



CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

VARIAÇÃO DO FLUIDO DIELÉTRICO NA USINAGEM POR ELETROEROSÃO E SUA INFLUÊNCIA NA DUREZA SUPERFICIAL E FORMAÇÃO DA CAMADA NITRETADA NO AÇO AISI H13

Cid Clay Quirino, cidclay@gmail.com¹

Jose Rubens Gonçalves Carneiro, Dr, joserub@pucminas.br²

^{1,2} Pontifícia Universidade Católica-MG, Av Dom José Gaspar, Nº 500 - Coração Eucarístico, Belo Horizonte-MG

Resumo: O objetivo desse trabalho é avaliar a influência do fluido dielétrico utilizado no processo de usinagem por descargas elétricas EDM (Electrical Discharge Machining) no incremento de dureza superficial do aço AISI H13. No processo de usinagem por descarga elétrica EDM a escolha do correto fluido dielétrico, pode garantir resultados desejáveis em termos de qualidade da superfície e taxa de remoção do material. Neste estudo, foi feita a variação do fluido dielétrico adicionando um fluxo externo a alta pressão. Posteriormente foi avaliado a interferência na formação da camada nitretada, quando usinado por eletrodo de cobre eletrolítico. Foram analisados os resultados de três processos: 1 - EDM com água deionizada e ureia 30g/l, utilizando uma fonte de bombeamento externo e abrasivo sob pressão 240 bar; 2 - EDM com o óleo mineral; e 3 - EDM com água deionizada e ureia 30g/l. Diante disto foi possível identificar o aparecimento da camada nitretada nos processos que utilizaram como fluido dielétrico a água deionizada e Ureia, não sendo possível identificar tal camada no processo de EDM com óleo mineral. Quando utilizado o abrasivo óxido de alumínio a alta pressão, ocorreu redução na espessura e na dureza da zona afetada pelo calor. No processo de EDM sem pressão, utilizando como fluido dielétrico a ureia com concentração de 30g/l, observou-se uma maior espessura da camada nitretada e dureza mais elevada na camada imediatamente abaixo da camada branca. Com a avaliação por Microdureza e análise metalográfica, foi possível verificar, nas amostras analisadas, o aparecimento de nitretos em aquelas que utilizaram ureia no processo de usinagem. Como conclusão, temos o efetivo endurecimento da camada abaixo da camada branca, tanto no processo de EDM + Ureia 30g/l quanto no processo de AJEDM + Ureia 30g/l, não sendo possível identificar o mesmo comportamento no processo de EDM utilizando como fluido dielétrico o óleo mineral.

Palavras-chave: EDM- Electrical Discharge Machining, Aço H-13, Nitretação

1. INTRODUÇÃO

Dentre os desafios da indústria, é possível ressaltar o de usinar materiais de maior dureza e desenhos de geometria complexa, onde o processo de usinagem convencional não é recomendado. Tal ocorrência torna cada vez mais necessária a busca por melhorias nos processos de usinagem não convencionais. Como estes são, na maioria das vezes, uma solução economicamente menos viáveis, tem sido comum encontrar estudos sobre a possibilidade de se utilizar processos híbridos, que são a combinação de diferentes fenômenos físicos. Segundo Descoeudres (2004), apesar de possuir vantagens, como a capacidade de usinar materiais duros e de geometrias complexas, a evolução da EDM tem sido necessária a fim de manter-se competitiva e economicamente interessante para o mercado moderno.

De acordo com Norliana (2006) o processo de usinagem por eletroerosão EDM - *Electrical Discharge Machine* é um processo não convencional de fabricação, baseado em energia termoeletrônica no qual pulsos de descargas ocorrem em pequenos GAPs entre o eletrodo-ferramenta e o eletrodo-peça, removendo o material da superfície através da fusão e vaporização. Muthuramalingam (2015) diz que o processo constitui da ferramenta, chamada eletrodo e da peça imersos em um fluido dielétrico. Ambos são ligados a uma fonte de corrente contínua através de cabos, de modo que, ao ser ligado o interruptor, forma-se uma tensão elétrica. O fluido inicialmente possui uma função de isolante, de modo que não há passagem de corrente até que uma distância denominada GAP entre o eletrodo/peça é atingida e o dielétrico passa a atuar como condutor. Quando isso ocorre, devido ao arco elétrico que é gerado, elétrons são emitidos entre o ânodo e catodo colidindo com as moléculas do dielétrico. Assim diminui a resistência da coluna de fluido, de modo a gerar uma descarga elétrica com energia suficiente para fundir e vaporizar o material criando uma pequena cratera na

superfície da peça. Afastando-se novamente o eletrodo da peça, a corrente é interrompida e os detritos de material são removidos pelo fluido.

O processo consiste, portanto em repetidas aproximações e afastamentos entre a ferramenta e a peça. Se esse campo elétrico é forte o bastante para que a força eletrostática possa induzir os elétrons livres, os elétrons são acelerados pelo campo elétrico, a partir do elemento negativo para o elemento positivo. Após essa fase, ocorrem colisões (elásticas e inelásticas) entre os elétrons com as moléculas do fluido dielétrico, ocorrendo a ionização das moléculas do dielétrico gerando mais íons e elétrons livres. Colisões secundárias e terciárias ocorrem aumentando a concentração de elétrons entre o eletrodo-ferramenta e a peça (canal de plasma). Ocorre nesse momento o aumento na colisão de elétrons com a peça causando alta temperatura (solda localizada e remoção de material).

Santos (2013) descreve que o processo de EDM possui como característica, uma baixa TRM (taxa de remoção de material) se comparado com processos de usinagem convencionais. Assim com o objetivo de melhorar a TRM, foi desenvolvido o processo híbrido AJEDM. Arantes (2007) ressalta que essa técnica é a combinação entre os processos de EDM e o processo não convencional/mecânico *AWJM-Abrasive Water Jet Machining* cuja finalidade é possibilitar uma melhoria nos parâmetros de TRM, tornando o processo mais rápido em relação à EDM. As partículas abrasivas, além de ajudarem no processo mecânico de retirada de material, ajudam também a concentrar as descargas elétricas.

Também de acordo com Santos (2013), o processo de nitretação por EDM é caracterizado pela formação de uma zona refundida ocorrendo, logo abaixo desta, alterações microestruturais de uma cor ligeiramente mais escura, formando uma sombra conhecida como zona afetada pelo calor. É importante ressaltar que, segundo Chiaverini (2012) a nitretação é um tratamento de endurecimento superficial do material até certa profundidade, por meio da introdução do nitrogênio contido em um ambiente nitrogenoso, que tem como objetivo endurecer a superfície e aumentar a resistência à corrosão e desgaste. Santos (2013), testou a viabilidade de nitretar o aço AISI-4140 por descargas elétricas através de um canal de plasma rico em nitrogênio implantado na superfície do aço. Desse modo mostrou a viabilidade de aplicação tecnológica deste processo através do uso da solução de água deionizada e ureia.

A formação da zona refundida foi avaliada nesse trabalho, tanto no processo de EDM com dois tipos distintos de fluido dielétrico, como também no processo de AJEDM. O objetivo descrito para esse trabalho é avaliar a influência do fluido dielétrico na formação dessa camada refundida, e no incremento de dureza superficial do aço AISI H13. Para isso foi feita a comparação tanto nos processos: 2 - EDM com fluido dielétrico óleo mineral, 1 - EDM com fluido dielétrico água deionizada e ureia, e 3 - AJEDM com fluido dielétrico água deionizada e ureia.

2. METODOLOGIA

Para execução do processo misto de usinagem por descargas elétricas AJEDM, foi necessário adaptar uma bomba de água de alta pressão, modelo Karcher HD10/25 com pressão de 240 bar, à máquina de eletroerosão, modelo 440NC. Para que fosse possível utilizar a ureia, sem prejuízo a máquina de eletroerosão, foi construído e instalado uma cuba de aço inox AISI 304 para que o fluido dielétrico fosse armazenado. Para garantir o nível do fluido dentro da cuba, foi feita a adaptação de uma bomba de recirculação do fluido, conforme ilustrado na Figura (1). O aço utilizado como metal base para usinagem nesse estudo foi o AISI H13, sem ser submetido a tratamento para aumento de dureza.

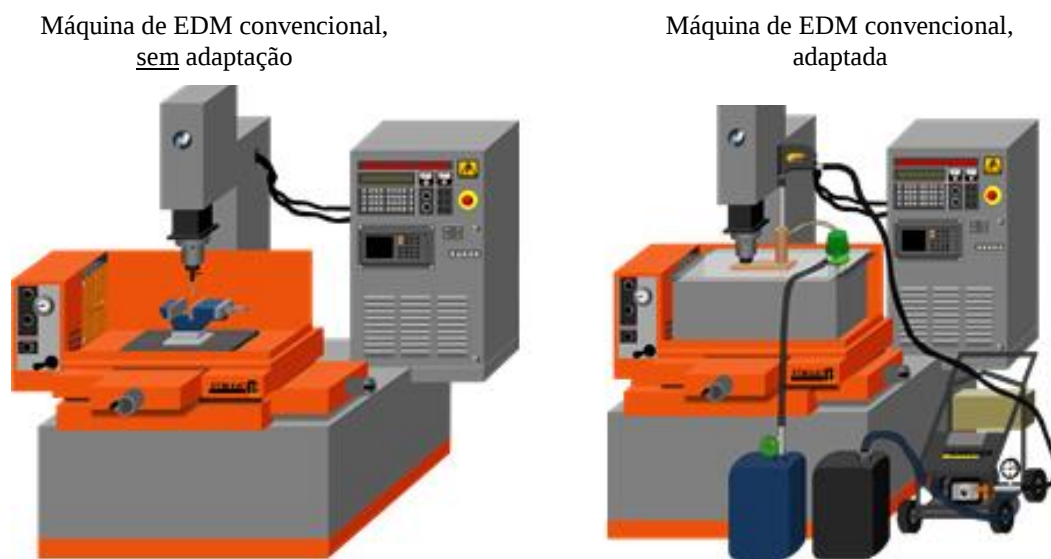


Figura 1. Adaptação máquina EDM para AJEDM (fonte próprio autor)

O bico mostrado na figura (2) foi utilizado na injeção do abrasivo, foi usinado em cobre eletrolítico de forma a possibilitar a inserção de um bico venturi na câmara de injeção. A pressão de água utilizada, foi de 240 bar, e ao se misturar ao abrasivo na câmara de mistura e injetada no processo, possibilitou o aumento na limpeza da posse de fusão e significativo aumento na TRM. Contudo, houve a necessidade de avaliar se tal pressão poderia promover a remoção da ureia na região de alta temperatura e consequente remoção da camada nitretada pelo processo.



Figura 2. Bico Venturi na adaptação para AJEDM (fonte próprio autor)

No processo de usinagem mista AJEDM, O abrasivo utilizado foi o óxido de alumínio, tendo sido submetido ao processo de peneiramento com peneira de 100 mesh, como mostrado na figura (3), com malhas conforme normas ABNT, ASTM e Tyler. Uma amostra de abrasivo foi colocada em um moinho de bolas, porém não apresentou melhora na redução da malha, portanto o procedimento para preparação do abrasivo foi apenas o peneiramento.



Figura 3. Peneiras usadas para peneirar o abrasivo

O tempo de usinagem foi de 10 minutos tanto para os processos sem pressão externa quanto para amostras submetidas ao processo de AJEDM e com pressão externa, como apresentado na tabela 1.

Tabela 1. Tempos e quantidade de amostras para cada processo

PROCESSO/FLUIDO DIELETRICO	TEMPO DE USINAGEM
EDM + Óleo Mineral (min)	10
EDM + Ureia (min)	10
AJEDM (min)	10

Posteriormente, as amostras submetidas a usinagem pelos três processos foram cortadas de forma a possibilitar a observação da cavidade usinada. Cada metade foi preparada para ataque com Nital a 2%. Com o objetivo de observar a zona branca e ZAC-Zona afetada pelo calor, elas foram embutidas e posteriormente lixadas e polidas na politriz, como apresentado na figura (4).

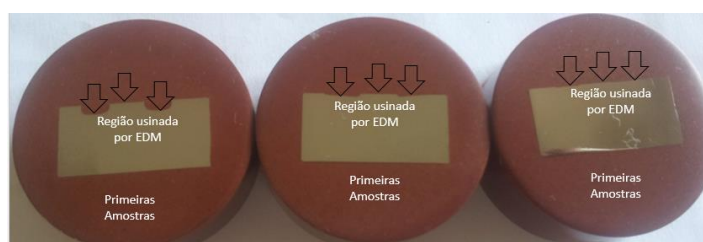


Figura 4. Amostra em aço H13 embutida e preparadas (baquelite de menor dureza)

Posteriormente ao processo de usinagem, preparação e avaliação das primeiras amostras, não foi possível evidenciar a camada endurecida durante a verificação da Microdureza. Como causa, foi identificado que o processo de separação/corte das amostras, foi feito com uma lâmina de serra manual. Tal corte causou a remoção de parte da camada endurecida. Como ação para melhorar o processo, ficou definido que o corte das amostras posteriores, deveria

ser feito antes mesmo da usinagem, ou seja, as amostras deveriam ser cortadas e retificadas de formato bi partido e posteriormente fixadas e usinadas, de forma a preservar a superfície a ser avaliada.

Importante salientar que, durante o processo de preparação e embutimento das primeiras amostras, foi observado o aparecimento de inúmeros planos nas amostras preparadas com baquelite de menor dureza. Isso dificultou a visualização no microscópio da camada afetada pelo calor. Esse foi outro ponto de melhoria observado durante o processo de preparação das primeiras amostras, e para solucionar, foi então utilizado um baquelite de maior dureza quando na preparação das amostras posteriores como visto na figura 5.

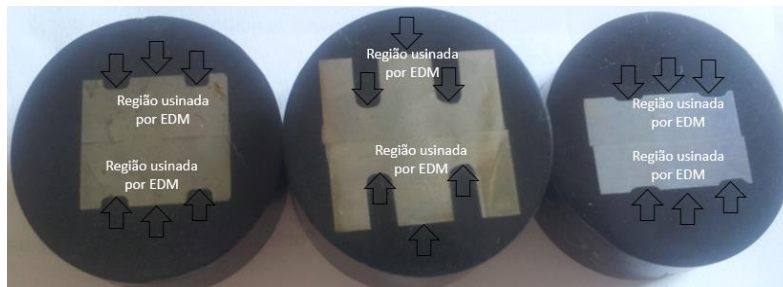


Figura 5. Amostras Bi-partidas em aço H13 embutida e preparadas (baquelite de maior dureza)

2.1. Parâmetros Operacionais processo EDM/AJEDM

Os parâmetros operacionais selecionados no catálogo do fabricante da máquina EDM, estão listados na Tabela 2. E para realização dos testes foi utilizado o regime de desbaste, alterando para cada processo o fluido dielétrico e mantendo os demais parâmetros constantes em todos os processos. Na tabela 2 estão os parâmetros que foram utilizados durante os testes e a unidade de medida de cada um.

Tabela 2. Parâmetros operacionais do Processo de EDM

Parâmetros	
Polaridade Eletrodo/Ferramenta	Negativa
Tensão (V)	110
Corrente ($T_s=10$) (A)	30
Tempo de pulso (T_{on}) – (μs)	100
Relação entre o tempo de pulso e o tempo total (DT) (%)	89
Fenda (<i>gap</i>)	2
Sensibilidade	2
Tempo de erosão (s)	0,5
Afastamento periódico do eletrodo ferramenta (mm)	1
Intervalo entre erosão e afastamento (s)	0

2.2. Fluido dielétrico

Conforme Klockea (2013), vários tipos de fluidos são usados como dielétrico. Normalmente são a base de óleo hidrocarboneto ou água, sendo que as propriedades físicas e químicas do dielétrico têm bastante influência no processo e podem afetar significativamente a produtividade e qualidade da superfície do material. Arantes (2003) diz que alguns fatores precisam ser analisados para que o fluido possa ser utilizado. Por exemplo, a rigidez dielétrica é um valor limite de campo elétrico (kV/mm), sendo que a partir deste valor, os átomos que compõem o material se ionizam e o material dielétrico deixa de funcionar como um isolante. Maior rigidez dielétrica implica menor distância entre ferramenta/peça, com o consequente aumento da precisão da usinagem. Além da rigidez dielétrica, a viscosidade, calor específico, condutividade térmica e ponto de ebulição são determinantes para a escolha do fluido.

Kunieda (2005) diz que o efeito isolante do fluido quando as peças estão afastadas, tem uma importância muito grande, já que evita que ocorra eletrólise no eletrodo durante o processo. Como a peça terá uma forma igual à do eletrodo, o líquido usado precisa ser tal que minimizará o máximo possível o GAP (10-100 μm). Por outro lado, um GAP mínimo é necessário para evitar um curto circuito, principalmente em casos em que o conjunto deve ser sensível a vibração.

É necessária também uma análise do descarte do fluido. Segundo Silva (2007), o descarte pode ser físico ou químico ou ambos combinados, dependendo da contaminação do fluido, da composição, condições locais, legislação ambiental e custos. As etapas mais comuns são a quebra da emulsão, separação do óleo e tratamento da água separada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Análise metalográfica

As figuras 6 e 7 mostram a imagem ampliada em 50 e 200 vezes, do aço AISI H13 após a usinagem por descarga elétrica, utilizando como fluido dielétrico, o óleo mineral por 10 min. A imagem mostra também, as micro-partículas aderidas na superfície da peça, bem como micro-trincas e poros que se formam na cavidade usinada.

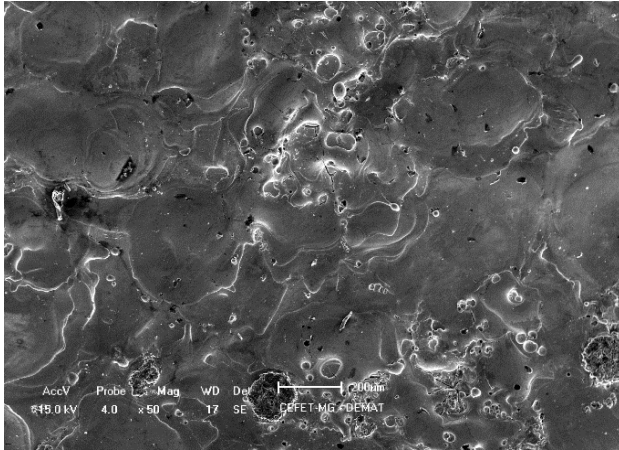


Figura 6. Microestrutura do aço AISI H13 submetido a EDM-Convencional. Atacado com Nital e aumento de 50X

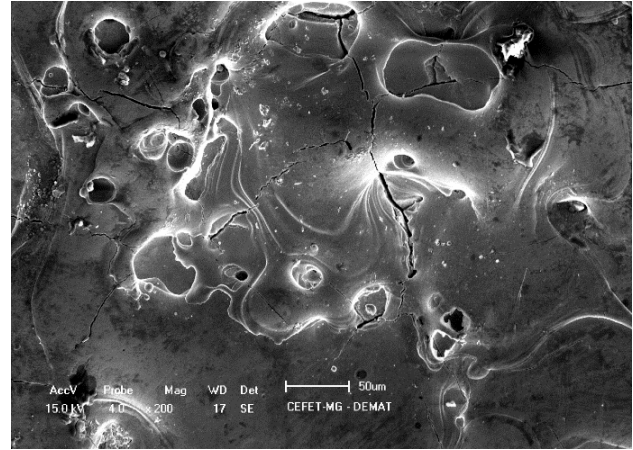


Figura 7. Microestrutura do aço AISI H13 submetido a EDM-Convencional. Atacado: com Nital e umento de 200X

A figura 08 e 09 mostram a imagem ampliada em 50 e 200 vezes, do aço AISI H13 após a usinagem por descarga elétrica, utilizando fluido dielétrico o água deionizada 30g/l, por 10 min. É possível observar micro-partículas aderidas a superfície da peça, porém, surgimento em menor nível de micro-trincas.

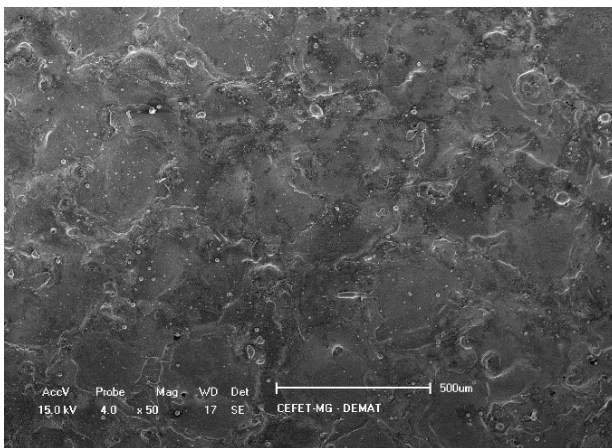


Figura 08. Microestrutura do aço AISI H13 submetido a EDM+Ureia. Atacado com Nital e aumento de 50X

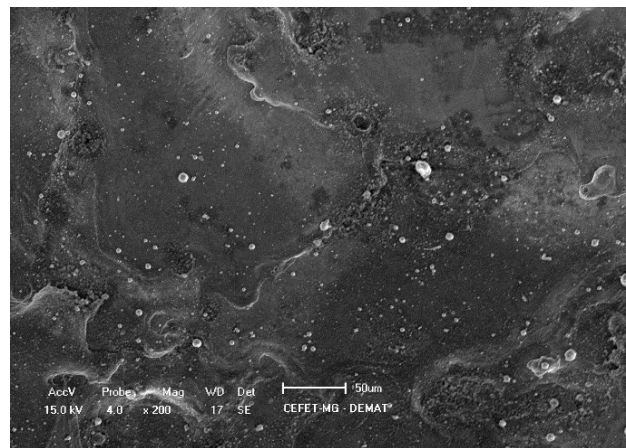


Figura 09. Microestrutura do aço AISI H13 submetido a EDM+Ureia. Atacado: com Nital e aumento de 200X

As figuras 10 e 11 mostram a imagem ampliada em 50 e 200 vezes, do aço AISI H13 após a usinagem por descarga elétrica, utilizando como fluido dielétrico a água deionizada e ureia 30 g/l, com injeção externa de água a alta pressão (AJEDM), por 10 min. A superfície apresenta micro-partículas aderidas sem o aparecimento de micro-trincas, com a presença de poros na cavidade.

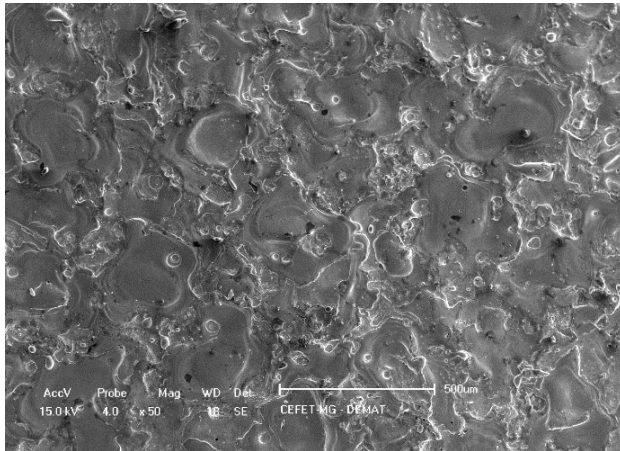


Figura 10. Microestrutura do aço AISI H13 submetido a AJEDM. Atacado com Nital e aumento de 50X

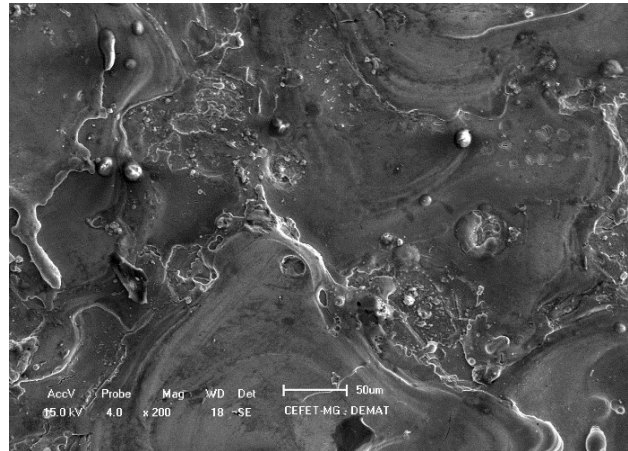


Figura 11. Microestrutura do aço AISI H13 submetido a AJEDM. Atacado com Nital e aumento de 200X

O aparecimento de micro-partículas aderidas foi verificado em maior nível nos processos onde o fluido dielétrico permaneceu estático, ou seja, nos processos que utilizaram o óleo mineral e água deionizada + ureia sem pressão. Já no processo de AJEDM, a pressão externa aumentou a eficiência na limpeza da zona fundida, e consequentemente remoção de parte do material. O mesmo ocorreu com o aparecimento das micro trincas, que aconteceu em níveis maiores no processo onde o fluido dielétrico foi o óleo mineral. Isso se deve ao fato de que a superfície da peça, quando aquecida pela descarga elétrica, é resfriada rapidamente pela ação do fluido dielétrico, ou seja, uma camada refundida forma-se na região. Isso induz o surgimento de tensões térmicas, que promovem o aparecimento de poros e micro-trincas. Com isso, a remoção da camada refundida passa a ser imprescindível para a integridade da peça usinada (FULLER, 1989).

3.2. Análise por Microdureza

A figura 12 mostra o resultado da análise de Microdureza na camada afetada pelo calor da superfície do aço AISI H13, após ter sido submetido a EDM com Óleo Mineral como sendo o fluido dielétrico. O resultado demonstra que não houve aumento de dureza em relação ao metal base (~250 HV), bem como não houve formação da camada afetada pelo calor.



Figura 12. Micro estrutura do aço AISI H13 usinado com fluido (óleo mineral). Attack: Nital 2%

As figuras 13 e 14 mostram o significativo aumento na dureza da camada afetada pelo calor, após ter sido submetido ao procedimento de usinagem por EDM com fluido dielétrico Ureia 30 g/l. Também é possível ver a formação de uma camada ligeiramente escurecida imediatamente abaixo da camada branca, como informado por Santos (2013), camada afetada pelo calor.

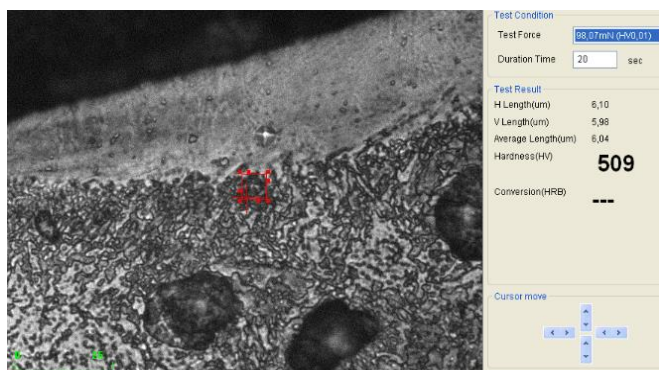


Figura 13. Micro estrutura do aço AISI H13, usinado por EDM e fluido (Água + Ureia 30g/l), Nital 2%

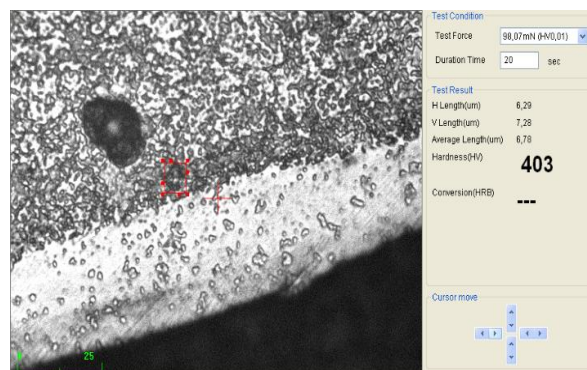


Figura 14. Micro estrutura do aço AISI H13, usinado por EDM e fluido (Água+Ureia 30g/l), Nital 2%

A figura 15 mostra um aumento na dureza da camada afetada pelo calor, após ter sido submetido ao procedimento de usinagem por AJEDM com fluido dielétrico Ureia 30 g/l e pressão externa. O aumento da dureza identificado após a usinagem por AJEDM, foi menor se comparado ao processo sem a pressão externa. Esse resultado está relacionado com o fato de que a pressão externa de água, promove a remoção da ureia na zona fundida, reduzindo a disponibilidade de nitrogênio na mesma durante o processo.

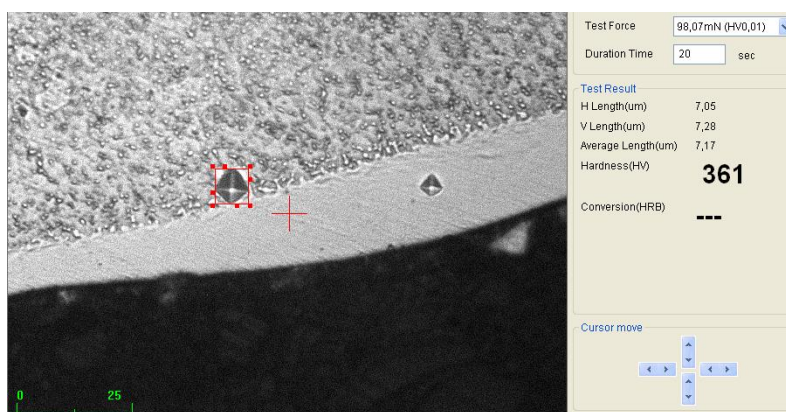


Figura 15. Micro estrutura do aço AISI H13 usinado por AJEDM e fluido Ureia 30g/l, Nital 2%

4. CONCLUSÃO

Diante do exposto, foi possível afirmar que, ocorre nitretação no processo de usinagem por EDM, quando utilizado como fluido dielétrico a água deionizada e ureia, tanto no processo sem pressão, quanto no processo com pressão externa AJEDM. No processo de EDM, que utilizou o óleo mineral como fluido, é possível afirmar que nem o aumento de dureza nem o aparecimento da camada endurecida pelo calor ocorreram. No processo de AJEDM a pressão externa remove em grande medida a disponibilidade de nitrogênio na zona fundida, e reduz tanto os valores de dureza superficial quanto a profundidade da camada endurecida.

Foram identificados, no processo de EDM + Ureia 30g/l, valores de durezas em média de 230 HV no metal base. Após a usinagem, ocorreu incremento para valores de 473HV em média. Já após o processo de AJEDM, foi identificado valores ligeiramente inferiores ao processo anterior, de 317HV, porém com incremento substancial de dureza. Por outro lado, não houve incremento no processo de EDM com óleo mineral.

5. AGRADECIMENTOS

A Puc Minas, pela disponibilidade dos laboratórios necessários para este trabalho. Ao CEFET-MG pela contribuição dos equipamentos para análise metalográfica, e principalmente, pelo apoio nas discussões inerentes ao estudo científico.

6. REFERÊNCIAS

- Arantes, Luciano José, 2003. Avaliação de superfícies usinadas por diferentes fluidos dielétricos no processo de usinagem por eletroerosão. Revista Escola de Minas: REM, Ouro Preto, v.56, n.2, p. 91-96.
- Arantes, Luciano José., 2007. Desenvolvimento e avaliação do processo híbrido de usinagem por descargas elétricas e jato de água abrasivo (AJEDM), p125. Tese (Pós-graduação) – Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Uberlândia.
- Chiaverini, Vicente., 2012. Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7. ed. ampl. e rev. São Paulo: ABm. 599p.
- Descoeudres, A., 2004. A Optical emission spectroscopy of electrical discharge machining plasma. Journal of Physics D, Applied Physics
- Fuller, J. E., 1989. Electrical Discharge Machining, Metals handbook. 9.ed. 1989. V.16, p.557-564.
- Klockea, F. et al., 2013. Analysis of material removal rate and electrode wear in sinking EDM roughing strategies using different graphite grades, p6.
- Kunieda, M., 2005. Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process. CIRP Annals - Manufacturing Technology. Manufacturing Technology, p54.
- Mohd Abbas, Norliana et al., 2007. "A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)". International Journal of Machine Tools and Manufacture, p47.
- Muthuramalingam, T et al. 2015. A review on influence of electrical process parameters in EDM process. Archives Of Civil and Mechanical Engineering, p15.
- Santos, Rogério Felício dos., 2013. Nitretação por EDM do aço AISI 4140, p129.
- Silva, Ernane Rodrigues da., 2007. Comparação do desempenho do fluido dielétrico vegetal com mineral sintético e querosene na eletroerosão do aço AISI H13. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

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

VARIATION OF DIELECTRIC FLUID AT ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING PROCESS, AND INFLUENCE ON HARD SURFACE AND FORMATION OF NITRIDED LAYER AT STEEL AISI H13

Abstract. *The goal of this study is evaluate the influence of the dielectric fluid used at Electrical Discharge Machining process EDM, on increasing surface hardness of steel AISI H13. At electrical discharge machining process, the correct definition of dielectric fluid can ensure desirable results in terms of surface quality and material removal rate MRR. In this study, it was varied the dielectric fluid and it was inserted an external high pressure flow of water and after, the results was evaluate the interference of this process at nitrided layer formation when machined by EDM with electrolytic copper electrode. Results were evaluated from three processes, 1 - EDM with deionized water and urea 30g / l, using a source external abrasive and pumping pressure 240 bar, 2 - EDM with mineral oil and 3 - EDM with deionized water and urea 30g / l. It was possible identify the appearance of the nitrided layer in both processes where the dielectric fluid used were the deionized water plus urea, and it was not possible identify the nitrided layer in the EDM process with mineral oil. When was used abrasive "aluminum oxide" under high pressure, there was a reduction in the hard layer and hardness of the heat affected zone. In EDM process, using a dielectric fluid as urea at a concentration of 30g / l, a larger thickness of the nitrided layer was observed and the highest hardness in heat-affected zone. With the micro hardness and evaluation by metallographic analysis, it was verified, in the samples, the appearance of nitrides in both samples that used urea. In conclusion, we have the actual hardening of the layer immediately below the white layer, both in the process of EDM + Urea 30g / l and in AJEDM process + Urea 30g / l, it is not possible to identify the same results at EDM process using as fluid dielectric mineral oil.*

Keywords: EDM- Eletrical Discharger Machining, Steel H-13, Nitrided