

Nitretação por descargas elétricas no aço AISI 4140 com adição de pó de carbeto de silício em diferentes proporções ao fluido dielétrico.

Nitriding AISI 4140 steel through electric discharge adding silicon carbide powder in different proportions into the dielectric fluid.

Henrique Gustavo Santos^{1*}, Ernane Rodrigues da Silva^{1*}, Victor Souza Esteves Lima¹

¹Departamento de Engenharia de Materiais, CEFET-MG. CEP: 30421-169, Belo Horizonte, MG.

Submetido em: 04.01.2021; Aceito em: 10.06.2022; Publicado em: 28.07.2022.

***Autor para correspondência:** henry-santos10@hotmail.com

Resumo: A nitretação realizada por meio de usinagem por descargas elétricas é um método que vincula a usinagem de peças de complexas geometrias à capacidade de obtenção de tratamento termoquímico de nitretação em sua superfície. Este estudo tem como objetivo avaliar os resultados da nitretação por descargas elétricas do aço AISI 4140, utilizando como fluido dielétrico, água deionizada com ureia farmacológica diluída e adição de pó de carbeto de silício ao fluido em diferentes proporções. O nitrogênio, como elemento responsável pelo ganho de dureza superficial, é proveniente da ureia que compõe o fluido dielétrico utilizado no processo. Uma máquina de eletroerosão por penetração, tecnicamente adaptada, foi utilizada para realizar o experimento. Vinte e cinco amostras idênticas foram preparadas e usinadas por descargas elétricas utilizando eletrodo de grafita. A caracterização das amostras foi feita a partir do ensaio de microdureza Vickers, medição da rugosidade superficial e das técnicas de microscopia óptica e difração de raio x. Além disso, foi avaliado o desempenho da usinagem em todos os conjuntos de amostras com e sem variação de concentração de pó abrasivo. Os resultados encontrados evidenciam a formação da camada nitretada com aumento de até 110% da dureza superficial em relação ao substrato, alteração no desempenho da usinagem e redução da rugosidade superficial quando adicionado pó abrasivo ao fluido dielétrico.

Palavras-chave: Nitretação, usinagem por descargas elétricas, carbeto de silício, fluido dielétrico.

Abstract: The nitriding process performed through machining by electrical discharges is a method that combines the machining of complex geometries parts to the ability to obtain thermochemical nitriding treatment on their surface. This study aims to evaluate the results of nitriding by electrical discharges on AISI 4140 steel, using as a dielectric fluid, a mix of deionized water with diluted pharmacological urea and the addition of silicon carbide powder to the fluid, in different proportions. Nitrogen, as the element to add surface hardness in steel, comes from the urea that is part of the dielectric fluid used in the process. A properly adapted penetration EDM machine was used to carry out the experiment. Twenty-five identical samples were prepared and machined by electrical discharges using a graphite electrode. The characterization of the sample was made via Vickers microhardness test, evaluation of surface roughness and optical microscopy and x-ray diffraction techniques. Additionally, the machining performance was evaluated in all sets of samples, with and without abrasive powder concentration variation. The results obtained show the formation of the nitrided layer in the steel with an increase of up to 110% in surface hardness in relation to the substrate, change in machining performance and reduction in surface roughness when abrasive powder is added to the dielectric fluid.

Keywords: Nitriding, machining by electrical discharges, abrasive powder, dielectric fluid.

INTRODUÇÃO

A nitretação é um tratamento termoquímico aplicado no aço para aumento de resistência à fadiga e resistência ao desgaste por deslizamento. Esse processo promove um aumento de dureza superficial nos aços em função da introdução do nitrogênio, sob a ação de ambiente nitrogenoso, a determinada temperatura e possui extenso campo de aplicação na indústria (CHIAVERINI, 2012).

Para Sun e Bell, (1991), o processo de nitretação a plasma é o mais utilizado para melhorar as propriedades da superfície de vários aços de engenharia.

A usinagem por descargas elétricas (EDM) é um processo termoeletrônico que efetua a remoção de material da superfície da peça através de descargas elétricas. É um dos processos mais indicados para fabricação de moldes e matrizes, por possibilitar a usinagem de peças com geometrias complexas e de elevada dureza que seriam difíceis de serem usinadas por processos convencionais como fresagem e torneamento. Esta é uma das principais vantagens da EDM em relação aos processos convencionais, já que ela pode ser feita em materiais com propriedades mecânicas cada vez mais exigentes, fato que os torna materiais de difícil usinabilidade (PANDEY; SINGH, 2010). O princípio básico de remoção de material é a ocorrência de sucessivas descargas elétricas entre os eletrodos, ferramenta (anodo) e peça (catodo), que são separados por uma fenda de trabalho conhecida como “gap”. McGeough (1988) e Fuller (1989), afirmam que partículas são arrancadas por fusão ou sublimação e erodidas das faces dos eletrodos. Stevens (1998), afirma que cada descarga elétrica gera energia térmica suficiente para fundir e evaporar pequenas porções de material dos eletrodos, os quais permanecem submersos em um fluido dielétrico durante a usinagem

Um dos principais parâmetros para mensurar e avaliar a EDM são a Taxa de Remoção de Material (TRM), Rugosidade Superficial (RS), Relação de Desgaste entre os Eletrodos ou Desgaste Volumétrico Relativo (DVR) (Cruz, 1993).

O processo EDM possui uma característica muito atrativa e que vem sendo investigada nos últimos anos que é a possibilidade de conseguir modificações superficiais na peça. Essas modificações afetam as propriedades da peça e ocorrem devido ao plasma formado que podem conter partículas de outros materiais. O canal de plasma formado durante a usinagem pode ser aproveitado para fazer a implantação de elementos químicos na superfície do substrato. Para Kumar, (2009), os elementos químicos devem estar presentes no eletrodo ferramenta ou no fluido dielétrico.

As sucessivas descargas elétricas que ocorrem durante o processo de usinagem, possibilitam a inserção de íons que se encontram presentes no fluido dielétrico na camada superficial do material trabalhado. Sendo assim, elementos químicos específicos que podem alterar as propriedades superficiais dos materiais, podem ser implantados em sua superfície de acordo com a necessidade da aplicação (Raslan et al., 2012; Silva, 2012; Santos, 2013; Oliveira et al., 2015).

A indústria busca continuamente por desenvolvimento de materiais com melhores propriedades mecânicas para trabalhar em condições mais severas e redução de custos de forma a aumentar a produtividade. Raslan et al. (2012), mostraram que é possível utilizar o processo EDM para promover a nitretação de superfícies por meio da adição de ureia ao fluido dielétrico que ficou denominado Nitretação por Descargas Elétricas (NDE). Anteriormente, Yan et al. (2005) e Camargo et al. (2009), estudaram esse método no titânio e mostraram que existe a formação de nitretos na superfície do material e, conseqüentemente, ganho de resistência ao desgaste por deslizamento. Lima (2018), através da NDE no aço AISI 4340, evidenciou a formação de nitretos de ferro na superfície do material e a formação de uma camada nitretada uniforme utilizando eletrodo de cobre. A NDE, portanto, é uma fusão de dois processos em um, ou seja, ao realizar a usinagem por descargas elétricas é possível adquirir ao mesmo tempo o endurecimento superficial provocado pela nitretação.

Apesar das evidências de modificações superficiais e melhorias nas propriedades através da implantação de elementos químicos, a rugosidade é uma característica que precisa ser melhorada após a realização desse processo. Como forma de adquirir melhor acabamento superficial, esse trabalho propõe uma investigação no processo de NDE no aço AISI 4140, utilizando uma dissolução de ureia em água deionizada com diferentes concentrações de Carbetto de Silício (SiC) como fluido dielétrico. O SiC é formado por um átomo de silício e outro de carbono e possui elevada dureza, o que o torna excelente material abrasivo. A mistura desse composto ao fluido dielétrico foi feita com o intuito de diminuir a rugosidade da superfície usinada e, conseqüentemente, melhorar o acabamento superficial. Estudos mostram que a adição de pó de SiC em fluidos dielétricos no processo EDM, pode resultar em melhor acabamento superficial. Rodrigues (1999), estudou o aço rápido ABNT M2 em processo de usinagem por descargas elétricas com e sem adição de pó de SiC em fluidos dielétricos à base de hidrocarbonetos. Ao analisar os resultados, ele concluiu que o pó abrasivo adentrou à fenda de trabalho, o gap, e fez com que as descargas elétricas se tornassem mais uniformes e direcionadas, resultando em melhor acabamento superficial.

Chow et al., (2008), adicionaram pó de SiC à água pura para servir como fluido dielétrico para micro EDM da liga de titânio Ti6Al4V. Sua pesquisa comparou o acabamento superficial quando usinado com e sem adição de SiC. Os resultados mostraram que com a utilização da água pura com adição de carbetto de silício a fenda de trabalho ficou maior em função da alta condutividade no fluido, com isso, a energia de descarga que refina a aspereza da peça foi dispersada de forma eficaz, resultando na redução da rugosidade.

Silva et al., (2012), também analisaram o desempenho do pó de SiC e de Al₂O₃ (óxido de alumínio) no processo de usinagem híbrido AJEDM, *Abrasive Jet Electrical Discharge Machining* (Usinagem por Descargas Elétricas e Jato de Água Abrasivo) e concluíram que o desempenho de usinagem foi melhor quando utilizado o pó de SiC, quando comparado com o pó de Al₂O₃, ambos com granulometria de 600 mesh e pressão de trabalho de 240 bar.

O objetivo deste estudo é avaliar os efeitos da usinagem por descargas elétricas no aço ABNT 4140 com adição do abrasivo SiC, em diferentes proporções, ao fluido dielétrico composto de água e ureia. Especificamente, serão estudados os principais parâmetros de avaliação de usinagem, a formação da camada nitretada e sua morfologia superficial através da microscopia óptica da seção transversal, caracterização dos nitretos formados com a utilização da técnica de difração de raio x e, finalmente, será feita uma avaliação dos efeitos na rugosidade superficial com e sem adição de SiC.

MATERIAL E MÉTODOS

Procedimento Experimental

A metodologia experimental do trabalho, foi feita seguindo uma sequência lógica, de acordo com as características de cada etapa do processo. Inicialmente, foi feita a separação dos materiais e ferramentas necessários para, em seguida, fazer a preparação da máquina e regulagem dos parâmetros.

Posterior a essas etapas iniciais, os testes foram realizados. Como forma de avaliar os testes, foi analisado o desempenho da usinagem, aspecto e medida da rugosidade de cada amostra e a caracterização dos materiais submetidos aos respectivos ensaios. Através da figura 1, pode-se observar o detalhamento da sequência do trabalho.



Figura 1. Representação das etapas do experimento. **Fonte:** Autor, 2021.

Preparação das amostras

Os corpos de prova foram fabricados em geometria cilíndrica com dimensões $\varnothing 3/4'' \times 10$ mm a partir de uma barra cilíndrica trefilada do aço AISI 4140. Este aço é amplamente utilizado na indústria por combinar propriedades mecânicas, podendo trabalhar em variados níveis de solicitação. Sua composição química é demonstrada na tabela 1.

Tabela 1. Composição química do aço AISI 4140.

Aço SAE/AISI	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)						
	C	Mn	P Máx.	S Máx.	Si	Cr	Mo
4140	0,38-0,43	0,75-1,00	0,03	0,04	0,15-0,35	0,80-1,10	0,15-0,25

Fonte: Manual de aços Gerdau, 2003.

As peças foram torneadas com a finalidade de padronizar as medidas e garantir a uniformidade em suas faces para posterior usinagem por descargas elétricas. Neste caso, os corpos de prova fazem o papel do eletrodo peça no processo EDM.

Foram fabricadas vinte e cinco amostras e separadas em cinco grupos contendo cinco unidades cada. Como pode ser visto na figura 2, uma das amostras de cada grupo foi previamente seccionada ao meio para facilitar a preparação metalográfica e possibilitar a caracterização da camada nitretada após a NDE.



Figura 2. Amostras do aço ABNT 4140 usinados por EDM. **Fonte:** Autor, 2021.

Eletrodos Ferramenta

A NDE nas amostras foi realizada utilizando como eletrodos ferramenta a grafita. Como mostrado na figura 3, todos eles foram usinados com o diâmetro de vinte e dois milímetros, ligeiramente maior que o diâmetro dos corpos de prova, para garantir que toda a superfície da amostra fosse envolvida e usinada.

Os eletrodos foram numerados para facilitar a combinação do mesmo com a amostra usinada. Esse procedimento se faz necessário para verificar sua massa antes e depois do processo, dados estes, essenciais para avaliação do desempenho da usinagem.

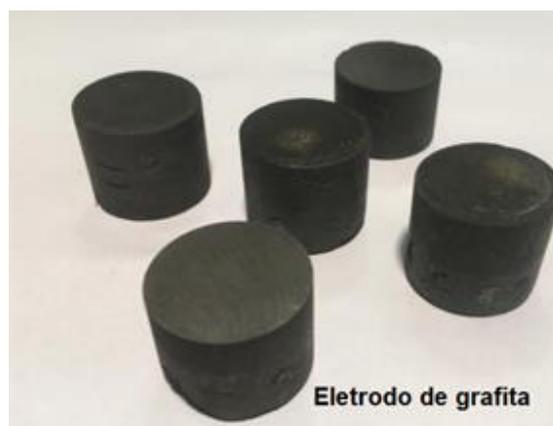


Figura 3. Eletrodos de grafite com as faces usinadas. **Fonte:** Autor, 2021.

Para a realização do experimento, foi utilizada uma máquina de usinagem por descargas elétricas por penetração convencional, modelo Eletroplus – 540/SERVSPARK, representada na figura 4.

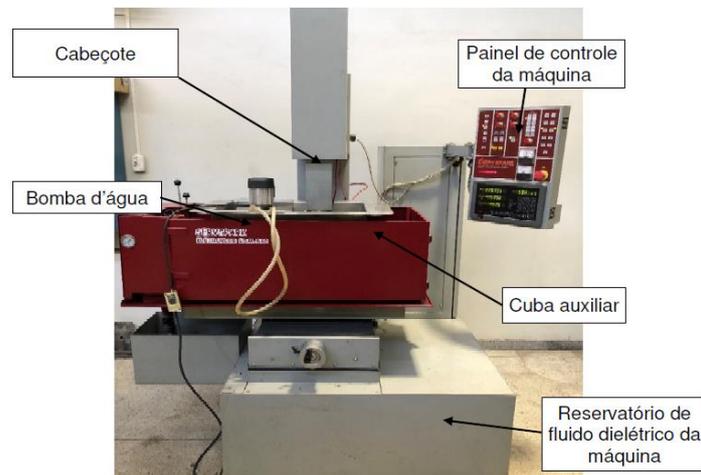


Figura 4. Máquina de usinagem por descargas elétricas. **Fonte:** Autor, 2021.

Como o experimento proposto apresenta características específicas, foi necessário utilizar uma série de recursos e adaptações para se ter êxito no processo. A utilização de uma cuba auxiliar fabricada em aço AISI 304 foi necessária para evitar que o fluido dielétrico de água deionizada com uréia se misture com o fluido próprio da máquina e, ainda, evitar corrosão de seus componentes.

Uma bomba centrífuga modelo CD 3002 de fabricação ASTEN, com vazão de 51 litros por minuto a uma pressão de 2 metros de coluna de água (0,2 bar), acoplada a um motor elétrico de corrente alternada, com 3100 rotações por minuto e potência de 120 Watts, foi utilizada para recircular o fluido dielétrico na cuba auxiliar. Na saída dessa bomba, uma mangueira foi fixada com o bico apontado para baixo, sem direcionar o fluxo de fluido direto à região de trabalho como mostra a figura 5.

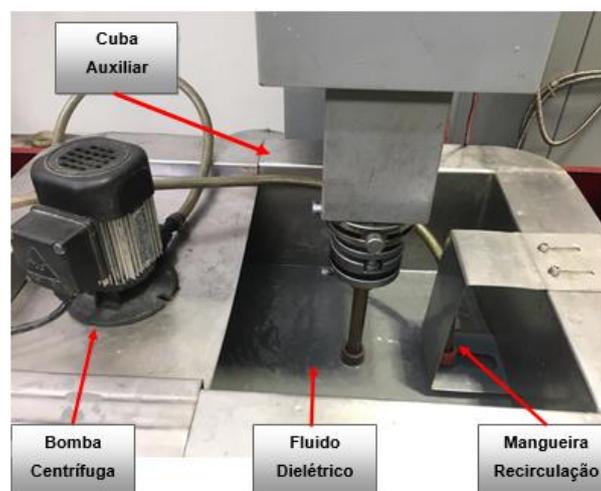


Figura 5. Cuba auxiliar fabricada em aço inox, adaptada para o experimento. **Fonte:** Autor, 2021.

Como foi feita a adaptação de uma cuba auxiliar na máquina, foi necessário instalar um dispositivo para fixação da peça, visto na figura 6. A geometria do dispositivo foi desenvolvida especificamente para fixação das amostras, uma vez que o diâmetro da cavidade é ligeiramente maior que os corpos de prova. Essa característica foi necessária para garantir que a peça esteja paralela à base. Um parafuso foi utilizado para o travamento da peça, a fim de impedir qualquer movimentação durante a usinagem.

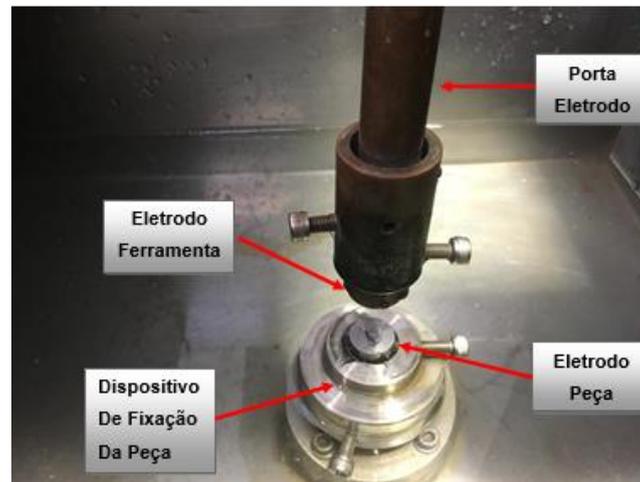


Figura 6. Dispositivo para fixação das amostras e eletrodos. **Fonte:** Autor, 2021.

Para a realização da NDE das 25 amostras, foram utilizados os mesmos parâmetros em todas elas, tanto no processo sem adição como também com adição de SiC. Como o processo possui diversas variáveis, alterando os parâmetros delongaria muito essa pesquisa e dificultaria uma análise crítica das amostras. Como pode ser observado na figura 7, eles podem e devem ser regulados através do painel de controle da máquina antes de iniciar a operação.



Figura 7. Painel de controle da máquina de EDM. **Fonte:** Autor, 2021.

A definição dos parâmetros deste procedimento experimental se deu com base na pesquisa de Lima (2018) que, através de seus estudos, mostrou a formação de nitretos e uniformidade da camada nitretada adquirida com base nos parâmetros testados. A tabela 2 mostra os parâmetros utilizados para usinagem de todas as amostras.

Tabela 2. Parâmetros utilizados no processo EDM

Parâmetros de Trabalho	Definição
Fenda de trabalho (<i>gap</i>)	1*
Velocidade do servomecanismo	3*
Tempo de erosão	5*
Afastamento periódico ferramenta	3*
Polaridade eletrodo ferramenta	Positiva (+)
Tempo de Pulso (Ton)	100 μ s
Tempo de Pausa (Toff)	1,5*
Tensão	50 Volts
Corrente	40 Ampéres

Fonte: Autor, 2021.

Preparação do fluido dielétrico

O fluido dielétrico utilizado foi uma dissolução de ureia em água deionizada. A ureia utilizada no processo é a mesma que se usa em manipulações farmacológicas e possui cerca de 46% de nitrogênio. Para conseguir água deionizada, foi utilizado um deionizador portátil à base de resina. Esse equipamento recebe água potável e deioniza a mesma, fazendo com que ela perca sua condutividade.

Para a realização da NDE, foi utilizado um total de 30 litros de fluido dielétrico. A concentração da ureia foi feita com base no trabalho de Santos (2015), que mostrou que a concentração de ureia não influenciou na espessura da camada nitretada. Logo a concentração foi definida em função da baixa condutividade elétrica e, portanto, utilizou-se uma concentração de 33,33 gramas de uréia por litro de água deionizada. Sendo assim, para 30 litros de água foi necessário 1 kg de ureia.

Além da ureia, o pó abrasivo conhecido como Carbetto de Silício foi utilizado em diversas concentrações. Os testes foram realizados de cinco em cinco peças e para cada conjunto de cinco unidades, utilizou-se uma concentração de SiC, conforme mostra a tabela 3.

Tabela 3. Concentração de SiC por quantidade de amostras

Qtd de amostras	Concentração de SiC [g/L]
05	0 (sem SiC)
05	10
05	20
05	30
05	40

Fonte: Autor, 2021.

A cada 5 peças usinadas, o fluido dielétrico era substituído para alterar a concentração de SiC. A mesma quantidade de água deionizada e ureia foi utilizada para todas as amostras, variando apenas a concentração do pó abrasivo.

Uma das principais características do fluido dielétrico é não ser condutor de eletricidade para que as descargas elétricas ocorram de maneira controlada. Sendo assim, foi utilizado um condutivímetro portátil que opera na faixa de 0 a 1999 μ S/cm, com incerteza de $\pm 2\%$, para verificar a condutividade do fluido em diversas etapas do processo, mostrado na tabela 4.

Tabela 4. Condutividade ao longo do processo

Etapa	Condutividade [μ S/cm]
Água concessionária	106
Água após passar pelo deionizador	0
Água com ureia diluída	28
Água com ureia e SiC	31
Água com ureia e SiC, após usinagem com eletrodo de cobre e grafite	62

Fonte: Autor, 2021.

A condutividade do fluido foi monitorada em diversos momentos para garantir a performance do processo (Figura 8). O processo de medição foi feito mergulhando a face do aparelho ao fluido dielétrico, com profundidade em torno de 50 milímetros. Após alguns segundos o instrumento imprime o valor da condutividade no leitor digital como visto na figura abaixo, permitindo fazer os registros necessários do experimento.



Figura 8. Realização da medição da condutividade do fluido dielétrico.

Fonte: Autor, 2021.

Para diluir a ureia e misturar o SiC na quantidade exata à água deionizada, foi utilizada uma balança de precisão fabricante Marte, modelo AD4200, com capacidade mínima e máxima de 0,5 a 4210 g e resolução 0,01 grama.

Metalografia

As amostras foram preparadas de acordo com as técnicas metalográficas. Para evitar o desprendimento da ZR e perda excessiva das bordas do material durante o polimento, uma resina epóxi termo-endurecível de boa qualidade foi utilizada para o embutimento. Foi feito o lixamento utilizando lixas de SiC com granulometria conforme sequência: 180, 220, 360, 400, 500, 600, 1200 e 2000 mesh. Em seguida, foi feito o polimento com pasta de diamante e o ataque químico com Nital 3% para a revelação metalográfica das superfícies trabalhadas. As micrografias foram realizadas com o auxílio do microscópio óptico Fortel com sistema de aquisição de imagens Kontrol modelo M713. Uma câmera foi instalada no dispositivo para fazer a captura das imagens que evidenciam as características alcançadas com o experimento. Este procedimento foi utilizado por SANTOS *et al.* (2019) para mensurar as espessuras das camadas nitretadas.

Dureza

Uma amostra de cada um dos cinco conjuntos foi submetida ao ensaio de microdureza Vickers. Elas foram preparadas conforme padrão de preparação metalográfica indicada para o tipo de material ensaiado. O ensaio foi realizado com o auxílio de um microdurômetro Shimadzu modelo HMV-2TE, com microscópio óptico incorporado e software Easy Test HMV-AD. As endentações foram feitas nas faces polidas das amostras de forma a permitir mensurar a dureza da zona refundida e da camada nitretada. A carga do ensaio foi de 10 gf por um período de 20 segundos.

Caracterização de Nitretos por Difração de raio-X (DRX)

Uma máquina de DRX modelo Shimadzu XRD – 7000 X-Ray foi utilizada para fazer a caracterização dos nitretos formatos após o processo de NDE. Uma amostra de cada um dos cinco conjuntos foi ensaiada para possibilitar a análise de eventual alteração em função da variação da concentração de SiC ao fluído dielétrico. Os parâmetros utilizados no processo de DRX foram os mesmos utilizados por Ranieri (2010) e Lima (2018) em seus estudos e estão listados na tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros adotados no ensaio de DRX

PARÂMETRO	ESPECIFICAÇÃO
Radiação	CuK α
Tensão	40 kV
Corrente	30 mA
Tipo de varredura	$\theta - 2\theta$
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
Velocidade de varredura	2°/min

Fonte: Autor, 2021.

Verificação do desempenho da usinagem

Como forma de avaliar o desempenho da EDM, três parâmetros principais foram analisados: a Taxa de Remoção de Material (TRM), a Taxa de Desgaste de Eletrodo (TD) e o Desgaste Volumétrico Relativo (DVR).

Ambos dependem da variação da massa dos eletrodos ferramenta e peça. Por isso, tanto os eletrodos ferramenta e os corpos de prova foram pesados, três vezes cada, antes e depois da usinagem, para possibilitar a avaliação destes parâmetros. Como os eletrodos permanecem mergulhados no fluido dielétrico, foi necessário garantir a secagem dos eletrodos de grafita após a usinagem, já que este material tem características de reter umidade e poderia comprometer os resultados. A secagem foi feita em um forno mufla, com temperatura de 400 °C à uma exposição de 3 horas. Além disso, a cada passe de usinagem, foi necessário fazer a operação de faceamento da superfície desgastada, preparando para o próximo ensaio.

A variação da massa foi calculada através da equação (1).

$$\Delta m = m_i - m_f \quad (1)$$

Onde,

Δm = Variação de massa do eletrodo (g)

m_i = massa inicial (g) → antes da usinagem

m_f = massa final (g) → após usinagem

A TRM representa a quantidade de material perdido pela peça em um determinado tempo durante a usinagem. Ela é expressa em mm³/min e pode ser quantificada através da equação (2).

$$TRM = \Delta m / (\rho \cdot t) \quad (2)$$

Onde:

Dm = Variação da massa da peça, [g];

ρ = massa específica do material, [g/mm³];

t = tempo da usinagem, [min].

A TD representa o volume de material do eletrodo ferramenta perdido durante a usinagem em um determinado tempo e expressa em mm³/min. Para quantificar a TD, a equação (3) foi utilizada.

$$TD = \Delta m / (\delta \cdot t) \quad (3)$$

Onde:

Dm = Variação da massa do eletrodo, [g];

ρ = massa específica do material, [g/mm³];

t = tempo da usinagem, [min].

E, por último, o DVR relaciona o volume de material perdido pelo eletrodo ferramenta em relação ao volume de material removido da peça.

Esse parâmetro é composto pela razão entre TRM e TD, em percentual e a equação que o representa é a (04).

$$DVR = TD/TRM \cdot 100 \quad (4)$$

Quanto menor o DVR, melhor o desempenho operacional. Cada amostra foi submetida à testes de 10 minutos e repetido por cinco vezes nas mesmas configurações de eletrodo ferramenta, parâmetros operacionais e concentração de SiC.

Aspecto Superficial

A rugosidade dos corpos de prova foi medida utilizando um rugosímetro portátil da marca TESA, modelo RUGOSURF 20 com ponta de diamante, representado na figura 9. Para diminuir as chances de erros de medição, foi fabricado um dispositivo de alumínio, que possui uma base para apoio do rugosímetro e uma cavidade de encaixe com a mesma geometria das amostras. Nessa cavidade foi instalado um parafuso que trava as peças para não se movimentarem durante a medição. Foram realizados 5 medições em cada peça e a ponta do rugosímetro foi ligeiramente posicionada ao centro da peça, com comprimento de amostragem cut-off de 2,5 mm.



Figura 9. Rugosímetro utilizado na medição das rugosidades das amostras. **Fonte:** Autor, 2021.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dureza

A tabela 06 apresenta os resultados médios e desvio padrão obtidos da microdureza Vickers nas amostras usinadas com e sem adição de SiC em comparação com a microdureza do metal base.

Tabela 6. Resultados obtidos de microdureza nas amostras usinadas por descargas elétricas com e sem adição de SiC ao fluido dielétrico.

	MATERIAL BASE ABNT 4140	CAMADA NITRETADA				
		CONCENTRAÇÃO DE SiC [g/l]				
		0	10	20	30	40
DUREZA VICKERS (HV)	269 ± 6	373 ± 11	504 ± 22	567 ± 5	446 ± 8	582 ± 24
GANHO DE DUREZA		39%	87%	110%	66%	116%

Fonte: Autor, 2021.

Foram realizadas 03 medições nas camadas nitretadas (intermediárias) e utilizou-se com referência a média das medidas encontradas.

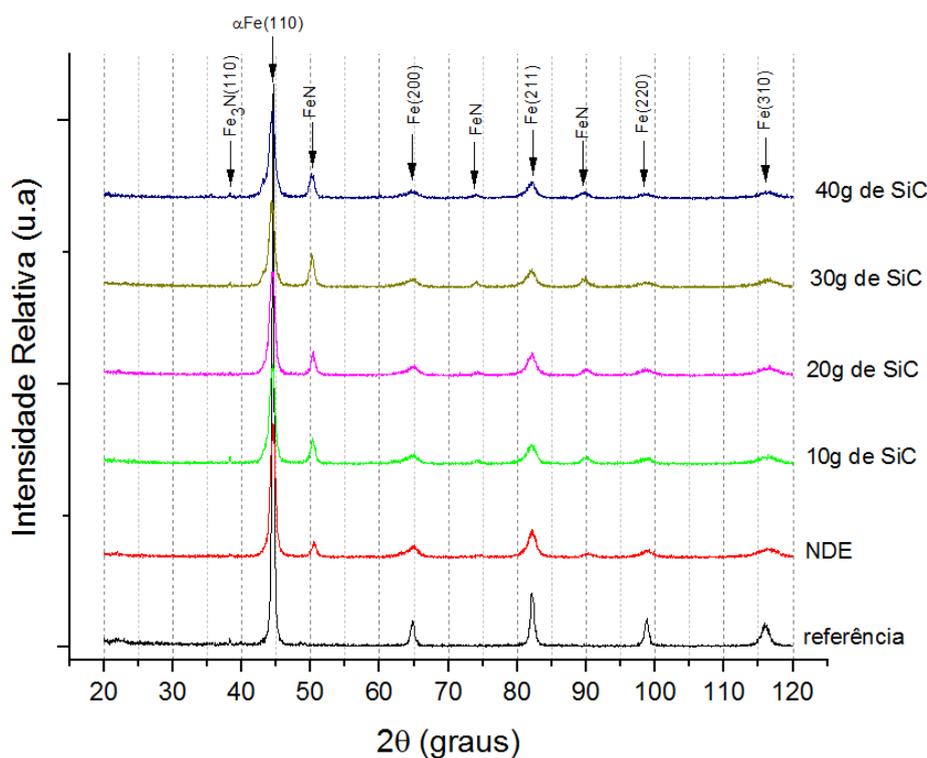
Como pode ser observado, em todas as amostras usinadas por EDM, obteve-se um ganho de dureza na camada superficial quando comparado ao metal-base. O ganho mínimo de dureza foi de 39% ao realizar a NDE sem adição de SiC.

Outro ponto que se deve levar em consideração é que a adição de carreto de silício ao fluido dielétrico, acarretou um ganho ainda maior de dureza na camada superficial. Ao comparar a NDE sem adição e com a adição de 40 g de SiC por litro de fluido dielétrico, percebe-se uma diferença considerável, onde o primeiro apresentou dureza de 373 ± 11 e o segundo uma dureza de 582 ± 24 , aproximadamente 56% a mais. Isso mostra que a adição deste abrasivo ao fluido dielétrico na NDE promove alteração nos resultados obtidos.

Difração de raio-X

Uma amostra de cada grupo foi submetida ao ensaio de difração de raio-x. Os difratogramas podem ser vistos no gráfico 01. Cada uma das curvas representa uma amostra que teve o fluido dielétrico diferente, com adição de SiC em diferentes proporções e também isento deste pó, com apenas água deionizada e ureia.

Gráfico 1. Representação dos difratogramas das superfícies usinadas de todas as amostras



Fonte: Autor, 2021.

É possível identificar os picos de nitretos de ferro FeN formados nas amostras usinadas em comparação com o substrato, o aço AISI 4140.

Os picos de FeN foram maiores nas amostras usinadas com adição de SiC ao fluido dielétrico quando comparados com os picos encontrados na amostra sem adição deste pó. Os picos mais acentuados apareceram nas amostras que foram usinadas com a concentração de 30 gramas de SiC por litro de fluido dielétrico, como pode ser notado no gráfico 01. Isso reforça a influência no processo de NDE provocada pela adição deste pó ao fluido.

Formação das camadas – Metalografia

As figuras de 10 a 12 evidenciam, através de microscopia ótica de seção transversal da superfície usinada, a formação das camadas nitretadas ou camadas intermediárias e as camadas refundidas. A figura 10 a) refere-se à amostra usinada sem adição de SiC e 10 b) com adição de SiC na proporção de 10 gramas por litro de fluido dielétrico. As figuras 11 a) com adição de SiC na proporção de 20 gramas por litro, e 11 b) com adição de SiC na proporção de 30 gramas por litro e, finalmente, a figura 12 na proporção de 40 gramas por litro de fluido dielétrico.

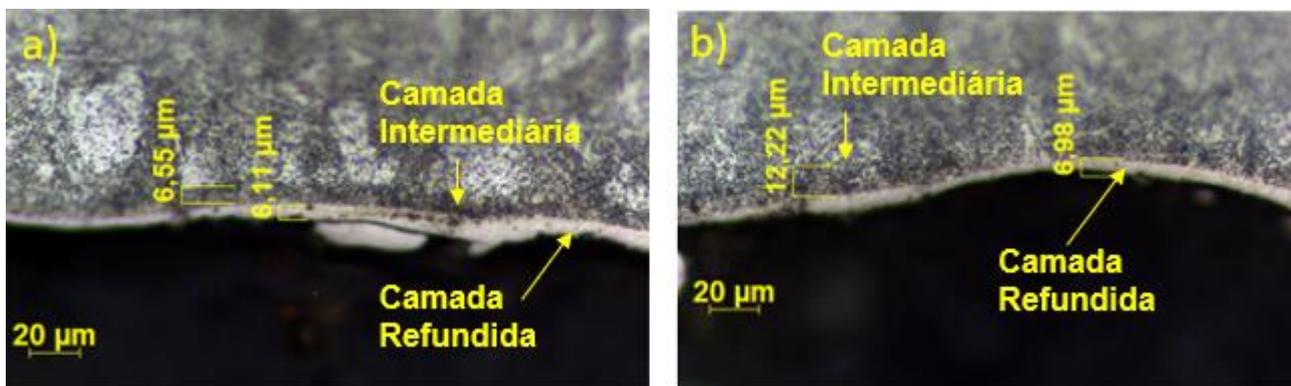


Figura 10. a) Imagens de microscopia ótica da seção transversal da superfície usinada sem adição de carbeto de silício adicionado ao fluido dielétrico; b) Amostra usinada com 10 gramas de carbeto de silício por litro de fluido dielétrico. Camadas refundida e intermediária em destaques. **Fonte:** Autor, 2021.

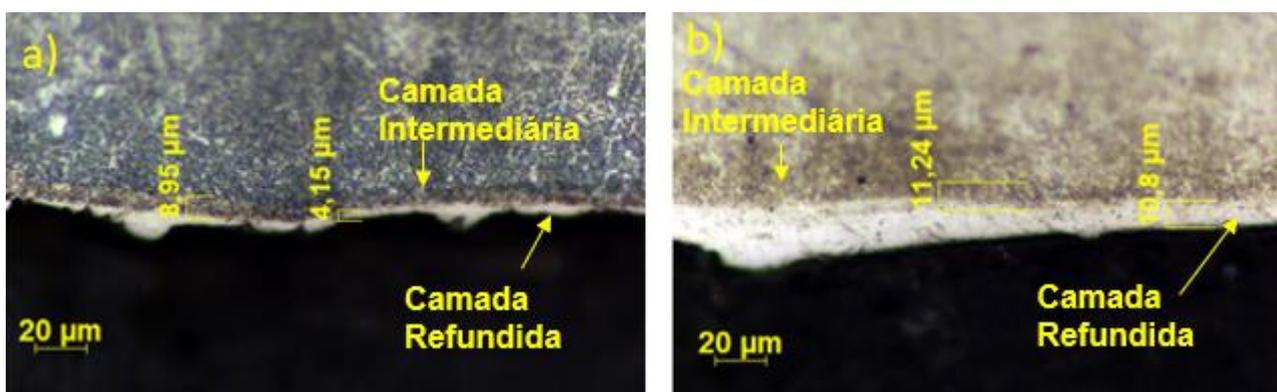


Figura 11. a) amostra usinada com adição de 20 g/L de SiC e b) amostra usinada com adição de 30 g/l de SiC ao fluido dielétrico. Camadas refundida e intermediária em destaques. **Fonte:** Autor, 2021.

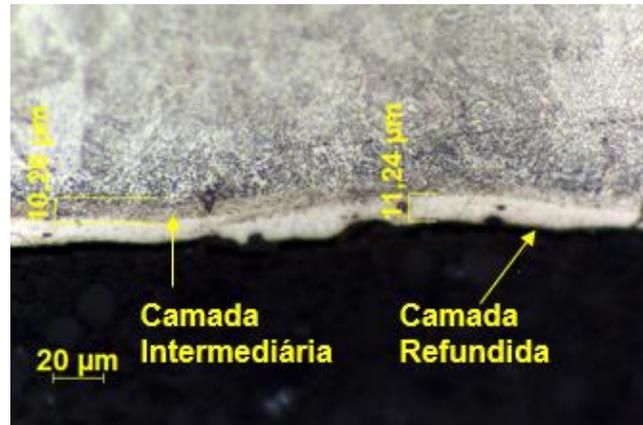


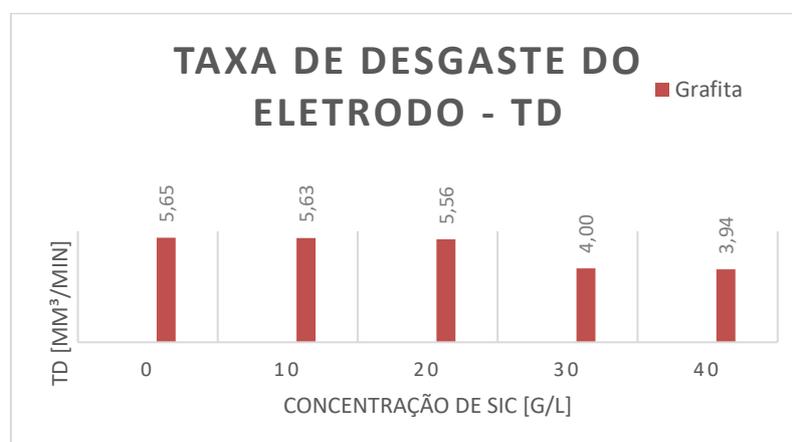
Figura 12. Amostra usinada com adição de 40 g/l de SiC ao fluido dielétrico. Camadas refundida e intermediária em destaques. **Fonte:** Autor, 2021.

Nas imagens acima pode-se observar a formação das camadas nitretadas e camada refundida nas amostras, tanto na usinagem com adição de SiC nas diferentes proporções, como também sem adição deste abrasivo. Foi notado que em todas as amostras as espessuras das camadas intermediárias se mantêm discretamente uniforme ao longo do perfil da peça usinada sem grandes variações. Já as camadas refundidas, observa-se maior variação e formação de flocos na usinagem sem adição de SiC. Ao analisar as imagens das amostras, foi identificado que as espessuras das camadas nitretadas com a adição de pó abrasivo foram, consideravelmente, maiores do que a espessura da camada sem adição deste material ao fluido dielétrico.

Desempenho nas usinagens pelos processos EDM e PMEDM (TD, TRM e DVR)

O gráfico 2 apresenta a taxa de desgaste dos eletrodos-TD de grafita no processo NDE, referente à usinagem realizada com adição de SiC ao fluido dielétrico, com concentrações de 10, 20, 30 e 40 gramas por litro de fluido, comparado com o mesmo processo sem adição de SiC, utilizando apenas água deionizada e ureia como fluido dielétrico.

Gráfico 2. Taxas de desgaste dos eletrodos de grafita pelo processo NDE.

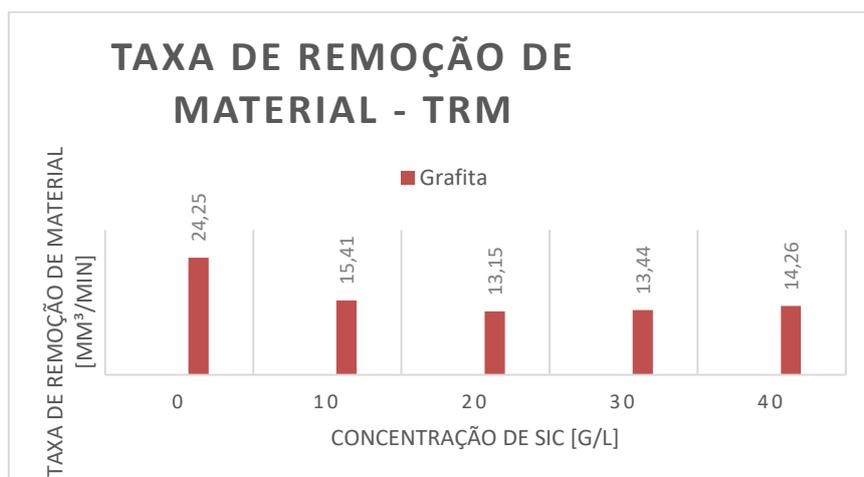


Fonte: Autor, 2021.

Através dos resultados apresentados no gráfico, observa-se que a TD foi menor com a adição de SiC comparado ao mesmo processo sem a adição, ou seja, ao adicionar pó de SiC nota-se menor TD nos eletrodos ferramentas. Nota-se que a TD diminuiu à medida em que se aumentou a concentração de pó ao fluido dielétrico.

O gráfico 3 mostra o resultado da taxa de remoção de material-TRM realizado com adição de SiC em diferentes concentrações ao fluido dielétrico, comparado com o processo sem adição de SiC.

Gráfico 3. Taxas de remoção de material de corpos de prova pelo processo NDE.

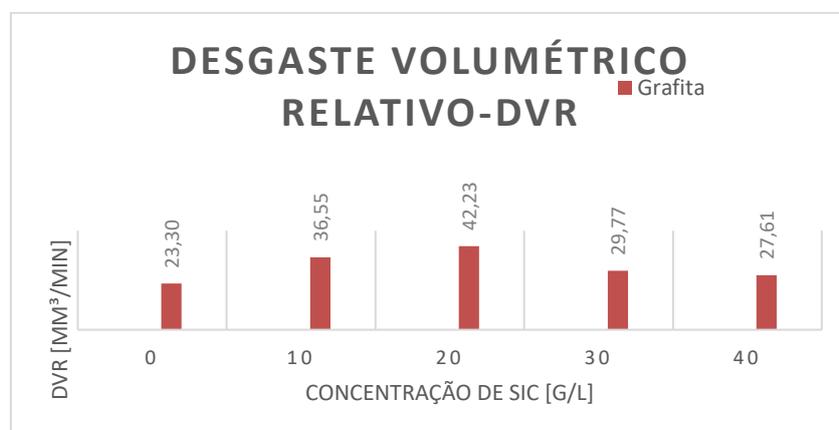


Fonte: Autor, 2021.

A taxa de remoção de material também foi influenciada. Observa-se uma diminuição da taxa de remoção de material do corpo de prova quando se utiliza pós de SiC adicionados ao fluido dielétrico.

O gráfico 4 apresenta o resultado de desgaste volumétrico relativo-DVR no processo NDE com eletrodo de grafita, com e sem adição de SiC ao fluido dielétrico.

Gráfico 4. Desgastes volumétricos relativos



Fonte: Autor, 2021.

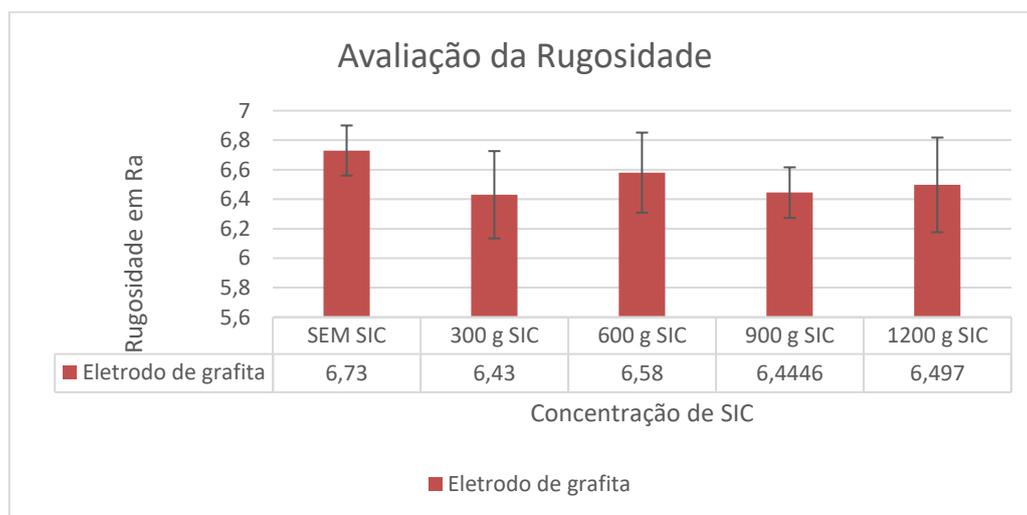
Quanto menor o desgaste volumétrico relativo mais eficiente é o processo, ou seja, no processo por NDE busca-se menor TD e maior TRM.

O DVR, quando utilizado eletrodo de grafita, foi maior em todas as amostras usinadas com adição de pó ao fluido, evidenciando que o material abrasivo adicionado ao fluido teve influência significativa ao processo. Apesar da TD ter sido menor com a adição de SiC, a TRM também diminuiu consideravelmente, fazendo com que o DVR seja superior quando comparado com o processo sem adição do pó.

Análise superficial

No gráfico 5 é possível avaliar os valores médios das rugosidades de todas as amostras testadas nas diferentes configurações de concentração de SiC. Pode-se observar diminuição da rugosidade nas amostras usinadas com adição do pó abrasivo. Em destaque, o menor valor de rugosidade foi evidenciado nas amostras com adição de carbeto de silício ao fluido dielétrico na proporção de 10 gramas por litro. Este resultado vai de encontro com a pesquisa de Chow et al. (2008) que mostrou redução de rugosidade em processo EDM quando adiciona-se pó de SiC, mais tarde mostrado por Nunes (2019) com a realização da nitretação por EDM da liga Ti6Al4V.

Gráfico 5. Média das medições de rugosidade das amostras usinadas nas diferentes proporções de SiC adicionados ao fluido dielétrico.



Fonte: Autor, 2021.

CONCLUSÕES

Frente ao estudo realizado e com base nos resultados obtidos, pode-se concluir os seguintes:

- Foi evidenciada a formação da camada com maior dureza comparada à do metal-base, tanto na usinagem com adição de SiC ao fluido, como também sem adição. Nota-se variação irrelevante nas espessuras das amostras usinadas.
- Através do ensaio de microdureza foi possível verificar que a camada superficial teve um ganho de dureza considerável em relação ao substrato, evidentemente, tal ganho provocado pela formação dos nitretos formados que foram evidenciados no ensaio DRX.
- Quando adicionado SiC ao fluido dielétrico, a TD, TRM e, conseqüentemente, o DVR sofrem alterações, reforçando a interferência o SiC provoca ao processo quando adicionado ao fluido dielétrico.

- Além disso, foi evidenciado a redução na rugosidade das peças quando realizada a usinagem na presença de pó abrasivo, neste caso, o SiC.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais CEFET-MG, pelo apoio técnico/acadêmico e por ceder toda a estrutura para a realização dos experimentos e incentivo à pesquisa e à PUC-MINAS por ceder os laboratórios para a realização de ensaios específicos ao estudo proposto.

REFERÊNCIAS

- CAMARGO, BC; COSTA, LH; RASLAN, AA. **Endurecimento superficial de uma liga Ti6Al4V por meio de usinagem por descargas elétricas.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO – COBEF, 2009, Belo Horizonte, Anais...5, Belo Horizonte: COBEF, 2009.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos.** 7.ed. ampliada e revista. - São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2012. 599p.
- 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.
- CRUZ, C. Há inúmeras maneiras não-tradicionais de usinar materiais: conheça algumas. **Máquinas e Metais,** **27(324),** 80-85, 1993.
- FULLER, JE. Electrical discharge machining. *Metals Handbook - Machining* 16, 9 ed. Terre Haute: Joseph R. Davis, 1989.
- KUMAR, RS, SINGH, TP, SETHI, BL. Surface modification by electrical discharge machining: A review. **Journal of Materials Processing Technology,** **209,** 3675-3687, 2009.
- LIMA, VSE, SANTOS, RNN, SILVA, ER., *et al.*, **Nitretação por descargas elétricas do aço AISI 4340.** In: CONEM – X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Salvador, Bahia, Brasil, 20-24 mai. 2018.
- McGEOUGH, JA., 1988. **Advanced Methods of Machining.** Chapman and Hall, London, pp. 128-152.
- NUNES, RNS. Nitretação por descargas elétricas da liga Ti-6Al-4V com adição de pó abrasivo SiC em fluido dielétrico. **Matéria (Rio J.)** **24 (3)** • 2019
- OLIVEIRA, AR, Scharf, D, Silva, LB, Santos, RF, Silva, ER, Raslan, AA. **Enriquecimento Superficial de Ligas de Titânio para Implantes Odontológicos com Cálcio e Fósforo pelo Processo de Descargas Elétricas.** VIII Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Salvador, 2015.
- PANDEY A; SINGH S. Current research trends in variants of Electrical Discharge Machining: A review. **International Journal of Engineering Science and Technology,** **2-6.** 2172-2191. 2010.
- RASLAN, AA, SANTOS, RF, SILVA, ER, ARANTES, LJ. (2012). **Método de Modificação Superficial de Implantes de Biomateriais Utilizando Descargas Elétricas.** Patente BR 10 2012 0305232
- RODRIGUES, JRP. **Efeito da adição de carboneto de silício em pó na geração de microtrincas e na topografia da superfície usinada por descargas elétricas do aço-rápido ABNT M2.** 1999. 47f. Dissertação do Mestrado – UFU – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.
- SANTOS, RF. **Nitretação por EDM do Aço AISI 4140.** Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica/UFU, Uberlândia. 2013.
- STEVENS, L. **Improvement of Surface Quality in Die-Sinking EDM.** Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica/Katholieke Universiteit Leuven, Leuven. 1998.
- SILVA, ER. **Otimização e Avaliação dos Parâmetros de Influência do Processo AJEDM.** Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica/UFU, Uberlândia. 2012.
- SILVA, ER; SANTOS, RF; SOUZA, LBF; RASLAN, AA. **Comparação de desempenho entre os pós-abrasivos de carbeto de silício (SiC) e alumina (Al₂O₃) no processo híbrido AJEDM.** In: Simpósio do programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica – 20º POSMEC, 2012, Uberlândia, 2015.
- SUN, T; BELL, T. **Plasma Surface Engineering of Low Alloy Steel.** **Materials Science and Engineering.** **140,** 419-434. 1991.
- YAN, BH; TSAI, HC; HUANG, FY. 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.** **45,** 2005, 194-200.

