

CARACTERÍSTICAS DE INTEGRIDADE SUPERFICIAL DA LIGA DE ALUMÍNIO AMP8000 E DO AÇO AISI P20 APÓS ELETROEROSÃO POR PENETRAÇÃO

Fred L. AMORIM

Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR

Rua Imaculada Conceição, 1155 - Prado Velho - 80.215-901 - Curitiba - PR

email: famorim@rla01.pucpr.br

Resumo. O processo de eletroerosão por faíscas (*EDM-Electrical Discharge Machining*) afeta termicamente as camadas superficiais das peças usinadas. Dependendo da profundidade dessas zonas termicamente afetadas, a funcionalidade da ferramenta de moldagem pode ser seriamente comprometida. Portanto, é importante qualificar e quantificar o nível da influência térmica do processo sobre a seção transversal das peças. Atualmente, ligas de alumínio de alta resistência são utilizadas pela indústria de ferramentas como materiais alternativos aos aços na confecção de moldes de pequena e média produção de peças plásticas e na fabricação de protótipos de moldes. Até o momento, existe no Brasil pouca informação bibliográfica sobre os efeitos da eletroerosão sobre a integridade superficial deste tipo de material. Neste trabalho foram executados ensaios de eletroerosão em uma liga de alumínio de alta resistência, sob condições de usinagem de desbaste e de acabamento, com o intuito de se estudar e quantificar aspectos de integridade superficial como a espessura da camada re-solidificada, a dureza e a profundidade da zona termicamente afetada pela EDM e a existência de poros e microtrincas nas peças.

1. INTRODUÇÃO

No processo de eletroerosão por faíscas (EDM - *Electrical Discharge Machining*), o princípio físico da remoção de material está associado ao efeito erosivo produzido por sucessivas descargas elétricas não-estacionárias e aleatoriamente distribuídas ao longo das superfícies de dois materiais (eletrodo-ferramenta e eletrodo-peça), os quais devem apresentar uma condutividade elétrica mínima de 0,01 S/cm. Usualmente, a duração das descargas t_e pode variar de 0,2 a 3600 μ s. Os eletrodos trabalham submersos num meio dielétrico líquido e são separados entre si de uma certa distância, chamada de fenda de trabalho ou *gap*, durante a faísca elétrica. Esta fenda pode possuir dimensão de 0,005 até 2 mm, dependendo das condições de usinagem. Geralmente um hidrocarboneto ou água deionizada são utilizados como fluido dielétrico, o qual tem como funções básicas concentrar a energia do canal de descarga, evacuar por meio de lavagem as partículas eletroerodidas e resfriar os eletrodos. A energia para remoção de material é fornecida pelo gerador da máquina de EDM, o qual promove uma descarga elétrica i_e com uma duração t_e especificada pelo operador que, em consequência, provoca o aquecimento, a fusão e a evaporação de uma pequena quantidade de material formando uma minúscula poça em ambos os eletrodos, segundo argumentação de König & Klocke (1997). Entre duas faíscas sucessivas, quando é feito o desligamento da energia elétrica, é estabelecido um tempo de intervalo t_o . Nesse instante uma parte do material eletroerodido é violentamente ejetada e carregada pelo fluxo de dielétrico para fora da fenda de trabalho e o restante se solidifica na recém formada cratera e adjacências, sendo este ciclo repetido até a usinagem completa do formato geométrico da peça.

A eletroerosão representa um processo de usinagem amplamente aplicado nas indústrias aeronáutica e aeroespacial, médica, equipamentos ópticos e eletrônicos e na indústria de ferramentas em geral, particularmente para a fabricação de moldes para injeção de materiais plásticos, segundo informa Guitrau (1997). Pelo fato de na usinagem por eletroerosão não existir contato mecânico entre a ferramenta e a peça a ser confeccionada, já que a remoção de material é principalmente decorrente de fenômenos termoelétricos produzidos por descargas elétricas entre o eletrodo-ferramenta e o eletrodo-peça, o processo de eletroerosão é muito utilizado na usinagem de materiais de difícil processamento, como os aços temperados e ligas de alta dureza, para os quais existem muitos estudos desenvolvidos sobre a determinação de parâmetros adequados de processo, assim como também sobre a influência da eletroerosão em relação a aspectos de integridade superficial das peças, relata Amorim (2002).

Devido às características do princípio de usinagem do processo de EDM, a erodibilidade de um material apresenta muito pouca dependência de suas propriedades mecânicas. Em contrapartida, as propriedades físicas dos materiais representam o fator de principal influência na erodibilidade dos materiais submetidos a EDM. Em virtude das diferentes propriedades físicas das ligas de alumínio em comparação com as apresentadas pelos aços, os efeitos térmicos da eletroerosão sobre a integridade superficial de peças do primeiro tipo de material não são iguais àqueles observados nas peças de aço após a eletroerosão.

Erstling (1998) apresenta que as ligas de alumínio de alta resistência têm sido empregadas em substituição aos aços na confecção de moldes de pequena e média produção e na fabricação de protótipos de moldes para injeção de materiais plásticos. Segundo Amorim & Weingaertner (2002), até o momento, existe no Brasil poucos trabalhos experimentais sobre a eletroerosão de ligas de alumínio de alta resistência, em particular sobre os efeitos do processo de EDM na integridade superficial das peças. Neste trabalho foram executados ensaios de eletroerosão em uma liga de alumínio de alta resistência, sob condições de usinagem de desbaste e de acabamento, com o intuito de se observar e quantificar aspectos de integridade superficial como a espessura da camada resolidificada, a dureza e a profundidade da zona termicamente afetada pela EDM e a existência de poros e micro-trincas na superfície das peças.

O material testado foi a liga de alumínio AMP8000, recentemente lançada no mercado pela alemã *ALIMEX Metallhandelsgesellschaft GmbH*. É importante acrescentar que este material não possui ainda nenhuma classificação em normas técnicas internacionais, segundo informa o fabricante ALIMEX (2001). Porém, o mesmo informa que a composição química típica da liga é a seguinte: 4,3-5,2% de Zn; 2,6-3,7% de Mg; 0,5-1,0% de Cu e o restante de alumínio. A liga AMP 8000 apresenta como principais características uma boa resistência mecânica ($\approx 600 \text{ N/mm}^2$) aliada à alta condutividade térmica ($\approx 165 \text{ W/mK}$) - até seis vezes superior à dos aços normalmente usados para moldes ($\approx 30 \text{ W/mK}$) - que possibilita a redução do tempo do ciclo de moldagem ao mesmo tempo em que favorece a simplificação do sistema de refrigeração da ferramenta. Concilia ainda uma boa resistência a corrosão contra a maioria dos materiais plásticos normalmente utilizados. A baixa massa específica ($\approx 2830 \text{ kg/m}^3$) dessa liga, aproximadamente um terço do aço, proporciona um aumento da velocidade de fechamento e abertura dos moldes e, também, menor desgaste do sistema de fechamento, como também maior facilidade de manejo da ferramenta no chão-de-fábrica.

2. MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Usinagem – LAUS da Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR, em Curitiba, utilizando uma máquina de eletroerosão por penetração CNC Charmilles ROBOFORM 30. Para atingir com precisão resultados confiáveis, foram considerados os seguintes materiais e procedimentos:

(a) Amostras quadradas da liga AMP8000, com 25 mm de largura e 15 mm de espessura, apresentando uma textura de superfície $R_a = 2 \mu\text{m}$.

(b) Barras cilíndricas de cobre eletrolítico, com um diâmetro de 20 mm e um furo central de 4 mm, foram montadas axialmente em linha com as peças e utilizadas como eletrodos-ferramenta nas polaridades positiva e negativa.

(c) O fluido dielétrico de hidrocarboneto Arclean Electron – viscosidade de 3 cSt a 20°C –, produzido pela Archem Química Ltda., foi injetado a 0,01 MPa através do furo do eletrodo, proporcionando a lavagem adequada das partículas erodidas para fora da fenda de trabalho.

(d) Foram preparados dois modos de atuação do gerador da máquina ROBOFORM 30, como mostra a Fig 1. O primeiro foi o gerador isoenergético ou de pulsos retangulares, que significa que é possível estabelecer – dentre outros parâmetros de eletroerosão – a duração da descarga t_e e uma corrente de descarga \hat{i}_e constante entre os eletrodos (ferramenta e peça). O segundo modo foi o de circuito de relaxação. Em um gerador assim, uma fonte de alimentação DC carrega um capacitor e simultaneamente os eletrodos até atingir a tensão de ionização do dielétrico provocando, em consequência, uma descarga elétrica entre os eletrodos. Durante a descarga ocorre continuamente uma inversão da corrente e da tensão até um descarregamento quase total da energia armazenada no capacitor. Esse tipo de gerador normalmente é utilizado em operações de eletroerosão fina, embora seja possível apenas um controle limitado do processo de eletroerosão. A principal vantagem do gerador de relaxação é diminuir para níveis bastante baixos a quantidade de cargas elétricas residuais nos eletrodos, fato este que resulta em um processo de usinagem mais estável.

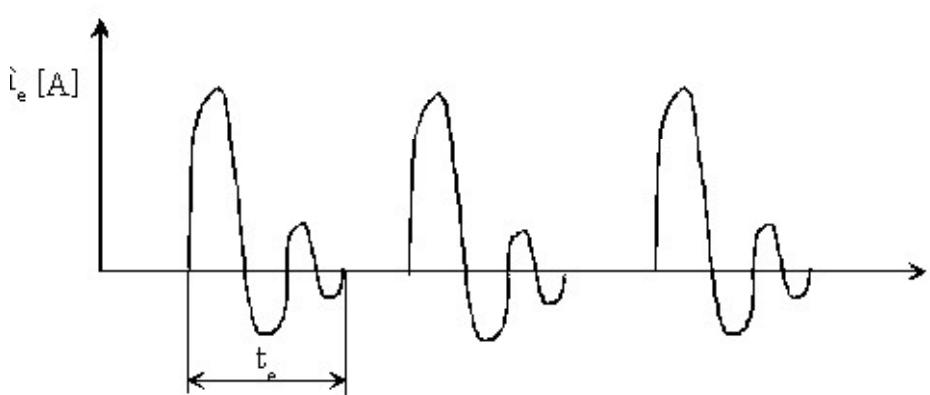
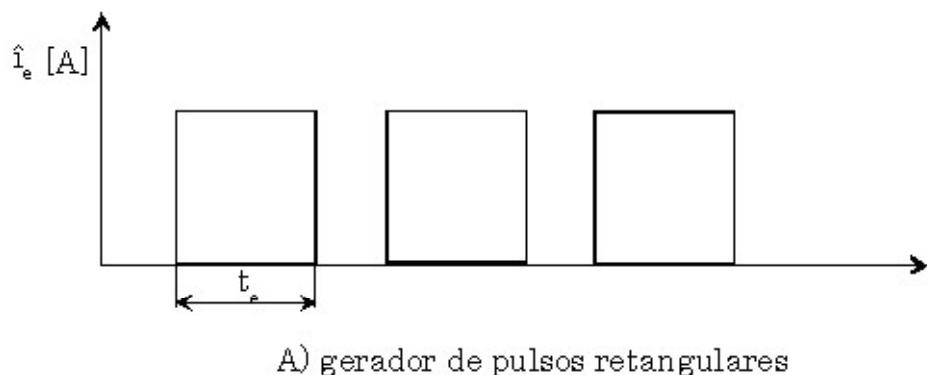


Figura 1. Esquema simplificado do comportamento da corrente de descarga \hat{i}_e segundo o modo de atuação do gerador da máquina de EDM.

(e) A relação de contato τ , como destaca da Fig.2, que significa a razão entre a duração do pulso t_i e o tempo do período t_p ($t_p = t_i + t_o$), foi estabelecida constante a 0,8 para todos os testes de desbaste. Esse valor de τ foi utilizado devido à boa estabilidade observada em operações de eletroerosão para essa condição, o que significa poucas ocorrências de curtos-circuitos e emissões de arco, assim como uma lavagem adequada das partículas erodidas para fora da fenda de trabalho.

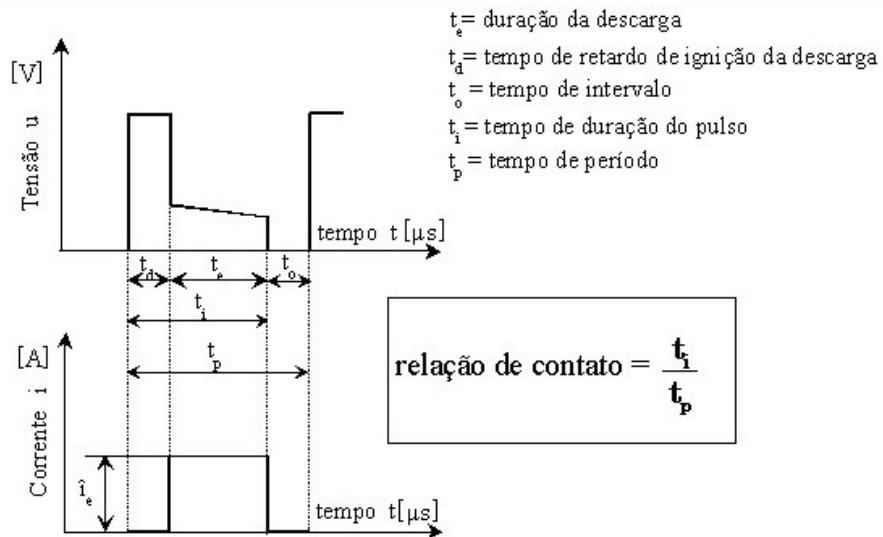


Figura 2. Evolução da tensão e corrente elétricas durante a descarga de uma faísca.

Na eletroerosão de acabamento definiu-se o valor 0,5 para a relação de contato, isto é $t_i = t_o$. Por outro lado, níveis de τ mais altos do que 0,5 ($t_i > t_o$), definidos reduzindo o valor de t_o em relação a t_i , provavelmente causariam uma concentração excessiva de detritos na fenda de trabalho, provocando uma remoção de material não uniforme ao longo das superfícies frontais de ambos os eletrodos, bem como um possível aumento da rugosidade.

(f) A tensão em aberto \hat{u}_i tem uma relação intrínseca com a magnitude da fenda de trabalho, isto é, a distância entre os eletrodos durante a descarga. Quanto maior o valor de \hat{u}_i , maior é a fenda de trabalho. Portanto, é uma prática comum definir \hat{u}_i em níveis mais baixos – 80, 100, 120 V – quando se realiza eletroerosão sob condições de desbaste, pois a alta energia média $W_e = u_e \cdot i_e \cdot t_e$ [J] consegue manter uma fenda de trabalho maior, que, por sua vez, provoca a expulsão apropriada dos detritos. Conforme a energia W_e é diminuída, também diminui a magnitude da fenda de trabalho. Portanto, em operações de eletroerosão de acabamento é recomendado estabelecer valores mais altos de \hat{u}_i para promover uma fenda de trabalho mais adequada. Neste estudo, foi estabelecido o valor $\hat{u}_i = 160$ V para os testes sob condições de desbaste e para a usinagem de acabamento utilizou-se $\hat{u}_i = 200$ V. Essas magnitudes de \hat{u}_i garantiram uma dispersão apropriada das descargas ao longo da área frontal dos eletrodos e boas condições de lavagem dos produtos da remoção.

(g) Para cada condição de teste foram realizadas três repetições, sendo o tempo médio de 45 min definido para a usinagem de desbaste e 90 min para a usinagem de acabamento.

A Tab. 1, a seguir, apresenta detalhadamente os parâmetros elétricos utilizados nos testes deste trabalho. Estes parâmetros representam condições adequadas sugeridas para a usinagem da liga AMP8000 e foram estabelecidos por Amorim (2002).

Tabela 1. Definições dos parâmetros de EDM para os ensaios.

Corrente de descarga i_e [A]	Duração da descarga t_e [μs]	Tempo de intervalo t_o [μs]	Tensão em aberto \hat{u}_i [V]	Polaridade da ferramenta	Modo do gerador
32	400	100	160	(+)	isoenergético
24	100	25	160	(+)	isoenergético
6	25	25	160	(+)	isoenergético
2	3,2	3,2	200	(-)	relaxação
1	3,2	3,2	200	(-)	relaxação

2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo argumenta Barash (1965), Massarelli & Marchioni (1977), Jutzler (1982), Kruth *et al.* (1995) e König & Klocke (1997), citados por Amorim & Weingaertner (2004), as peças usinadas por eletroerosão apresentam uma zona superficial afetada termicamente (ZAT) pelo processo, sendo esta zona constituída por várias camadas. De acordo com os autores citados acima e conforme a norma VDI 3402 - Blatt4 (2000), a ZAT é primeiramente constituída por uma camada superficial conhecida como camada branca (*recast layer*), sendo observada após a mesma a existência de uma zona de transformação de fase (*phase transformation zone*) seguida por uma zona de conversão (*conversion zone*).

A camada branca situa-se exatamente na superfície da peça e é formada pelo material eletroerodido que não foi evacuado da fenda de trabalho e que acabou por se solidificar na cratera recém formada e nas suas adjacências. No caso dos aços, como destaca a Fig. 3A, essa camada possui pouca uniformidade de espessura, estrutura heterogênea e uma dureza maior que a do material base. Apresenta-se também com muitos e poros e microtrincas, devido às altas tensões residuais causadas pelo fenômeno da eletroerosão, como se pode observar na Fig. 3B. Cabe acrescentar que as microtrincas geralmente não ultrapassam os limites de espessura da camada branca.

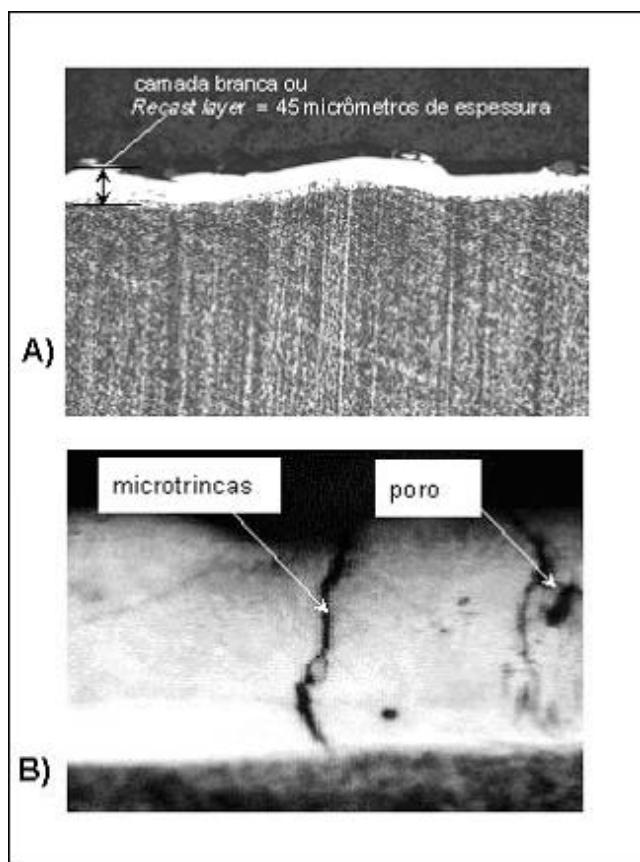


Figura 3. Amostra de aço AISI P20 após EDM com $i_e = 32\text{ A}$, $t_e = 400\text{ }\mu\text{s}$ e $\tau = 0,8$. (A) Seção transversal da amostra destacando a camada branca ou *recast layer* e (B) destaque da existência de micro trincas e poros, com ampliação de 50 vezes - Amorim & Weingaertner (2004).

Logo abaixo da camada branca aparece a zona de transformação de fase, que é causada pelo calor gerado pelo processo de EDM e por esse motivo é onde acontecem modificações químicas e estruturais. Essa zona é normalmente constituída por múltiplas camadas, as quais dificilmente são distinguidas umas das outras. No caso dos aços, observa-se normalmente abaixo da camada branca uma camada temperada, cuja dureza é maior que a do material base da liga.

Abaixo da zona de transformação de fase é encontrada a zona de conversão (conversion zone), a qual, nos aços, apresenta-se revenida, sendo esta finalmente seguida pelo material base da liga, que não sofreu nenhum efeito do processo de EDM.

Na Fig. 4 estão expostas micrografias da seção transversal de amostras da liga AMP 8000 usinadas sob condições de desbaste e de acabamento do processo. Pelas micrografias é possível observar a presença de uma camada negra superficial. Esta camada, similar ao comportamento dos aços, representa o material liquefeito que não foi expulso pela lavagem e que acabou por se solidificar na cratera e nas regiões circunvizinhas. Um aspecto interessante é que essa camada se apresenta extremamente porosa para usinagem com correntes de descarga $i_e = 32 \text{ A}$ e 24 A (Fig. 4A e 4B), aspecto inexistente no material base da liga.

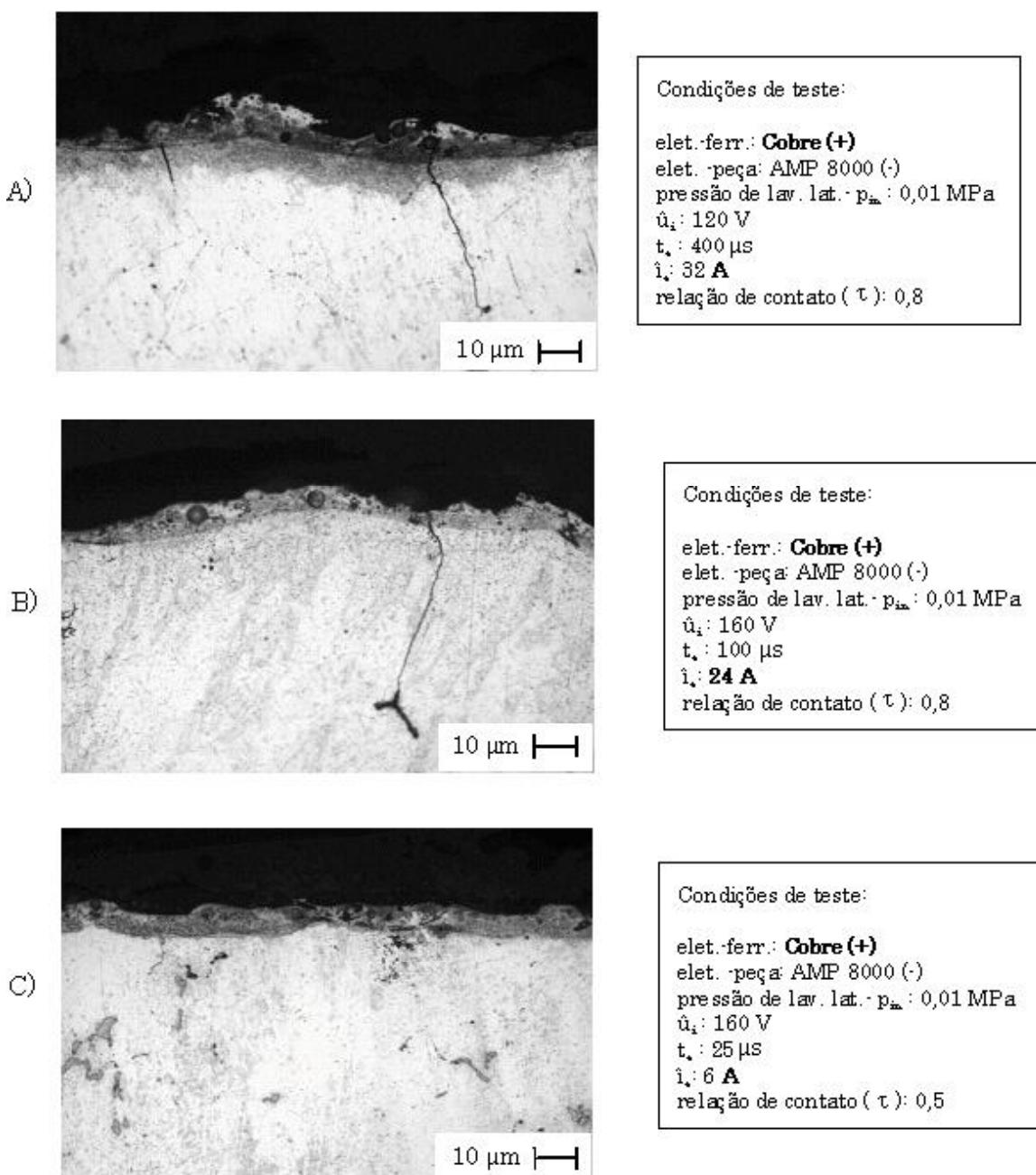


Figura 4. Micrografias de seções transversais de amostras da liga AMP8000 sob (A) e (B) usinagem de desbaste e (C) usinagem de acabamento, utilizando gerador no modo isoenergético.

Esta porosidade é possivelmente causada pela turbulência promovida pelo fluxo dielétrico através da peça e da ferramenta durante a lavagem, assim como também pelos gases liberados pelo processo e que não foram expulsos para fora da fenda de trabalho, os quais no decorrer da rápida solidificação do material ficaram retidos na camada superficial.

Pode-se notar pela micrografia da Fig. 4C que com a redução da energia fornecida ao processo, isto é, com a corrente de descarga $i_e = 6 \text{ A}$, a quantidade e o tamanho dos poros tende a diminuir, assim como também a presença de microfissuras.

Nos caso da usinagem dos aços, a presença das microfissuras permanece normalmente restrita à camada superficial branca, como destacado na Fig 3B. Já na usinagem da liga AMP 8000, observa-se que as microfissuras se propagam além da camada superficial, chegando a atingir o material base da liga, como destacado nas micrografias das Fig. 4A e 4B, fato este que tende a comprometer seriamente a vida das ferramentas de moldagem pelo fato de reduzir a resistência a fadiga quando a ferramenta éposta em trabalho.

Na Fig. 5 as micrografias A e B correspondem a amostras de seções transversais da liga AMP 8000 usinadas sob condições de acabamento fino do processo de EDM, ou seja, neste caso o gerador da máquina foi programado para atuar no modo de relaxação.

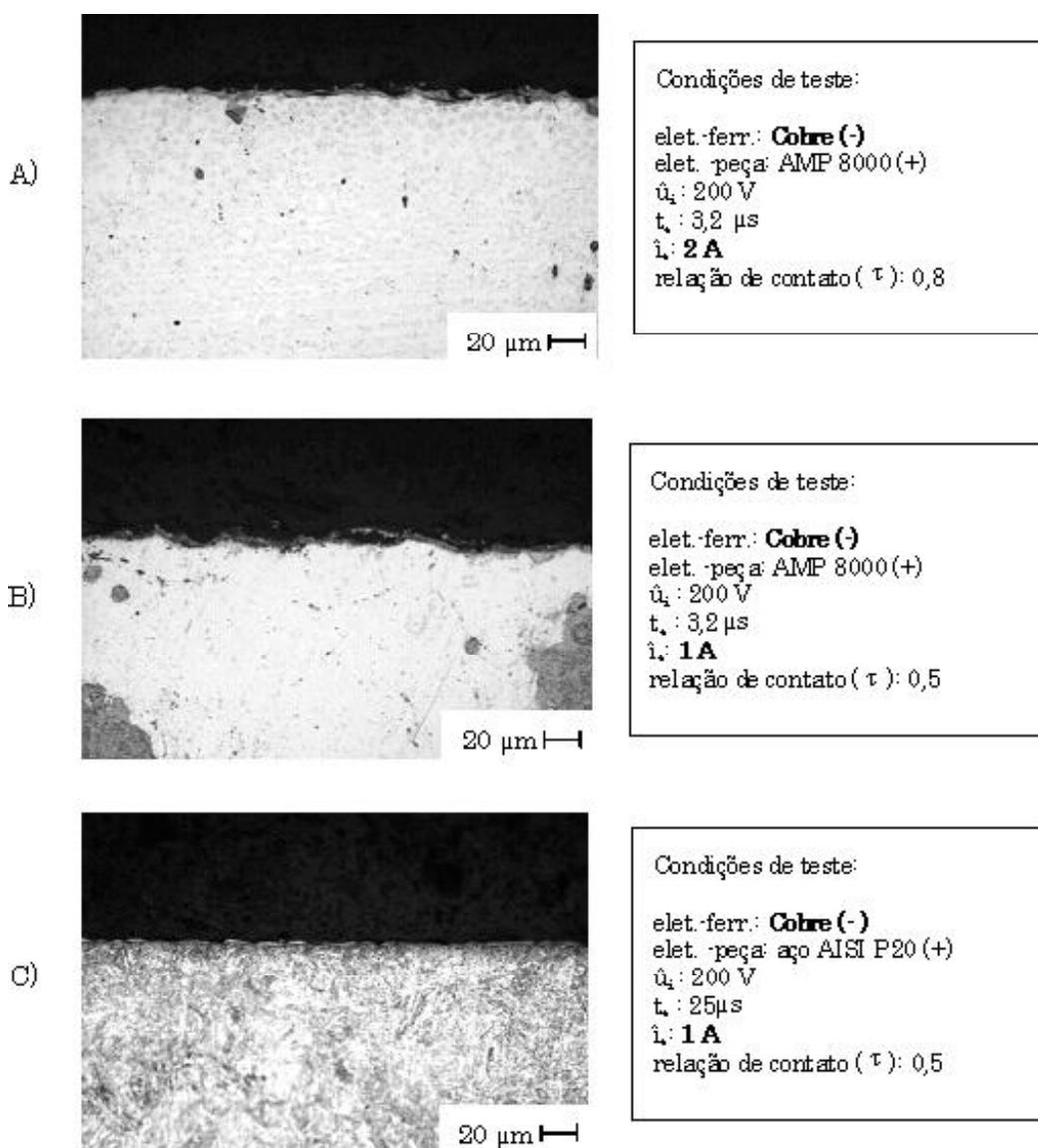


Figura 5. Micrografias (A) e (B) de seções transversais da liga AMP 800 e (c) do aço AISI P20 sob condições de acabamento, utilizando gerador no modo de relaxação.

A micrografia da Fig. 5C destaca a seção transversal de uma amostra de aço AISI P20 também usinada com o gerador no modo de relaxação. É possível perceber que a amostra de aço apresenta uma camada superficial bem mais uniforme que aquela produzida na liga AMP 8000. Pela comparação das Fig. 4 e Fig. 5 constata-se que para baixas correntes de descarga I_e a camada superficial da liga AMP 8000 tende a ser extremamente fina. Nota-se também que não existe a formação de microfissuras, aspecto positivo no que se refere à resistência a fadiga das ferramentas de moldagem.

Medições de microdureza Vickers [HV] partindo da camada superficial e percorrendo o sentido do material base da liga, indicaram que no caso da liga AMP 8000 a dureza tende a aumentar, como destaca a Fig 5. Para a liga AMP 8000 usinada com $I_e = 32$ A na condição da duração ótima da descarga $t_e = 400 \mu\text{s}$, a qual promoveu o máximo valor da taxa V_w , é observada na camada superficial uma dureza de 101 HV, a qual aumentou gradualmente para 159 HV no material base da liga. Apesar de não ser visível por exame ao microscópio óptico, a presença da zona termicamente afetada pelo processo pode ser inferida pelo aumento gradual da dureza.

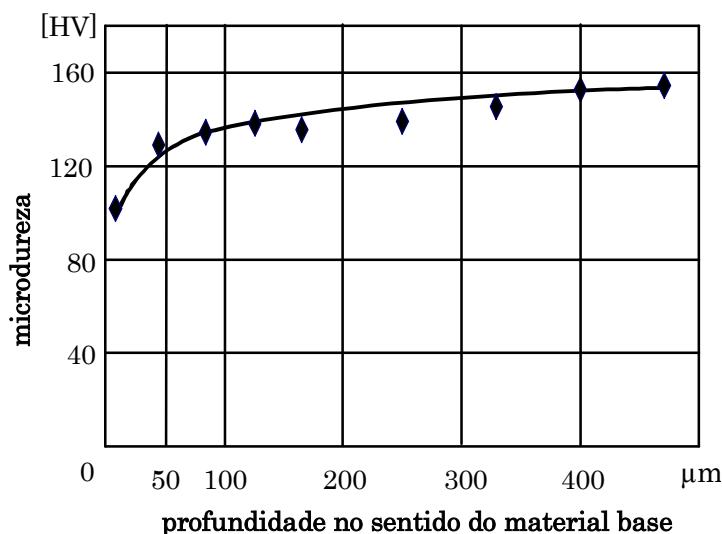


Figura. 5.Comportamento da microdureza Vickers [HV] na usinagem de desbaste da liga AMP 8000 a partir da camada superficial até o material base da liga, para corrente de descarga de 32 A, duração da descarga $I_e = 400 \mu\text{s}$ e gerador isoenergético.

Na eletroerosão do aço AISI P20 sob as mesmas condições de usinagem da liga AMP 8000, observa-se um fenômeno oposto, ou seja, a dureza tende a diminuir na medida em que se aprofunda no sentido do material base da liga. Foram executadas cinco medições de microdureza em intervalos espaçados de 40 μm a partir da superfície da amostra do AISI P20, como apresentado na Tab. 2. Na camada superficial observou-se 435 HV e algo em torno de 327 HV ou aproximadamente 33 HRC no material base da liga, sendo esta última a dureza do aço AISI P20 de acordo com informações do fabricante.

Tabela 2 – Microdureza Vickers [HV] para o aço AISIP20 usinado sob condições de desbaste.

Profundidade de medição [μm]	Dureza [HV] $I_e = 32$ A $t_e = 400 \mu\text{s}$ $\tau = 0,8$
40	435
80	350
120	335
160	333
200	327

3. CONCLUSÕES

Com base nos resultados dos testes, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- (a) no que diz respeito à espessura da camada superficial constatou-se pelas medições que o valor máximo de aproximadamente 18 μm foi obtido para usinagem de desbaste nas condições de corrente de descarga $i_e = 32 \text{ A}$ e $t_e = 400 \mu\text{s}$. Em comparação com o aço, a espessura da camada superficial produzida na liga AMP 8000 é bastante inferior.
- (b) Na usinagem de acabamento com gerador no modo de relaxação foi encontrada a espessura mínima em torno de 6 μm para condições de correntes de descarga $i_e = 1 \text{ A}$ e 2 A e duração da descarga $t_e = 3,2 \mu\text{s}$. Esse nível de espessura é relativamente similar àquele observado nas amostras do aço AISI P20.
- (c) Observou-se a existência de muitos poros e microtrincas na camada superficial das amostras, sendo que estas últimas se propagam até o material base da liga, no caso de usinagem sob condições de desbaste. No entanto, na usinagem de acabamento, isto é, com a diminuição da corrente de descarga i_e , nota-se uma redução significativa da existência de poros e microtrincas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alimex Präzision In Aluminium. Products. Disponível Em: <<http://www.alimex.de>> Acesso em: Janeiro 2001.

Amorim, F.L., 2002. "Tecnologia de Eletroerosão por Penetração da Liga de Alumínio AMP8000 e da liga de cobre CuBe para Ferramentas de Moldagem de Materiais Plásticos. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 156 p.

Amorim, F. L.; Weingaertner, W. L., 2002. "Influence of Duty Factor on the Die-Sinking Electrical Discharge Machining of High-Strength Aluminum Alloy Under Rough Machining". Journal Of The Brazilian Society of Mechanical Sciences And Engineering, Brasil, Vol. 24, No. 3, pp. 194-199.

Amorim, F. L.; Weingaertner, Walter L. 2004. "Die-Sinking Electrical Discharge Machining of a High Strength Copper-Based Alloy for Injection Molds". Journal Of The Brazilian Society of Mechanical Sciences And Engineering, Brasil, Vol. 26, No.2. (IN PRESS).

Erstling, A. 1998. "Aluminium - Ein Werkstoffinspiriert - Designer -Blasform" Der Stahlformenbauer, Düsseldorf, v. 6, n. 1, p.70-80,

Guitrau, E. P. 1997. "The EDM Handbook". 1. ed., Hanser Gardner Publications, 305 p. USA

König, W.; Klocke, F. 1997. "Fertigungsverfahren - 3: Abtragen Und Generieren" Ed. Springer, Berlin, Germany.

VDI - Verein Deutscher Ingenieure. 2000., "3402 - Blatt 4 - Anwendung der Funkenerosion". VEB, Verlag Technik, Berlin.

5. DIREITOS AUTORAIS

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

SOME CHARACTERISTICS OF THE SURFACE INTEGRITY OF AMP8000 ALUMINUM ALLOY AFTER DIE-SINKING ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

Abstract. The process of electrical discharge machining (EDM) causes thermally affected zones on the surface of workpieces. Depending on the depth of those thermal effects, the functionality of a plastic molding tool can be seriously damaged. Thus, it is very important to qualify and to quantify the thermally affected zones on workpieces after EDM. The use of high-strength aluminum alloys as material for injection molding tools to produce small and medium batches of plastic products as well as prototyping molds is becoming of increase demand by the tooling industry. It is known that nowadays in Brazil there is lack of bibliographic material regarding the effects of EDM on the surface integrity of aluminum alloys. In this work an experimental study has been carried out on the rough and finish EDM of a high-strength aluminum alloy in order to analyze the thickness of the recast layer, the hardness and the depth of the heat affected zones and the existence of pores and microcracks.