

NITRETAÇÃO COM DESCARGAS ELÉTRICAS DO AÇO IF (*INTERSTITIAL FREE*)¹

Rogério Felício dos Santos²
André Rezende de Figueiredo Oliveira³
Ernane Rodrigues da Silva⁴
Alberto Arnaldo Raslan⁵

Resumo

O potencial de enriquecimento superficial de ligas através do processo EDM (*Electrical Discharge Machining*) tem sido objeto de pesquisas recentes. Entre os processos, o enriquecimento com nitrogênio utilizando descargas elétricas produzidas nos processos EDM, ou processo NDE (Nitretação por Descargas Elétricas) apresentou resultados promissores. Em aço AISI 4140 mostrou-se ser possível obter uma camada nitretada com espessura da ordem de 25 μm e com endurecimento provocado pela formação de nitretos de ferro. O objetivo deste trabalho foi o de investigar as modificações superficiais produzidas pelo processo NDE em um aço IF (*Interstitial Free*). Para produzir as descargas elétricas foi utilizada uma máquina EDM por penetração. Como fluido dielétrico, empregou-se uma solução de água deionizada e ureia. Como eletrodo-ferramenta foi usado cobre eletrolítico. Os demais parâmetros operacionais foram selecionados de tal modo a se obter as descargas elétricas em um fluido com rigidez dielétrica comprometida pela presença de ureia. Os resultados obtidos com difração de raios-x mostraram a formação de uma camada enriquecida com a presença de nitretos de ferro. Houve, ainda, uma elevação na dureza desta camada, que foi atribuída à presença dos nitretos. Pode-se concluir que a técnica NDE é eficaz no enriquecimento e endurecimento superficial de aço IF.

Palavras-chave: Nitretação; Processo NDE; Aços IF; Dureza.

NITRIDING WITH ELECTRICAL DISCHARGES STEEL IF (*INTERSTITIAL FREE*)

Abstract

The surface enrichment of alloys through the process EDM (*Electrical Discharge Machining*) has been the subject of recent research. The enrichment with nitrogen using EDM processes showed promising results. AISI 4140 steel is possible to obtain a nitrided layer with a thickness of approximately 25 μm . The aim of this study was to investigate the surface modifications produced by the process NDE in a steel IF (*Interstitial Free*). How dielectric fluid, we used a solution of urea and deionized water. As electrode tool was used electrolytic copper. The results obtained by x-ray diffraction showed the formation of a layer enriched in the presence of iron nitrides. There was an increase in the hardness of this layer. Was attributed to the presence of nitrides. It is concluded that the technique is effective in NDE enrichment and surface hardening steel IF.

Keywords: Nitriding; NDE process; IF steel; Hardness.

¹ Contribuição técnica ao 68^o Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Doutor Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

³ Mestre em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia

⁴ Doutor Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

⁵ Doutor em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Uberlândia

1 INTRODUÇÃO

O processo de usinagem por descargas elétricas ou EDM (*Electrical Discharge Machining*) é um processo essencialmente térmico. Segundo McGeough,⁽¹⁾ as temperaturas na superfície da peça alcançam cerca de 20.000°C e são produzidas pressões da ordem de 200 bar, após a dissipação do canal de plasma. Assim, o material da superfície é fundido e arrancado da mesma, o que caracteriza o processo de usinagem. Uma parte deste material adere à superfície, formando uma zona refundida (ZR). Abaixo da mesma, forma-se uma zona afetada por calor (ZAC). O enriquecimento de superfícies utilizando a EDM tem sido tentado pela diluição de pós no fluido dielétrico, por íons desprendidos do eletrodo ferramenta ou por ambos. Com a adição de pós ao fluido, consegue-se que partículas fiquem aderidas à camada refundida, como mostrado por Silva.⁽²⁾ Isso é de pouca utilidade prática, uma vez que os processos de retífica, posteriores à usinagem, as removem. Os íons removidos do anodo alcançam maiores profundidades, conforme mostrado por Santos,⁽³⁾ mas a quantidade transferida não é relevante.

Os resultados mais promissores foram obtidos por Yan, Tsai e Huang⁽⁴⁾ em 2005 e Camargo, Costa e Raslan,⁽⁵⁾ em 2009, na nitretação de uma liga Ti₆Al₄V e Santos em 2013,⁽³⁾ na nitretação de um aço AISI 4140. Nestes casos, foi utilizada uma solução de água deionizada e uréia como fluido dielétrico. O nitrogênio é incorporado ao canal de plasma pela decomposição da uréia e difunde-se para a superfície destes materiais formando nitretos, tanto na ZR quanto na ZAC. Ocorre um endurecimento, de forma homogênea, destas camadas. Logo, para se melhorar a dureza da superfície, resistência à corrosão, resistência à fadiga, assim como o desempenho mecânico global de ferro puro e ligas de ferro simples, a nitretação tem sido amplamente utilizada nas indústrias.

Muitos processos de nitretação são aplicadas ao ferro puro e aços de baixo carbono, tais como a nitretação à gás, nitretação em banho de sal, nitretação à plasma e implantação iônica.

Embora os métodos acima sejam bem estabelecidos, alguns deles, tais como as técnicas modernas de nitretação, ainda têm algumas desvantagens do ponto de vista da engenharia, pois requerem o uso de técnicas e/ou equipamentos dispendiosos.

A nitretação líquida utiliza sais constituídos de cianeto e cianato. O grande problema na aplicação industrial é a toxicidade envolvidas no banho com cianeto.

Shen, Oh e Lee⁽⁶⁾ utilizaram sais de nitrato de potássio (KNO₃) na temperatura de 592°C com tempo de 27 horas para nitretar um aço IF. Eles obtiveram uma camada enriquecida com nitrogênio da ordem de 450 μm e um ganho de 443% na dureza Vickers. O endurecimento foi provocado, essencialmente, por nitrogênio intersticial.

O objetivo deste trabalho é o de explorar o potencial da técnica de Nitretação por Descargas Elétricas (NDE) em um aço IF, com o uso de uma máquina de usinagem por descargas elétricas por penetração (EDM).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os testes foram efetuados em uma máquina EDM convencional, por penetração, com algumas adaptações implementadas por Silva,⁽²⁾ como mostrado na Figura 1. A cuba auxiliar, fabricada em aço inoxidável AISI 304 foi instalada dentro da cuba principal da máquina de EDM, para que não ocorresse contaminação do fluido dielétrico da própria máquina, quando utilizados outros fluidos dielétricos.

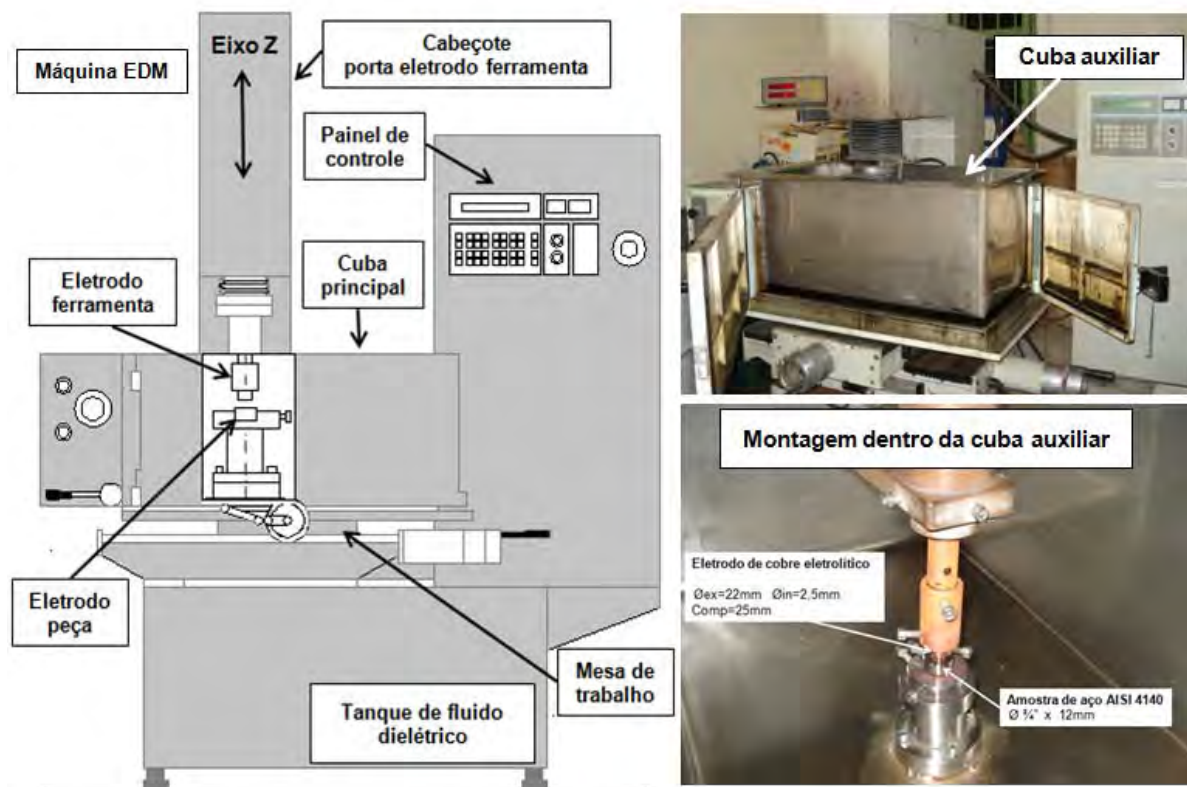


Figura 1. Desenho esquemático da máquina EDM e adaptações feitas para realização dos ensaios.⁽²⁾

Os parâmetros operacionais selecionados são listados na Tabela 1. Através de preparação metalográfica, revelou-se a microestrutura na seção transversal da amostra e a mesma foi analisada por microscopia. A presença de nitretos foi avaliada por difração de raios-x (DRX). As especificações técnicas do difratômetro e os parâmetros de varredura utilizados nas medições estão descritos na Tabela 2.

Tabela 1. Parâmetros operacionais empregados na máquina de EDM

Parâmetro		Unidades
Fluido dielétrico: Água deionizada e ureia	10	g/l
Polaridade da ferramenta	Negativa	
Eletrodo de cobre eletrolítico	Cilindro	
Tensão	110	V
Corrente (TS = 10)	30	A
Tempo de pulso (T_{on})	100	μ s
Relação entre o tempo de pulso e o tempo total (T_{off})	50	%
Tempo de erosão	5	S
Afastamento periódico da ferramenta	1	Mm
Intervalo entre erosão e afastamento	0	S

Tabela 2. Especificações técnicas e parâmetros usados na difração de raios-x

Parâmetro		Unidade
Radiação	Cu-K α	
Voltagem do tubo	40	kV
Corrente	30	Ma
Modo de varredura	Tempo fixo	
Espaçamento	0,02°	
Velocidade de varredura	2,00	graus/minuto
Ângulo inicial (2 θ)	30°	
Ângulo final (2 θ)	80°	

As propriedades mecânicas foram determinadas por ensaios de microdureza Vickers, com carga de 10 gf. Foram realizadas três medidas para cada amostra. O tempo para aplicação da carga foi de 10 s.

O aço IF, estabilizado ao titânio, da Companhia Siderúrgica Nacional foi utilizado como eletrodo peça. A Tabela 3 exhibe a composição química, em peso, desse aço. O tamanho de grão medido é de $66,21 \pm 21,28 \mu\text{m}$, com 475 contagens.

Tabela 3. Composição química (% em peso) do aço IF⁽⁷⁾

Elemento	C	Mn	P	S	Si	N	O
% em peso	0,003	0,190	0,027	0,005	0,011	0,0025	0,005
Elemento	Ni	Cr	Mo	Al	Nb	V	Ti
% em peso	0,004	0,002	0,002	0,049	0,001	0,003	0,069

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 apresenta a microestrutura da seção transversal de uma amostra de aço IF, usinada por EDM em que o fluido dielétrico foi uma solução de água deionizada e ureia na concentração de 10 g/l. São mostradas também as marcas produzidas pelas indentações do ensaio de microdureza Vickers.

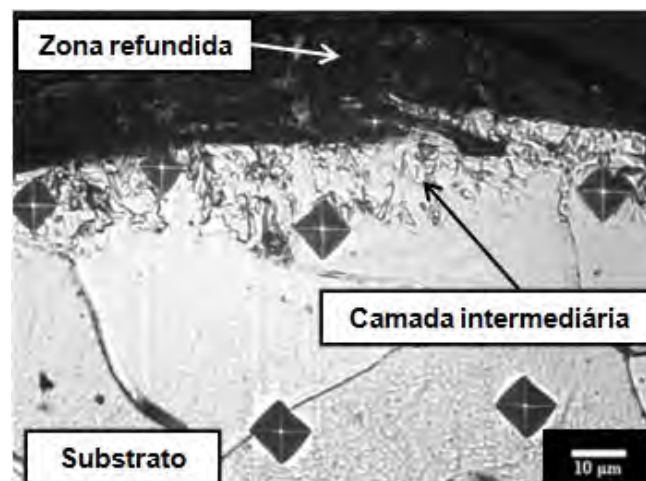


Figura 2. Microestrutura e indentações do ensaio de microdureza Vickers (carga 10 gf, 10 s) da seção transversal da amostra de aço IF, usinada por EDM, usando como fluido dielétrico uma solução de água deionizada e ureia, 10 g/l. Nital 2 %.

Observa-se na superfície da amostra a formação da ZR, com aparência mais escura. Logo abaixo da ZR destaca-se uma camada intermediária ou ZAC com microestrutura diferente do substrato, podendo ser uma região enriquecida por nitretos.

A Tabela 4 mostra os valores para medidas das espessuras das camadas formadas com a nitretação. Foram realizadas 15 medidas em cada camada.

Tabela 4. Espessuras das camadas formadas

	Média (µm)	Desvio Padrão
Zona Refundida	10,84	2,18
Camada Intermediária (ZAC)	9,71	1,12

As espessuras da ZR e da camada intermediária são de, aproximadamente, 10 µm cada.

O substrato é formado por uma matriz ferrítica. Os valores médios de microdureza Vickers (Hv) com os respectivos desvios padrão são indicados na Tabela 5. Nota-se a ocorrência de endurecimento significativo tanto na ZAC quanto na ZR. Devido ao baixo teor de carbono, a hipótese de ter havido um endurecimento por efeito de têmpera superficial pode ser descartada. Assim, o endurecimento pode ser provocado, a princípio, por dois fatores, considerado individualmente ou somados: nitrogênio intersticial e a formação de nitretos.

Tabela 5. Valores da microdureza Vickers (10 gf, 10 s) de aço IF, nitretado por EDM

	Hv	Ganho Relativo
Zona Refundida	295±29	114 %
Camada intermediária	274±11	99 %
Matriz Ferrítica	138±3	---

A presença de nitretos foi averiguada por difração de raios-x. A Figura 3 mostra os difratogramas do aço IF (Referência) e aço IF nitretado por EDM.

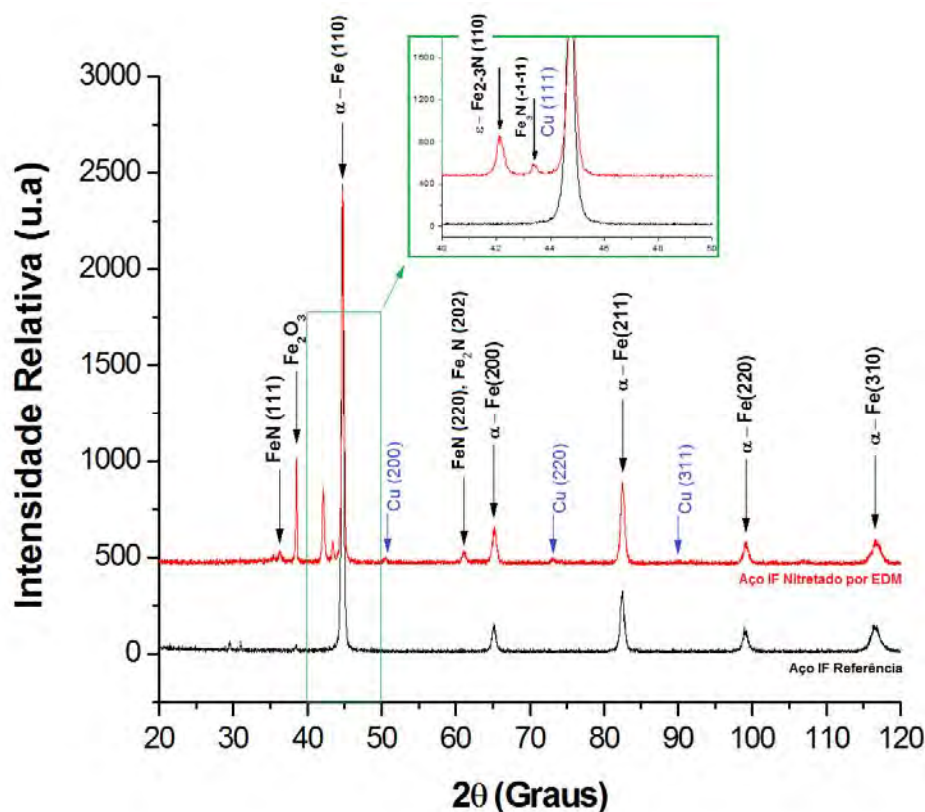


Figura 3. Difratogramas de Raios-X, configuração θ - 2θ , do aço IF: Referência e Nitretado pelo processo EDM.

Nota-se a presença de nitretos de ferro do tipo ϵ -Fe₂₋₃N, FeN, Fe₂N e Fe₃N. O cobre é proveniente do eletrodo.

A ureia é um composto orgânico, cristalino, incolor, de fórmula (NH₂)₂CO, com um ponto de fusão de 132,7 °C. Com o aquecimento gerado pela EDM, a ureia se decompõe em amônia que, por sua vez, libera o nitrogênio. O nitrogênio é ionizado no canal de plasma e, ao ocorrer descarga elétrica, o íon com elevada energia cinética difunde-se através da superfície do material.

Apesar de terem observado a formação de nitretos, Shen, Oh e Lee⁽⁶⁾ atribuíram ao nitrogênio intersticial o endurecimento observado em aço IF nitretado em banho de nitrato de potássio. No processo NDE aqui utilizado, não foi investigada a presença de nitrogênio intersticial, uma vez que os dois processos são diferentes no que diz respeito à temperatura, pressão e cinética. A difusão do nitrogênio com o processo NDE ocorre em um tempo aproximado de 10⁻⁶ segundos. A temperatura no canal de plasma está compreendida entre 8.000 e 10.000 °C e na superfície da peça pode atingir 20.000 °C. As pressões são da ordem de 200 bar. Além disso, o nitrogênio é inserido como íon. Portanto, é razoável supor que os nitretos sejam os principais responsáveis pelo endurecimento do aço IF com a utilização do processo NDE.

4 CONCLUSÕES

Os resultados mostram a possibilidade do aço IF ser nitretado pelas descargas elétricas do processo EDM, quando se utiliza solução de água deionizada e ureia na concentração de 10 g/l, como fluido dielétrico. As profundidades de nitretação alcançadas são da ordem de 20 μ m e foi obtido um ganho efetivo de dureza. Este ganho foi associado à formação de nitretos de ferro, embora possa estar havendo a contribuição de nitrogênio intersticial. A nitretação através deste processo possui simplicidade operacional, maior velocidade de execução e baixo custo operacional com relação aos tradicionais processos de nitretação. Entretanto, sofre a limitação de não se poder obter camadas nitretadas mais espessas.

Agradecimentos

À Fapemig (TEC APQ 01481/09), a Capes e ao CNPq pelo auxílio financeiro. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

REFERÊNCIAS

- 1 MCGEOUGH, J. A., Advanced Methods of Machining. London: Chapman and Hall, 1988. p. 128-152.
- 2 SILVA, E.R. Otimização e Avaliação dos Parâmetros de Influência do Processo AJEDM. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), 09/2012, 125 f.
- 3 SANTOS, R.F. Nitretação por EDM do Aço AISI 4140. Tese de Doutorado, UFU, 02/2013, 156 f.
- 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 Ti6Al4V através de usinagem por descargas elétricas. Anais do 5 Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF), Belo Horizonte-MG, abril/2009, 6 f.

- 6 SHEN Y.Z., OH K.H., and LEE D.N., Nitriding of Interstitial Free Steel in Potassium-Nitrate Salt Bath. *ISIJ International*, vol.46 (2006), n. 1, pp. 111-120.
- 7 SILVA, F.R.F; LINS, J. F. C.; MEDEIROS, N.; MOREIRA M. P.; Evolução Microestrutural de um Aço IF Prensado em Canais Equiangulares. *Tecnologia Metal. Mater.*, São Paulo, v. 5, (2009), n. 4, p. 193-197.