

# NITRETAÇÃO POR EDM DE AÇO AISI 4140<sup>1</sup>

Rogério Felício dos Santos<sup>2</sup>  
Ernane Rodrigues da Silva<sup>2</sup>  
Henara Lillian Costa<sup>3</sup>  
Alberto Arnaldo Raslan<sup>3</sup>

## Resumo

O aço AISI 4140 é amplamente usado na fabricação de eixos, pinos, engrenagens etc., apresentando uma estrutura adequada para processos de nitretação. O objetivo deste trabalho é verificar a possibilidade de nitretação em amostras deste aço, através do processo de usinagem por descargas elétricas (EDM), utilizando como fluido dielétrico, solução de água deionizada e ureia. Os testes foram executados em uma máquina de EDM por penetração convencional, com algumas adaptações. As técnicas de caracterização usadas foram: análise micrográfica, microdureza e difração de raios X. As descargas elétricas foram fotografadas utilizando câmera fotográfica de alta velocidade. Os resultados mostraram a formação de uma camada intermediária, entre a matriz e a zona refundida, rica em nitretos. A dureza desta camada é cerca de 81% maior que a dureza da matriz. A repetitividade destes resultados foi verificada por meio de 5 testes. Foi verificada a presença de camada intermediária também nas laterais da cavidade usinada por EDM. Pode-se concluir que o processo EDM usado, foi eficaz no enriquecimento por nitretos do aço AISI 4140.

**Palavras-chave:** EDM; Aço AISI 4140; Nitretação; Microdureza.

## EDM NITRIDING OF AISI 4140 STEEL

### Abstract

AISI 4140 steels are widely used to the manufacture shafts, pins, gears etc., presenting a structure that is suitable for nitriding processes. The objective of this study is to verify the possibility of nitriding AISI steel samples during electrical discharge machining (EDM), using a solution of deionized water and urea as dielectric fluid. The tests were carried out in a conventional die sinking EDM equipment with some adaptations. The techniques used to characterize the samples after the tests were: Micrographic analysis, hardness and x-ray diffraction. The electrical discharges were photographed using a high speed camera. The results showed the formation of an intermediate layer between the matrix and the recast layer rich in nitrides. The hardness of this layer is about 81% greater than the hardness of the matrix. The repeatability of these results was verified by means of five tests. It was verified the presence of intermediate layer also on the sides of the cavity machined by EDM. The results obtained showed that EDM was effective to enrich AISI 4140 steel with nitrides.

**Key words:** Electrical discharge machining; AISI 4140 steel; Nitriding; Microhardness.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Mestre, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (Cefet-MG), MG, Brasil.

<sup>3</sup> Professor(a) Doutor(a), Universidade Federal de Uberlândia (UFU), MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

As descargas elétricas produzidas nos processos de usinagem por descargas elétricas (EDM= Electrical Discharge Machining), são geradas por um plasma que se forma entre dois eletrodos imersos em um fluido dielétrico. Segundo McGeough<sup>(1)</sup>, as temperaturas geradas são superiores a 15.000°C e são suficientes para fundir a superfície do material do eletrodo peça e, em uma menor escala, do eletrodo ferramenta. Para Tomlinson<sup>(2)</sup>, a remoção do material fundido, cerca de 15%, é feita promovendo-se a circulação do fluido dielétrico, enquanto o restante (85%) é redepositado. De acordo com Kumar<sup>(3)</sup>, algumas tentativas têm sido feitas no sentido de se utilizar a energia gerada na EDM para promover o enriquecimento por liga de superfícies metálicas. Essas técnicas baseiam-se na diluição de pós metálicos no fluido, na transferência de material a partir do eletrodo ferramenta ou de uma combinação de ambas. Porém, poucos resultados práticos têm sido obtidos.

Yan et al.<sup>(4)</sup> investigaram o enriquecimento com nitrogênio de uma liga Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V. Como fonte de nitrogênio, eles usaram ureia diluída em água destilada. Eles registraram a formação de uma camada de nitretos com cerca de 60 µm de espessura. Observaram, ainda, que houve um acréscimo na dureza e na resistência ao desgaste. Camargo et al.<sup>(5)</sup> também investigaram a nitretação por EDM de uma liga Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V. Eles observaram a formação de duas camadas, ambas nitretadas: uma zona refundida e uma camada intermediária, com espessuras da ordem de 54 µm e de 7 µm, respectivamente.

Este trabalho teve por objetivo investigar o processo de nitretação por EDM de um aço AISI 4140.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Na realização dos testes, foi utilizada uma máquina EDM convencional com algumas adaptações. A Figura 1 mostra estas adaptações e a montagem feita para utilização do sistema de alimentação do fluido dielétrico, com bombeamento e sem bombeamento, destacando a hidrojateadora, que tem pressão nominal de 250 bar, e a cuba auxiliar fabricada em aço inox AISI 304. A cuba auxiliar foi adaptada na máquina de EDM, para que não ocorresse contaminação do fluido dielétrico da própria máquina, quando for testar outros fluidos dielétricos. Nesta figura também é mostrado o desenho do sistema de alimentação, que foi projetado para proporcionar a aplicação do jato do fluido dielétrico junto com o processo de usinagem por descargas elétricas. Neste trabalho os testes foram realizados com o regime de alimentação do fluido dielétrico sem bombeamento.

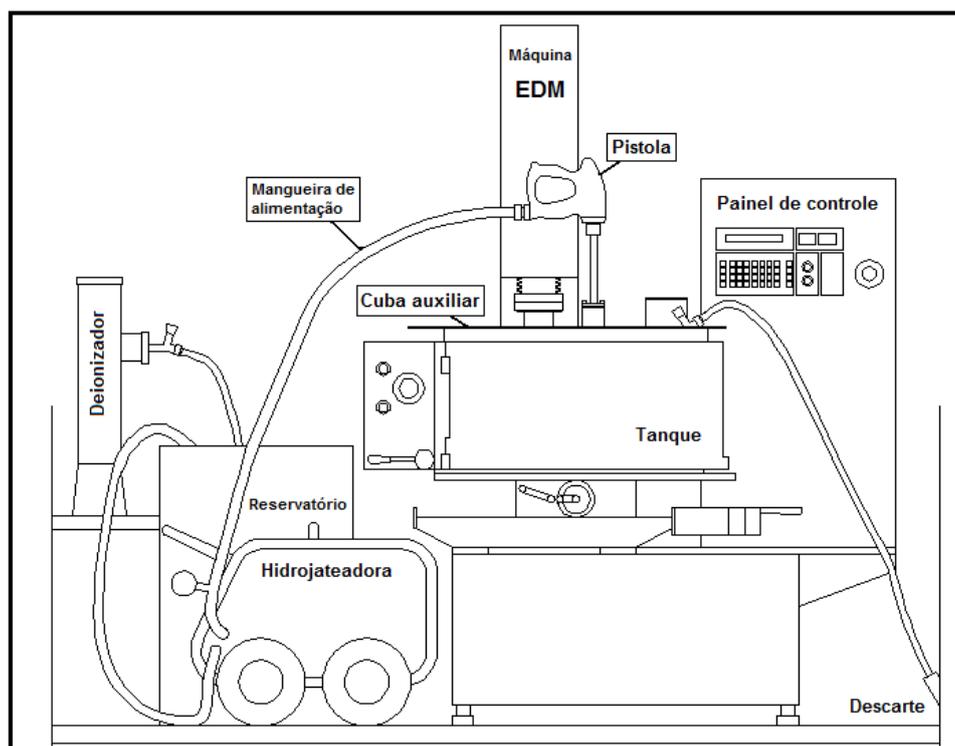


Figura 1. Desenho esquemático das adaptações feitas na máquina EDM para realização dos testes.

Os parâmetros operacionais selecionados são listados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de operacionais empregados na máquina de EDM

Parâmetro		Unidade
Eletrodo ferramenta: Cobre eletrolítico	Ø22x30	mm
Eletrodo peça: Aço AISI 4140	Ø19x10	mm
Fluido dielétrico: Água deionizada e ureia	10	g/l
Polaridade da ferramenta	Negativa	
Tensão	110	V
Corrente (TS = 10)	30	A
Tempo de pulso ( $T_{on}$ )	100	$\mu$ s
Relação entre o tempo de pulso e o tempo total ( $T_{off}$ )	50	%
Fenda ( <i>gap</i> )	2	
Tempo de erosão	5	s
Afastamento periódico da ferramenta	1	mm
Intervalo entre erosão e afastamento	0	s

A duração de cada teste foi de 5 minutos.

Através de preparação metalográfica, revelaram-se as microestruturas na seção transversal das amostras e as mesmas foram analisadas por microscopia ótica.

A presença de nitretos foi avaliada por difração de raios X. As especificações técnicas do difratômetro e os parâmetros de varredura utilizados nas medições estão descritos na Tabela 2.

**Tabela 2.** Especificações técnicas e parâmetros usados na difração de raios X

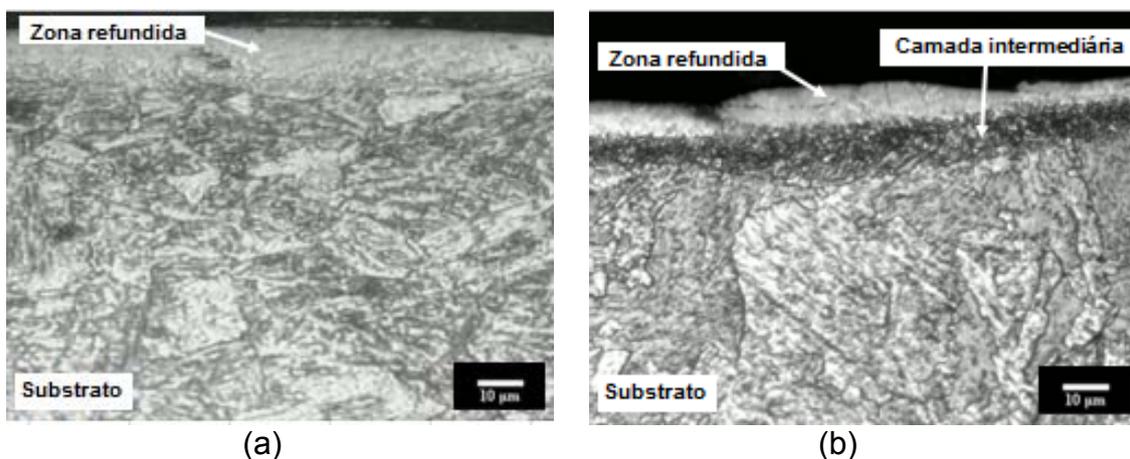
Parâmetro		Unidade
Radiação	Cu-K $\alpha$	
Voltagem do tubo	40	kV
Corrente	30	mA
Modo de varredura	Contínuo	
Espaçamento	0,02°	
Velocidade de varredura	2,00	graus/minuto
Ângulo inicial (2 $\theta$ )	4°	
Ângulo final (2 $\theta$ )	80°	

As propriedades mecânicas foram determinadas por ensaios de microdureza Vickers, com carga de 25 gf.

O canal de plasma foi fotografado usando câmera Hi Spec 5 Fastec com velocidade de 500 quadros por segundo e cada quadro medindo 12,8 x 5,0 mm.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As descargas elétricas aplicadas na superfície de amostras de aço AISI 4140 produziram as microestruturas, seção transversal, mostradas na Figura 2. Na Figura 2a foi utilizada somente a água deionizada e na Figura 2b foi usada uma mistura de água deionizada com 10 g/l de ureia.



**Figura 2.** Microestrutura da seção transversal de amostras de aço AISI 4140. (a) – água deionizada e (b) – água deionizada com ureia.

Nota-se que, na presença de ureia, Figura 2b, são formadas duas camadas: uma zona refundida e a camada intermediária. Pode-se afirmar que a camada se forma em decorrência da presença de ureia, uma vez que ela não surge na Figura 2a. Portanto, descarta-se a hipótese dela se formar por algum efeito de natureza térmica.

O difratograma de raios X mostrado na Figura 3 revelou a presença de nitretos de ferro FeN e  $\epsilon$ -Fe<sub>2-3</sub>N.

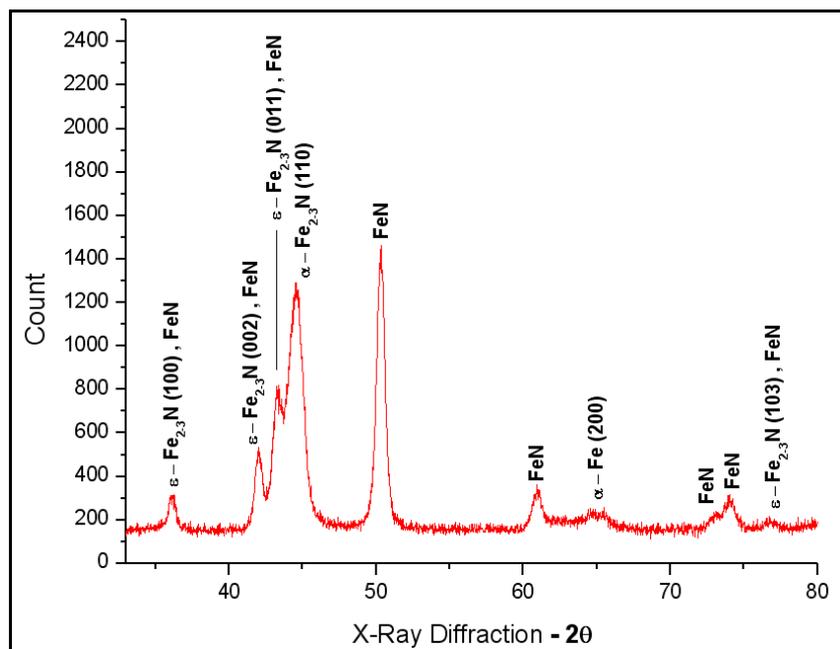


Figura 3. Presença de nitretos de ferro em aço AISI 4140 nitretado por EDM.

Alguns picos observados no difratograma coincidem com os encontrados por Goulart-Santos<sup>(6)</sup> em seu trabalho de pesquisa. No entanto, o deslocamento na direção de parâmetros de rede pode ser atribuído à saturação pelos átomos de nitrogênio introduzidos durante o processo EDM.

Os resultados obtidos através das micrografias para as medições das espessuras das camadas são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3. Espessuras da zona refundida e camada intermediária em  $\mu\text{m}$

Amostra	Água deionizada	Água deionizada e ureia				
		01	02	03	04	05
Camada Intermediária		11,37	11,89	12,58	11,51	11,77
		$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$
		1,17	1,32	0,62	2,13	1,47
Zona Refundida	11,34	9,06	9,50	10,03	9,23	9,36
	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$
	1,15	0,90	1,08	0,49	1,68	1,17

Observa-se que há uma reprodutibilidade nos resultados, seja do ponto de vista qualitativo, com a formação da camada intermediária nas 5 amostras ensaiadas, seja do ponto de vista quantitativo, pois apresentam espessuras similares.

Os resultados da espessura da zona refundida e camada intermediária apresentados na Tabela 3 estão condizentes com os obtidos por Camargo et al.<sup>(5)</sup> na liga  $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ , usinada por EDM, utilizando água deionizada e ureia como fluido dielétrico.

As profundidades alcançadas são compatíveis com as obtidas nos processos de nitretação iônica convencional, encontradas por Goulart-Santos<sup>(6)</sup>. É a explicação mais plausível para a formação da camada intermediária. No caso da zona refundida, a hipótese de uma parte do nitrogênio ficar aprisionado na poça de fusão, não pode ser descartada.

O aumento da quantidade de ureia, além das 10g/l, não permite a formação de um canal de plasma. A resistividade elétrica da água é abaixada a níveis que não possibilitam a ocorrência de descarga.

Os resultados obtidos de microdureza Vickers, com carga de 25 gf, são mostrados na Tabela 4.

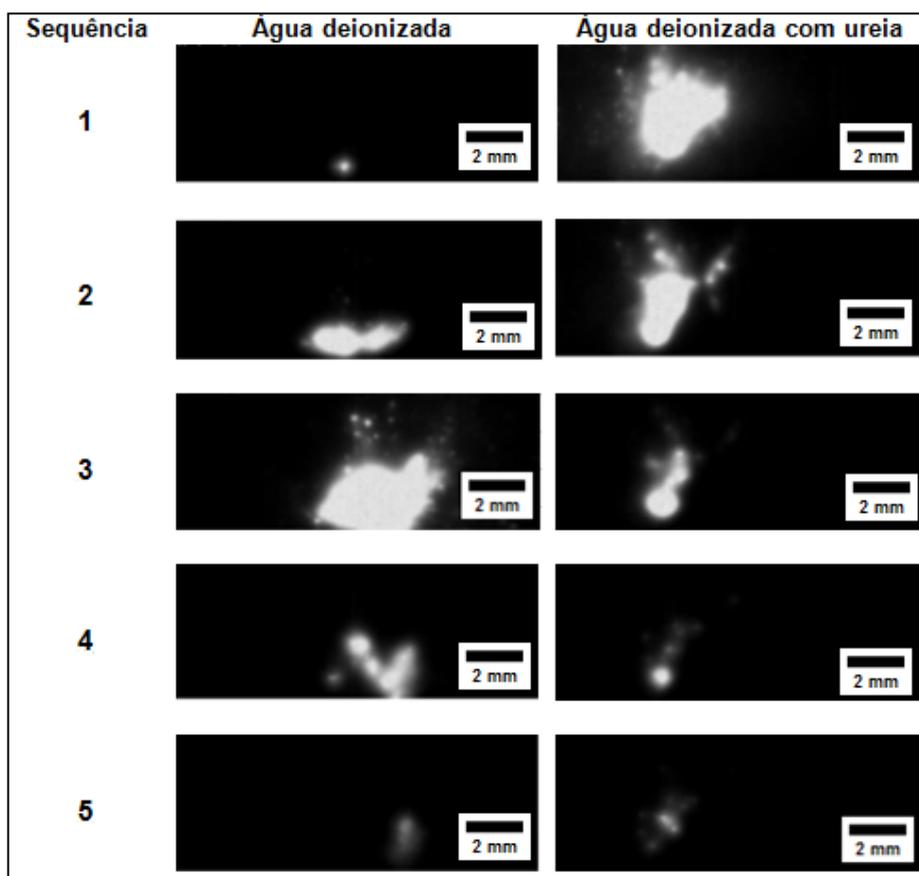
**Tabela 4.** Microdureza Vickers (25 gf) de aço AISI 4140 nitretado por EDM

	Água Deionizada (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Água Deionizada e ureia (Kgf/mm <sup>2</sup> )
Matriz	573,03 ± 22,45	489,49 ± 66,32
Camada Intermediária		887,54 ± 39,83
Zona Refundida	1163,46 ± 134,82	1203,32 ± 81,45

Nota-se que os nitretos provocam um endurecimento das camadas, sendo maior na zona refundida, possivelmente, por conter uma maior quantidade deles. A microdureza da camada intermediária da amostra usinada por EDM usando água deionizada e ureia como fluido dielétrico é 81% maior que a microdureza da matriz.

Os valores de microdureza da zona refundida são 35% maiores que a microdureza da camada intermediária, provavelmente devido a uma maior concentração de nitretos. No caso da liga Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V, investigada por Camargo et al.<sup>(5)</sup> a camada mais dura foi a intermediária. Essa diferença de comportamento em relação ao aço AISI 4140 precisa ser melhor investigada.

Na Figura 4 são mostradas imagens das alterações sofridas pelo canal de plasma, após a inserção da ureia na água deionizada.



**Figura 4.** Canal de plasma formado na EDM utilizando água deionizada e água deionizada com ureia como fluidos dielétricos.

Na sequência das imagens do canal de plasma, fotografado quando se usou água deionizada e ureia como fluido dielétrico, foi observado um decréscimo gradual da luminosidade e nas dimensões da descarga elétrica. Nota-se a interferência da ureia/nitrogênio no canal de plasma. Com o aquecimento, a ureia é decomposta e o nitrogênio é liberado. Ele fica aprisionado no canal de plasma na forma iônica. Ao ocorrer a descarga, o íon com elevada energia cinética, penetra na superfície do material.

A ocorrência de descargas elétricas nas laterais do eletrodo-ferramenta permite afirmar que a nitretação ocorre, também nas laterais da cavidade formada com o avanço do eletrodo-ferramenta. Esta hipótese é confirmada pelas microestruturas da Figura 5.

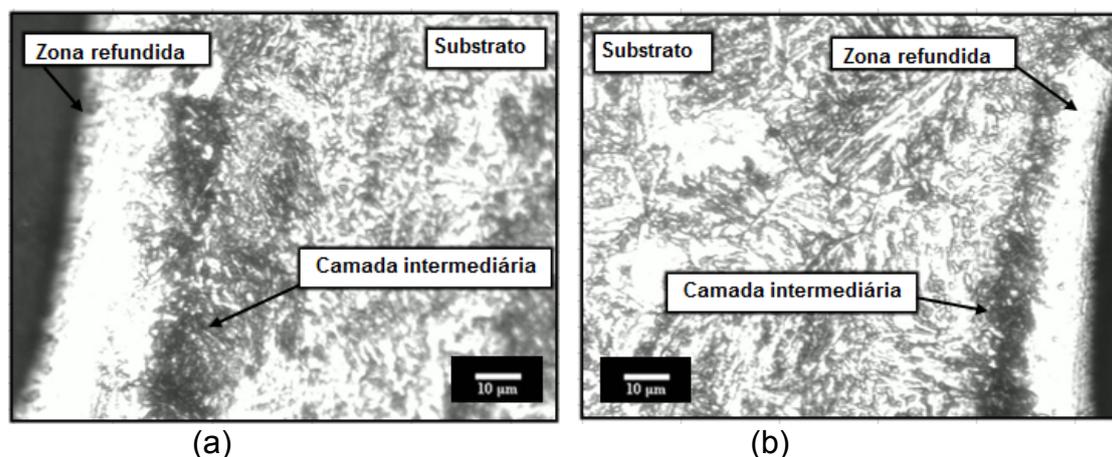


Figura 5. Nitretação produzida nas laterais (a) – esquerda e (b) – direita da cavidade.

As espessuras médias de 11 μm para a zona refundida e 9 μm para camada intermediária mostraram-se com valores próximos àquelas produzidas no fundo da cavidade (Tabela 3). Apesar das descargas laterais serem de menor intensidade, são suficientes para produzirem camada intermediária e zona refundida.

Arantes<sup>(7)</sup> mostrou que a TRM pode ser consideravelmente incrementada através do processo híbrido AJEDM (Abrasive Jet – EDM). Neste caso, a TRM com água deionizada alcança os mesmos níveis das TRMs obtidas com fluidos minerais. Contudo, o eletrodo ferramenta sofre um desgaste bastante acentuado. Em situações em que o eletrodo-ferramenta possa ser sacrificado, a combinação usinagem com nitretação torna-se viável empregando-se o processo AJEDM.

Em operações industriais de usinagem por EDM, a zona refundida que se forma na superfície é retirada por processos de retificação. Esta zona contém concentradores de tensões, como microtrincas e bolhas, que diminuem a vida útil das peças. A necessidade de se retirar a zona refundida nitretada no processo EDM necessita ser avaliada por ensaios tribológicos. Contudo, mesmo que se confirme a necessidade de se retirá-la, total ou parcialmente, ainda restará a camada intermediária.

Ensaio preliminares realizados em outros metais, como alumínio, e em outros aços como aço-carbono, aço-prata, H13 e inoxidável AISI 304, mostraram a formação das duas camadas. Estes materiais apresentam, portanto, potencial para exploração do processo de nitretação por EDM.

Algumas vantagens podem ser destacadas do processo de nitretação por EDM em relação aos tradicionais processos de nitretação gasosa e iônica: 1 – não requer equipamentos sofisticados; 2 – não requer operações complexas; 3 – rápido e é de 4 – baixo custo.

## 4 CONCLUSÃO

A utilização ureia diluída em água deionizada como fluido dielétrico em processos de usinagem por descargas elétricas (EDM) permitiu a obtenção de camadas nitretadas na superfície de amostras de aço AISI 4140.

Os nitretos formados são, principalmente, de ferro tipo FeN e  $\epsilon$ -Fe<sub>2-3</sub>N.

A zona refundida adquiriu uma dureza Vickers da ordem de 1.203 kgf/mm<sup>2</sup> e espessura da ordem de 9,44  $\mu$ m.

A camada intermediária adquiriu uma dureza Vickers da ordem de 887 kgf/mm<sup>2</sup> e espessura da ordem de 11,82  $\mu$ m.

O mecanismo de nitretação através da EDM está associado ao da nitretação iônica convencional.

## Agradecimentos

À Fapemig, pela liberação de recursos do projeto TEC APQ 01481/09. À Capes pelo auxílio financeiro aos pesquisadores.

## REFERÊNCIAS

- 1 MCGEOUGH, J. A. Advanced Methods of Machining. London: Chapman and Hall, 1988. p. 128-152.
- 2 TOMLINSON, W. J.; ADKIN, J. R. Microstructure and properties of electrodischarge machined surfaces. Surface Engineering, 1992, Vol. 8 No. 4, p. 283-288.
- 3 KUMAR, S., SINGH, R., SINGH, T. P., SETHI, B. L. Surface modification by electrical discharge machining: a review. Journal of Materials processing Technology. India, v. 209, 3675-3687, 2009.
- 4 YAN, B. H., TSAI, H. C., HUANG, F. Y., The effect in EDM of a dielectric of a urea solution in water on modifying the surface of titanium. International Journal of Machine Tools & Manufacture, n.45, 194-200, 2005.
- 5 CAMARGO, B. C., COSTA, H. L., RASLAN, A. A. Endurecimento superficial de uma liga Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V por meio de usinagem por descargas elétricas. V COBEF Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Belo Horizonte, MG, 2009.
- 6 GOULART-SANTOS, S. Avaliação do efeito de modificações superficiais a plasma no desempenho frente ao desgaste de um aço baixa liga: estudo da correlação entre profundidade de endurecimento e melhoria de desempenho. 2009. 121f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.
- 7 ARANTES, L. J. Desenvolvimento e avaliação do processo Híbrido de Usinagem por Descargas Elétricas e Jato de Água Abrasivo (AJEDM). 2007. 125f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.