

NITRETAÇÃO POR DESCARGAS ELÉTRICAS DO AÇO ABNT 4340 COM ADIÇÃO DE PÓ DE CARBETO DE SILÍCIO AO FLUIDO DIELÉTRICO

Nitriding by electric discharges in AISI 4340 steel with silicon carbide powder added to the dielectric fluid

Cristiano Elias^{1,2*}; Luciano Elias¹; Dâmaris Luiza Viana Daniel¹;
Ernane Rodrigues da Silva¹; Andreas Anderson Castro Lino²;

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

²Centro Universitário UNA, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

*Autor para correspondência: cristiano.elias@prof.una.br.

Recebido em: 21/02/2020, Aceito em: 06/05/2020, Publicado em: 15/05/2020.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22407/1984-5693.2020.v12.p.55-70>

RESUMO

Este artigo apresenta os resultados da pesquisa de nitretação por descargas elétricas no aço ABNT 4340 realizado em uma máquina de eletroerosão por penetração com adição de pó de carbeto de silício de 600 mesh ao fluido dielétrico. Cobre eletrolítico e grafita foram usados como eletrodos ferramenta. Adaptações como instalação de cuba auxiliar e bomba para circulação do fluido dielétrico foram implementadas na máquina de eletroerosão, para possibilitar a aplicação do processo. Solução aquosa de água deionizada e uréia farmacológica foi usada como fluido dielétrico. As camadas nitretadas foram caracterizadas por meio de microscopia ótica. O desempenho da usinagem foi avaliado por meio da taxa de remoção de material, taxa de desgaste da ferramenta e desgaste volumétrico relativo, a utilização de carbeto de silício adicionado ao fluido dielétrico melhora a taxa de remoção do material (TRM). A formação de nitretos foi analisada via difração de Raio-x. O desempenho foi melhor da usinagem com pó de carbeto de silício adicionado ao fluido dielétrico em relação a usinagem sem o pó de carbeto de silício. Picos de nitretos de ferro foram verificados nos difratogramas das amostras nitretadas, e o valor da rugosidade da superfície usinada sofreu uma pequena redução quando utilizado o carbeto de silício adicionado ao fluido dielétrico.

Palavras-chave: Nitretação por descargas elétricas, pó de SiC, aço ABNT 4340.

ABSTRACT

This article presents the results of the electrical discharge nitriding research on ABNT 4340 steel carried out in a penetration EDM machine with the addition of 600 mesh silicon carbide powder to the dielectric fluid. Electrolytic copper and graphite were used as tool electrodes. Adaptations such as installation of auxiliary tank and pump for circulating dielectric fluid were implemented in the EDM machine, to allow the application of the process. Aqueous solution of deionized water and pharmaceutical urea used as a dielectric fluid. The nitrided layers were characterized by means of optical microscopy. Machining performance was evaluated by means of material removal rate, tool usage rate and relative volumetric use, use of silicon carbide added to the dielectric fluid improves the material removal rate (MRR). The formation of nitrides was analyzed via x-Ray diffraction. The performance was better when machining with silicon carbide powder added to the dielectric fluid compared to machining without the silicon carbide powder. Spikes of iron nitrides were verified in the diffractograms of the nitrided parts, and the roughness value of the machined surface was slightly reduced when using the silicon carbide added to the dielectric fluid.

Keywords: Nitriding by electrical discharges, SiC powder, ABNT 4340 steel.

INTRODUÇÃO

O processo de nitretação por descargas elétricas por meio de uma máquina de eletroerosão por penetração, desenvolvido por Raslan (2012) e seus colaboradores, no início desta década, abriu uma linha de pesquisa que produziu vários artigos e periódicos sobre o tema. O processo permite a usinagem e tratamento termoquímico de nitretação, simultaneamente. Vários materiais como: liga de titânio e aços AISI 4140, 4340, 52100 e H13 já foram avaliados e se mostraram susceptíveis ao processo.

Raslan *et al.* (2012) destacam que o processo consiste na utilização de uma solução de água deionizada e uréia como fluido dielétrico. Ao se passar a corrente elétrica entre os eletrodos ferramenta e peça, forma-se um canal de plasma enriquecido com nitrogênio proveniente da uréia. Ao ocorrer a descarga o nitrogênio é incorporado à superfície da peça, formando nitretos e, conseqüentemente, o endurecimento da mesma. O processo alia a nitretação ao processo de usinagem. Além disso, é um processo rápido e pouco oneroso, se comparado aos métodos tradicionais de nitretação.

Nicesio *et al.* (2016) citam que muitos esforços têm sido conduzidos com o uso de diferentes fluidos dielétricos visando possibilitar o enriquecimento superficial de ligas com nitrogênio, carbono, boro e outros elementos. Melhorias significativas nas propriedades superficiais têm sido relatadas e a viabilidade do processo vem sendo estabelecida. Assim, a técnica de enriquecimento de superfícies metálicas com nitrogênio utilizando descargas elétricas, torna-se atrativa e economicamente viável, e ainda, explorada em várias pesquisas.

De maneira geral, o processo de Usinagem por Descargas Elétricas (*Electrical Discharge Machining* – EDM) ou eletroerosão, envolve a aplicação de uma diferença de potencial (corrente contínua) entre duas placas condutoras de eletricidade, chamadas de eletrodo e peça, as quais são separadas por uma pequena distância (de 0,012 a 0,050mm) denominada fenda ou gap, onde ocorrem descargas elétricas entre elas. No espaço entre a peça e o eletrodo, circula o fluido dielétrico, que se torna eletrolítico na forma gasosa. No instante da descarga elétrica, o eletrodo 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 . 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 de T_{ON} . Cessada a descarga elétrica, inicia-se por alguns milionésimos de segundo 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).

Para viabilizar a presença do nitrogênio, utiliza-se ureia diluída em água deionizada. Essa 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. 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. A utilização de processos híbridos, como misturar pó ao fluido dielétrico, possibilita um incremento significativo na velocidade de usinagem (RASLAN *et al.*, 2012).

Segundo Sales *et al.* (2017) a inovação encontrada neste 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 EDM por penetração não sofre qualquer tipo de mudança na sua configuração original, bastando somente realizar algumas adaptações.

A usinagem por descargas elétricas com pó adicionado ao fluido dielétrico é uma linha de trabalho que aprimora o processo de EDM. O pó adicionado ao fluido dielétrico reduz a força isolante e aumenta o gap, a fenda de trabalho, entre a ferramenta e a peça. Como resultado, o processo torna-se mais estável, melhorando a taxa de remoção de material e o acabamento superficial.

O objetivo desta pesquisa foi avaliar a nitretação por descargas elétricas do aço ABNT 4340 com adição de pó de carvão de silício de 600 mesh ($23\mu\text{m}$) ao fluido dielétrico formado por solução aquosa contendo ureia.

MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada em uma máquina de eletroerosão convencional, por penetração. Algumas adaptações foram necessárias para viabilizar a aplicação do processo de nitretação por descargas elétricas. A Figura 1 ilustra essas adaptações.

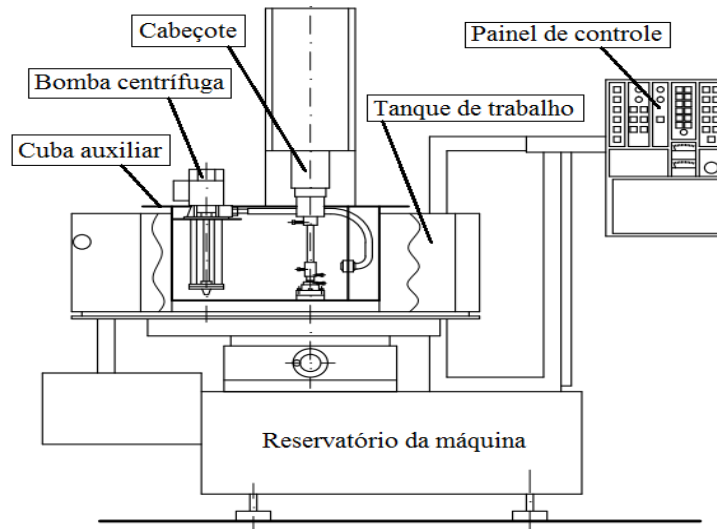


Figura 1. Desenho esquemático da máquina de eletroerosão com as adaptações.

A Figura 2 ilustra esquematicamente o interior da cuba auxiliar com o eletrodo ferramenta e amostra fixados no porta-eletrodo e porta-amostras. Uma cuba auxiliar, fabricada em aço inoxidável austenítico foi instalada dentro da cuba principal da máquina. Esta foi utilizada para que não ocorresse contaminação do fluido dielétrico da própria máquina em testes com fluidos dielétricos aquosos. Uma bomba centrífuga foi instalada na cuba auxiliar, com o objetivo de circular o fluido dielétrico com pó de carbeto de silício adicionado, procedimento semelhante ao citado por Kansal *et al.* (2007) em suas pesquisas.

As amostras foram confeccionadas com as dimensões de 19 mm de diâmetro por 13 mm de comprimento em aço ABNT 4340 de uma barra trefilada.

Os eletrodos ferramenta foram confeccionados em cobre eletrolítico e grafita, ambos com as dimensões de 22 mm de diâmetro por 30 mm de comprimento. Estes materiais são os mais adequados para serem aplicados no processo de eletroerosão.

O fluido dielétrico foi preparado com 30 litros de água deionizada, obtida a partir da água potável disponível para abastecimento público. Para deionizar a água foi utilizado um aparelho deionizador a base de resina. A condutividade da água antes da deionização era de 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$, aproximadamente, e após a deionização passou a ser de 0 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ureia farmacológica foi diluída na água deionizada para formar a solução aquosa na concentração de 30 gramas por litro. Carbeto de silício com granulometria de 600 mesh foi adicionado à solução aquosa na quantidade de 500 gramas, produzindo a concentração de 16,6 gramas por litro.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros operacionais ajustados na máquina de eletroerosão por penetração que possibilitaram a aplicação do processo de nitretração por descargas elétricas. Cada teste durou 10 minutos. Cada série de testes foi realizada três vezes.

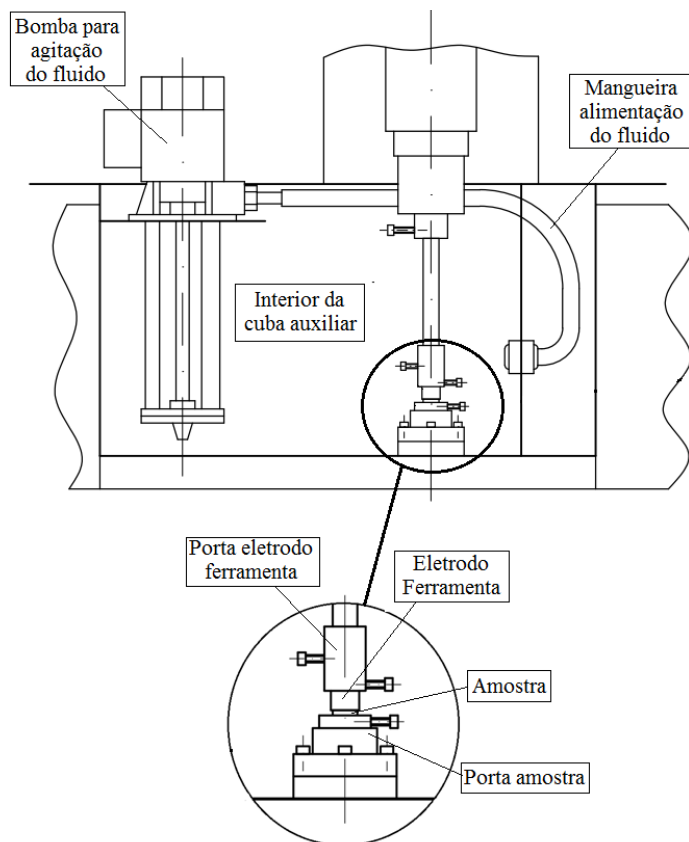


Figura 2. Desenho esquemático do interior da cuba auxiliar com detalhe para a montagem do eletrodo ferramenta e da amostra.

Tabela 1. Parâmetros operacionais de EDM usados no processo de nitretração por descargas elétricas.

PARÂMETRO	ESPECIFICAÇÃO
Polaridade do eletrodo	Positiva
Corrente	40 A
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	3,0*
Velocidade do servo	3,0*
Tempo de erosão	5,0*

* Estes parâmetros são 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 nitretação por descargas elétricas. As micrografias e avaliações das camadas refundida e intermediária foram realizadas em microscópio ótico com micrômetro incorporado. As imagens foram capturadas por meio de câmera digital acoplada aos equipamentos.

Para avaliação do desempenho do processo EDM foram calculadas a Taxa de Remoção de Material (TRM), a Taxa de Desgaste (TD) e o Desgaste Volumétrico Relativo (DVR). 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. Utilizou-se uma balança eletrônica com capacidade máxima para 310 gramas e resolução de 10⁻³ g.

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

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

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

Para quantificar a TRM, foi utilizada a Equação 2.

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

onde: Δm = variação de massa [g], t = tempo de usinagem [min] e a constante 0,00768 g/mm³ corresponde ao peso específico do aço ABNT 4340.

Para quantificar a TD (Taxa de Desgaste) do eletrodo ferramenta, foi utilizada a Equação 3.

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

onde: Δm = 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 g/mm³ para o cobre eletrolítico e 0,00175 g/mm³ para a grafita.

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

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

Um aparelho rugosímetro, modelo Rugosurf 20 foi utilizado para determinar as rugosidades das superfícies nitretadas nas diferentes condições.

Os parâmetros selecionados estão de acordo com a norma NBR ISO 4287: 2002 e manual do usuário fornecido pelo fabricante. O rugosímetro foi ajustado para o cut-off de 0,8 mm com comprimento de amostra de 4 mm e leitura do parâmetro Ra (desvio médio aritmético) e Rz (altura máxima do perfil de rugosidade). Para adquirir maior confiabilidade, cada amostra foi avaliada três vezes.

A etapa de caracterização por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada em quatro amostras, duas usinadas com adição do pó abrasivo de SiC e duas após processo utilizando-se apenas água deionizada e uréia como fluido dielétrico. A presença de nitretos foi verificada por difração de raios-x convencional, Bragg-Brentano ou θ - 2θ . A Tabela 2 apresenta os parâmetros de varredura e as especificações técnicas do difratômetro.

Tabela 2. Parâmetros adotados no ensaio de DRX

PARÂMETRO	ESPECIFICAÇÃO
Radiação	CuK α
Tensão	40 kV
Corrente	30 mA
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	1 s

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 3, 4, 5 e 6 ilustram imagens de microscopia ótica da seção transversal das amostras nitretadas do aço ABNT 4340 com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico e grafita com e sem adição de SiC ao fluido dielétrico.

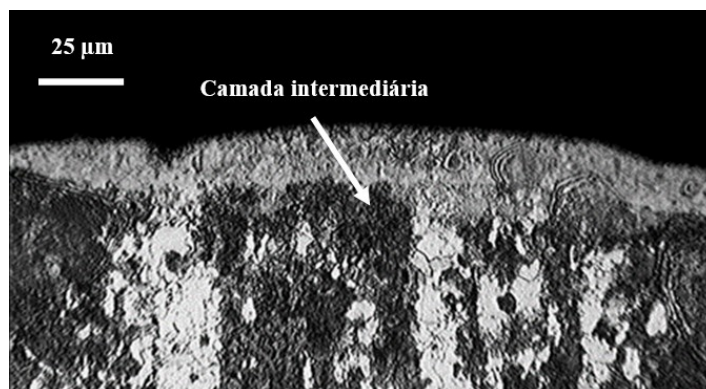


Figura 3. Imagem de microscopia ótica da seção transversal do aço ABNT 4340 nitretado por descargas elétricas com ferramenta de cobre eletrolítico com adição de SiC. Ataque nital 3%.

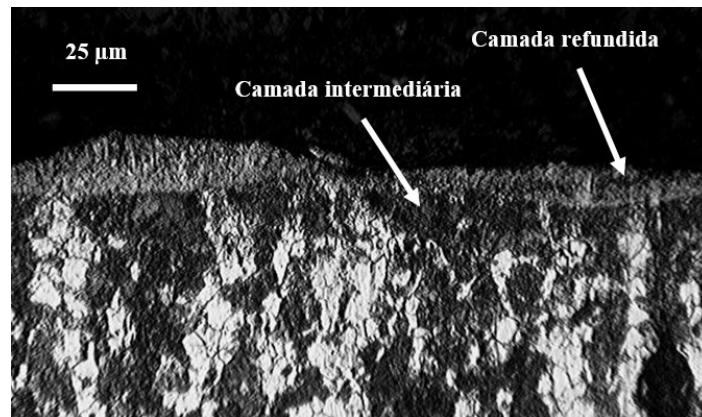


Figura 4. Imagem de microscopia ótica da seção transversal do aço ABNT 4340 nitretado por descargas elétricas com ferramenta de cobre eletrolítico sem adição de SiC. Ataque nital 3%.

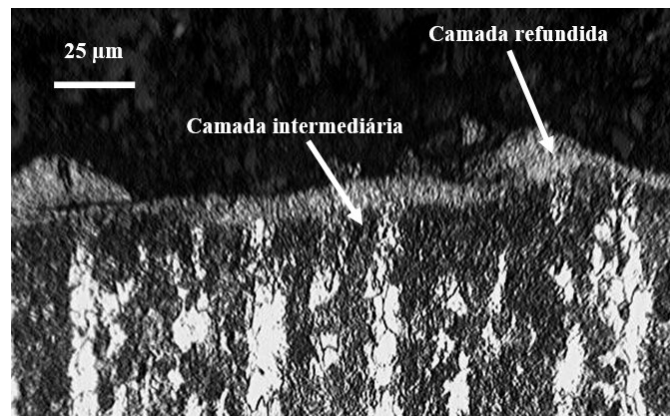


Figura 5. Imagem de microscopia ótica da seção transversal do aço ABNT 4340 nitretado por descargas elétricas com ferramenta de grafita com adição de SiC. Ataque nital 3%.

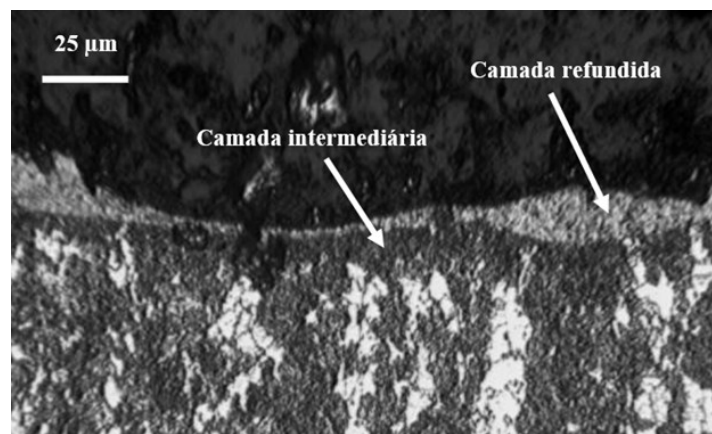


Figura 6. Imagem de microscopia ótica da seção transversal do aço ABNT 4340 nitretado por descargas elétricas com ferramenta de grafita sem adição de SiC. Ataque nital 3%.

Nota-se que em ambas as condições, com e sem adição de pó de carbeto de silício para os dois tipos de eletrodo ferramenta, ocorrem a formação das camadas refundidas e intermediária, semelhantes às observações de Raslan (2015) e Sales *et al.* (2017) na nitretação por descargas elétricas do aço ABNT 4140.

Outro fator relevante na aplicação do processo de nitretação por descargas elétricas é a diminuição na intensidade de microtrincas dentro da camada branca, devido ao uso de água deionizada em relação à utilização de hidrocarbonetos de origem mineral (MARASHI *et al.*, 2016).

A Figura 7 ilustra o gráfico com os resultados da taxa de remoção de material das amostras nitretadas do aço ABNT 4340.

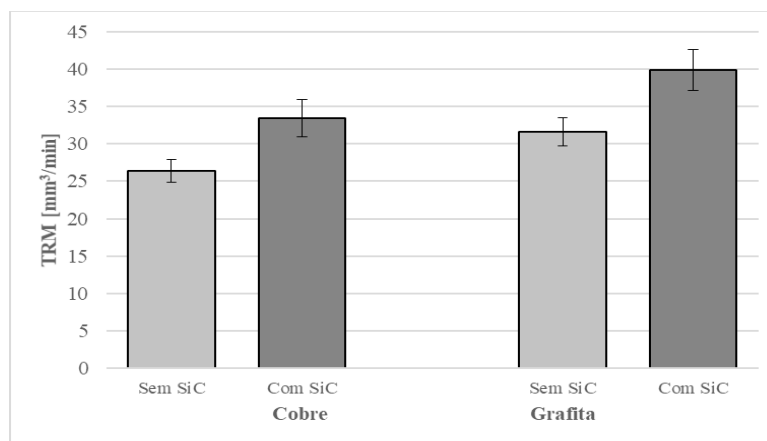


Figura 7. Gráfico com valores da taxa de remoção de material da usinagem com eletrodos de cobre eletrolítico e grafita com e sem adição de SiC de 600 mesh.

Observa-se um aumento de 26,5% no valor da TRM quando se utilizou eletrodo de cobre com carbeto de silício de 600 mesh adicionado ao fluido dielétrico, o valor de TRM aumentou de 26,4 para 33,4 mm³/min. Nota-se ainda, que para o eletrodo ferramenta de grafita o aumento foi de 26,2%, o valor da TRM aumentou de 31,6 para 39,9 mm³/min.

Os resultados corroboram com as observações de Chow *et al.* (2008), a adição de pó de SiC aumenta a condutividade elétrica do fluido dielétrico, alarga a fenda de trabalho, bem como, facilita a retirada de detritos e, conseqüentemente, aumenta a TRM.

Maraschi *et al.* (2016) afirmam que quantidades mais baixas de energia são induzidas na peça pela faísca com pó adicionado ao fluido dielétrico em comparação ao dielétrico puro, no entanto, a maior frequência de ignição supera esse efeito e promove uma maior remoção de material.

A Figura 8 ilustra o gráfico com os resultados da taxa de desgastes dos eletrodos ferramentas de cobre eletrolítico e grafita usados na usinagem do aço ABNT 4340.

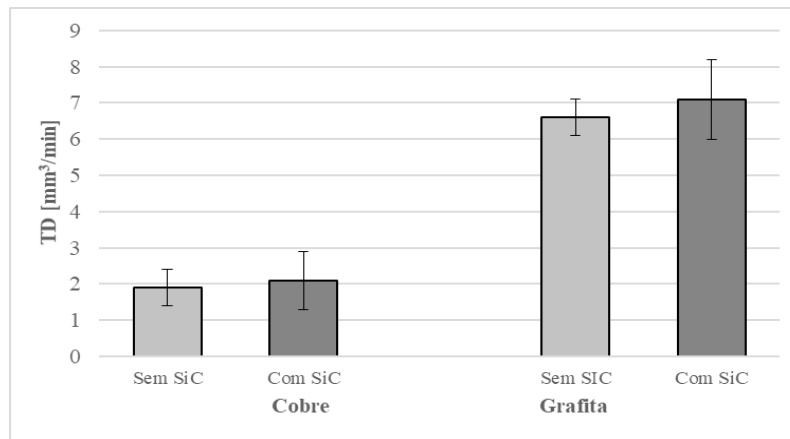


Figura 8. Gráfico com valores da taxa de desgaste dos eletrodos de cobre eletrolítico e grafita na usinagem do aço ABNT 4340 com e sem adição de SiC de 600 mesh.

Observa-se um aumento de 10,5% no valor de TD quando se utilizou eletrodo de cobre com carboneto de silício de 600 mesh adicionado ao fluido dielétrico, o valor de TD passou de 1,9 para 2,1 mm³/min. Nota-se ainda, que para o eletrodo ferramenta de grafita o aumento foi de 7%, o valor de TD subiu de 8,5 para 9,1 mm³/min. Chow *et al.* (2008), afirmam que o aumento da TRM é seguido pelo desgaste do eletrodo ferramenta, devido à ação das partículas do pó de SiC atuando como abrasivo na superfície da ferramenta. A Figura 9 ilustra o gráfico com os resultados do desgaste volumétrico relativo na usinagem do aço ABNT 4340 com e sem adição de SiC ao fluido dielétrico.

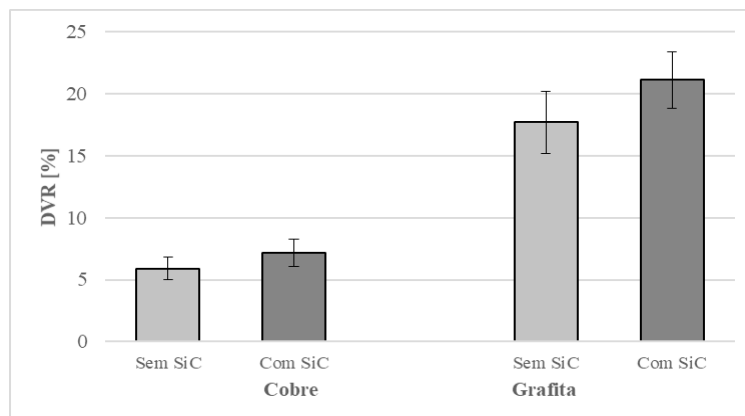


Figura 9. Gráfico com valores do desgaste volumétrico relativo dos eletrodos de cobre e grafita na usinagem do aço ABNT 4340 com e sem adição de SiC de 600 mesh.

Observa-se um aumento de 22% no valor do DVR quando se utilizou eletrodo de cobre com carbeto de silício de 600 mesh adicionado ao fluido dielétrico, o valor do DVR subiu de 5,9 para 7,2%. Nota-se ainda, que para o eletrodo ferramenta de grafita o aumento foi de 18,8%, o valor do DVR aumentou de 22,8 para 27,1%. Observa-se uma redução de 7,6% no valor de Rz quando se

utilizou eletrodo de cobre com carbeto de silício de 600 mesh adicionado ao fluido dielétrico, o valor de Rz reduziu de 24,8 para 22,5 μm . Nota-se ainda, que a redução para o eletrodo ferramenta de grafita foi de 12,1%, o valor de Rz passou de 37,9 para 33,3 μm . Observa-se uma redução de 7,6% no valor de Rz quando se utilizou eletrodo de cobre com carbeto de silício de 600 mesh adicionado ao fluido dielétrico, o valor de Rz reduziu de 24,8 para 22,5 μm . Nota-se ainda, que a redução para o eletrodo ferramenta de grafita foi de 12,1%, o valor de Rz passou de 37,9 para 33,3 μm . A Figura 10 ilustra o gráfico com os resultados da medição de rugosidade Ra média, em μm , das amostras nitretadas do aço ABNT 4340.

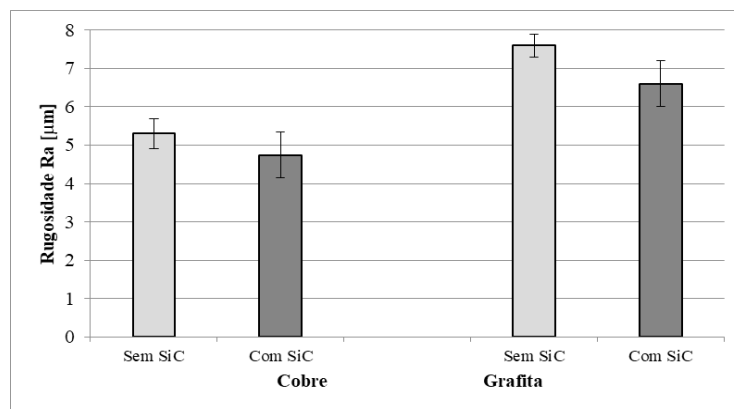


Figura 10. Gráfico com valores de rugosidade Ra (μm) média das amostras do aço ABNT 4340 usinadas com eletrodos de cobre eletrolítico e grafita com e sem adição de SiC de 600 mesh.

Observa-se uma redução de 10,5% no valor de Ra quando se utilizou eletrodo de cobre com carbeto de silício de 600 mesh adicionado ao fluido dielétrico, o valor de Ra reduziu de 5,3 para 4,7 μm . Nota-se ainda, que para o eletrodo ferramenta de grafita a redução foi de 13,1%, o valor de Ra reduziu de 7,6 para 6,6 μm . Resultados semelhantes foram relatados por Chow *et al.* (2008), a adição de pó ao processo de usinagem por descargas elétricas aumenta a TRM e melhoram a rugosidade da superfície. A Figura 11 ilustra o gráfico com os resultados da medição de rugosidade Rz média das amostras nitretadas do aço ABNT 4340.

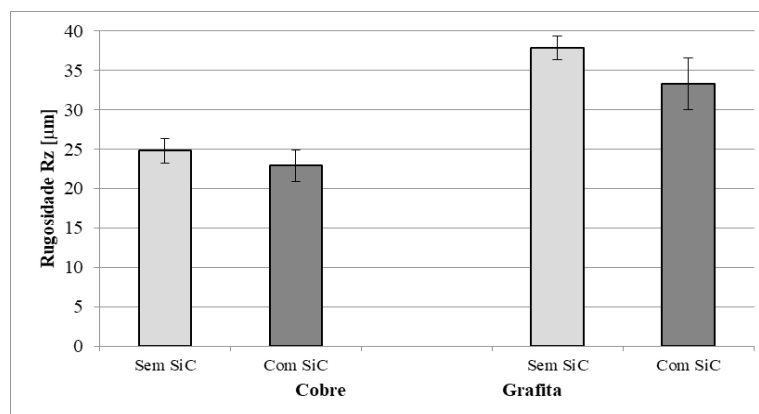


Figura 11. Gráfico com valores de rugosidade Rz (μm) média das amostras do aço ABNT 4340 usinadas com eletrodos de cobre eletrolítico e grafita com e sem adição de SiC de 600 mesh.

Kansal *et al.* (2007) relataram que a redução da força isolante do fluido dielétrico aumenta o *gap* entre ferramenta e peça. Como resultado o processo torna-se mais estável, melhorando o acabamento superficial.

A Figura 12 ilustra os difratogramas de Raio-x das amostras usinadas com eletrodos de cobre e grafita com e sem adição de SiC ao fluido dielétrico e ainda o do aço ABNT 4340 de referência.

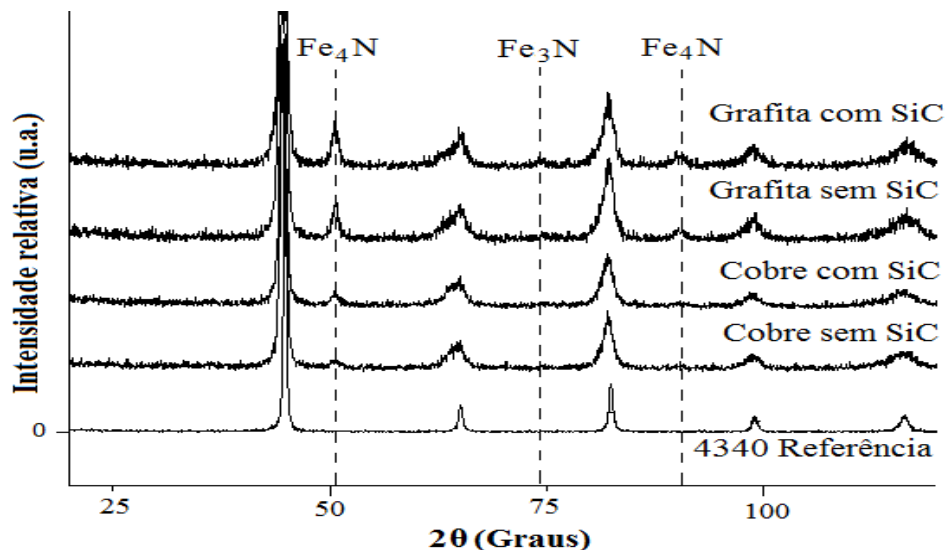


Figura 12. Difratogramas de Raio-x das amostras usinadas com eletrodos de cobre eletrolítico e grafita com e sem adição de SiC de 600 mesh e do aço ABNT 4340 referência.

É possível observar os picos de nitretos de ferro Fe₃N e Fe₄N formados nas amostras usinadas com eletrodos de cobre e grafita com e sem SiC em relação ao aço ABNT 4340 de referência. Segundo Santos (2013) 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 iram 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 da peça (catodo) e, implantam-se no interior da mesma.

As Figuras 13 e 14 ilustram imagens de microscopia eletrônica de varredura da topografia da superfície nitretada do aço ABNT 4340 com eletrodo ferramenta de cobre com SiC em 13, e sem adição de SiC ao fluido dielétrico em 14.

As Figuras 15 e 16 ilustram imagens de microscopia eletrônica de varredura da topografia da superfície nitretada do aço ABNT 4340 com eletrodo ferramenta de grafita com SiC na Figura 15 e sem adição de SiC ao fluido dielétrico, na Figura 16.

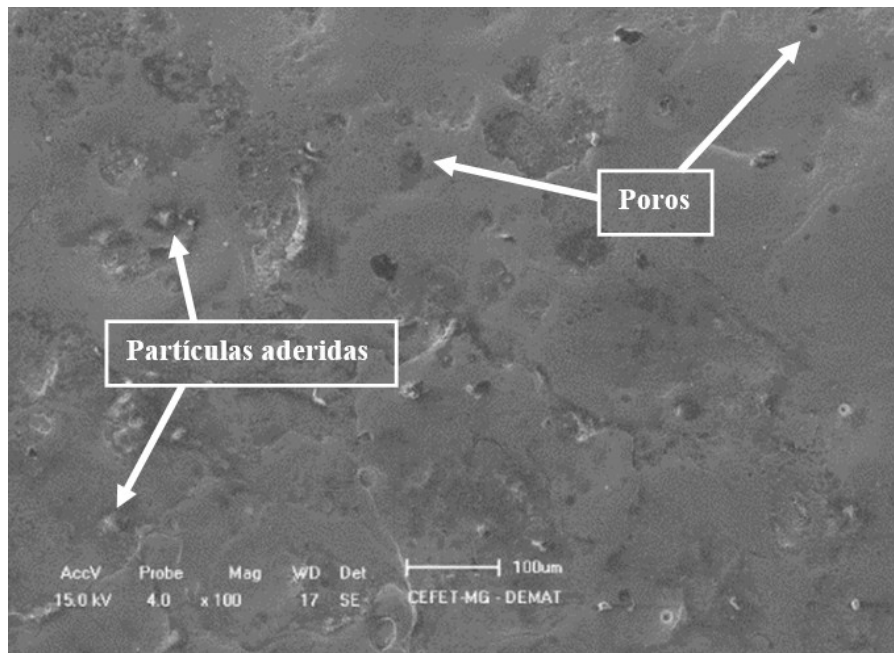


Figura 13. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da topografia do aço ABNT 4340 nitretado por descargas elétricas com ferramenta de cobre eletrolítico com adição de SiC.

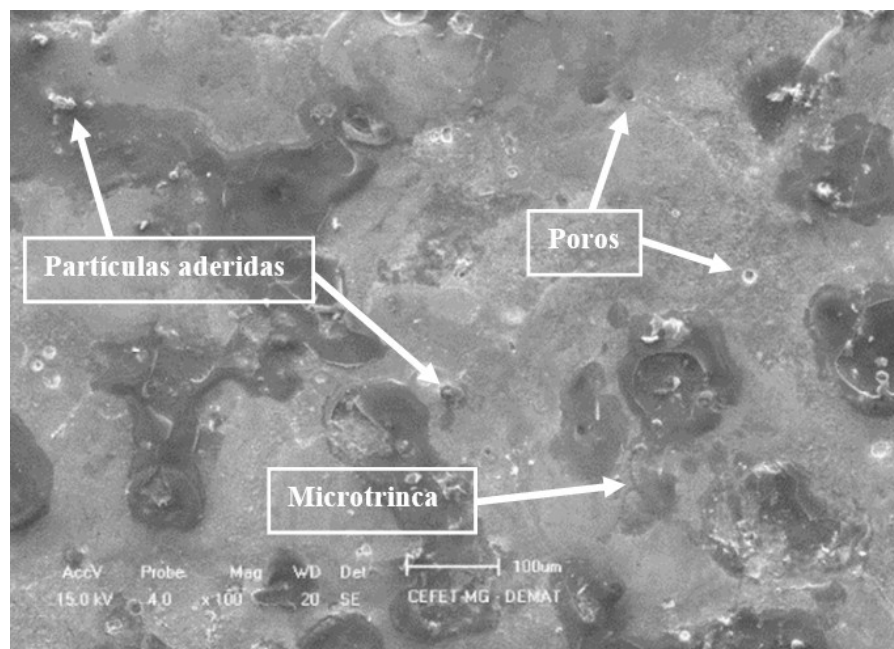


Figura 14. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da topografia do aço ABNT 4340 nitretado por descargas elétricas com ferramenta de cobre eletrolítico sem adição de SiC.

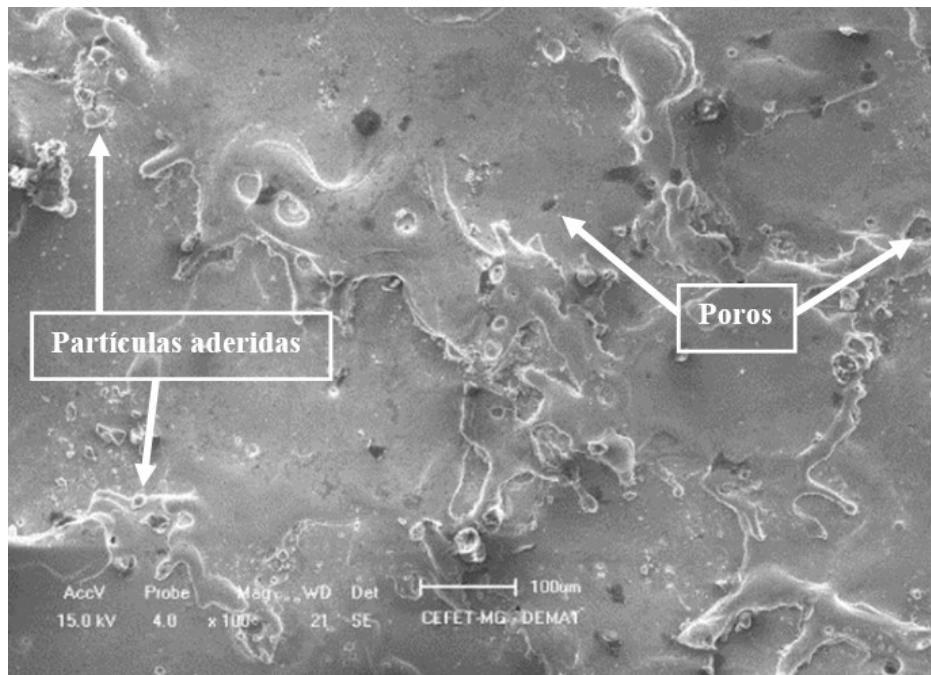


Figura 15. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da topografia do aço ABNT 4340 nitretado por descargas elétricas com eletrodo ferramenta de grafita com adição de SiC.

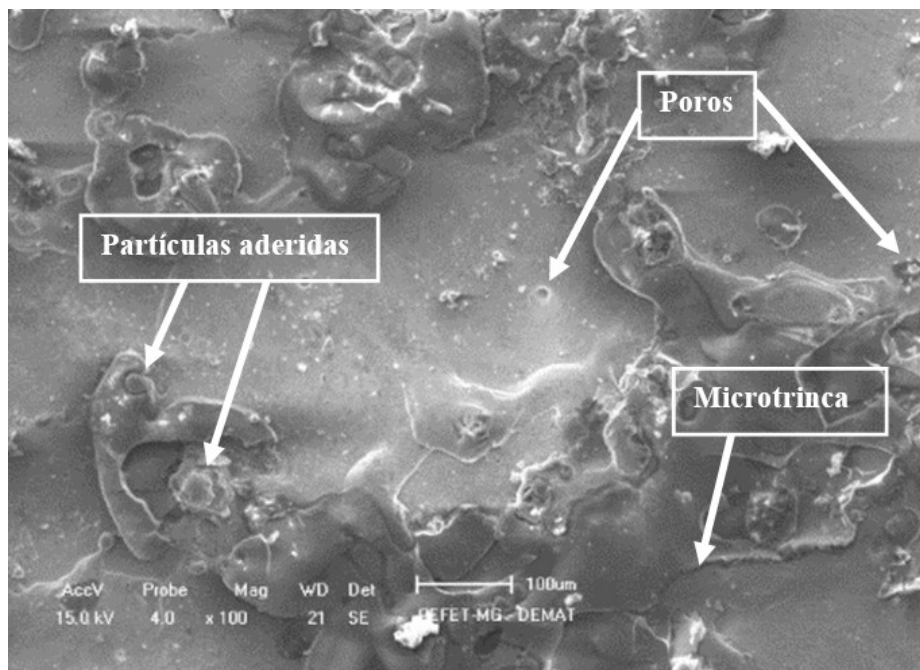


Figura 16. Imagem de microscopia eletrônica de varredura da topografia do aço ABNT 4340 nitretado por descargas elétricas com eletrodo ferramenta de grafita sem adição de SiC.

A topografia da superfície das amostras usinadas com e sem adição de SiC ao fluido dielétrico possuem poros e partículas aderidas, semelhante ao que ocorre com as superfícies usinadas com hidrocarbonetos, uma diferença que pode ser verificada é a redução de microtrincas. A superfície usinada com eletrodo ferramenta de grafita aparentemente possui uma topografia com mais picos, formados pela deposição de material refundido.

Chow *et al.* (2008), relatam que a usinagem por EDM com pó misturado ao fluido dielétrico produz uma menor ondulação de crateras, porque a força de impacto que atua sobre a peça é menor. Isso resulta na usinagem estável sem curto circuito entre a ferramenta e peça.

CONCLUSÕES

Após a aplicação do processo de nitretação por descargas elétricas no aço ABNT 4340 com adição de pó de carbeto de silício de 600 mesh ao fluido dielétrico, pode-se concluir que:

A adição de SiC ao fluido dielétrico não provocou mudanças consideráveis nas camadas refundida e intermediária em relação à aplicação da solução aquosa sem pó. A espessura de ambas as camadas aparentemente se mantém inalteradas.

A utilização de carbeto de silício adicionado ao fluido dielétrico melhor a TRM. Ocorreu um aumento de 26,5% quando se utilizou eletrodo ferramenta de cobre e 26,2% com eletrodo de grafita. Porém, esse aumento na TRM resultou também em um maior desgaste da ferramenta, a TD subiu 10,5% com eletrodo de cobre e 7% com de grafita. O DVR acompanhou esses aumentos, sendo que para o cobre foi de 22% e com a grafita 18,8%.

O valor da rugosidade Ra sofreu uma redução de 10,5% quando se usinou com pó de SiC e eletrodo de cobre e 13,1% com eletrodo de grafita. O valor de Rz acompanhou essa redução, 7,6% para o cobre e 12,1% para a grafita.

Foi observado nos difratogramas de Raio-x o surgimento de nitretos de ferro formados na superfície das amostras de aço ABNT 4340 usinadas com e sem adição de pó de carbeto de silício.

A morfologia das superfícies usinadas com ambos os eletrodos, cobre e grafita, nas condições com e sem adição de pó de SiC ao fluido dielétrico são semelhantes, ocorrem o surgimento de poros e partículas do material aderidas à superfície das peças.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHOW, HM; YANG, LD; LIN, CT; CHEN, YF. The use of SiC powder in water as dielectric for micro-slit EDM machining. **Journal of Materials Processing Technology**, **195**, 160-170. 2008.
- KANSAL, HK, SINGH, S, KUMAR, P. Technology and research developments in powder mixed electric discharge machining (PMEDM). **Journal of Materials Processing Technology** **184**, 32-41. 2007.
- MARASHI, H; JAFARLOUA, DM; SARHANA, AAD; HAMDI, M. State of the art in powder mixed dielectric for EDM applications. **Precision Engineering** **46**, 11-33. 2016.

NISÉSIO, IC; SILVA SP; FREITAS AF; SANTOS, RF; SILVA, ER. Avaliação da Qualidade da Ureia no Processo de Nitretação por Descargas Elétricas do Aço AISI 4140. **Anais... 8º COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. Salvador, BA: 2015.

RASLAN, AA; SANTOS, RF; SILVA, ER. Fundação de Apoio a Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG). UFU, Universidade Federal de Uberlândia. **Método de Nitretação através da Usinagem com Descargas – 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, BA: 2015.

SANTOS, RF. **Nitretação por EDM no aço AISI 4140**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Uberlândia, MG: 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.