

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

COBEF2017-0176

Eli Jorge da Cruz Junior, dacruz.eli@ifsp.edu.br

Alessandro Roger Rodrigues, roger@sc.usp.br

Hidekasu Matsumoto, hidekasu@dem.feis.unesp.br

¹IFSP Campus Votuporanga, Av. Jerônimo Figueira da Costa, 3014 Pozzobon, 15503110 Votuporanga,

²EESC USP, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Trabalhador São Carlense, 400 Centro, 13566590 São Carlos

³FEIS UNESP, Departamento de Engenharia Mecânica, Avenida Brasil, 56 Centro, 15385000 Ilha Solteira

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.

1. INTRODUÇÃO

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. Suas maiores aplicações são: fabricação de matrizes para estampagem, forjamento, fieiras para trefilação, extrusão, moldes para injeção de plástico, enfim, para o setor de ferramentaria em geral.

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).

Dentre os parâmetros de usinagem no processo de eletroerosão podemos citar: tensão de descarga, corrente de pico, duração do pulso, tempo de pausa, forma de onda, polaridade, gap do eletrodo e tipo de lavagem. Fazendo-se um comparativo entre os parâmetros de usinagem de um processo convencional (por exemplo, torneamento, onde os principais parâmetros de corte são: velocidade de corte, profundidade de usinagem e avanço por rotação) e os da eletroerosão, nota-se que o número de variáveis a ser controlado na eletroerosão é muito maior, tornando o processo mais complexo.

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).

O fator de serviço é a relação entre a duração do pulso e o tempo total do ciclo medido em porcentagem. 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.

A frequência de pulso é o número de pulsos (centelhas) produzido durante um segundo. 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.

A corrente média é a corrente disponível para cada pulso a partir da fonte de alimentação. Ela é a média da corrente da centelha medida ao longo de todo ciclo, obtida pelo produto do fator de serviço e a corrente de pico.

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).

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).

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 1 ilustra as camadas características geradas na peça pela eletroerosão.

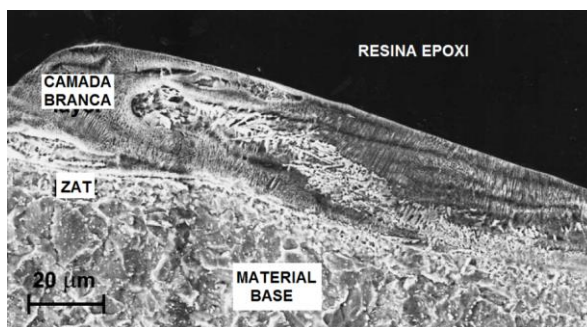


Figura 1. Camadas características geradas na peça pela eletroerosão

Fonte: Cusanelli et al. (2003).

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. 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. A Figura 2 apresenta uma microtrinca na camada branca.

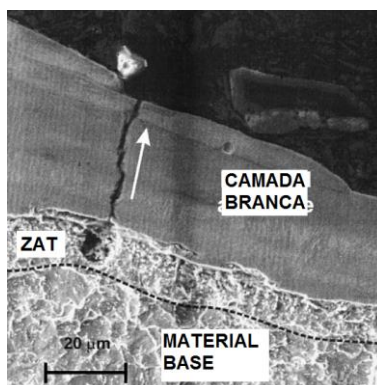


Figura 2. Microtrinca na camada branca de uma peça erodida

Fonte: Cusanelli et al. (2003).

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).

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).

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).

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.

2. METODOLOGIA

Trabalhou-se com um aço carbono com dois tamanhos de grãos ferríticos distintos. 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.

O material “como recebido” possuía um tamanho de grão médio da ferrita de $10,8 \pm 3,8 \mu\text{m}$ e os grãos ultrafinos, 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).

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 Tab. 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.

Os ensaios foram realizados em uma máquina de eletroerosão por penetração AgieCharmilles® SP 1U. O fluido dielétrico utilizado, homologado pela AgieCharmilles®, foi o Elettron da Archem®. A Figura 3 apresenta os detalhes de fixação dos corpos de prova ao longo do ensaio de usinagem.



Figura 3. Fixação do corpo de prova na máquina de eletroerosão

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).

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

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.

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.

Os corpos de prova foram embutidos em baquelite. As amostras foram cortadas na seção transversal à cavidade erodida. As amostras foram lixadas, polidas e atacadas com Nital 2%. O corpo de prova pronto para análise é apresentado na Fig. 4.

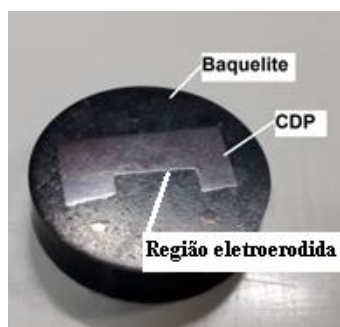


Figura 4. Amostra embutida para análise da microdureza e microestrutura da superfície erodida

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 μ m a partir da superfície e os demais em intervalos também de 20 μ m em direção ao centro da amostra. As medições eram realizadas até a dureza medida ser aquela do material base.

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.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

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

3.1. Microestrutura

As espessuras das camadas brancas medidas a partir da microestrutura são apresentadas na Tab. 2.

Tabela 2. Espessuras das camadas brancas.

Condição de Usinagem	Tamanho de Grão da Peça [μm]	
	CR	GUF
C1 (Desbaste)	100 ± 12	64 ± 17
C2 (Acabamento)	19 ± 5	15 ± 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 5 e 6 apresentam imagens da microestrutura.

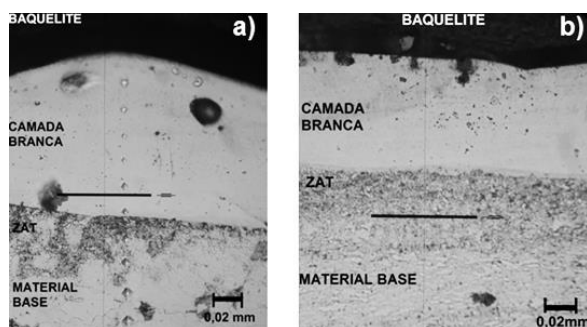


Figura 5. Microestrutura para condição C1 (desbaste): a) CR b) GUF

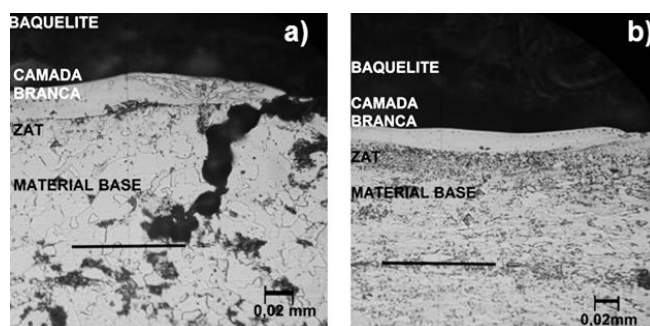


Figura 6. Microestrutura para condição C2 (acabamento): a) CR b) GUF

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). A Tabela 3 traz o quadro ANOVA.

Tabela 3. 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 $\times$ 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.

3.2. Microdureza

As Figuras 7 e 8 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.

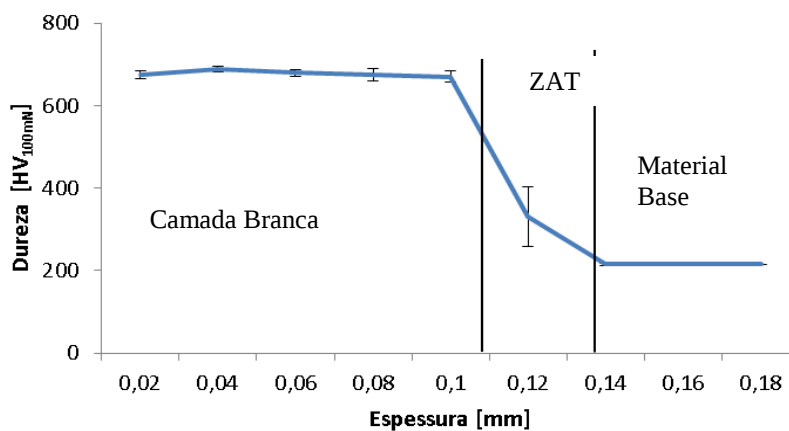


Figura 7. Microdureza para condição C1 (desbaste) e material CR

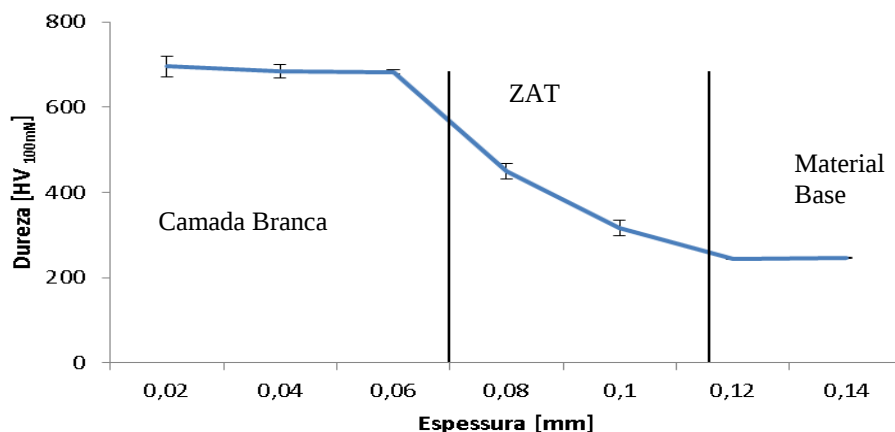


Figura 8. Microdureza para condição C1 (desbaste) e material GUF

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 Fig. 7 e 8.

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 4 traz o quadro ANOVA.

Tabela 4. 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).

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.

3.3. Microtrincas

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, consequentemente as espessuras das trincas são menores.

4. 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 desgaste 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.

5. REFERÊNCIAS

- 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.
- 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
- 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.

MARADIA, U. et al. Die sink EDM in meso-micro machining. CIRP Annals, Zurique, 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.

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

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.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

THE INFLUENCE OF THE FERRITIC GRAIN SIZE IN THE SURFACE INTEGRITY OF ERODED PARTS

COBEF2017-0176

Eli Jorge da Cruz Junior, dacruz.eli@ifsp.edu.br

Alessandro Roger Rodrigues, roger@sc.usp.br

Hidekasu Matsumoto, hidekasu@dem.feis.unesp.br

¹IFSP Campus Votuporanga, Av. Jerônimo Figueira da Costa, 3014 Pozzobon, 15503110 Votuporanga,

²EESC USP, Departamento de Engenharia Mecânica, Av.Trabalhador São Carlense, 400 Centro, 13566590 São Carlos

³FEIS UNESP, Departamento de Engenharia Mecânica, Avenida Brasil, 56 Centro, 15385000 Ilha Solteira

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

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