

NITRETAÇÃO POR DESCARGAS ELÉTRICAS DO FERRO FUNDIDO NODULAR

Nitriding of the Nodular cast iron by Electrical Discharge Machining

Luciano Elias^{1*}; Cristiano Elias¹; Bárbara Ellen Rodrigues Batista²;
Ernane Rodrigues da Silva¹

¹Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

²Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

*Autor para correspondência: eliasluc@yahoo.com.br

Recebido em: 19/08/2019, Aceito em: 02/12/2019, Publicado em: 21/12/2019.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22407/1984-5693.2019.v11.p.141-154>

RESUMO

O objetivo da pesquisa foi avaliar o processo de nitretação por descargas elétricas por meio de eletroerosão no ferro fundido nodular. Como material de eletrodos ferramenta, foram utilizados cobre e grafita. O fluido dielétrico foi uma solução aquosa de água deionizada e uréia. Avaliou-se o desempenho de usinagem por meio de determinação da taxa de remoção de material (TRM). Os resultados das imagens ilustraram a camada refundida e a intermediária para os dois eletrodos. Observaram-se picos de nitretos de ferro nos difratogramas de raios-X. O eletrodo de cobre promoveu aumento de TRM, aproximadamente o dobro com eletrodo de grafita.

Palavras-chave: Ferro fundido nodular. Nitretação por Descargas Elétricas. Eletrodos ferramenta de cobre e grafita. Eletroerosão.

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the nitriding process by electric discharges by means of electro-erosion in nodular cast iron. As tool electrodes material, electrolytic copper and graphite were used. As dielectric fluid an aqueous solution of deionized water and urea was used. Machining performance was assessed by determining the material removal rate (MRR). The optical imaging results illustrated the re-solidified layer and intermediate layer for both types of electrodes. Iron nitride peaks were observed on X-ray diffractograms. The copper electrode increased the MRR to approximately twice that of graphite electrode.

Keywords: Nodular cast iron. Nitriding by Electric Discharges. Copper and graphite tool electrodes. Electrical Discharge Machining.

INTRODUÇÃO

O ferro fundido nodular teve o seu campo de atuação ampliado a partir da década de 1970, devido suas propriedades como: tenacidade, resistência à tração, ductilidade, resistência ao desgaste e à fadiga. Essas propriedades conciliadas à redução de custo de operações proporcionada pela tecnologia de fundição habilitou o ferro fundido nodular, a atuar em aplicações na indústria automobilística.

As características da superfície do ferro fundido nodular podem ser modificadas para aplicações críticas de fadiga por meio de tratamentos termoquímicos como a nitretação. A nitretação é amplamente adotada para materiais ferrosos devido à formação de uma camada superficial dura sujeita ao efeito de tensões compressivas, aspectos que resultam em aumento do limite de fadiga (KONECNÁ, *et al.*, 2008).

A liga desse material contém ferro, silício e carbono na forma de nódulos esferoidais. Um inconveniente do processo de nitretação a plasma, no ferro fundido nodular, é a projeção de nódulos de grafita, em direção à superfície, após a formação da camada de compostos (KONECNÁ, *et al.*, 2008), fato este observado na figura 1.

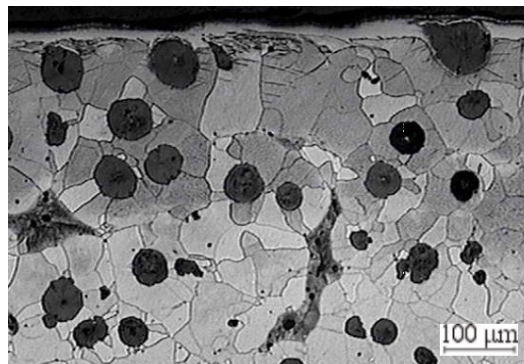


Figura 1. Micrografia da seção transversal do ferro fundido nodular nitretado (KONECNÁ, *et al.*, 2008).

O processo de nitretação por descargas elétricas, por meio de máquina de eletroerosão e por penetração permite, simultaneamente, a usinagem e tratamento termoquímico de nitretação. Por isso, vários materiais foram avaliados e se mostraram susceptíveis ao processo.

Ao passar a corrente elétrica, entre os eletrodos ferramenta e peça, forma-se um canal de plasma enriquecido com nitrogênio, proveniente da ureia. Ao ocorrer a descarga, o nitrogênio é incorporado à superfície da peça, formando nitretos e, conseqüentemente o endurecimento da mesma (RASLAN *et al.*, 2012). Os materiais empregados como eletrodos ferramenta são, normalmente, cobre e grafita (RASLAN, 2015).

De maneira geral, o processo de Usinagem por Descargas Elétricas (*Electrical Discharge Machinig* – EDM) ou eletroerosão envolve a aplicação de uma diferença de potencial (corrente contínua) entre duas placas condutoras de eletricidade, chamadas de eletrodo ferramenta e peça, as quais são separadas por uma pequena distância (de 0,012 a 0,050 mm) denominada fenda de trabalho ou *gap*, onde ocorrem descargas elétricas entre elas.

No espaço entre a peça e a ferramenta, circula o fluido dielétrico, que se torna eletrolítico na forma gasosa. No instante da descarga elétrica, a ferramenta e a peça não estão em contato direto, devido ao meio dielétrico que os envolve. Ao iniciar o ciclo de erosão, na pequena região de descarga elétrica, a potência desprendida por unidade de área pode chegar até $1000\text{W}/\text{m}^2$, e a temperatura até 12000°C (MCGEOUGH, 1988). Assim, o fluido evapora e se torna eletrolítico no meio gasoso. Neste caso, a pressão também se eleva, podendo alcançar até 200 atm. A descarga elétrica dura apenas alguns milionésimos de segundo. Este período é denominado T_{ON} . Cessada a descarga elétrica, inicia-se por alguns milionésimos de segundo o T_{OFF} , em que ocorre a emersão dos gases eletrolíticos. Os espaços ocupados pelo gás serão preenchidos pelo fluido dielétrico em temperatura menor que a região em usinagem. Assim, com o choque térmico, ocorrerá uma microexplosão e a desagregação das partículas fundidas da peça, dando início ao processo de usinagem (RASLAN *et al.*, 2012).

Os dois materiais mais utilizados como eletrodos ferramenta são o cobre, devido à sua alta condutividade elétrica e térmica e a grafita devido às suas propriedades térmicas (CZELUSNAK, *et al.*, 2019).

A hipótese de haver nitrogênio nas camadas é pertinente, uma vez que existe uma fonte do mesmo, ou seja, a uréia diluída na água. Na fase de ignição, os elétrons são acelerados pelo campo elétrico em direção ao anodo e colidem com moléculas do fluido dielétrico e os íons positivos se direcionam ao catodo, caracterizando o início do fenômeno, chamado de ionização por impacto. Esse mecanismo de colisões causa ruptura do dielétrico e gera NH_3 e CO_2 gasosos. A energia gasta para a conversão do fluido dielétrico é suficiente para formar o canal de plasma e decompor os constituintes presentes nessa mistura, em forma de vapores e gases, como o NH_3 que, por sua vez, se decompõe em N_2 e H_2 (SANTOS, 2013), Figura 2.

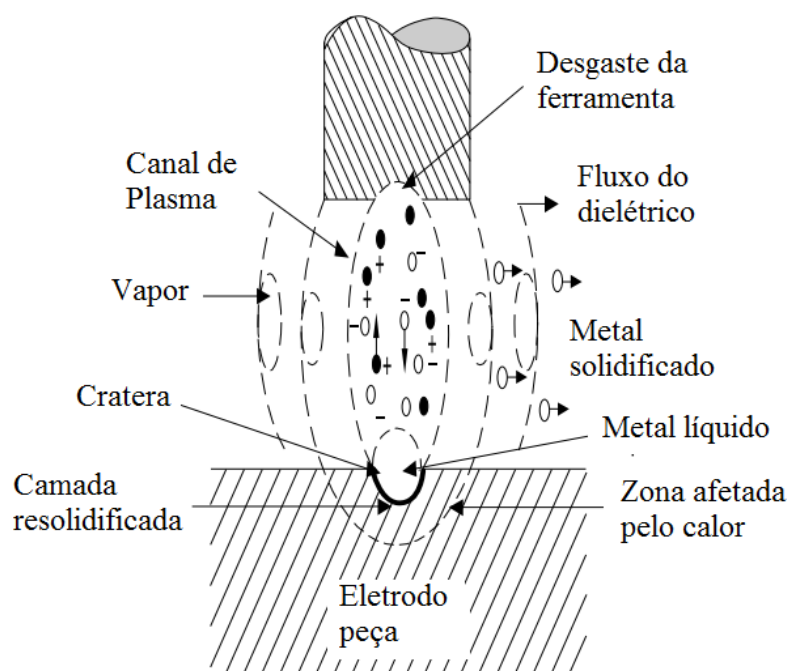


Figura 2. Imagem esquemática da formação do canal de plasma no processo de eletroerosão.

Fonte: SANTOS, *et al.*(2017).

O N_2 e H_2 irão se difundir no canal de plasma na forma de íons, como N_2^+ , N^+ e H_2^+ . Por serem positivos, eles serão impulsionados para a superfície do eletrodo peça (catodo) e, pela alta energia cinética que adquirem, implantam-se no interior da mesma (SANTOS, 2013).

Para viabilizar a presença do nitrogênio, utiliza-se ureia diluída em água deionizada, a qual é a mistura utilizada como fluido dielétrico que possibilita a realização da nitretação. Para processos de usinagem apenas, a água deionizada não é um bom fluido dielétrico. O processo se torna demasiadamente lento. Para o processo de eletroerosão, os fluidos empregados são, normalmente, à base de óleos minerais derivados de petróleo. Mas para o processo de nitretação proposto, não é possível utilizá-los (RASLAN *et al.*, 2012).

A inovação encontrada nesse novo método de nitretação de peças, por meio do processo EDM por penetração, é que toda a cavidade está sujeita ao processo de nitretação. A máquina de eletroerosão por penetração não sofre qualquer tipo de mudança na sua configuração original, basta somente realizar algumas adaptações (SANTOS, *et al.*, 2017).

O objetivo da pesquisa foi avaliar a aplicação do processo de nitretação por descargas elétricas no ferro fundido nodular, aplicado como eletrodos ferramenta cobre eletrolítico e grafita. Como fluido dielétrico foi utilizado uma solução aquosa de água deionizada e uréia farmacológica em uma máquina de eletroerosão por penetração convencional.

MATERIAL E MÉTODOS

O material avaliado, no processo de nitretação por descargas elétricas, foi o ferro fundido nodular, para tanto foram confeccionadas amostras no formato cilíndrico com 20 mm de diâmetro por 15 mm de comprimento. A Tabela 1 apresenta a composição química do ferro fundido nodular, utilizado na pesquisa.

Tabela 1. Composição química do ferro fundido nodular utilizado na pesquisa.

%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Cu	%Mg	%Fe
3,57	2,57	0,31	0,01	0,08	0,03	0,04	Balanço

Fonte: FRANÇA, *et al.*, 2015.

Os eletrodos ferramenta foram confeccionados em cobre eletrolítico e grafita, ambos com as dimensões de 22 mm de diâmetro por 25mm de comprimento. A Tabela 2 refere-se às propriedades físicas dos materiais dos eletrodos de cobre eletrolítico e grafita utilizados na pesquisa.

Tabela 2. Propriedades físicas dos materiais dos eletrodos de cobre e grafita.

Propriedades Físicas	Cobre	Grafita
Resistividade Elétrica ($\mu\Omega/cm$)	1,96	0,12
Condutividade Elétrica Comparado com Prata (%)	92	0,11
Condutividade Térmica (W/mK)	380,7	160
Ponto de Sublimação e Fusão ($^{\circ}C$)	1083	3500
Calor Específico (cal/g $^{\circ}C$)	0,092	0,17 – 0,2
Peso Específico a 20 $^{\circ}C$ (g/cm 3)	8,9	1,75
Coefficiente de Expansão Térmica ($\times 10^{-6}C^{-1}$)	6,6	7,8

Fonte: CHE HARON, *et al.*, 2008.

O trabalho de pesquisa foi realizado em uma máquina de usinagem por eletroerosão convencional, por penetração, adaptada para viabilizar a aplicação do processo de nitretação por descargas elétricas, as adaptações, conforme ilustra a figura 1: uma cuba auxiliar, fabricada em aço inoxidável austenítico, foi instalada no interior da cuba principal da máquina. Esta foi utilizada para que não ocorresse contaminação do fluido dielétrico da própria máquina durante os testes com fluidos dielétricos aquosos. Uma bomba centrífuga, instalada na cuba auxiliar, é acionada para circular o fluido dielétrico e realizar a limpeza da fenda de trabalho.

O fluido dielétrico utilizado foi preparado com 30 litros de água deionizada. Para deionizar a água foi utilizado um aparelho deionizador marca Acqua Delta ($\phi 150\text{mm} \times 850\text{mm}$ de comprimento) com a capacidade de 50L/h a base de resina.

A condutividade elétrica da água, antes da deionização, era de $150 \mu\text{S/cm}$, aproximadamente, e, após o procedimento, passou a ser de $0 \mu\text{S/cm}$. Um quilograma de ureia farmacológica foi diluída na água deionizada para formar a solução aquosa na concentração de 33,3 gramas por litro. Após a adição da uréia, a condutividade elétrica da solução aquosa passou para $22 \mu\text{S/cm}$.

A máquina de eletroerosão não sofre qualquer tipo de mudança ou adaptação, devido ao uso da cuba auxiliar adaptada à máquina original, durante a aplicação do processo de nitretação por descargas elétricas (SANTOS, *et al.*, 2016).

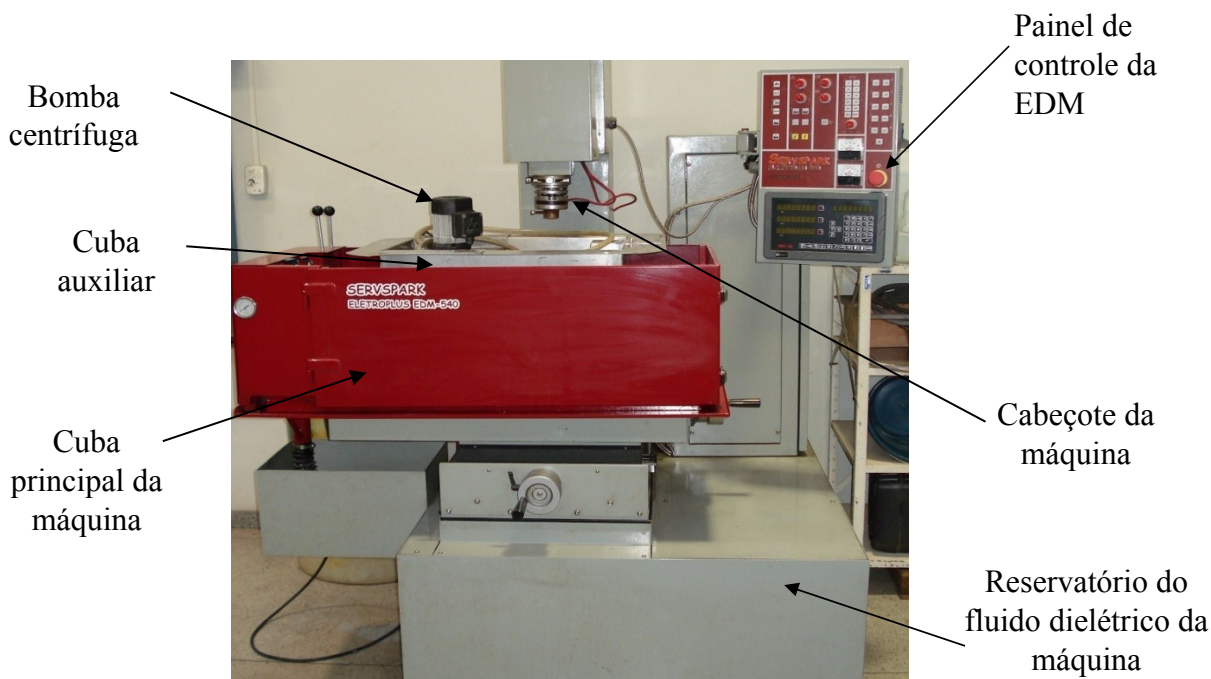


Figura 3. Foto da máquina de eletroerosão adaptada para a pesquisa.

A Figura 4 ilustra os eletrodos peça e ferramenta de cobre eletrolítico, posicionados no interior da cuba auxiliar para aplicação da nitretação por descargas elétricas.

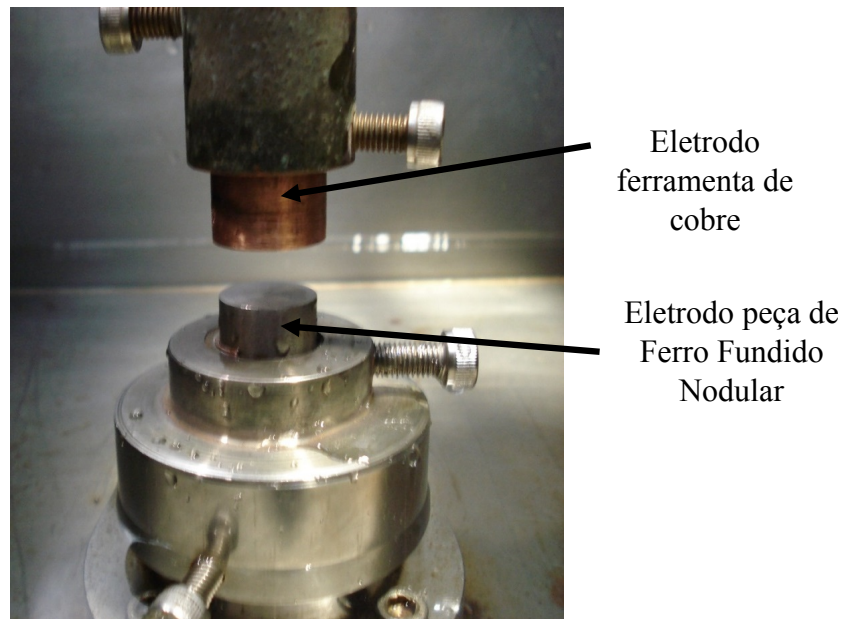


Figura 4. Foto dos eletrodos, peça e ferramenta de cobre posicionados no interior da cuba auxiliar.

A Tabela 3 relaciona-se com os parâmetros operacionais, ajustados na máquina de eletroerosão por penetração, possibilitaram a aplicação do processo de nitretração por descargas elétricas, com base em trabalhos realizados por outros pesquisadores (Nicesio, *et al.* 2016). Cada teste durou 10 minutos. Cada série de testes foi realizada cinco vezes.

Tabela 3. Parâmetros operacionais ajustados na máquina para nitretração por descargas elétricas.

PARÂMETRO	ESPECIFICAÇÃO
Polaridade do eletrodo ferramenta	Positiva
Corrente	40A
Tempo de pulso (T_{ON})	100 μ s
Tempo de pausa (T_{OFF})	1,5*
Fenda de trabalho (<i>Gap</i>)	1,0*
Afastamento periódico da ferramenta	5,0*
Velocidade do servo	5,0*
Tempo de erosão	6,0*

* Estes parâmetros foram ajustados, diretamente, no painel de controle da máquina de EDM.

Os corpos de prova foram seccionados e preparados por técnicas metalográficas após os testes de nitretração por descargas elétricas. As micrografias e avaliações da camada refundida e camada intermediária foram realizadas em microscópio óptico com micrômetro incorporado. O microscópio óptico utilizado foi o Fortel com sistema de aquisição de imagens Kontrol modelo M713. As imagens capturadas por meio de câmera digital acoplada aos equipamentos.

De posse das imagens foi realizado a medição das espessuras das camadas utilizando o software AxioVision SE64 Rel. 4.9.1. Foram feitas medidas da espessura da camada nitretada e da camada refundida espaçadas entre si de 0,2mm a partir da borda da amostra, as medidas do primeiro e o último milímetro foram descartadas pela irregularidade da borda da amostra.

A presença de nitretos foi verificada por difração de raios X convencional, Bragg-Brentano ou θ - 2θ . A Tabela 4 relaciona-se com os parâmetros de varredura e as especificações técnicas do difratômetro.

Tabela 4. Parâmetros adotados no ensaio de DRX - Difração de raios x

PARÂMETRO	ESPECIFICAÇÃO
Radiação	Cu K α
Energia de transição	8,0 keV
Tensão	40kV
Corrente	30mA
Tipo de varredura	θ - 2θ
Ângulo inicial de varredura (2θ)	20°
Ângulo final de varredura (2θ)	120°
Modo de varredura	Tempo fixo
Passo de amostragem	0,04°
Tempo de varredura por ponto	1s

A dureza da camada refundida, camada intermediária e do substrato foi mensurada pelo ensaio de microdureza Vickers, com auxílio de um microdurômetro Shimadzu modelo HMV-2TE com capacidade de carga de 10 a 100 gf. Para o ensaio, utilizou-se carga de 10 gf por 15 segundos. As indentações foram realizadas na seção transversal das amostras previamente preparadas para o ensaio metalográfico. Essas indentações foram executadas nas amostras em conjunto de três e espaçadas igualmente em torno de 25 μ m.

A etapa de caracterização por microscopia eletrônica de varredura foi realizada na superfície das amostras usinadas com eletrodos ferramenta de cobre eletrolítico e grafita.

Para avaliação do desempenho do processo eletroerosão, foram calculadas a Taxa de Remoção de Material, a Taxa de Desgaste e o Desgaste Volumétrico Relativo. Os eletrodos de grafita foram secados, em forno mufla, à temperatura de 300°C, durante 3 horas antes de cada pesagem. Durante a execução dos experimentos a amostra e o eletrodo ferramenta foram pesados três vezes antes e após cada série de usinagem. Para isso utilizou-se uma balança eletrônica com capacidade máxima para 310 gramas e resolução de 10⁻³g.

A variação de massa foi determinada pela diferença entre as massas: inicial e final, obtida da Equação 1.

$$\Delta_m = m_i - m_f \quad [\text{g}] \quad (1)$$

onde: m_i = massa inicial [g] e m_f = massa final [g].

Para quantificar a TRM, foi utilizada a Equação 2.

$$\text{TRM} = \frac{\Delta_m}{(0,00768) \cdot t} \quad [\text{mm}^3/\text{min}] \quad (2)$$

onde: Δ_m = variação de massa [g], t = tempo de usinagem [min] e a constante 0,00768g/mm³ corresponde ao peso específico do ferro fundido nodular.

Para quantificar a TD do eletrodo ferramenta, foi utilizada a Equação 3.

$$TD = \frac{\Delta_m}{\rho \cdot t} \quad [\text{mm}^3/\text{min}] \quad (3)$$

onde: Δ_m = variação de massa [g], t = tempo de usinagem [min] e a constante ρ corresponde ao peso específico do material do eletrodo ferramenta. O valor de ρ é $0,0089\text{g}/\text{mm}^3$ para o cobre eletrolítico e $0,00175\text{g}/\text{mm}^3$ para a grafita.

A Equação 4 foi usada para determinar o DVR, que é a relação entre TD e TRM, expresso em porcentagem.

$$\text{DVR} = \frac{\text{TD}}{\text{TRM}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 ilustra uma imagem de microscopia óptica da seção transversal de uma amostra de ferro fundido nodular usinada com eletrodo ferramenta de cobre.

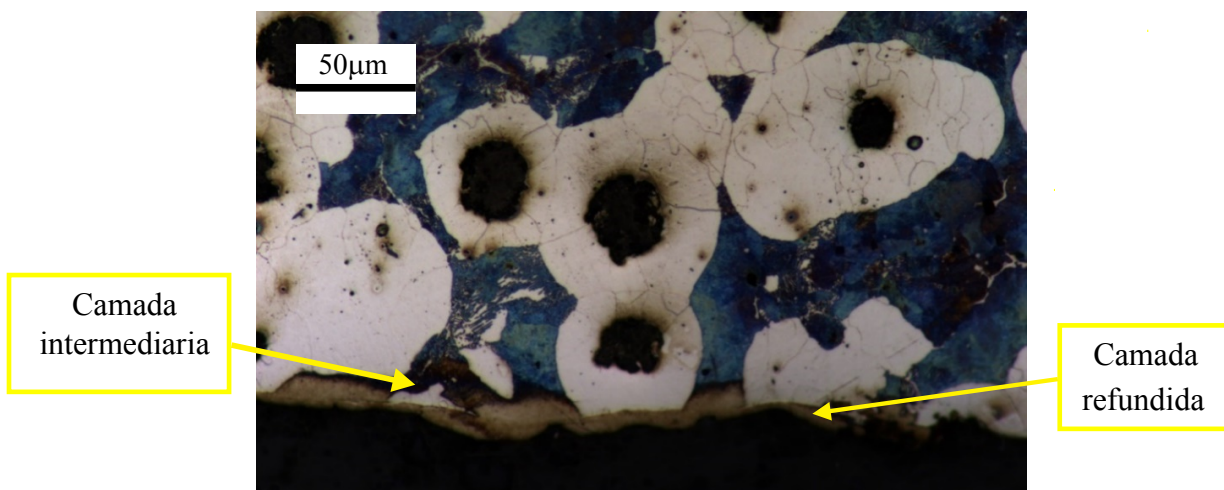


Figura 5. Microscopia óptica da seção transversal da amostra de ferro fundido nodular, usinada com eletrodo de cobre. Ataque nital 3%.

Notam-se a formação da camada refundida e camada intermediária, semelhante ao que foi observado por outros pesquisadores no processo de nitretação por descargas elétricas de aços. (NICESIO, *et al.* 2016, RASLAN, 2015, SANTOS, *et al.* 2017).

A Figura 6 ilustra uma imagem de microscopia óptica da seção transversal de uma amostra de ferro fundido nodular, usinada com eletrodo ferramenta de grafita.

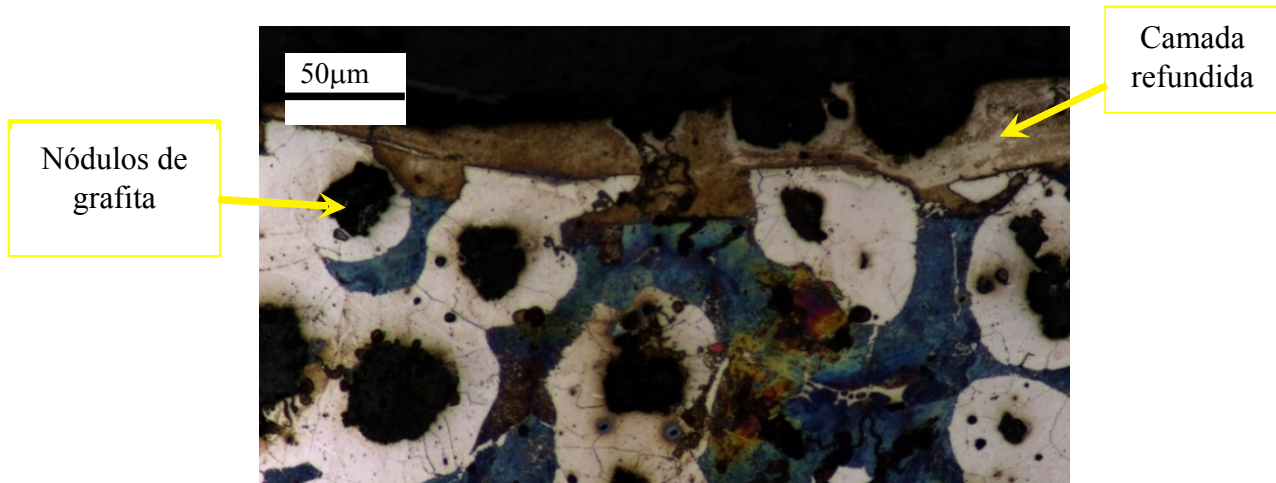


Figura 6. Microscopia óptica da seção transversal da amostra de ferro fundido nodular, usinada com eletrodo de grafita. Ataque nital 3%.

Notam-se, para ambos os tipos de eletrodos, camada refundida e camada intermediária. Outra observação relevante de mencionar é o destaque dos nódulos de grafita nas camadas que também foram citados por outros autores em suas pesquisas. (TSAI *et al.*, 2000, YANG, 2012).

A Figura 7 ilustra os difratogramas de raio X do ferro fundido nodular de referência e das amostras nitretadas com eletrodos ferramenta de cobre e grafita, usinadas com fluido dielétrico, formado por solução aquosa de água deionizada e ureia.

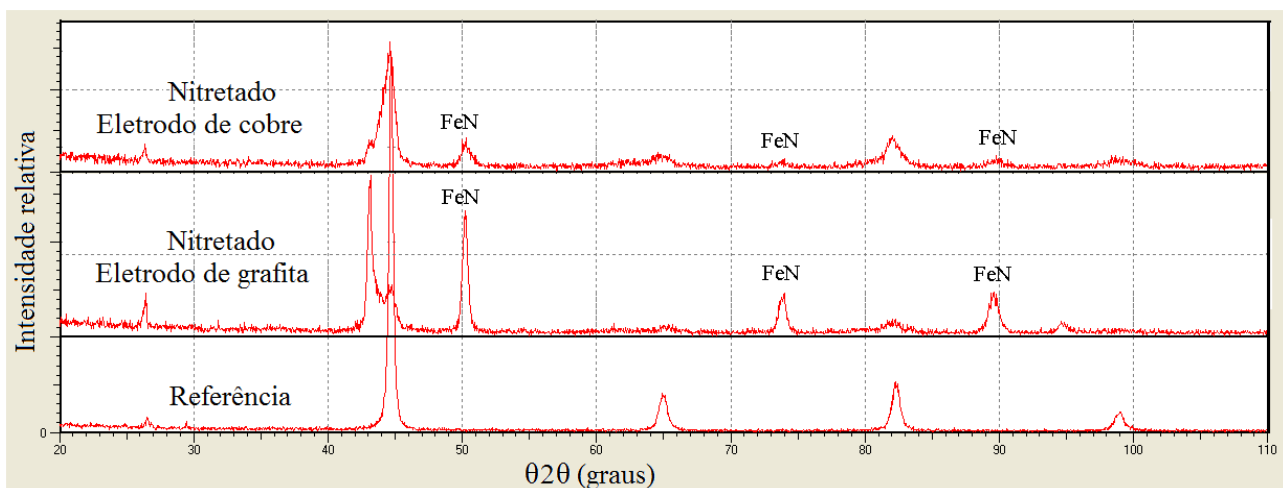


Figura 7. Difratogramas de raio X do ferro fundido nodular de referência e das amostras nitretadas.

Notam-se os picos de nitretos de ferro FeN formados nas amostras usinadas com eletrodos de cobre eletrolítico e grafita em relação ao ferro fundido nodular de referência.

O mecanismo de colisão dos íons e elétrons causa ruptura do dielétrico e gera NH₃ e CO₂, com energia suficiente para decompor os constituintes presentes na mistura (água deionizada e ureia), em forma de vapores e gases como o NH₃ que, por sua vez, se decompõe em N₂ e H₂, que irão se difundir no canal de plasma na forma de íons, como N₂⁺, N⁺ e H₂⁺. Além destes íons, formam-se íons de cobre, oriundos do eletrodo ferramenta, no caso do cobre eletrolítico. Por serem positivos, eles serão impulsionados para a superfície da peça (catodo) e, implantam-se no interior da mesma (SANTOS 2013).

A Tabela 5 relaciona os valores de microdureza Vickers, das peças usinadas com eletrodos de cobre eletrolítico e grafita, medidas na seção transversal das amostras.

Tabela 5. Valores de microdureza Vickers das camadas refundida e intermediária.

Camada	Eletrodo Ferramenta	
	Cobre eletrolítico	Grafita
Refundida	767,2 ± 35,8	699,7 ± 23,7
Intermediária	493,7 ± 42,9	486,5 ± 45,5
Metal base	241,0 ± 10,8	

Nota-se um aumento nos valores de dureza nas camadas intermediária e refundida para ambos os tipos de eletrodos ferramenta. O ganho no valor de microdureza ocorre nas camadas, com maior destaque para o valor da camada refundida, devido ao resfriamento brusco do material, que não é totalmente removido da superfície do eletrodo peça (SANTOS, *et al.*, 2016).

A Figura 8 ilustra o gráfico com os resultados da taxa de remoção de material, taxa de desgaste e do desgaste volumétrico relativo das amostras de ferro fundido nodular usinadas com eletrodos ferramenta de cobre eletrolítico e grafita.

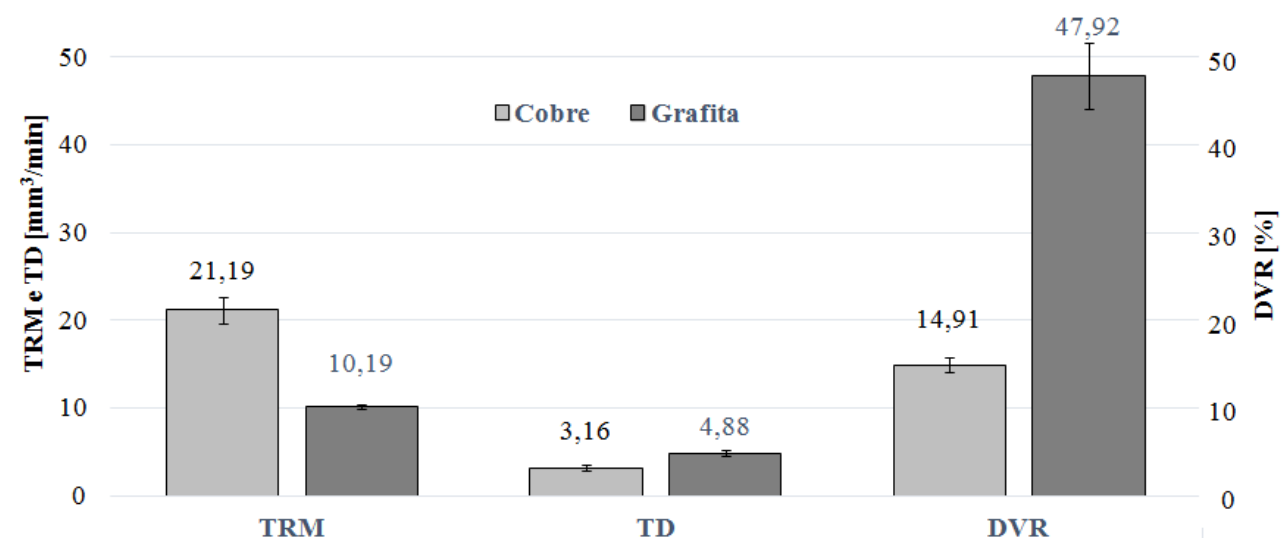


Figura 8. Gráfico dos resultados de TRM, TD e DVR das amostras de ferro fundido nodular usinadas.

Nota-se um maior valor da taxa de remoção de material com eletrodo ferramenta de cobre, aproximadamente, o dobro em relação ao eletrodo de grafita.

O menor valor da TRM quando se utiliza eletrodo ferramenta de grafita em relação ao cobre eletrolítico na eletroerosão do ferro fundido nodular também foi observado por outros pesquisadores (ROY, *et al.*, 2015).

No ferro fundido nodular a matriz e os nódulos de grafite atuam como anodo e catodo (JEONG, *et al.*, 2002). Provavelmente, durante o processo de nitretação por descargas elétricas, a carga positiva dos nódulos de grafite contidos no eletrodo peça, irá atrair elétrons do material do eletrodo ferramenta. Os íons de cobre atuaram na matriz, promovendo uma taxa de remoção de material semelhante à que ocorre nos aços. No entanto, o eletrodo ferramenta de grafita não produziu o mesmo efeito que ocorre nos aços, pois a taxa de remoção de grafita foi inferior à do cobre. A Figura 9 ilustra um desenho esquemático, do canal de plasma, formado no processo de nitretação por descargas elétricas no ferro fundido nodular.

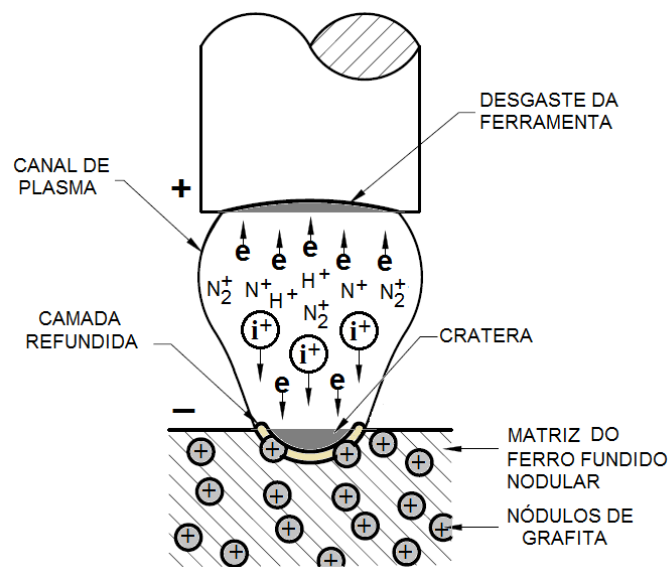


Figura 9. Desenho esquemático do canal de plasma formado no processo de nitretação por descargas elétricas no ferro fundido nodular.

A Figura 10 ilustra a superfície da cavidade usinada pelo processo de eletroerosão, utilizando cobre eletrolítico como eletrodo ferramenta. O retângulo indica um nódulo de grafite, ilustrado na figura 11.

A figura 10 ilustra os nódulos de grafite, que destacam da superfície do ferro fundido nodular usinado. Esse fato exerce influência na corrente durante o processo, já que alguns nódulos, durante o processo, ficam expostos na superfície. Provavelmente alguns elétrons são atraídos pelos nódulos de grafite expostos.

O valor da taxa de desgaste para a eletrodo ferramenta de grafita foi 50% maior que o valor do cobre eletrolítico.

A combinação de baixa TRM com maior TD provocou um maior valor do desgaste volumétrico relativo do eletrodo ferramenta de grafita, aproximadamente duas vezes maior do que do eletrodo de cobre.

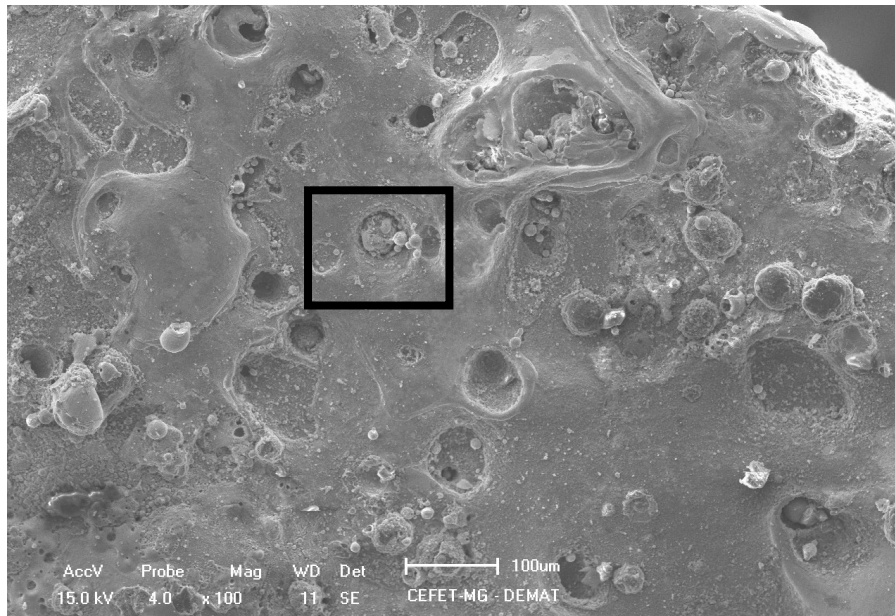


Figura 10. Imagem de MEV da superfície usinada descargas elétricas no ferro fundido nodular.

A Figura 11: nódulo de grafite em destaque da superfície ilustrada na figura 10.

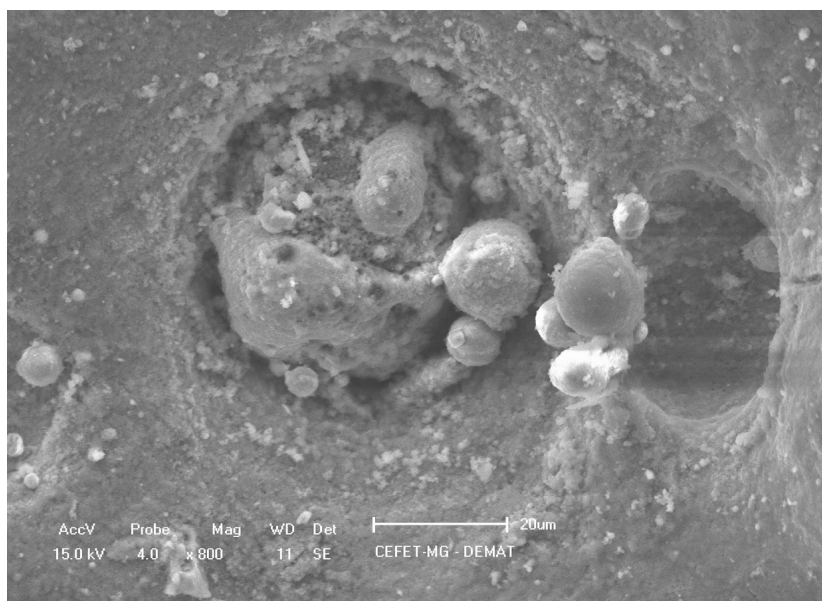


Figura 11. Imagem de MEV de nódulo de grafite, em destaque na figura 10.

A figura 11 ilustra um nódulo de grafite exposto na superfície, o mesmo detalhe foi observado por outros pesquisadores (TSAI *et al.*, 2000, YANG, 2012).

CONCLUSÕES

Considerando os resultados dessa pesquisa, verifica-se que surgiram camadas refundidas e camada intermediária nas amostras de ferro fundido nodular, usinadas com eletrodos de cobre eletrolítico e grafita.

Foi possível verificar que houve a formação das camadas com espessura total (camada refundida+camada intermediária) de aproximadamente $36\mu\text{m}$ e $75\mu\text{m}$ nas amostras usinadas com eletrodos de cobre e grafita, respectivamente, via microscopia óptica.

Picos de nitretos de ferro foram constatados nos difratogramas das amostras nitretadas com eletrodos de cobre e grafita, evidenciando a implantação de nitrogênio na superfície do ferro fundido nodular.

A taxa de remoção de material (TRM) da amostra usinada com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico foi maior que a do eletrodo de grafita, esse aumento, aproximadamente, o dobro.

A taxa de desgaste (TD) foi mais acentuada quando utilizou-se eletrodo de grafita, atingindo um desempenho de 54,4% superior, em comparação com o cobre.

A dureza do material apresentou aumento em todas as amostras analisadas, uma média de 100% do metal base em relação à camada intermediária, a qual apresentou valor de dureza médio de 500 HV, e a camada refundida com valor médio de 750 HV.

Nódulos de grafita foram observados, expostos da superfície das amostras de ferro fundido nodular nitretadas por descargas elétricas.

Na morfologia da superfície avaliada com o MEV, identificou-se a formação de micropartículas refundidas, poros e trincas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG pela cessão de sua estrutura para execução da pesquisa e a PUC-MINAS por ceder seus laboratórios para realização de ensaios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHE HARON, CH; GHANI, JA; BURHANUDDIN, Y; SEONG, YK, SWEE, CY. Copper and Graphite Electrodes Performance in **Electrical-Discharge Machining of XW42 Steel**, Journal of Materials Processing Technology **201**, 570-573. 2008.
- CZELUSNAK, T; HIGA, CF; TORRES, RD; LAURINDO, CAH; PAIVA JJMF.; LOHRENGEL, A; AMORIM, FL. **Materials used for sinking EDM electrodes: a review**, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2019.
- FRANÇA, ABC; SILVA, ER; CARNEIRO, JRG. **Efeito do Revenimento nas Propriedades Mecânicas do Ferro Fundido Nodular Austemperado**. Anais. 8º COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Salvador, 2015.
- JEONG, JJ; JEONG, BY; KIM, MH; LEE, C. **Characterization of TiN Coatings on the Plasma Nitrided Spheroidal Graphitic Cast Iron Substrates**, Surface and Coatings Technology **150**, 24–30. 2002.
- KONEČNÁ, R; KONSTANTOVÁ, V; NICOLETTO, G. **Sizing of Defects and Fatigue Behavior of Nitrided Nodular Cast Irons**, Materials Science, **14**(3), 215-220. 2008.
- MCGEOUGH J.A. **Advanced methods of machining**. Chapman and Hall, London, pp. 128–152. 1998.
- MAJEROVÁL, V; KONEČNÁ, R; NICOLETTO, G. **Influence of Nitriding on Fatigue Behavior and Fracture Mechanisms of Nodular Cast Iron**, Proceedings of the Conference Fractography, Oct. 2006.

- NICESIO, IC; SILVA, SP; FREITAS FA; SANTOS, RF; SILVA, ER. **Avaliação da qualidade da ureia no processo de nitretação por descargas elétricas**. Anais. 9º CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Fortaleza, 2016.
- RASLAN, AA; SANTOS, RF; SILVA, ER; FAPEMIG, Fundação de Apoio a Pesquisa de Minas Gerais; UFU, Universidade Federal de Uberlândia. **Método de Nitretação Através da Usinagem com Descargas Elétricas – NDE**”. BR 10 2012 030523-2. 2012.
- RASLAN, AA. **Implantação Iônica em Meio Aquoso por EDM: Resistência ao Desgaste de Aço AISI 4140**. Anais... 8º COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Salvador, 2015.
- ROY, DC; MONDAL, R; MONDAL, M. **Optimization of MRR in EDM Process with Different Job Material i.e Stainless Steel and Cast Iron by Taguchi Method**. Journal of Engineering Research and Applications, **5**(5), 24-31.
- SANTOS, RF. **Nitretação por EDM no Aço AISI 4140**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Uberlândia, 2013.
- SANTOS, RF; SILVA, ER; SALES, WF; RASLAN, AA. **Influence of Urea Content Blended with Deionized Water in the Process of Nitriding Using Electrical Discharge Machining on AISI 4140 Steel**, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **89**,1251-1257. 2017.
- SANTOS, RF.; SILVA, E.R.; SALES, W.F.; RASLAN, A.A. **Influence of the Electrode Material on the Nitriding of Medium Carbon Steel Using Sink Electrical Discharge Machining**, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **90**, 2002-2007. 2017.
- SANTOS, RF; SILVA, ER; SALES, WF; RASLAN, AA. **Analysis of the Surface Integrity when Nitriding AISI 4140 Steel by the Sink Electrical Discharge Machining (EDM) process**. Procedia CIRP **45**, 303-306. 2016.
- TSAI, D.C.; LUI, T.S.; CHEN, L.H. **Effect of Graphite Nodules on the EDM Machinability of Ferrite SG Cast Irons**. Materials Transactions, **41**(2), 299. 2000.
- YANG, Z. **The Use of Nitriding to Enhance Wear Resistance of Cast Irons and 4140 Steel**. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais). Universidade de Windsor, 2012.