p. 191-197, 2004.

KUNIEDA, M. et al. Advancing EDM through fundamental insight into the process. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, Vancouver, v. 54, n. 2, p. 64-87, 2005.

LI, J. Z. et al. Influence of microstructure of alloy on the machining performance of micro EDM, **Surface & Coatings Technology**, Dalian, v. 1, n. 228, p. 460-465, 2013

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Blucher, 2009. 384 p.

MAHARDIKA, M., TSUJIMOTO, T. MITSUI, K, A new method for monitoring micro-electric discharge machining process, **International Journal of Machine Tools and Manufacturing**, Birmingham, v. 48, n. 3 - 4, p. 446-458, 2008.

MARADIA, U. et al. Die sink EDM in meso-micro machining. **CIRP Annals**, Zurich, v. 1, p. 166-171, 2012.

MONTANARI, L. et al. Processamento termomecânico de laminação amorno para refino de grão em um aço 0,16%C. In: ABM INTERNATIONAL CONGRESS, 66., 2011, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: ABM, 2011. p. 1599-1606.

RODRIGUES, A. R. et al. **Processo termomecânico para obtenção de aços ferríticos com grãos ultrafino**. Patente, PI11072474 28/01/2011.

SANJEEV, K. et al. Surface modification by electrical discharge machining: A review. **Journal of Materials Processing Technology**, Dortmund, v. 209, n. 8, p. 3675-3687, 2009.

SINGH, S.; KANSAL, H.K.; KUMAR, P. Parametric optimization of powder mixed electrical discharge machining by response surface methodology. **Journal of Materials Processing Technology**, Dortmund, v. 169, n. 3, p. 427-436, 2005.

SRIVASTAVA, V. PANDEY, P.M. Study of ultrasonic assisted cryogenically cooled EDM process using sintered (Cu-TiC) tolltip, **Journal of Manufacturing Process**, Illinois, v. 15, n. 1, p. 158-166, 2013.

STORR, M. **Important facts about spark erosion**. Stuttgart: Oelheld, 2007. 44 p. Disponível em: < www.oelheld.de>. Acesso em: 20 out 2014.

TSAI, H. C.; YAN, B.H.; HUANG, F.Y. EDM performance of Cr/Cubased composite electrodes, **International Journal of Machine Tools and Manufacturing**, Birmingham, v. 43, n. 3, p. 245-252, 2003

ZEILMANN, R. P., VACARO, T., BORDIN, F. M., 2014 Surface integrity of electrodischarge machined cavities for different depths and radii , **Journal of Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering**, Rio de Janeiro, v. 37, n. 1, p. 93-104, 2014.