

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

Cristiano Elias

**NITRETAÇÃO POR DESCARGAS ELÉTRICAS NO AÇO ABNT 4340 COM PÓ DE
CARBETO DE SILÍCIO ADICIONADO AO FLUÍDO DIELÉTRICO**

**Belo Horizonte
Fevereiro de 2020**

Cristiano Elias

**NITRETAÇÃO POR DESCARGAS ELÉTRICAS NO AÇO ABNT 4340 COM PÓ DE
CARBETO DE SILÍCIO ADICIONADO AO FLUÍDO DIELÉTRICO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva

Belo Horizonte
Fevereiro de 2020

E42n Elias, Cristiano.
Nitretação por descargas elétricas no aço ABNT 4340 com pó de carbeto de silício adicionado ao fluido dielétrico / Cristiano Elias. – 2019.
76 f. : il.

Orientador: Ernane Rodrigues da Silva

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2019.
Bibliografia.

1. Usinagem por eletroerosão. 2. Nitretação. 3. Aço. I. Silva, Ernane Rodrigues da. II. Título.

CDD: 671.35



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
“NITRETAÇÃO POR DESCARGAS ELÉTRICAS NO AÇO
AISI 4340”

Autor: Cristiano Elias

Orientador: Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Leonardo Neves
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Carlos Eduardo dos Santos
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG)

Belo Horizonte, 23 de Agosto de 2019.

**Aos meus irmãos, filhos e
esposa.
Que este trabalho possa
inspirá-los em muitas
conquistas.**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre ter me guiado e ter sido sempre muito generoso em todos os momentos da minha vida, fazendo com que eu cresça profissionalmente e como pessoa sempre.

Ao professor Dr. Ernane Rodrigues da Silva, meu orientador, por todo apoio, incentivo e disponibilidade durante todo o trabalho, bem como pela confiança depositada, um grande professor que levo como referencia de profissional.

A minha esposa Denise, pela compreensão, apoio e incentivo em seguir em frente neste trabalho.

Peço desculpas aos meus filhos pelos momentos em que tive que ausentar para me dedicar a este trabalho, estudando, pesquisando e desenvolvendo, deixo este trabalho como um exemplo de incentivo para elas no futuro.

Agradeço aos meus irmãos Luciano sempre presente nesta conquista e ao Tulio que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Não posso deixar de agradecer a você mãe, que mesmo ausente fisicamente, sempre estive ao meu lado e em minhas lembranças, tenho certeza que deve estar extremamente feliz por eu ter conseguido concluir este trabalho.

Enfim, agradeço a todos que, embora não citados, colaboraram direta ou indiretamente para a construção desse trabalho, torcendo por esta conquista.

RESUMO

Desde o início da década de 2010, o processo de nitretação por descargas elétricas vem se destacando como uma alternativa de baixo custo, por promover a junção dos processos de usinagem por descargas elétricas e o tratamento superficial de nitretação, simultaneamente, por meio de um único equipamento, a máquina de eletroerosão. Este trabalho objetivou avaliar no processo de nitretação por descargas elétricas a interferência da utilização de carbeto de silício adicionado ao fluido dielétrico em uma solução aquosa de água deionizada com uréia. Assim como a uréia é utilizada como fonte de nitrogênio necessária para o tratamento termoquímico de nitretação o carboneto de silício é uma fonte de silício e carbono, buscando assim uma maior dureza da superfície nitretada e uma superfície mais polida com rugosidade mais baixa. A preparação das amostras de aço ABNT 4340 e dos eletrodos ferramenta de cobre eletrolítico e grafita foram realizadas em torno convencional. Os testes foram realizados em uma máquina de usinagem por descargas elétrica por penetração, com algumas adaptações de trabalhos anteriores, como por exemplo, a cuba de aço inox, onde foi realizada a usinagem das amostras imersas ao fluido dielétrico com adição de carbeto de silício. Os parâmetros de usinagem foram definidos direto no painel da máquina, utilizando o indicador chamado erosímetro como referencia para otimizar o máximo o potencial da usinagem entre eletrodo ferramenta e peça. Observou-se uma tendência de melhora nos resultados de alguns parâmetros como dureza e profundidade da superfície nitretada, morfologia da superfície usinada, rugosidade e taxas de desgaste e remoção de material, da usinagem realizada com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico e fluido dielétrico com adição de carbeto de silício, se comparado com as usinagens das amostras de aço ABNT 4340 com eletrodo ferramenta de grafita e fluido dielétrico com carbeto de silício.

Palavras-chave: Nitretação; Eletroerosão; Aço ABNT 4340; carbeto de silício em pó

ABSTRACT

Since the beginning of the 2010s, the electrical discharge nitriding process has stood out as a low cost alternative, as it promotes the junction of the electrical discharge machining processes and the nitriding surface treatment, simultaneously, through a single equipment, the EDM machine. This work aimed to evaluate the interference of the use of silicon carbide added to the dielectric fluid in an aqueous solution of deionized water with urea in the nitriding process by electric discharges. Just as urea is used as a necessary nitrogen source for the thermo-chemical nitriding treatment, silicon carbide is a source of silicon and carbon, thus seeking greater hardness of the nitrided surface and a more polished surface with lower roughness. The preparation of AISI 4340 steel samples and electrolytic copper and graphite tool electrodes were performed on conventional lathe. The tests were carried out in an electric penetration machining machine, with some adaptations from previous works, such as the stainless steel vat, where the samples immersed in the dielectric fluid with the addition of silicon carbide were machined. The machining parameters were defined directly on the machine's panel, using the indicator called erosimeter as a reference to optimize the maximum machining potential between tool electrode and workpiece. There was a tendency to improve the results of some parameters such as hardness and depth of the nitrided surface, morphology of the machined surface, roughness and rates of wear and material removal, of the machining performed with electrolytic copper tool electrode and dielectric fluid with addition of silicon carbide, if compared to the machining of AISI 4340 steel samples with graphite tool electrode and dielectric fluid with silicon carbide.

Keywords: Nitriding; EDM; AISI 4340 steel; powdered silicon carbide

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Representação esquemática do processo EDM.....	21
Figura 2 -	Fluxograma das etapas experimentais do desenvolvimento da pesquisa.....	27
Figura 3 -	Eletrodos.....	28
Figura 4 -	Condutividade água deionizada+uréia.....	29
Figura 5 -	Condutividade água deionizada+uréia+carbeto de silício.....	30
Figura 6 -	Suporte de fixação do jato de fluido dielétrico.....	31
Figura 7 -	Imagem do equipamento EDM- 540D.....	38
Figura 8 -	Desenho esquemático do interior da cuba auxiliar com detalhe para a montagem do eletrodo ferramenta e amostra.....	38
Figura 9 -	Imagem do equipamento EDM-540, visualizando a cuba auxiliar.....	40
Figura 10 -	Fixação dos eletrodos.....	40
Figura 11 -	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%.....	41
Figura 12 -	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%.....	42
Figura 13 -	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%.....	42
Figura 14 -	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%.....	43
Figura 15 -	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.....	44

Figura 16 -	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.....	45
Figura 17 -	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..	46
Figura 18 -	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....	46
Figura 19 -	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....	47
Figura 20 -	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.....	48
Figura 21 -	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.....	49
Figura 22 -	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.....	50
Figura 23 -	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.....	51
Figura 24 -	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.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo das propriedades do cobre e do grafita	26
Tabela 2 - Parâmetros operacionais de EDM usados no processo de NDE	30
Tabela 3 - Peso específico	32
Tabela 4 - Parâmetros adotados no ensaio de DRX	33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	= American Iron and Steel Institute – Instituto Americano do Ferro e Aço.
CEFET- MG	= Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
DEMAT	= Departamento de Engenharia de Materiais.
DRX	= Difração de raios X.
DVR	= Desgaste volumétrico relativo.
NDE	= Nitretação por descargas elétricas.
EDM	= Electrical Discharge Machining - Usinagem por Descargas Elétricas.
IUPAC	= União Internacional de Química Pura e Aplicada.
MEV	= Microscopia Eletrônica de Varredura.
TDE	= Taxa de desgaste do eletrodo ferramenta
TRM	= Taxa de Remoção de Material.
UFU	= Universidade Federal de Uberlândia.
ZAC	= Zona afetada pelo calor.
ZR	= Zona refundida.

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$	= Graus Celsius
λ	= Comprimento de onda
$^{\circ}$	= Graus
h	= Constante de Planck
u	= Frequência
e^{-}	= Elétron
I_{sc}	= Corrente perdida
θ	= Ângulo de contato
γ_{sv}	= Tensão superficial sólido-vapor
γ_{sl}	= Tensão superficial sólido-líquido
γ_{lv}	= Tensão superficial líquido-vapor
W_{ad}	= Trabalho de adesão
s	= Segundo.
Si	= Silício.
Ti	= Titânio.
TiN	= Nitreto de titânio.
V	= Vanádio.
v	= Velocidade.
V	= Volume.
w	= Watt.
μm	= Micrometro.
μs	= Micro segundos.
$\mu\text{S/cm}$	= MicroSiemens por centímetro.
δ	= Peso específico.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	166
1.1 Justificativa	19
2. OBJETIVOS.....	199
2.1 Objetivos Específicos.....	199
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1 Tratamento térmicos de nitretação	20
3.2. Usinagem por descargas elétricas – EDM (Electrical discharge machining) ..	22
3.3. Fundamentos do processo de eletroerosão.....	233
3.3.1. Parâmetros influentes no processo de eletroerosão	244
3.4. Nitretação com descargas elétricas (NDE)	288
3.5. Fluido dielétrico.....	30
3.6. Solução aquosa - Uréia como fonte de Nitrogenio.....	31
3.7. Fluido dielétrico com adição de pó de carbeto de silício na água deionizada	32
3.8. Material para eletrodo ferramenta.....	33
3.9. Textura e integridade de superfícies usinadas por EDM	34
3.10. Camada Refundida e Zona afetada pelo calor (ZAC).....	37
4. METODOLOGIA	38
4.1. Materiais e preparo do corpo de prova	39
4.2. Eletrodos ferramenta	40
4.3. Fluido dielétrico (água deionizada e uréia).....	40
4.4. Fluido dielétrico com carbeto de silicio	41
4.5. Parâmetros operacionais de EDM usados no processo de nitretação por descargas elétricas	42
4.6. Adaptação do direcionamento do jato de limpeza na cuba de aço Inoxidável.	43
4.7. Avaliação do desempenho do processo EDM	44
4.8. Rugosidade da superfície usinada.....	46
4.9. Caracterização por microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	47
4.10. Caracterização por difração de raio X.....	47
4.11. Dureza	48
4.12. Metalografia	48
4.13 Equipamento de usinagem.	48

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
5.1. Formação da camada refundida e camada intermediária.....	52
5.2. Microdureza.....	54
5.3. Difração de Raio X.....	55
5.4. Rugosidade.....	59
5.5. Microscopia Eletrônica de Varredura.....	61
5.6. Desempenho do processo de nitretação por descargas elétricas.....	62
5.6.1 Taxa de remoção de material (TRM).....	63
5.6.2 Taxa de desgaste (TD).....	65
5.6.3 Desgaste volumétrico relativo (DVR)	67
6. CONCLUSÕES	69
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71

1. 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 dessa 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 superfície da peça. O processo de nitretação por descargas elétricas alia o tratamento térmico de nitretação ao processo de usinagem, otimizando o tempo do processo e com uma tendência de custo menor 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, tornou 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 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 entre duas placas condutoras de eletricidade, chamadas de eletrodo e peça, as quais são separadas por uma pequena distância (de 0,012 a 0,050 mm). Ao iniciar o ciclo de erosão, na

pequena região de descarga elétrica, a potência desprendida por unidade de área pode chegar até 1.000 W/m^2 e a temperatura até 12000°C , segundo Camargo et al.; (2006).

No processo de nitretação por descargas elétricas, para garantir a presença do nitrogênio, utiliza-se ureia diluída em água deionizada essa mistura 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. Investigações realizadas por Kobayashi (1995) confirma que a adição de pó de silício ao fluido dielétrico no processo EDM aumenta o desempenho na usinagem, reduzindo a camada superficial afetada pelo calor e também reduzindo a rugosidade na superfície usinada. Com base nesta investigação de Kobayashi (1995) acredita-se que a adição de carbeto de silício no fluido dielétrico torne também o campo elétrico mais uniforme, permitindo assim que as descargas elétricas sejam melhor distribuídas ao longo da região usinada, com isso o resultado é uma remoção mais uniforme reduzindo a quantidade de microtrincas e imperfeições da superfície usinada.

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* entre o eletrodo ferramenta e a peça. Como resultado, o processo torna-se mais estável, melhorando a taxa de remoção de material e o acabamento superficial.

1.1. justificativa

Durante as pesquisas e testes com nitretação por descargas elétricas (SANTOS,2013); (RASLAN,2015), foram levantados vários questionamentos em relação a qualidade da superfície nitretada pelo processo de EDM em diferentes tipos de aços, como por exemplo imperfeições, rugosidade e microtrincas. De acordo com Kobayashi (1995) com a adição de carbeto de silício a superfície nitretada torna-se mais polida, com uma rugosidade menor que no processo sem adição de carbeto de silício, e ainda com uma redução de microtrincas e imperfeições na superfície da peça usinada.

2. OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa foi avaliar a superfície das amostras de aço ABNT 4340 após o processo de nitretação por descargas elétricas utilizando como fluido dielétrico água deionizada, uréia (concentração 33 gramas por litro) e pó de carbeto de silício - SiC (concentração 16,7 gramas por litro) com a granulometria de 600 mesh.

2.1. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho de usinagem com fluido dielétrico e pó de carbeto de silício, são:

- Indicar a formação da camada refundida e da camada intermediária; com e sem pó de SiC através da microscopia óptica;
- Quantificar a dureza da camada nitretada por meio de ensaios de microdureza das amostras usinadas com e sem pó de SiC;
- Caracterizar, por meio (DRX), os nitretos formados na superfície usinada;
- Medir a rugosidade das superfícies das amostras usinadas após nitretação com e sem a adição do carbeto de silício em pó ao fluido dielétrico;
- Avaliar a presença de microtrincas e imperfeições na superfície da peça usinada via MEV;
- Avaliar o desempenho da usinagem com solução de uréia e acréscimo de pó carbeto de silício relacionando taxa de remoção de material (TRM), taxa de desgaste (TD) e desgaste volumétrico relativo (DVR);

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em peças como engrenagens, deseja-se um núcleo tenaz e uma superfície resistente ao desgaste. Para essa aplicação, aços com baixo teor de carbono são submetidos ao tratamento termoquímico de cementação, que eleva o teor de carbono na superfície, aumentando sua resistência ao desgaste, ao mesmo tempo que preserva a tenacidade do núcleo, mantido com baixo teor de carbono.

Os tratamentos termoquímicos têm por objetivo alterar as propriedades superficiais do aço. Em geral materiais extremamente duros têm elevada resistência ao desgaste, porém baixa tenacidade/resistência ao impacto. Por outro lado, materiais menos duros, embora mais tenazes, em geral não apresentam boa resistência ao desgaste (CHIAVERINI, 2008).

3.1. Tratamento Termoquímicos de Nitretação

A nitretação é um tratamento de endurecimento superficial em que se introduz superficialmente no aço, até uma certa profundidade, nitrogênio, sob a ação de um ambiente nitrogenoso, a uma determinada temperatura. Este processo é realizado com finalidade de aumentar a dureza, redução do coeficiente de atrito e aumento da resistência à fadiga, corrosão e ao desgaste (CHIAVERINI, 2008). O processo de nitretação ocorre por difusão de átomos de nitrogênio no interior do retículo cristalino de ligas metálicas.

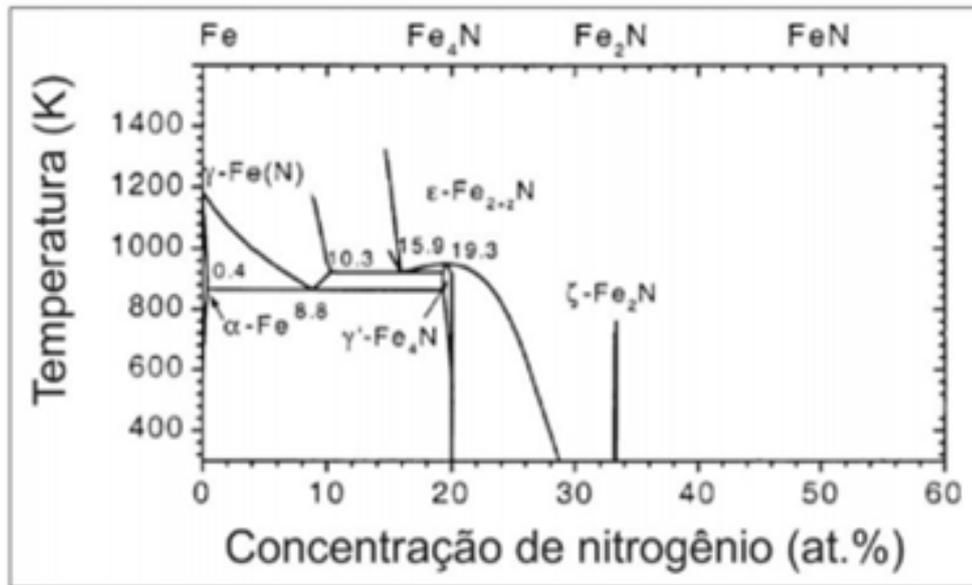
Em ligas ferrosas é esperada a difusão intersticial do nitrogênio, visto que os átomos de nitrogênio ($r = 75 \text{ pm}$) são menores que os átomos de ferro ($r = 126 \text{ pm}$), permitindo o encaixe nas posições intersticiais. Entretanto o nitrogênio não seria tão pequeno a ponto de ocupar diversas posições intersticiais, o que acarreta a formação de nitretos de ferro quando o limite de solubilidade é ultrapassado.

Forma-se um sistema semelhante ao ferro carbono em certos aspectos (ZAGONEL, 2006). Além disso, elementos de liga podem interferir no processo de difusão do nitrogênio. Os processos de nitretação, normalmente, ocorrem na faixa de temperatura de 500 a 590°C, portanto qualquer mudança de fase estaria relacionada

à precipitação de nitretos ou carbonitretos, dependendo da presença de carbono na liga ou do meio nitretante (Nicésio, 2017).

A Figura 1 apresenta o diagrama de fases ferro-nitrogênio.

Figura 1 – Diagrama de fases Fe-N



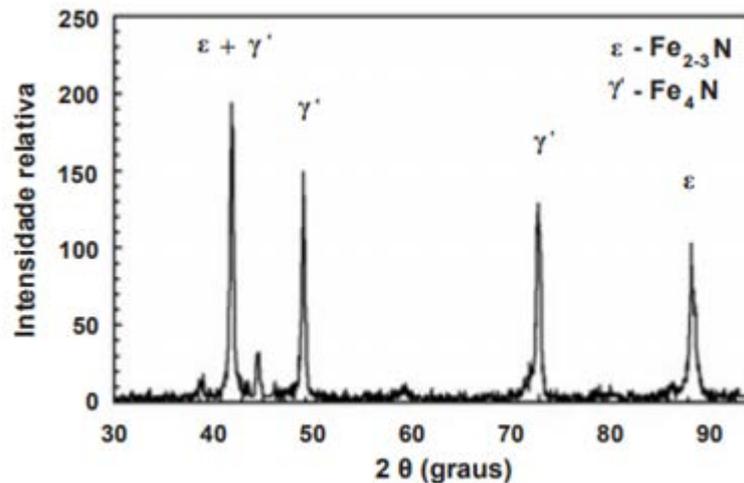
Fonte: ZAGONEL, 2006

O primeiro nitreto a se formar é denominado de γ' , de estequiometria Fe₄N, cúbico de face centrada e com composição de nitrogênio próxima de 5,9% em massa. Caso o teor de nitrogênio exceda o valor de 6,1% em massa, ocorre a precipitação simultânea do nitreto ϵ , de estequiometria Fe₂₋₃N, com estrutura cristalina hexagonal compacta. Para teores de nitrogênio acima de 8%, o único nitreto presente será o tipo ϵ .

A precipitação desses nitretos ocorre de duas formas: na formação da camada de compostos, que se situa na superfície mais externa do material e na zona de difusão (SANTOS, 2013).

A Figura 2 apresenta o difratograma de raios X com os picos típicos dos nitretos.

Figura 2 – Difratograma de raio X



Fonte: MELLO, 2010

Para Zambon et al.; (2010) a fase “ε” é desejada para aplicações que requerem resistência ao desgaste e à fadiga sem choque. A fase γ' tem maior tenacidade, porém menor dureza e menor resistência ao desgaste e é aplicada em trabalhos com choque ou cargas severas.

3.2. Usinagem por descargas elétricas – EDM (*Electrical discharge machining*)

A eletroerosão por penetração é um processo de usinagem amplamente utilizado na fabricação de cavidades para moldes e matrizes, na usinagem de sistemas mecânicos e microeletrônicos, e em aços ferramenta tratados (LEE, HSU e TAI, 2004; CHE HARON et al.; 2008; AMORIM, 2002). Sua capacidade de realizar formatos complexos e usinar materiais de alta dureza a torna uma excelente opção para estes campos (LEE e TAI, 2003). Embora em princípio não seja um processo caro, as pequenas taxas de remoção, em comparação com os chamados processos convencionais de usinagem, tornam o custo dos componentes produzidos elevado. Um aumento da corrente pode causar danos térmicos como fissuras e modificações metalúrgicas que podem prejudicar a utilização dos componentes usinados. O problema pode ser minimizado pela utilização correta de parâmetros de entrada, como corrente e tempo

de onda ligado, que levem a menores danos ao material da peça e sejam economicamente viáveis.

O processo de usinagem por eletroerosão se estabeleceu como uma alternativa para a usinagem de materiais de difícil usinabilidade e geometrias complexas. O desenvolvimento do processo, especialmente em termos de taxas de remoção, fez com que se estabelecesse como processo competitivo, extendendo suas aplicações (HO e NEWMAN, 2003).

3.3. Fundamentos do processo de eletroerosão

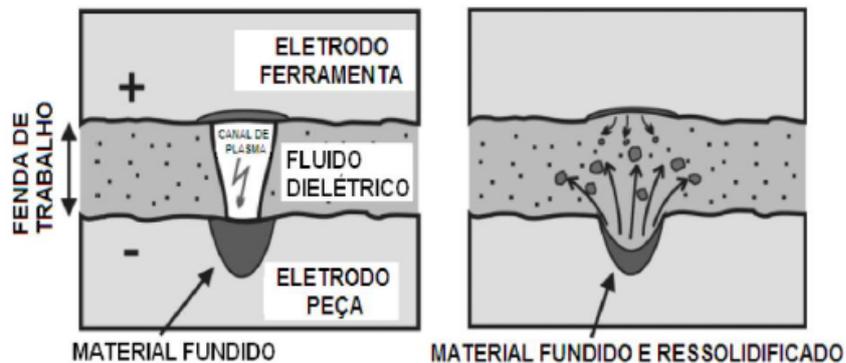
O processo de eletroerosão consiste basicamente da aproximação de um eletrodo ferramenta (conhecido normalmente apenas como eletrodo) e um eletrodo peça com polaridades diferentes, embora seja possível e menos interessante a utilização de corrente alternada. Entre os dois eletrodos normalmente se usa um fluido dielétrico, que pode ser água deionizada, um óleo mineral ou querosene. Quando se atinge certa distância entre eletrodo e peça, denominada *gap*, que normalmente varia entre 5 e 100 μm (SIMAO et al.; 2003), um processo de formação de uma faísca elétrica ocorre (WEINGAERTNER, 1999; GUITRAU, 1997; BENEDICT, 1987).

Em nível micrométrico, a sequência do processo de usinagem pode ser explicada através de quatro fases (AMORIM, 2002):

1. Fase de ignição da faísca.
2. Formação do canal de plasma.
3. Fusão e evaporação de parcelas do material de peça e eletrodo.
4. Ejeção do material fundido.

A energia térmica gera um canal de plasma entre o catodo e anodo com temperaturas entre 12.000°C e 20.000°C, iniciando o aquecimento e a fusão na superfície de cada pólo conforme Figura 3 (BLEYS et al.; 2006).

Figura 3 - Representação esquemática do processo EDM.



Fonte: BLEYS et al., 2006.

Segundo Camargo et al., (2006) no processo EDM ocorre a formação da camada branca, ou zona refundida (ZR), devido ao resfriamento do material fundido que se deposita na superfície da cratera após uma descarga. Também abaixo dela tem-se a zona afetada pelo calor (ZAC) que é parcialmente afetada pelas altas temperaturas do processo.

3.3.1 Parâmetros influentes no processo de eletroerosão

Durante a execução do processo, existem diversos parâmetros de entrada que influenciam o resultado do trabalho (RAMASAWMY e BLUNT, 2004; FENGGOU e DAYONG, 2003),

- ✓ Polaridade.
- ✓ Corrente nominal utilizada.
- ✓ Tempo de onda ligado (T_{on}).
- ✓ Tempo de onda desligado (T_{off}).

As combinações corretas dos parâmetros garantem qualidade do processo e melhor desempenho. Dentre os principais parâmetros pode-se destacar:

a) Polaridade: segundo Guitrau (1997), embora a usinagem por EDM possa ser realizada com corrente alternada, essa não é uma boa opção principalmente pelo desgaste excessivo. Em EDM por penetração, a polaridade do eletrodo ferramenta é normalmente positiva, o que reduz o desgaste do eletrodo.

b) Corrente (i): segundo Kumar et al.; (2009) a corrente de trabalho é um dos parâmetros mais importantes em EDM, isso porque ela está diretamente ligada à produtividade do processo. Correntes mais altas são empregadas em operações de desbaste e em situações de maiores TMR, mas ao custo de prejudicar o acabamento superficial.

c) Tempo de onda ligado (T_{on}): é a duração do tempo de onda medida em microsegundos. Durante esse período de tempo a corrente é transmitida através do eletrodo em direção à peça dentro de um pequeno intervalo de centelhamento. Em EDM a erosão ocorre na forma de fusão e vaporização do material, a duração de pulso é proporcional ao material fundido e/ou vaporizado e, portanto, a cratera produzida será maior se comparada com o pulso mais curto (MOHAN; RAJADURAI; SATYANARAYANA, 2004).

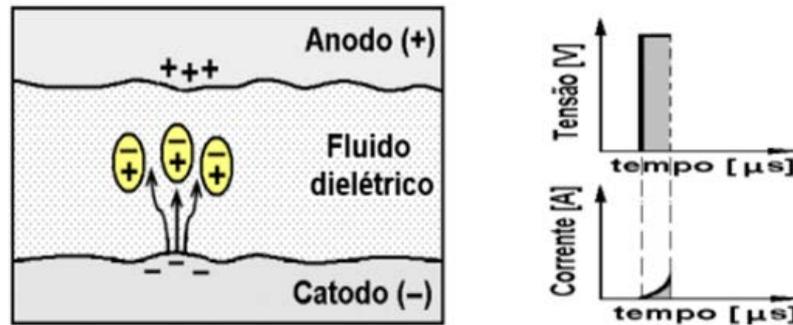
d) Tempo de onda desligado (T_{off}): é o tempo de duração que não ocorre usinagem, sendo o tempo necessário para as micropartículas que foram arrancadas do material pela descarga elétrica, sejam arrastadas para fora da área de contato entre eletrodo e peça, pelo fluido dielétrico (BENEDICT, 1987).

Pesquisas como a de Amorim (2002) descrevem o fenômeno durante a descarga elétrica no processo de EDM. O ciclo do processo EDM compreendido entre o eletrodo ferramenta e o eletrodo peça submersos no fluido dielétrico, acontece em quatro etapas consecutivas:

a) Fase de ignição: nessa etapa o eletrodo ferramenta se aproxima da peça de trabalho (em torno de 0,05 mm e 1 mm). Há uma resistência oferecida pelo fluido dielétrico, e por essa razão, mesmo com tensões altas (variado de 60 a 300 V), não há fluxo de corrente. Na sequência, o eletrodo ferramenta se aproxima da peça até a distância da fenda de trabalho, gerando um aumento do campo elétrico entre as faces dos eletrodos provocado pela aproximação das partes. A partir daí os elétrons acelerados e liberados no catodo colidem com as moléculas do fluido dielétrico conforme representado na Figura 4. Esse mecanismo favorece a liberação de mais

elétrons e íons positivos que estão em direção ao catodo, dando início ao fenômeno de ionização por impacto (AMORIM, 2002).

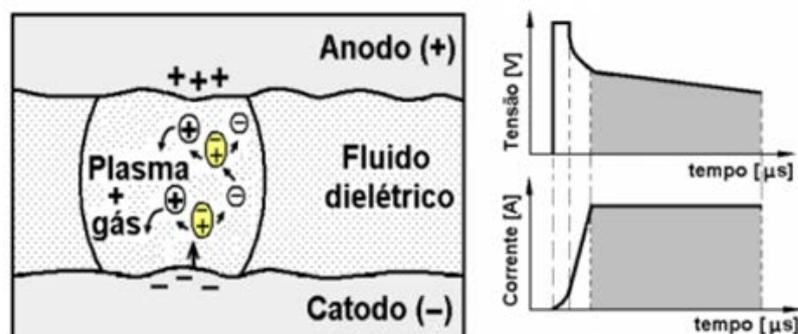
Figura 4 – Representação da fase de ignição da faísca



Fonte: Stevens, 1998

b) Formação do canal de plasma: após início da ionização por impacto, o fenômeno se multiplica em altíssima velocidade e como consequência produz um superaquecimento e vaporização de pequenas porções do dielétrico. Nesse momento, acontece a redução de resistência do dielétrico e aumento da corrente elétrica e observa-se formação e intensificação do que se conhece como túneis transportadores de energia elétrica para o catodo e anodo. Em seguida há formação do canal de plasma, gerado pela queda da tensão e aumento drástico da corrente elétrica, como demonstrado na Figura 5. O nível energético atinge inicialmente 3 J/mm^3 , temperaturas 40.000 K e pressão dinâmica de 3 kbar (AMORIM, 2002).

Figura 5 – Representação da fase de formação do canal de plasma

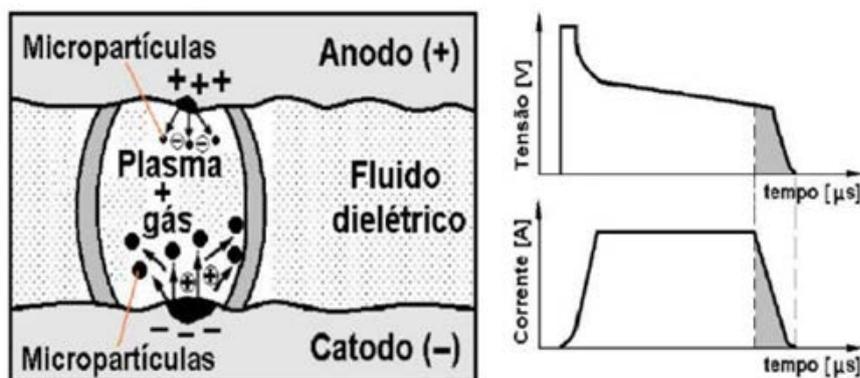


Fonte: Stevens, 1998

c) Fusão e evaporação de pequena porção do material: ainda segundo Amorim (2002), o tempo de conservação do canal de plasma é definido pelo operador (T_{on}) e

ao longo desse tempo, o plasma de alta energia se funde constantemente por conduções térmicas e assim, pequenas porções do material, tanto na peça quanto no eletrodo, se liquefazem. Entretanto, pouca quantidade desse material líquido evapora. Na Figura 6 pode-se observar que no decorrer do tempo da descarga (T_{on}) há o prosseguimento da fusão dos materiais, tanto do eletrodo quanto da peça, e um progressivo aumento do canal de plasma (AMORIM, 2002).

Figura 6 – Representação da fase de fusão e evaporação



Fonte: Stevens, 1998

d) Ejeção do material: Santos (2013), explica que por meio da interrupção da descarga, uma pequena cavidade é formada na superfície da peça e do eletrodo causada pela abrupta queda de pressão que extingue o canal de plasma. Parte do material fundido acaba se resolidificando na cratera e a outra parte é removida pelo fluido dielétrico. As condições de limpeza da peça durante a usinagem influenciam profundamente o processo. Porém, a quantidade de possibilidades geométricas tanto de disposição dos bicos de limpeza e da cavidade executada, pressão e vazão utilizadas e as possibilidades de utilização de limpeza interna ao eletrodo fazem com que o estudo das condições ideais seja tanto de difícil solução e controle, como muito específica a cada caso (SANTOS, 2013).

A utilização de maiores retrações para o eletrodo, seja em termos de tempo ou distância, facilita a limpeza da fenda com jatos direcionados do dielétrico, especialmente em cavidade profundas (RAMASAWMY e BLUNT, 2004; FENGGOU e DAYONG, 2003).

Normalmente, um aumento da frequência promove uma melhoria da qualidade superficial, uma vez que a energia fica dividida em várias parcelas, ocasionando uma remoção mais distribuída pelas faíscas geradas (BENEDICT, 1987).

O material do eletrodo tem importância fundamental no processo, embora teoricamente existam muitas possibilidades para material de eletrodo (a princípio qualquer material condutor elétrico), na prática existe um conjunto reduzido de materiais utilizados como eletrodo com sucesso (GUITRAU, 1997). A composição e a condição do fluido dielétrico também influem na estabilidade do processo, o que na prática significa afirmar que alteram em todo o resultado da usinagem, desde a taxa de remoção de material (ARANTES, 2001) até a rugosidade obtida (LEÃO E PASHBY, 2004).

3.4. Nitretação com descargas Elétricas (NDE)

A energia térmica gerada durante a EDM pode ser aproveitada para enriquecer superfícies metálicas (Raslan 2015). Muitos estudos têm sido conduzidos com o uso de diferentes fluidos dielétricos visando possibilitar o enriquecimento superficial de ligas com nitrogênio, carbono, boro entre outros elementos. Assim, a técnica de enriquecimento com nitrogênio de superfícies metálicas, utilizando descargas elétricas, torna-se atrativa e economicamente viável por ser realizada simultaneamente com a usinagem, Raslan (2015).

Diversos pesquisadores, (SANTOS, 2013); (Raslan 2015); (LIMA, CORRÊA, 2006); têm investigado as modificações superficiais ocorridas em metais quando se utiliza, como fonte de nitrogênio, soluções aquosas de ureia no fluido dielétrico em processos de EDM.

Yan et al.; (2005) investigaram o uso de EDM com solução de ureia para examinar as modificações ocorridas durante usinagem de peças metálicas de titânio puro. Neste trabalho o objetivo era que o nitrogênio decomposto da solução de ureia fosse transferido para os corpos de prova. As análises efetuadas por esses pesquisadores evidenciaram a formação de nitreto de titânio, com modificações superficiais nos corpos de prova, refletidas, principalmente, na melhoria das características de desgaste por deslizamento e atrito, ou seja, uma melhora também na dureza e resistência da superfície.

Camargo et al.; (2006) realizaram a nitretação de liga de titânio, Ti6Al4V, utilizando o processo EDM com solução de ureia como fluido dielétrico e os resultados obtidos mostraram a formação de uma camada nitretada, que permitiu aumento de cerca de 60% na dureza em relação à matriz. Santos (2013) identificou modificações estruturais ocorridas em aço AISI 4140, como aumento de dureza superficial e formação de nitretos de ferro, após submeter amostras ao processo de nitretação por EDM, utilizando solução aquosa de ureia como fluido dielétrico. Nesse trabalho, Santos apresenta um modelo para o processo de nitretação por descargas elétricas, caracterizando a inserção do nitrogênio por implantação iônica e não por difusão. O fenômeno denominado ionização por impacto causa ruptura do dielétrico gerando NH_3 gasosa que, por sua vez, se decompõe em N_2 e H_2 , conforme as equações:



O N_2 e H_2 irão se difundir no canal de plasma na forma de íons, como N_2^+ , N^+ e H_2^+ conforme indicado nas equações (1) e (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. Íons oriundos do eletrodo ferramenta (anodo), cobre e carbono, também podem ser formados (SANTOS, 2013). Santos (2015) avaliou a influência da corrente elétrica no processo de nitretação por descargas elétricas do aço AISI H13, utilizando soluções aquosas de ureia 10gramas/litro, e percebeu que a corrente não influencia significativamente a espessura da ZR quando se utiliza corrente de 10, 20 ou 30 A.

A formação da ZAC foi influenciada pela corrente, sendo obtida maior espessura para esta camada, quando se utilizou corrente de 40 A.

3.5. Fluido dielétrico

De acordo com Fuller (1989), o fluido dielétrico possui três funções conduzir as descargas elétricas, refrigerar, remover materiais estranhos e resíduos de usinagem, realiza essas funções no espaçamento entre o eletrodo ferramenta e eletrodo peça.

A limpeza do *gap* durante o processo de usinagem é a mais relevante dentre as três funções, pois a limpeza evita a deposição de resíduos evitando curto circuito e a redução da taxa de remoção de material.

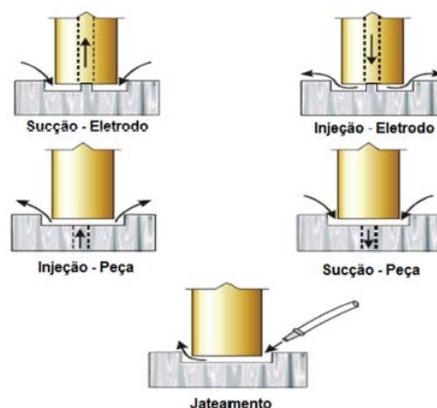
O fluido dielétrico no processo convencional deve apresentar algumas características básicas como: ser do tipo sintético, ter alto ponto de fulgor, possuir capacidade de troca de calor alta, baixa viscosidade e ser de baixa toxicidade e corrosão ENGEMAQ (1996).

A limpeza adequada da região usinada com o arrastamento das partículas solidificadas é muito importante para o desempenho do processo, sendo grande responsável pela presença da camada refundida mais ou menos profunda.

A capacidade de arrefecimento influencia também no desempenho do processo, pois o resfriamento relativamente rápido das partículas fundidas, evita o aumento de material que volta a se solidificar e se integra ao material constitutivo da camada refundida, o que é prejudicial à integridade superficial da peça (ARANTES, 2007).

No processo EDM existem configurações de algumas formas de posicionamento do fluido dielétrico para limpeza da cavidade, esse fluxo do dielétrico pode ser no eletrodo ou na peça, dependendo do tipo de cavidade, conforme Figura 7.

Figura 7 – Configurações de limpeza da cavidade na usinagem EDM



Fonte: ARANTES, 2007

3.6. Solução aquosa - Uréia como fonte de Nitrogenio

A ureia é o principal produto nitrogenado da degradação metabólica das proteínas em todos os mamíferos e alguns peixes. A ureia é encontrada não apenas na urina de todos os mamíferos, mas também no sangue, leite e transpiração. Possui aplicação importante para a agricultura, representando alta concentração de nitrogênio (BRITANNICA ACADEMIC, 2017).

A ureia é um composto orgânico cristalino, de cor branca, sabor amargo, solúvel em água e álcool. É um composto quaternário, constituído por nitrogênio, oxigênio, carbono e hidrogênio. Quimicamente é classificada como amida e, por isso, considerada um composto nitrogenado não proteico (NNP), cuja fórmula química é $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$. Estudos de (SANTOS, 2013) têm sido conduzidos com o uso de diferentes fluidos dielétricos visando possibilitar o enriquecimento superficial de ligas com nitrogênio, carbono, boro entre outros elementos.

A Tabela 1 apresenta a composição química da ureia brasileira.

Tabela 1 - Composição química da ureia encontrada no Brasil

Compostos	Concentração (%)
Nitrogênio	46,4
Biureto	0,55
Água	0,25
Amônio livre	0,008
Cinzas	0,003
Ferro e chumbo	0,003

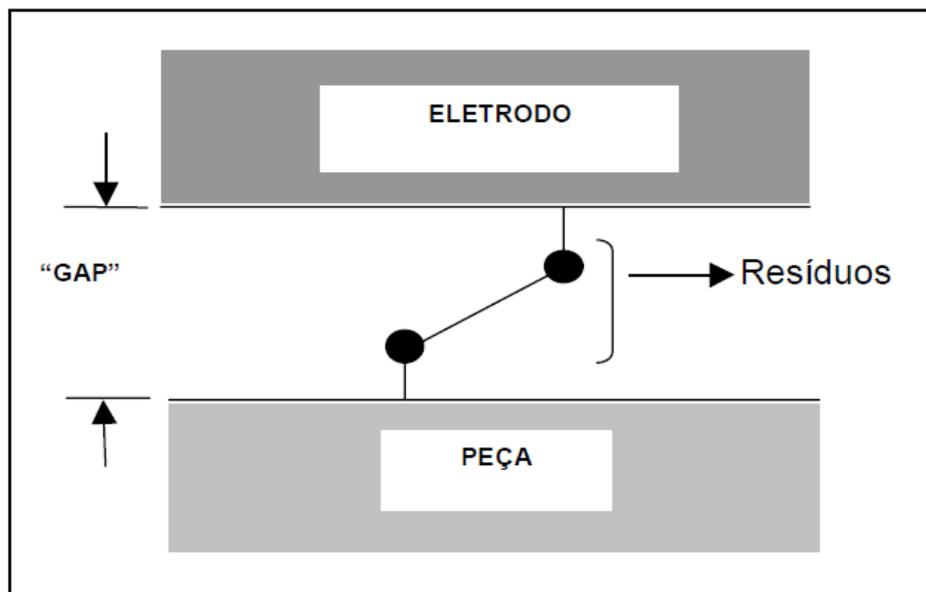
Fonte: Adaptado de GUIMARÃES JR, 2016

Ureia é uma substância que funde a 132,7 ° C (271 ° F) e decompõe-se antes da ebulição.

3.7. Fluido dielétrico com adição de pó de carbetto de silício na água deionizada

Os primeiros passos para a utilização de pó abrasivo em fluido dielétrico, foram dados por Kurafuji e Suda (1965), que ao analisar a influência dos vários fluidos dielétricos, perceberam que o tempo de uso dos mesmos aumenta a Taxa de Remoção de Material (TRM). Esse comportamento foi atribuído ao fato dos resíduos serem formados em uma concentração específica. Além disso, afirmaram que a maior estabilidade no processo foi devido a resistência no “gap” ser consideravelmente menor e de haver um aumento no decorrer do processo. Estas afirmações são justificáveis através da Figura 8, que mostra o efeito de propagação da descarga na presença dos resíduos (fragmentos de usinagem).

Figura 8: Mecanismo de propagação da descarga elétrica



Fonte: Kurafuji e Suda 1965

O nitrogênio usado no processo de nitretação por descargas elétricas é obtido a partir da solução aquosa de ureia empregada como fluido dielétrico no processo EDM, sendo que esta solução aquosa é o composto de água deionizada com adição de uréia. A técnica de enriquecer superfícies com nitretos através de descargas elétricas também foi estudada por Camargo et al.; (2009). Os testes consistiram em usar como fluido dielétrico, solução de água deionizada e ureia (10 g/l) e uma liga Ti6Al4V.

3.8. Material para eletrodo ferramenta

Como no processo de EDM a corrente elétrica é a propulsão necessária para efetuar o corte, materiais de maior condutividade ou menor resistividade, promovem cortes mais eficientes, portanto, materiais que são bons condutores podem ser utilizados na fabricação de eletrodos. Outra análise importante é baseada no ponto de fusão do material. Como EDM é um processo térmico, quanto maior for o ponto de fusão do material do eletrodo, melhor será a relação de desgaste entre a peça de trabalho e o eletrodo (JHA; RAM; RAO, 2011).

A Tabela 2 mostra um comparativo das propriedades do cobre e da grafita.

Tabela 2 - comparativo das propriedades do cobre e do grafita

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

Fonte: Propriedades físicas de eletrodos de cobre e de grafita (CHEHARON et al., 2008).

Analisando a tabela 2 verifica-se que o cobre tem maior condutividade térmica, mas o grafita suporta mais o dano na eletroerosão, devido ao seu alto ponto de sublimação. O tipo de material utilizado tem influência especialmente sobre a taxa de remoção de material e sobre o desgaste do próprio eletrodo (CHE HARON et al.; 2008).

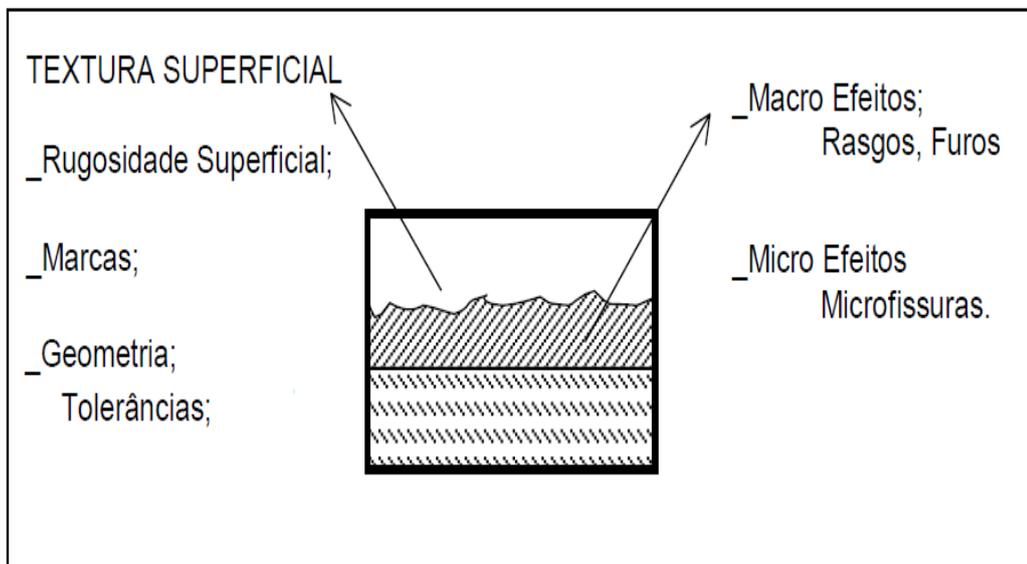
Segundo Amorim (2002), no Brasil e na Europa os eletrodos de cobre eletrolítico que possuem custo de material menor, são mais utilizados, ao passo que nos Estados Unidos o grafite possui maior aplicação.

Para efeito de comparação após usinagem dos corpos de prova, é relevante conhecer algumas propriedades do cobre e da grafita. Ainda segundo Jha, Ram e Rao (2011) muitos materiais têm sido utilizados para a fabricação de eletrodos, tais como: o cobre eletrolítico, grafita, carbonetos de tungstênio, latão, ligas de prata e cobre, cobre-tungstênio. Os metálicos apresentam melhor desempenho em materiais de baixo ponto de fusão como o latão, cobre e alumínio, já a grafita é aplicada em materiais de alta temperatura de fusão como, por exemplo, o aço e suas ligas.

3.9. Textura e integridade de superfícies usinadas por EDM

Segundo Field e Kahles (1982), ao se usinar qualquer peça existem dois importantes aspectos que devem ser definidos e controlados no processo de usinagem por descargas elétricas. O primeiro está relacionado com as irregularidades geométricas da superfície e é denominado textura superficial, e o segundo com as alterações metalúrgicas da superfície e camada subsuperficial, denominado Integridade superficial. A Figura 9 ilustra esses dois aspectos.

Figura 9: Efeitos da tecnologia de superfície (Field e Kahles 1982).



Fonte: (Field e Kahles 1982)

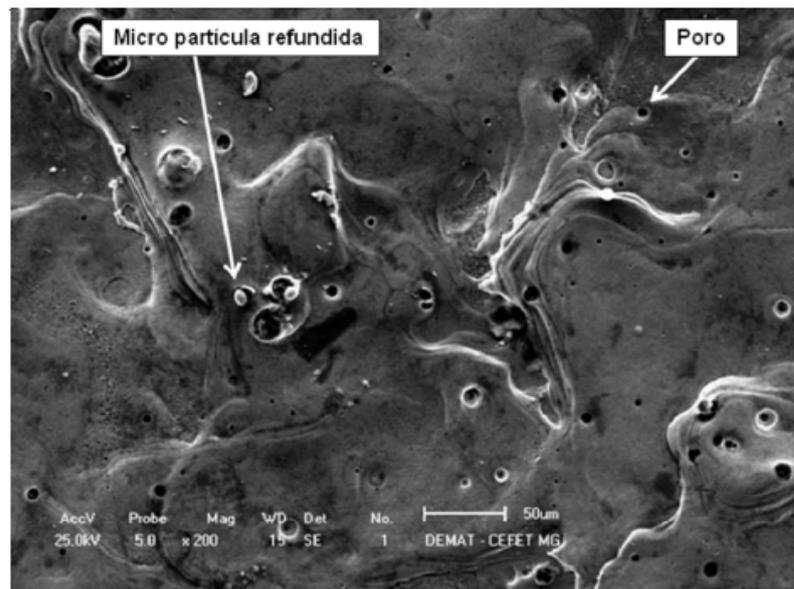
Segundo Kremer et al.; (1997), altas temperaturas são geradas, causando fusão local ou mesmo evaporação do material a usinar. Em cada descarga, uma cratera é formada no material e uma menor cratera é formada no eletrodo.

Segundo Kremer et al.; (1997) de todo material fundido produzido em cada descarga, uma quantidade é removida pelo do fluxo de fluido dielétrico o restante do material fundido solidifica-se formando uma superfície rugosa.

As características da superfície obtida, sobreposição de crateras, glóbulos de impurezas, “chaminés”, bolhas (formadas quando os gases presos são liberados através do material resolidificado), são reveladas por análise via microscopia eletrônica de varredura, nas Figuras 10 e 11, respectivamente.

Ambas apresentam crateras, poros e micro partículas refundidas na superfície. Ou seja, o aspecto típico de superfícies usinadas por EDM.

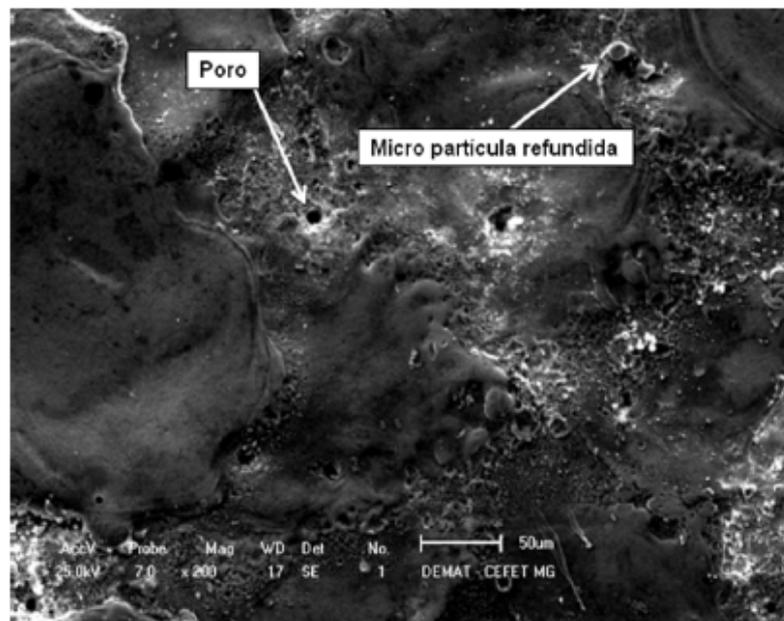
Figura 10 – Imagem de MEV da superfície do aço AISI 4140, usinado por EDM com água deionizada



Fonte: Santos, 2015

A Figura 11 ilustra a superfície de um aço AISI 4140 usinado por EDM (Santos, 2015). Nota-se a presença de material redepositado no centro da cavidade e transbordamento nas bordas.

Figura 11 – Imagem do MEV da superfície de um aço AISI 4140 usinado por EDM



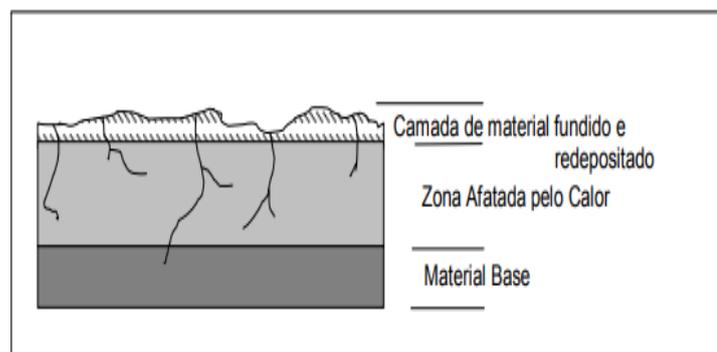
Fonte: Adaptado Santos, 2015

Uma característica importante das superfícies usinadas por EDM, é a abundância de microtrincas superficiais. A formação de microtrincas está associada com o desenvolvimento de altas tensões térmicas que excedem a tensão máxima de resistência do material.

As dimensões das crateras assim como a sua densidade, aumentam com a energia da descarga. Além disso, a profundidade das microtrincas variam com a energia de descarga (Kremer et al.; 1997).

A Figura 12 ilustra as camadas superficiais e subsuperficiais de uma amostra de aço logo após a usinagem por descargas elétricas.

Figura 12: Camadas superficiais e subsuperficiais de uma amostra de aço usinada pelo processo EDM



Fonte: (Field e Kahles 1982)

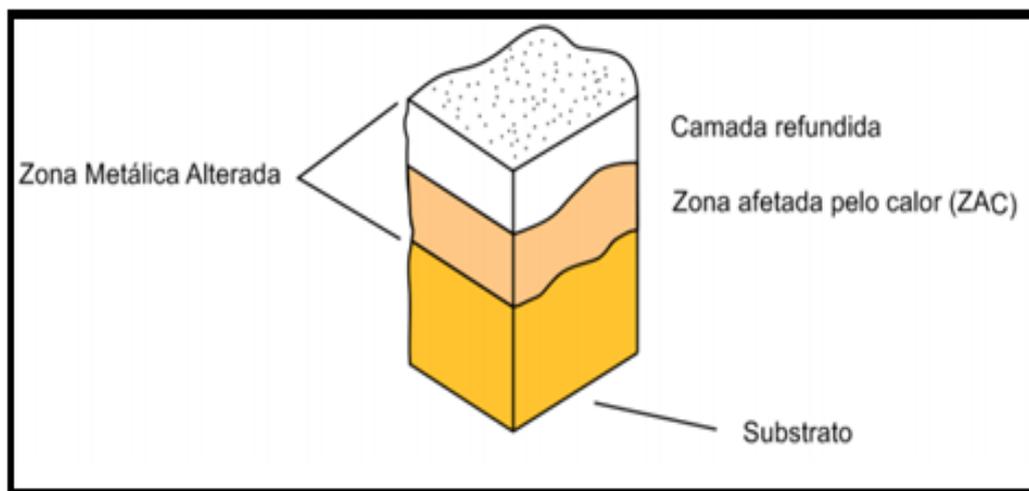
3.10. Camada Refundida e Zona afetada pelo calor (ZAC)

A camada refundida, que pode variar de 1 μm a 25 μm dependendo do parâmetro empregado, é gerada devido às mudanças metalúrgicas. Essa camada reduz significativamente a resistência à fadiga da liga e pode ou não conter microfissuras inerentes ao processo (EL-HOFY, 2005). A profundidade da camada refundida depende da energia e duração do pulso aplicado à máquina.

Na Figura 13 é indicado a camada refundida e logo abaixo há uma região termicamente afetada pelo calor (ZAC) com possíveis alterações na composição química e mudanças de fase, apesar de não ter sofrido fusão.

Essa região, mesmo não tendo contato com o fluido dielétrico, recebe o calor irradiado pelo plasma que possui temperatura suficiente para propiciar as transformações citadas acima por difusão atômica (SANTOS, 2013).

Figura 13: Camadas refundida e zona afetada pelo calor de um aço usinado pelo processo de eletroerosão



Fonte: Kumar et al.; 2009.

4. METODOLOGIA

O trabalho experimental foi realizado nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Amostras de aço ABNT 4340 foram submetidas à nitretação por descargas elétricas (NDE), utilizando-se uma solução aquosa formada por água deionizada e uréia como fluido dielétrico; e acrescentando-se a esse fluido, pó de carbeto de silício de 600 mesh. As etapas do experimento estão descritas no fluxograma da Figura 14.

Figura 14 - Fluxograma das etapas experimentais do desenvolvimento da pesquisa



Fonte: Autor

4.1 Materiais e preparo das amostras

As amostras em aço ABNT 4340 foram torneadas e confeccionados em torno convencional, com dimensões de 13 mm de comprimento e 19 mm de diâmetro. Este padrão de dimensionamento foi respeitado para que os corpos de prova se encaixem no porta amostra fixado na cuba. A Tabela 3 apresenta a composição química da liga. As amostras foram retiradas de uma barra trefilada com certificado de qualidade enviado pelo fornecedor.

Tabela 3: Composição química da liga de aço ABNT 4340

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%	Ni%
0,37-0,43	0,15-0,35	0,60-0,80	<0,025	<0,025	0,70-0,90	0,20-0,30	1,65-2,00

Fonte: Adaptado de proaços, 2019

As amostras foram divididas em grupos: seis delas usinadas utilizando como fluido dielétrico água deionizada e uréia, sendo que em três utilizou-se eletrodo de cobre e outras três com eletrodo de grafita.

Em outro grupo, também composto por seis amostras, foi adicionado ao fluido dielétrico pó de carbeto de silício. Três amostras foram usinadas com eletrodo de cobre e outras três com eletrodo de grafita. A Tabela 4 apresenta a distribuição das amostras nos grupos de experimento.

Tabela 4: Grupos e quantidades de eletrodos ferramenta

Amostras	Eletrodo	Quantidade	Fluido dielétrico
Grupo A	Cobre	3	Uréia em água deionizada
Grupo B	Grafita	3	
Grupo C	Cobre	3	Uréia em água deionizada e pó SiC
Grupo D	Grafita	3	

Fonte: Autor

Com o intuito de facilitar a caracterização e a preparação metalográfica da amostra, algumas amostras foram seccionadas ao meio, no sentido da espessura antes da usinagem pelo processo de NDE.

Santos (2013) verificou que não ocorre influencia do efeito de borda ao nitretar por descargas elétricas peças bipartidas.

4.2 Eletrodos Ferramenta

Como materiais dos eletrodos ferramenta, foram utilizados grafita e cobre eletrolítico ambos cilíndricos, usinados em torno convencional com 22 mm de diâmetro e 30 mm de comprimento.

Sendo 6 eletrodos de cobre eletrolítico e 6 de grafita, distribuídos conforme os grupos de usinagem indicados na Tabela 4. Todos os eletrodos foram pesados antes e após NDE em balança analítica de precisão, com resolução 0,0001 g e linearidade $\pm 0,0003g$.

4.3 Fluido dielétrico (água deionizada e uréia)

No preparo dos fluidos dielétricos foi utilizada água deionizada, obtida a partir da água potável fornecida pela empresa de abastecimento da região metropolitana de Belo Horizonte. Para preparo da solução aquosa a água foi deionizada utilizando um aparelho deionizador portátil a base de resina. Na realização do preparo do fluido dielétrico para a primeira etapa do trabalho, foi utilizado apenas a água deionizada e a uréia farmacológica.

O fluido dielétrico foi preparado com 30 litros de água deionizada. A condutividade da água antes da deionização era de 160 $\mu S/cm$, aproximadamente, após a deionização mediu 0 $\mu S/cm$.

Ureia farmacológica foi diluída na água deionizada para formar a solução aquosa na concentração de 30 gramas por litro, após a adição da uréia a condutividade medida foi de 22 $\mu\text{S}/\text{cm}$ conforme indicado na Figura 15.

Figura 15 - Condutividade água deionizada+Ureia



Fonte: Fotos do autor.

4.4 Fluido dielétrico com Carbeto de Silício

Nesta etapa foi realizado o mesmo procedimento de preparação do fluido dielétrico conforme descrito no item 4.3, porém ao final da preparação do fluido dielétrico com 30 litros de água deionizada, condutividade 22 $\mu\text{S}/\text{cm}$, conforme Figura 15, e com a uréia diluída na proporção de 30 gramas por litro, foi adicionado o carbeto de silício com granulometria de 600 mesh na quantidade de 500 gramas, produzindo a concentração de 16,6 gramas de carbeto de silício por litro de água deionizada com uréia nas proporções descritas, com condutividade de 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$ conforme indicado na Figura 16.

Figura 16 - Condutividade água deionizada+Uréia+Carbeto de Silício



Fonte: Fotos do autor.

4.5 Parâmetros operacionais de EDM usados no processo de nitretação por descargas elétricas

A Tabela 5 apresenta os parâmetros operacionais ajustados na máquina de eletroerosão por penetração que possibilitaram a aplicação do processo de nitretação por descargas elétricas.

Os parâmetros foram ajustados diretamente na máquina possibilitando a regulação dos parâmetros conforme otimização do erosímetro.

O tempo de usinagem foi de 10 minutos, sendo feito em duas réplicas para cada condição de usinagem.

Tabela 5 – Parâmetros operacionais de EDM usados no processo de nitretação por descargas elétricas.

PARÂMETRO	ESPECIFICAÇÃO
Polaridade do eletrodo ferramenta	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 ferramenta	3,0*
Velocidade do servo	3,0*
Tempo de erosão	5,0*

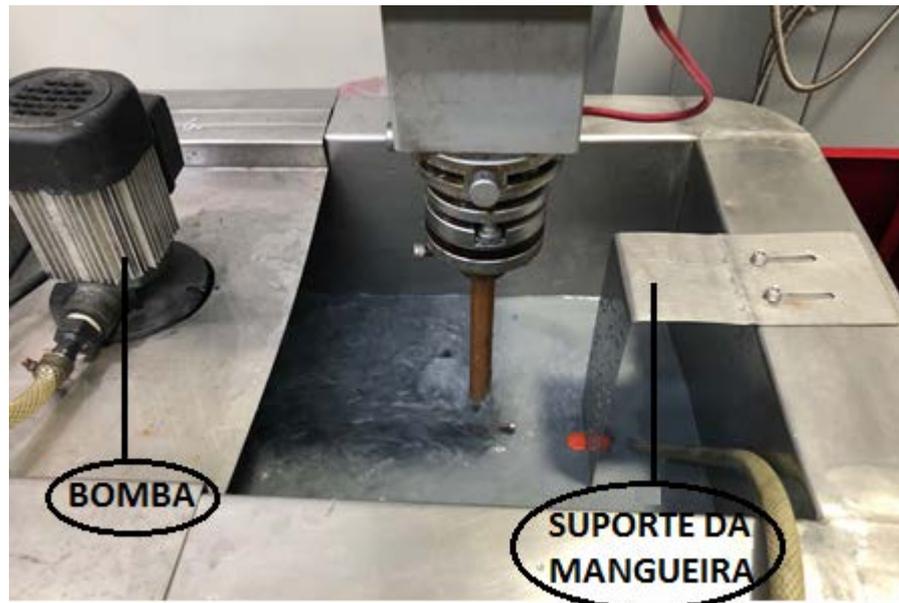
Fonte: Manual do equipamento Estes parâmetros são ajustados, diretamente, no painel de controle da máquina de EDM. .

4.6 Adaptação do direcionamento do jato de limpeza na cuba de aço Inoxidável

Na cuba auxiliar, fabricada em aço inoxidável austenítico, foi realizada a fixação de um suporte para direcionar o jato e circulação do fluxo de dielétrico pela bomba centrífuga, podendo assim, ser ajustado em diferentes posições de direcionamento do fluxo e este suporte metálico proporciona o direcionamento fixo do jato de fluido dielétrico sobre a peça, conforme mostrado na Figura 17.

Durante o processo de usinagem na eletroerosão a penetração, a limpeza da região usinada é muito importante para evitar irregularidades na superfície da peça e dificuldades de usinagem da superfície.

Figura 17 - Suporte de fixação do jato de fluido dieletrico



Fonte: Fotos do autor.

4.7 Avaliação do desempenho do processo EDM

Usando uma balança analítica M-0,0001 g/ BEEngineering, as amostras e os eletrodos foram pesadas antes e após o processo da usinagem por EDM, para calcular a taxa de desgaste do eletrodo (TD) e a taxa de remoção do material da amostra (TRM). Apenas os eletrodos de grafita foram ao forno de aquecimento tipo mufla durante 3 horas a uma temperatura de 400°C para secagem, devido a absorção de água durante o processo de usinagem por eletroerosão (Santos, 2019).

Os cálculos foram efetuados a partir das equações 4, 5. O desempenho da usinagem foi avaliado pelos parâmetros TD e TRM.

A Tabela 6 apresenta os pesos específicos dos materiais adotados, estes valores de pesos específicos foram utilizados nos cálculos das taxas de TRM e TD.

Tabela 6 - Peso específico

Material	Peso específico δ (g/mm³)
Aço ABNT 4340	0,00785
Cobre eletrolítico	0,00892
Grafita	0,00167

Fonte: Chiaverinni, 2008

Foram avaliadas as variações de massa apresentada pelos eletrodos e corpos de prova, segundo a equação.

$$\Delta m = m_i - m_f \quad (3)$$

Onde:

m_i = massa inicial (antes da usinagem);

m_f = massa final (após a usinagem).

Utilizando a equação 4 foi possível calcular a quantidade de material desgastado do eletrodo ferramenta.

$$TD = \frac{\Delta m}{\delta \cdot t} \quad (4)$$

Onde:

Δm = variação de massa do eletrodo ferramenta;

δ = peso específico do material do eletrodo;

t = tempo de usinagem.

A TRM foi determinada pela equação 5, caracterizando a eficiência de remoção de material durante a usinagem.

$$TRM = \frac{\Delta m}{(\delta) \cdot t} \quad (5)$$

Onde:

Δm = variação de massa do corpo de prova;

δ = peso específico do aço ABNT 4340;

t = tempo de usinagem.

O DVR caracteriza o desempenho do processo de EDM, geralmente expresso em porcentagem e calculado pela relação entre TD e TRM, conforme a equação 6.

$$DVR = \frac{TD}{TRM} \cdot 100 \quad (6)$$

4.8 Rugosidade da Superfície usinada

Um aparelho rugosímetro, modelo Rugosurf 20 foi utilizado para determinar as rugosidades das superfícies nitretadas nas diferentes condições de usinagem com fluido dielétrico, com e sem pó de carbetto de silício.

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 cinco vezes e posteriormente os valores encontrados foram registrados para realização de análise destes parâmetros.

4.9 Caracterização por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A morfologia da superfície das amostras da liga de aço ABNT 4340 foi verificada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando o equipamento Hitachi TM 3000. Quatro amostras foram submetidas ao ensaio: duas delas usinadas com eletrodo ferramenta de cobre, sendo uma com adição do pó de SiC e outra sem; e duas com eletrodo ferramenta de grafita, com e sem adição de pó SiC.

4.10 Caracterização por difração de raio X

A difração de raios X (DRX) foi realizada com corpos de prova submetidos a EDM com a solução aquosa de ureia e com corpos de prova usinados com a solução aquosa de uréia e carbeto de silício, individualmente, visando verificar a formação dos nitretos de ferro. O equipamento utilizado foi o difratômetro Shimadzu XRD – 7000 X-“Ray Diffractometer”, existente no laboratório de caracterização do DEMAT/CEFET-MG.

A presença de nitretos foi verificada por difração de raios-x convencional, Bragg-Brentano ou θ - 2θ . A Tabela 7 apresenta os parâmetros de varredura e as especificações técnicas do difratômetro.

Tabela 7 – 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

Fonte: Autor

4.11 Dureza

A avaliação da dureza das camadas ZR e ZAC e também do substrato foi realizada por ensaios de microdureza Vickers (HV) com o auxílio de um microdurômetro Shimadzu modelo HMV-2T E, com microscópio óptico incorporado e software Easy Test HMV-AD para obtenção de imagens capturadas por meio de câmara digital incorporada ao equipamento existente no laboratório de caracterização da PUC-MG.

4.12 Metalografia

Após a usinagem por descargas elétricas, os corpos de prova foram embutidos utilizando resina epóxi termo-endurecível. Em seguida ao embutimento, as amostras foram lixadas manualmente utilizando lixas 100, 180, 220, 360, 400, 500, 600, 1200, e 2000 mesh. Após o procedimento de lixamento foi realizado o polimento com pasta diamante 1 μm e pano metalográfico, sendo lubrificadas durante este processo com álcool para polimento, utilizando politrizes, até que a superfície apresentou aspecto espelhada. Em seguida foram efetuados os ataques químicos com Nital 3%.

4.13 Equipamento de usinagem

A usinagem foi realizada em equipamento EDM por penetração, Eletroplus – 540/SERVSPARK, situada no campus I - CEFET-MG com adaptações necessárias para realização do processo de nitretação por descargas elétricas.

Este equipamento é utilizado para realização de usinagem de peças de aço, pelo processo de erosão por penetração, no qual utiliza-se eletrodos ferramenta de cobre ou grafita. Conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18 - Imagem do equipamento EDM-540.



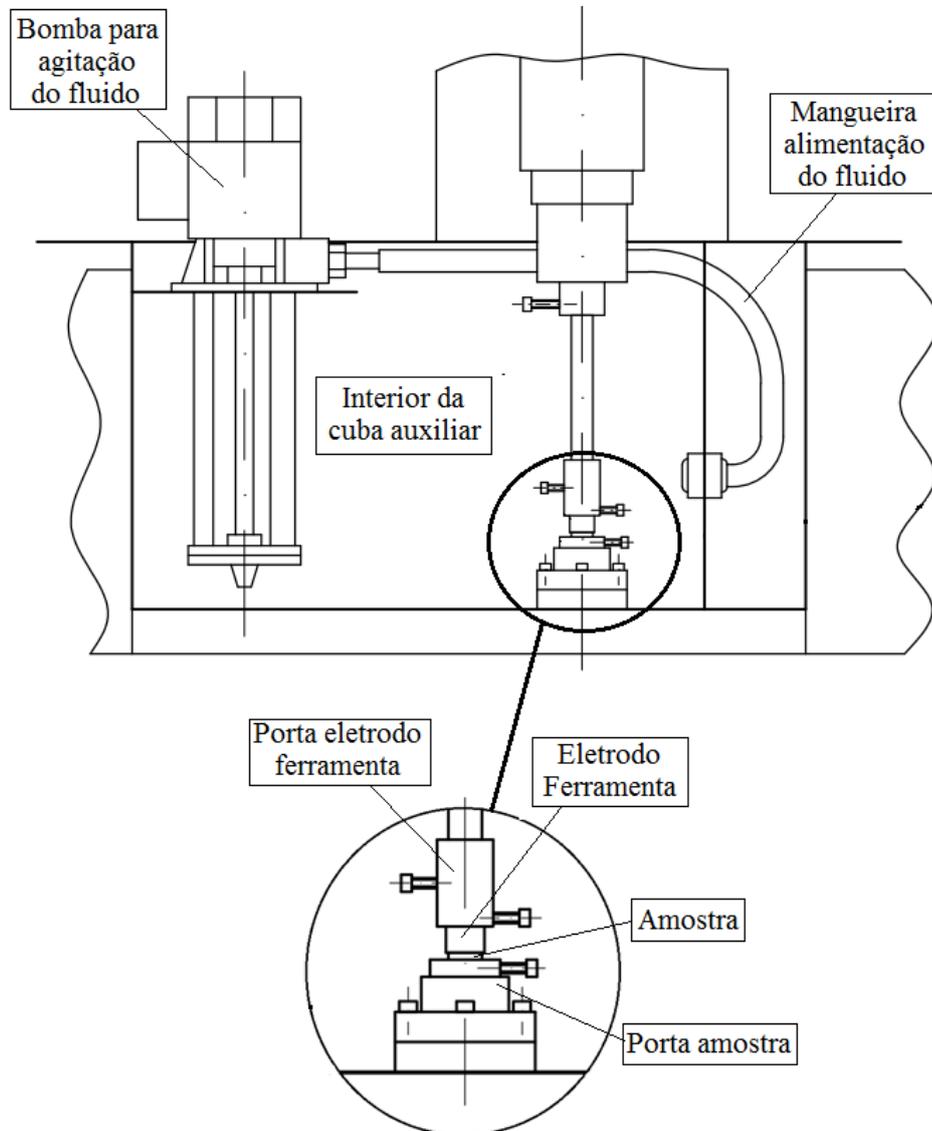
Fonte: Foto do autor

O equipamento foi adaptado para ser utilizado no processo de nitretação por descargas elétricas e trabalhar com soluções aquosas de ureia, que apresentam potencial corrosivo.

Para isso foi utilizado uma cuba auxiliar, com capacidade para 105 litros, em aço inoxidável AISI 304 instalada no interior da cuba principal da máquina, esta cuba de aço inoxidável foi utilizada em pesquisas anteriores, como a de Santos (2013) e Nicesio (2017).

A Figura 19 ilustra, esquematicamente, o interior da cuba auxiliar com o eletrodo ferramenta e amostra fixados no porta eletrodo e porta amostras.

Figura 19 - Desenho esquemático do interior da cuba auxiliar com detalhe para a montagem do eletrodo ferramenta e amostra.



Fonte:

Esta cuba 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, Singh e Kumar (2007) em suas pesquisas.

A Figura 20 ilustra a montagem da cuba auxiliar na máquina de eletroerosão.

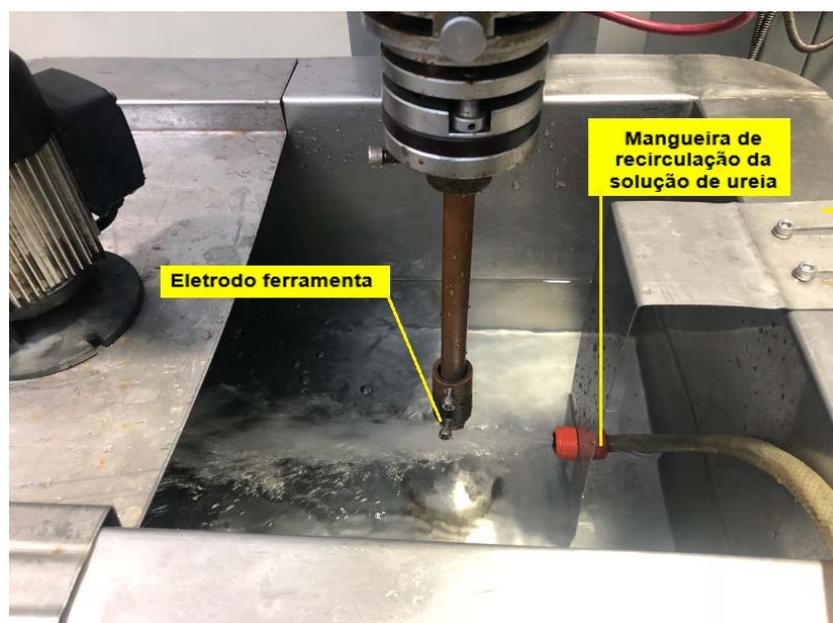
Figura 20 - Imagem do equipamento EDM-540, visualizando a cuba auxiliar.



Fonte: Foto do autor

A Figura 21 ilustra o sistema de fixação dos eletrodos e da peça a ser usinada, a fixação ocorreu por meios de parafusos que prende tanto a peça em seu porta amostra, quanto o eletrodo ferramenta em seu suporte, garantindo a intercambiabilidade.

Figura 21 – Fixação dos eletrodos



Fonte: Foto do autor

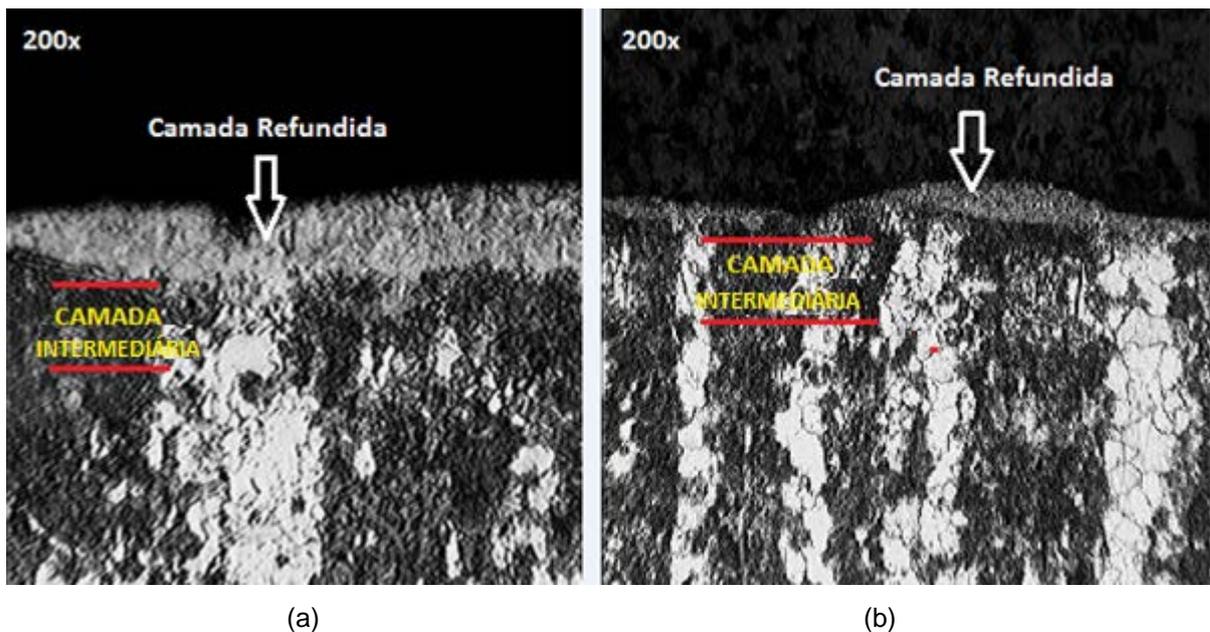
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados resultados dos testes das amostras de aço ABNT 4340 após nitretação por EDM, utilizando como fluido dielétrico água deionizada, uréia e pó de carbeto de silício. São apresentados além das formações da zona refundida e da região intermediária nas amostras usinadas com eletrodos distintos, comparando a usinagem com e sem a adição do pó; a dureza da camada nitretada, difratogramas de raio-X identificando os picos dos nitretos formados; a rugosidade superficial em diferentes parâmetros de rugosidade a morfologia da superfície da amostra via MEV e cálculos do desempenho do processo NDE.

5.1. Formação da camada refundida e camada intermediária

A Figura 22 ilustra imagens de microscopia ótica da seção transversal das amostras nitretadas do aço ABNT 4340 com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico e grafita, respectivamente, com e sem adição de carbeto de silício ao fluido dielétrico.

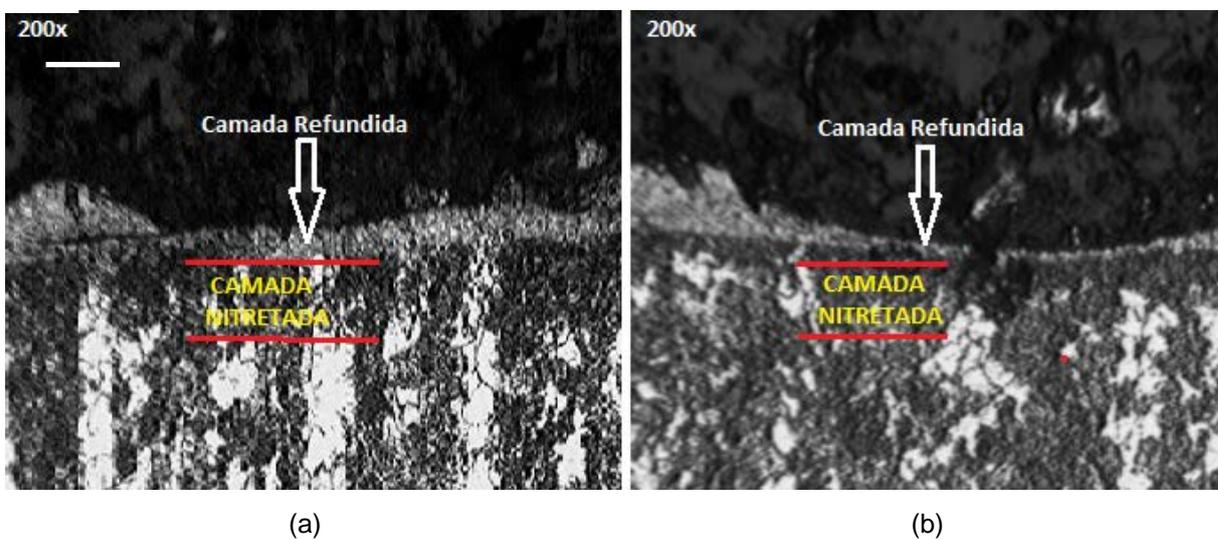
Figura 22 – Imagem de microscopia ótica da seção transversal do aço ABNT 4340 nitretado por descargas elétricas com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico a) Com adição de SiC ao fluido dielétrico, b) Sem adição de SiC ao fluido dielétrico. Ataque nital 3%.



Fonte: Fotos do autor.

Ao analisar as imagens da Figura 23, estima-se a formação da camada intermediária mais espessa quando se adicionou o pó de carvão de silício ao fluido dielétrico, independentemente do eletrodo ferramenta utilizado, o que pode estar associado à alteração da intensidade e à concentração da descarga (KLOCKE; ANTONOGLU; THOMAIDIS, 2004).

Figura 23 – Imagem de microscopia ótica da seção transversal do aço ABNT 4340 nitretado por descargas elétricas com eletrodo ferramenta de grafita a) Com adição de SiC ao fluido dielétrico, b) Sem adição de SiC ao fluido dielétrico. Ataque nital 3%.



Fonte: Fotos do autor

Nota-se que em ambas as condições, com e sem adição de pó de carvão de silício para os dois tipos de eletrodo ferramenta (cobre e grafita), ocorrem a formação das camadas refinadas e intermediária, semelhantes às observações de Raslan (2015) e Sales, et al.; (2017) na nitretação por descargas elétricas do aço ABNT 4140, porém há uma formação irregular e fragmentada na superfície, por essa razão, sua espessura não pôde ser estimada.

Observando as imagens onde a usinagem foi realizada com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico, estima-se que a espessura da região nitretada é maior que nas amostras usinadas com eletrodo ferramenta de grafita, principalmente ao utilizar o pó de carvão de silício adicionado ao fluido dielétrico.

5.2. Microdureza

Os valores médios de dureza obtidos utilizando eletrodo de grafita e cobre eletrolítico no dielétrico com e sem pó de carbeto de silício, são informados na Tabela 8, onde pode-se comparar os valores médios das durezas mensuradas em todas as usinagens.

Tabela 8: Valores da microdureza Vickers do aço 4340 utilizando eletrodo de cobre e grafita em NDE com e sem pó SiC adicionado ao fluido dielétrico

Eletrodo		Metal base Aço ABNT 4340	NDE com pó	NDE sem pó
Cobre	Dureza (HV)	330,00 ± 4,04	710,00 ± 19,31	630,00 ± 21,03
	Aumento em relação ao metal base		115,5%	90,9%
Grafita	Dureza (HV)	330,00 ± 4,04	652,00 ± 24,13	608,00 ± 31,90
	Aumento em relação ao metal base		97,5%	84,4%

Fonte: Autor

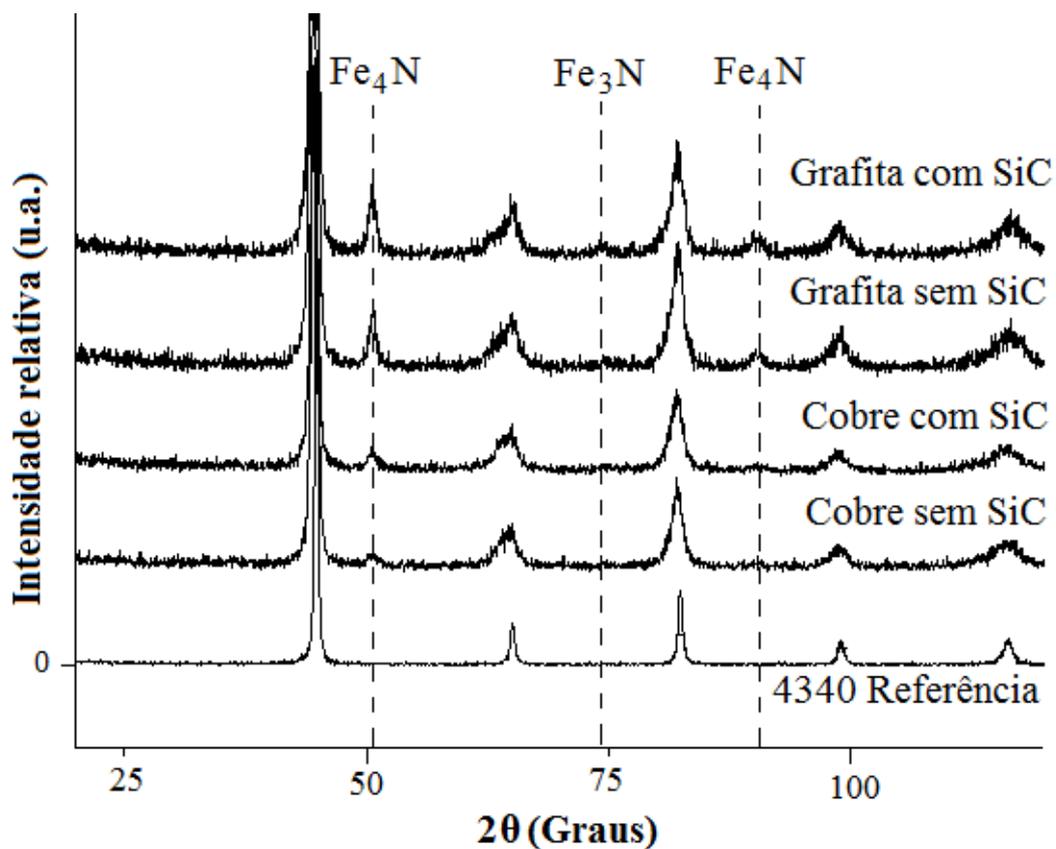
As amostras sofreram um aumento no valor médio da microdureza nas camadas intermediárias em relação ao material base. No material base que é o aço ABNT 4340 normalizado, a dureza mensurada foi de 330 Vickers. Os resultados de microdureza mostraram um acréscimo de cerca de 115,5% (710 Vickers) de dureza na camada intermediária quando usinada com cobre e carbeto de silício e um aumento de 97,5% (652 Vickers) na dureza quando usinada com eletrodo ferramenta de grafita e carbeto de silício adicionado ao dielétrico.

Os valores médios de dureza obtidos utilizando eletrodo de grafita e cobre eletrolítico no dielétrico sem carbeto de silício, na região nitretada tiveram aumento de 90,9% (630 Vickers) quando usinadas com o eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico e aumento de 84,4% (608 Vickers) quando usinadas com eletrodo ferramenta de grafita. Com a adição de carbeto de silício ao fluido dielétrico, o resultado médio das durezas da região nitretada após usinagem com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico e eletrodo ferramenta de grafita, apresenta valores maiores que as usinagens sem a adição de carbeto de silício.

5.3. Difração de Raio X

A Figura 24 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 24 – 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.



Fonte: Autor.

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.

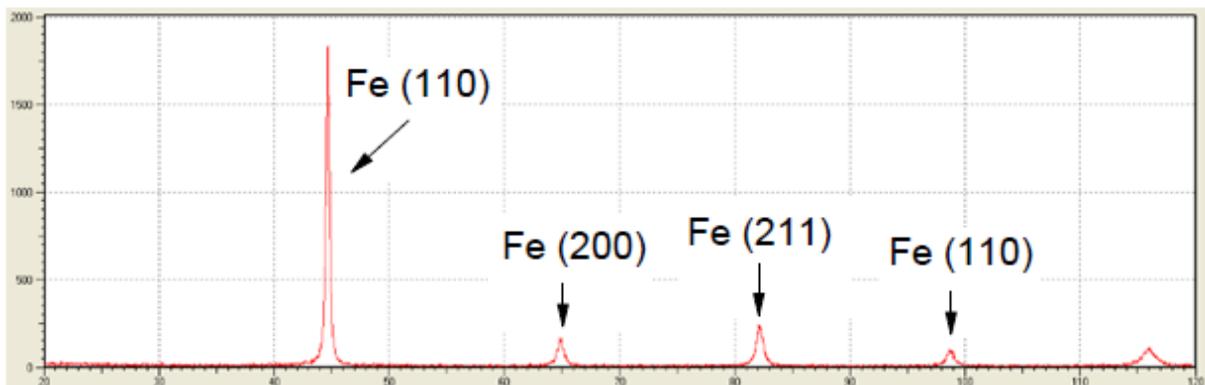
Por serem positivos, eles serão impulsionados para a superfície da peça (catodo) e, implantam-se no interior da mesma.

As análises de DRX revelaram que, em ambas as condições de NDE, com e sem pó, há formações de nitretos de ferro, o nitreto de ferro é formado pela reação química entre o metal base e o nitrogênio decomposto da solução aquosa contendo uréia.

A análise dos difratogramas permitiu identificar as fases presentes em todas as amostras, constituídas pelo elemento ferro.

A orientação cristalográfica (110), Fe- α (ccc – cúbica de corpo centrado), será a referência, conforme indicado na Figura 25.

Figura 25 - Espectro de DRX de referência do aço ABNT 4340



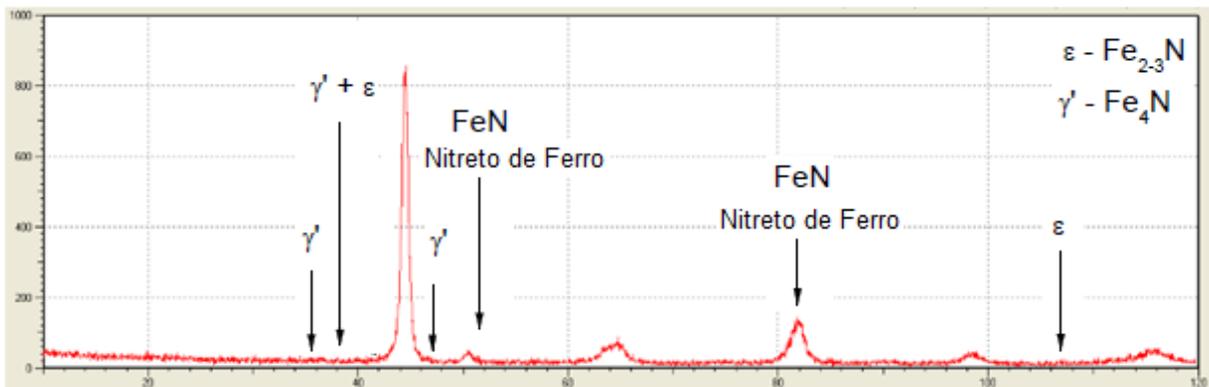
Fonte: Elaborado pelo autor

A pequena espessura das camadas nitretadas faz com que o volume difratado seja reduzido de tal forma que eventuais reflexões provenientes das camadas nitretadas sejam fracas (SANTOS, 2015). As Figuras 26 a 29 apresentam difratogramas com a identificação dos nitretos FeN, ϵ e γ' .

Os picos identificados nos difratogramas são compatíveis com os nitretos apontados por Stonieski et al.; (2013), Santos et al.; (2011) e Mello et al.; (2010).

A Figura 26 ilustra o resultado do difractograma com a amostra usinada com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico com adição de pó do carbeto de silício ao fluido dielétrico.

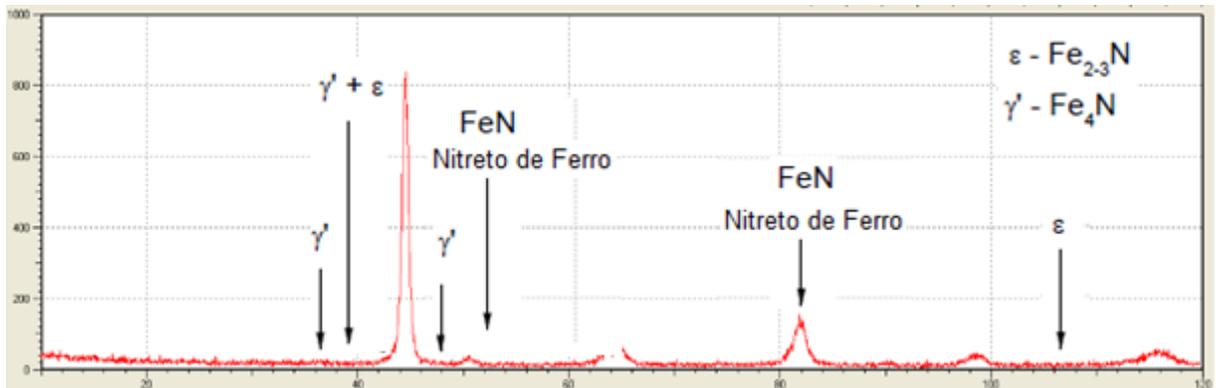
Figura 36 - Espectro de DRX obtido após NDE utilizando eletrodo ferramenta de cobre e solução aquosa de ureia com carbeto de silício



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 27 mostra o resultado do difractograma com a amostra usinada com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico e sem a adição do pó de carbeto de silício ao fluido dielétrico.

Figura 47 - Espectro de DRX obtido após NDE utilizando eletrodo ferramenta de cobre e solução aquosa de ureia sem carbeto de silício.



Fonte: Elaborado pelo autor.

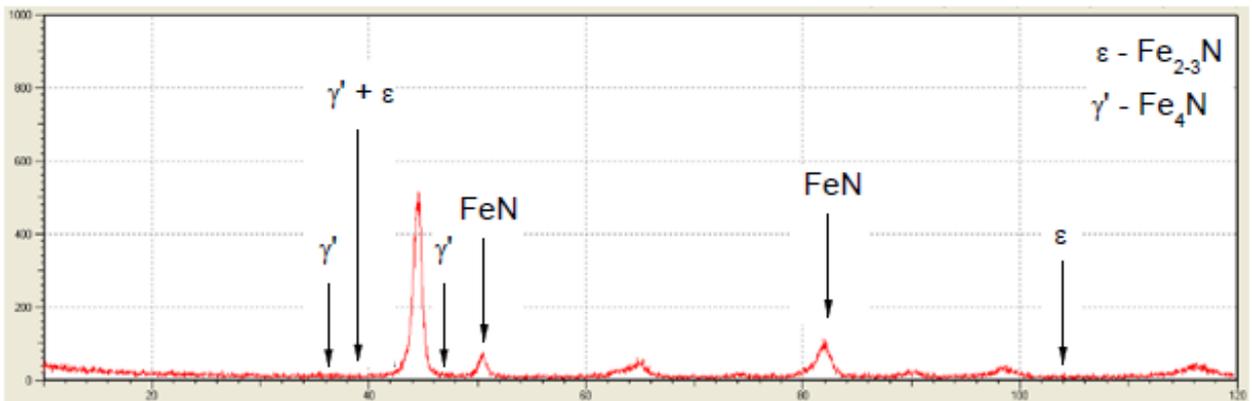
O resultado das usinagens realizadas com eletrodos ferramenta de cobre eletrolítico com e sem a adição de carbeto de silício, podem ser observados nos dois gráficos apresentados nas Figuras 26 e 27, onde é indicado a presença de nitretos de ferro na superfície analisada, o que comprova a implantação de nitrogênio.

Os difratogramas apresenta-se modificados quando comparado com o do aço ABNT 4340 sem tratamento (referência) Figura 25. Os nitretos ainda continuam mostrando

uma maior presença nos dois difractogramas. Os picos apresentados são compatíveis com Fe₂N, Fe e FeC.

A Figura 28 apresenta o resultado do difractograma com a amostra usinada com eletrodo ferramenta de grafita com a adição do pó de carbeto de silício ao fluido dielétrico.

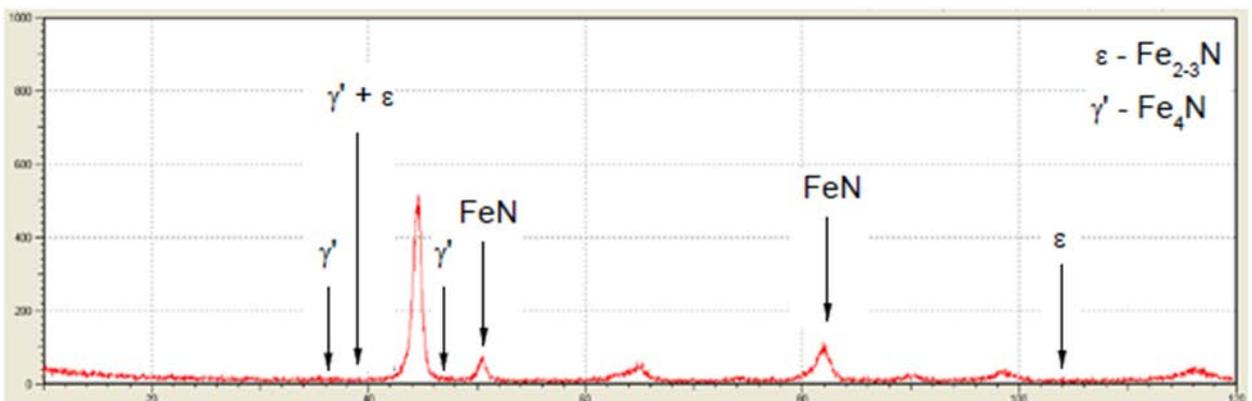
Figura 58 - Espectros de DRX obtidos após NDE utilizando eletrodo ferramenta de grafita e solução aquosa de ureia com carbeto de silício



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 29 ilustra o resultado do difractograma com a amostra usinada com eletrodo ferramenta de grafita sem a adição do pó de carbeto de silício ao fluido dielétrico.

Figura 69 - Espectros de DRX obtidos após NDE utilizando eletrodo ferramenta de grafita e solução aquosa de ureia sem carbeto de silício



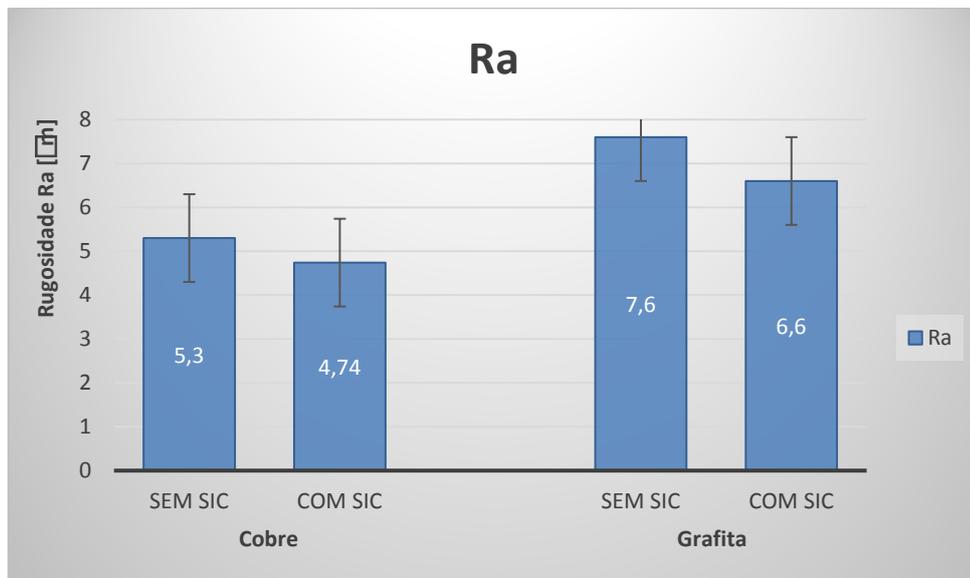
Fonte: Elaborado pelo autor.

Pelos difratogramas das Figuras 28 e 29 observa-se que há uma redução no pico principal de nitreto de ferro se comparado com a peça usinada com eletrodo ferramenta de cobre.

5.4. Rugosidade

Analisando o resultado das rugosidades em Ra das amostras usinadas, a Figura 30 ilustra o gráfico com os resultados das médias referentes as medições de rugosidade Ra, em μm , das amostras nitretadas do aço ABNT 4340.

Figura 30 – 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.



Fonte: Autor.

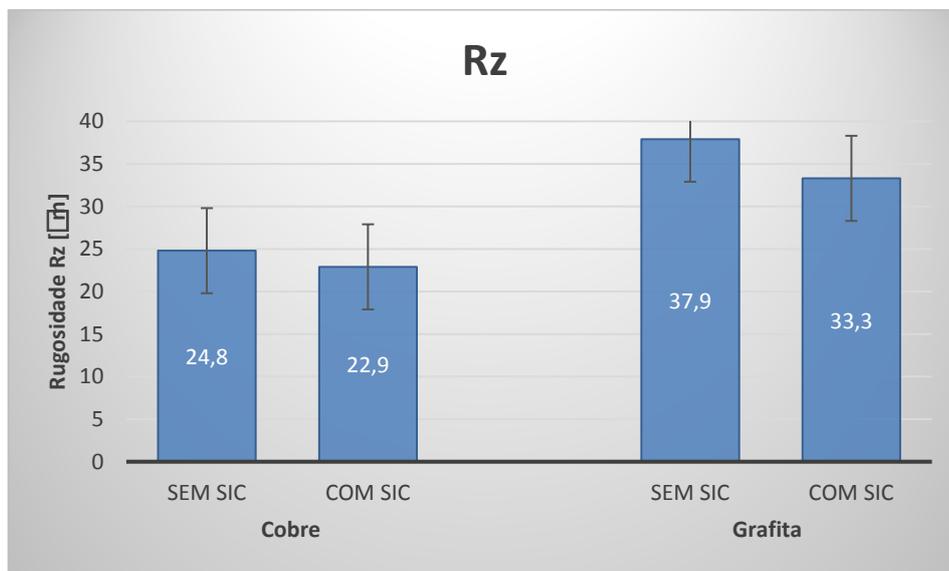
Observa-se uma redução no valor médio de Ra quando se utilizou eletrodo de cobre com carbeto de silício de 600 mesh adicionado ao fluido dielétrico, porém este valor médio de Ra que reduziu de 5,3 para 4,7 μm , estatisticamente são iguais devido ao desvio padrão. Nota-se ainda, que para o eletrodo ferramenta de grafita também houve uma redução no valor médio de Ra de 7,6 para 6,6 μm , que também estatisticamente são iguais.

Resultados semelhantes foram relatados por Chow, et al.; (2008), a adição de pó ao processo de usinagem por descargas elétricas aumentam a TRM e melhoram a rugosidade da superfície, porém nos resultados com o aço ABNT 4340 esta redução

não foi tão significativa ao se comparar as usinagens com e sem carbeto de silício adicionado ao fluido dielétrico.

Analisando os resultados obtidos da rugosidade Rz, a Figura 31 ilustra o gráfico com os resultados referentes as médias das medições de rugosidade Rz das amostras nitretadas do aço ABNT 4340.

Figura 31 – 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.



Fonte: Autor

Observa-se uma redução no valor médio de Rz quando se utilizou eletrodo de cobre com carbeto de silício de 600 mesh adicionado ao fluido dielétrico, o valor médio de Rz reduziu de 24,8 μm para 22,9 μm , apesar da redução numérica, estatisticamente podemos considerar que são praticamente a mesma rugosidade.

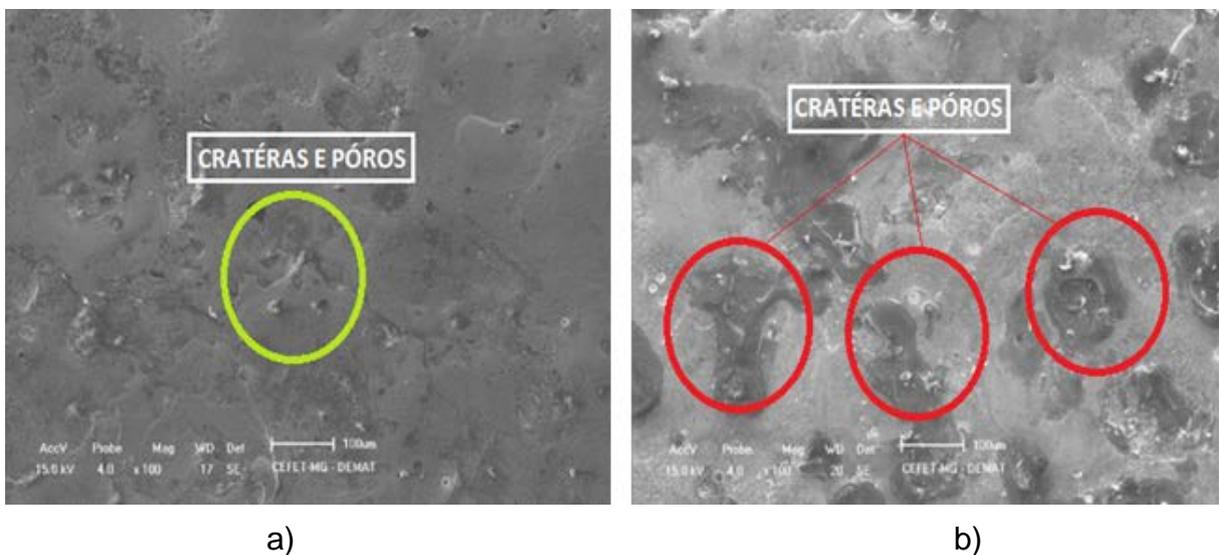
Nota-se ainda, uma redução para o eletrodo ferramenta de grafita no valor médio de Rz que passou de 37,9 μm para 33,3 μm , também apesar da redução numérica, estatisticamente pode-se considerar que são praticamente a mesma rugosidade.

Kansal, Singh e Kumar (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, pelos resultados observa-se uma tendência desta redução da rugosidade mas como a redução foi muito próxima ao valor encontrado da rugosidade medida na superfície usinada sem a adição de carbeto de silício.

5.5. Microscopia Eletrônica de Varredura

A Figura 32 ilustra as imagens de microscopia eletrônica de varredura da topografia da superfície nitretada do aço ABNT 4340 com eletrodo ferramenta de cobre, na figura 32 (a) com adição de carbeto de silício ao fluido dielétrico e (b) sem a adição de carbeto de silício ao fluido dielétrico.

Figura 32 – Imagem de microscopia eletrônica de varredura da topografia do aço ABNT 4340 nitretado por descargas elétricas com ferramenta de cobre eletrolítico
a) Com adição de SiC e b) Sem adição de SiC



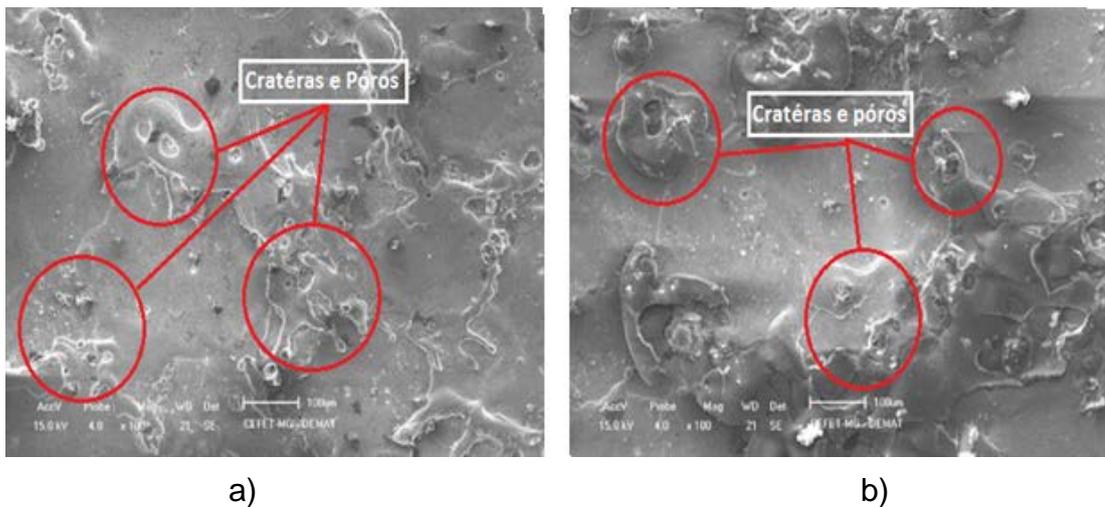
Fonte: Fotos do autor.

Na imagem da Figura 32 foram observados que na superfície usinada com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico sem a adição de carbeto de silício, várias regiões indicam aparentemente crateras e póros na área examinada e uma ligeira melhora na superfície usinada com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico e pó de carbeto de silício adicionado ao fluido dielétrico, aparentemente com menos póros e crateras, conforme Chow, et al.; (2008), relatou 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, o que aparentemente ocorreu na amostra usinada com eletrodo de cobre e carbeto de silício, como resultado uma superfície menos irregular.

A Figura 33 ilustra as imagens de microscopia eletrônica de varredura da topografia da superfície nitretada do aço ABNT 4340 com eletrodo ferramenta de grafita na figura 33 (a) com adição de carbeto de silício ao fluido dielétrico e na (b) sem a adição de carbeto de silício ao fluido dielétrico.

Figura 33 – 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.

a) Com adição de SiC e b) Sem adição de SiC



Fonte: Fotos do autor

A topografia da superfície das amostras usinadas com eletrodo ferramenta de grafita com e sem adição do carbeto de silício ao fluido dielétrico possuem muitos poros e partículas aderidas, as superfícies usinadas com eletrodo ferramenta de grafita aparentemente possui uma topografia com mais picos e crateras formados pela deposição de material refundido, ao contrário da usinagem com cobre eletrolítico mesmo utilizando o pó de carbeto de silício adicionado ao fluido dielétrico, na usinagem com eletrodo ferramenta de grafita a superfície aparentemente não apresentou melhoras significativas na redução dos poros e crateras.

5.6. Desempenho do processo de nitretação por descargas elétricas

Os resultados da TRM, TD e DVR foram obtidos a partir de 10 minutos de usinagem por descargas elétricas com os parâmetros de usinagem foram ajustados na própria máquina, buscando a otimização da usinagem através do indicador no painel da

máquina chamado erosímetro, na usinagem foi utilizado como fluido dielétrico uma solução de 30 litros de água deionizada, ureia na concentração de 30 g/l, e carbeto de silício 16 g/l.

5.6.1 Taxa de remoção de material (TRM)

Os resultados da média e desvio padrão da taxa de remoção de material (TRM) são mostrados na Tabela 9.

As usinagens foram realizadas num total de 12 amostras, sendo: 3 amostras usinadas com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico sem adição de carbeto de silício ao fluido dielétrico, 3 amostras usinadas com eletrodo ferramenta de cobre e com a adição de carbeto de silício ao fluido dielétrico, 3 amostras usinadas com eletrodo ferramenta de grafita e sem adição de carbeto de silício ao fluido dielétrico, 3 amostras usinadas com eletrodo ferramenta de grafita com a adição de carbeto de silício ao fluido dielétrico, conforme indicado na Tabela 9.

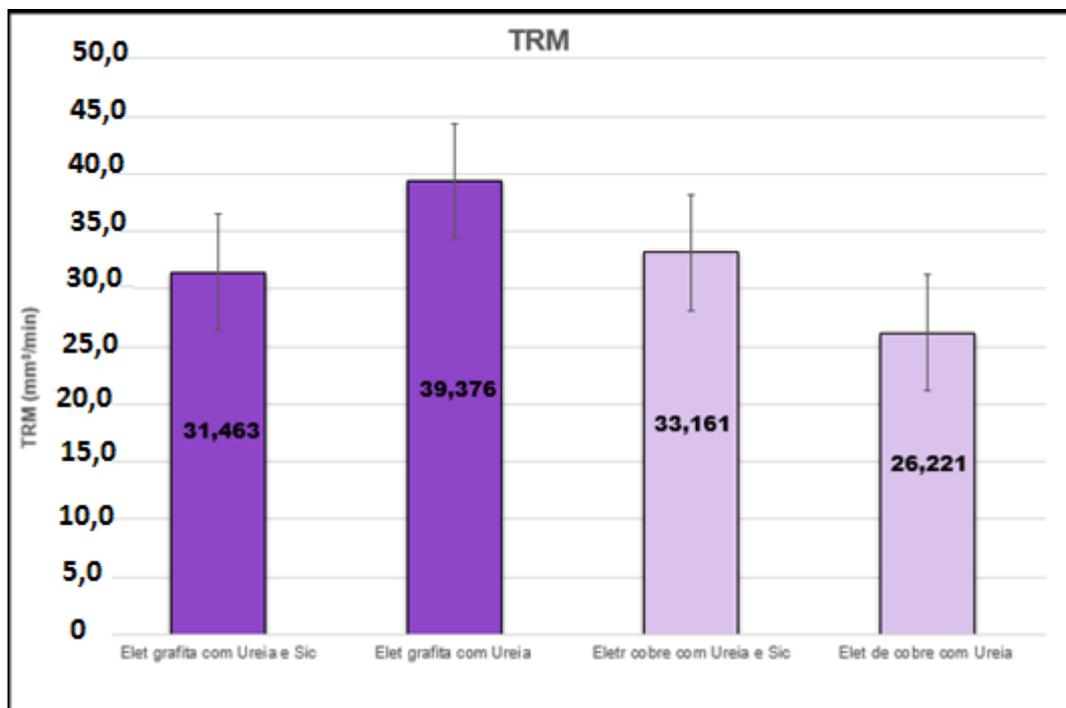
Tabela 9 – Valores da taxa de remoção de material, média e desvio padrão da usinagem com eletrodos de cobre eletrolítico e grafita com e sem adição de SiC de 600 mesh.

Tipo do material	Numero das amostras	Taxa de remoção de material (mm³/min)	Média	Desvio Padrão
Eletrodos de grafita com Ureia e Sic	1	31,154	31,463	1,733
	2	29,905		
	3	33,330		
Eletrodos de cobre com Ureia e Sic	1	26,172	33,161	7,757
	2	31,804		
	3	41,506		
Eletrodos de grafita com Ureia	1	36,573	39,376	3,720
	2	43,596		
	3	37,959		
Eletrodos de cobre com Ureia	1	26,286	26,221	1,602
	2	27,789		
	3	24,587		

Fonte: Autor

Conforme indicado na Figura 34, observa-se um aumento no valor médio da TRM quando se utilizou eletrodo de cobre com carbeto de silício de 600 mesh adicionado ao fluido dielétrico, o valor médio de TRM aumentou de 26,22 para 33,16 mm³/min, apesar do aumento numérico da TRM, ao verificarmos o valor do desvio padrão, conclui-se que os valores são praticamente iguais nas duas situações de usinagem com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico com e sem adição de carbeto de silício ao fluido dielétrico.

Figura 34 – 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.



Fonte: Autor

Nota-se ainda, que para o eletrodo ferramenta de grafita o aumento no valor médio da TRM foi 31,46 para 39,37 mm³/min. Os resultados para a usinagem com eletrodo ferramenta de grafita e adição de carbeto de silício ao fluido dielétrico, corroboram com as observações de Chow, et al.; (2008), e 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.

5.6.2 Taxa de desgaste (TD)

Os resultados das médias e desvios padrão das taxas de desgaste (TD) são mostrados na Tabela 10. Observa-se um aumento no valor médio de TD quando se utilizou eletrodo de cobre com carboneto de silício de 600 mesh adicionado ao fluido dielétrico, o valor médio de TD passou de 1,44 para 2,04 mm³/min.

Nota-se ainda, que para o eletrodo ferramenta de grafita o aumento no valor médio de TD subiu de 1,67 para 1,78 mm³/min, os resultados das usinagens com eletrodos de grafita, são estatisticamente iguais apresentando resultados diferentes do que Chow, et al.; (2008), afirmou em sua pesquisa, que o aumento da TD é seguido pelo desgaste do eletrodo ferramenta, devido à ação das partículas do pó de SiC atuando como abrasivo na superfície da ferramenta porém nas usinagens com eletrodos de cobre sem a adição de carbeto de silício adicionado ao fluido dielétrico apresentou valores menores de TD em relação ao eletrodo de cobre utilizado na usinagem com carbeto de silício, comprovando a pesquisa de Chow.

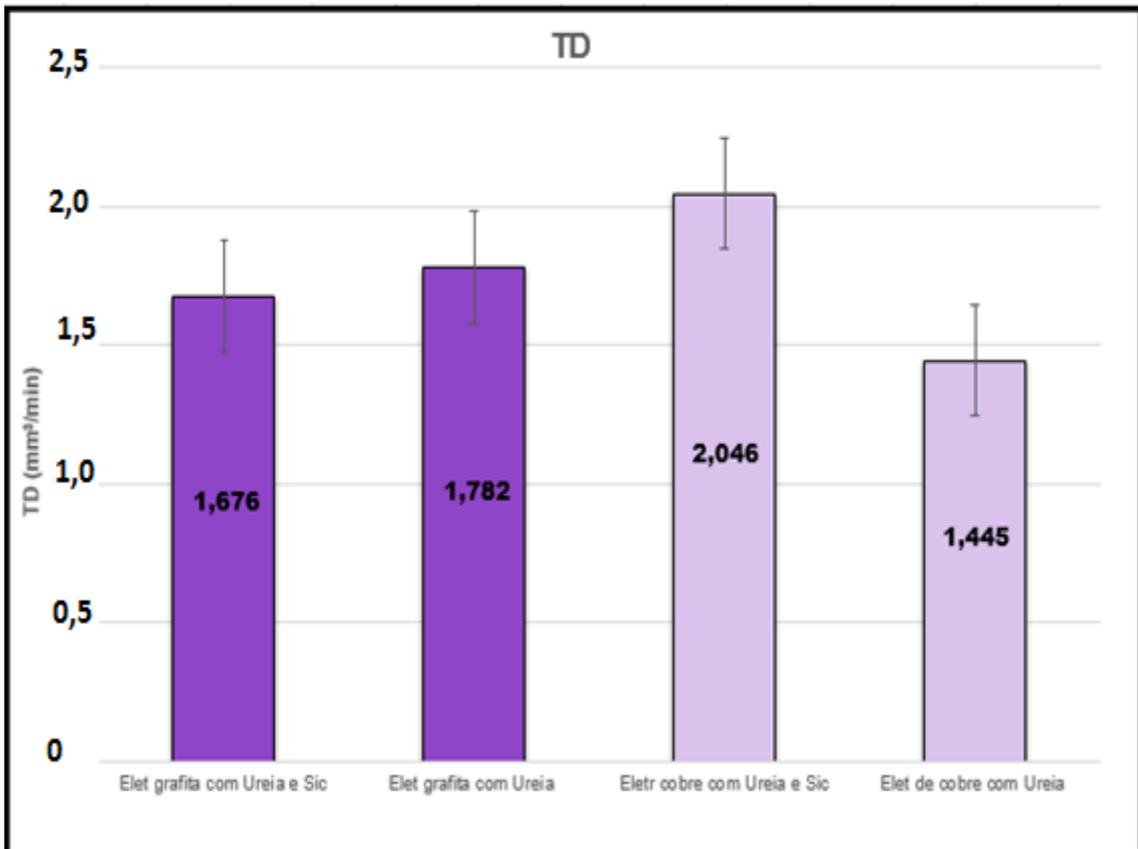
Tabela 10 – Valores da taxa de desgaste, média e desvio padrão da usinagem com eletrodos de cobre eletrolítico e grafita com e sem adição de SiC de 600 mesh.

Tipo do material	Numero das amostras	Taxa de desgaste (mm³/min)	Média	Desvio Padrão
Eletrodos de grafita com Ureia e Sic	1	1,855	1,676	0,159
	2	1,622		
	3	1,552		
Eletrodos de cobre com Ureia e Sic	1	1,349	2,046	0,817
	2	1,845		
	3	2,945		
Eletrodos de grafita com Ureia	1	1,371	1,782	0,359
	2	1,938		
	3	2,036		
Eletrodos de cobre com Ureia	1	1,472	1,445	0,043
	2	1,467		
	3	1,395		

Fonte: Autor

A Figura 35 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 35 – Valores da taxa de desgaste, média e desvio padrão da usinagem com eletrodos de cobre eletrolítico e grafita com e sem adição de SiC de 600 mesh.



Fonte: Autor

Ao comparar a TD em fluidos dielétricos com e sem pó de carbeto de silício na usinagem do aço ABNT 4340, há alteração no desgaste do eletrodo ferramenta, mostrando que a inserção do pó de SiC nestes testes acelerou o consumo dos eletrodos de cobre o que não aconteceu no eletrodo ferramenta de grafita, durante o processo de nitretação por descargas elétricas.

5.6.3 Desgaste volumétrico relativo (DVR)

Os resultados das médias e desvios padrão do desgaste volumétrico relativo (DVR) são mostrados na Tabela 11.

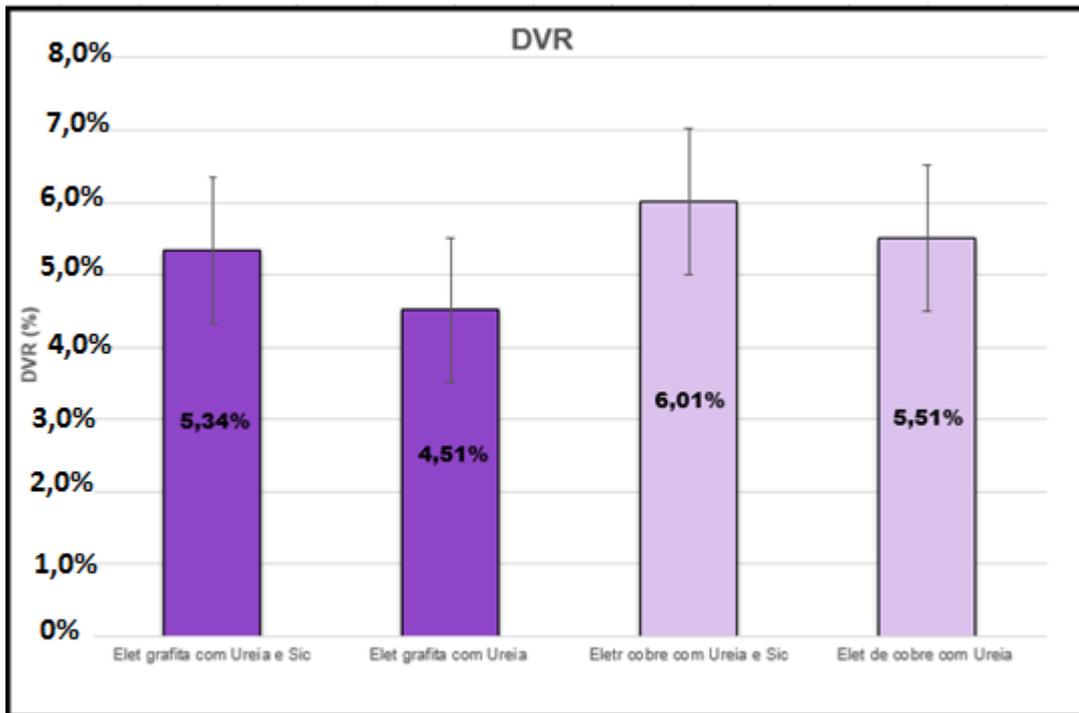
Tabela 11 – Valores da taxa de desgaste, média e desvio padrão da usinagem com eletrodos de cobre eletrolítico e grafita com e sem adição de SiC de 600 mesh.

Tipo do material	Numero das amostras	Desgaste volumétrico relativo (%)	Média	Desvio Padrão
Eletrodos de grafita com Ureia e Sic	1	5,95%	5,34%	0,65%
	2	5,42%		
	3	4,65%		
Eletrodos de cobre com Ureia e Sic	1	5,15%	6,01%	0,99%
	2	5,80%		
	3	7,09%		
Eletrodos de grafita com Ureia	1	3,74%	4,51%	0,81%
	2	4,44%		
	3	5,36%		
Eletrodos de cobre com Ureia	1	5,59%	5,51%	0,21%
	2	5,27%		
	3	5,67%		

Fonte: Autor

A Figura 36 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, observa-se um aumento no valor do DVR quando se utilizou eletrodo de cobre com carbeto de silício de 600 mesh adicionado ao fluido dielétrico, o valor médio do DVR subiu de 5,51 para 6,01%. Nota-se ainda, que para o eletrodo ferramenta de grafita o aumento do valor médio do DVR foi de 5,34 para 5,51%.

Figura 36 – 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.



Fonte: Autor.

Pode-se concluir que o DVR, que relaciona TD com TRM, indicando melhor desempenho quanto menor o seu valor, é melhor quando usa-se com eletrodo ferramenta de grafita. Enquanto o eletrodo de cobre apresentou DVR de aproximadamente 6,01% com pó e 5,51% sem pó, o eletrodo de grafita apresentou valores de 5,34% com pó e 4,51% sem pó, mostrando que independentemente do fluido dielétrico utilizado, o eletrodo ferramenta de grafita apresentou melhor performance, pois retirou-se mais material da peça com menor desgaste do eletrodo.

6. 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 carbeto de silício ao fluido dielétrico não provocou mudanças consideráveis nas camadas refundida e intermediária em relação à aplicação da solução aquosa sem pó de carbeto de silício. Observa-se a presença das duas camadas, refundida e intermediárias.

O valor da rugosidade Ra sofreu uma redução de 10,5% quando se usinou com pó de carbeto de silício e eletrodo de cobre e 13,1% com eletrodo de grafita e carbeto de silício. O valor de Rz acompanhou essa redução, 7,6% para o cobre e 12,1% para a grafita, ambos quando usinados com carbeto de silício. Porém essas reduções nas rugosidades Ra e Rz estão praticamente iguais aos valores das rugosidades das superfícies usinadas sem carbeto de silício, portanto fica inconclusivo se a adição do pó de carbeto de silício ao fluido dielétrico reduz significativamente a rugosidade superficial.

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, evidencia que a região foi nitretada.

Em relação a dureza adquirida após nitretação por descargas elétricas, verifica-se que ao utilizar carbeto de silício adicionado ao fluido dielétrico na usinagem, houve um aumento de aproximadamente 10% no valor médio da dureza em relação a usinagem sem carbeto de silício.

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

Em relação ao desempenho de usinagem a utilização de carbeto de silício adicionado ao fluido dielétrico não apresentou uma melhora significativa na TRM.

Ocorreu um pequeno aumento na taxa de desgaste quando se utilizou carbeto de silício adicionado ao fluido dielétrico. O DVR obteve valores menores quando não foi utilizado o carbeto de silício adicionado ao fluido dielétrico.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Avaliar influência da variação dos parâmetros de regulação da corrente elétrica no desempenho do processo de usinagem por descargas elétricas do aço ABNT 4340 com adição de carbeto de silício ao fluido dielétrico;
- ✓ Avaliar influência da granulometria do pó de carbeto de silício no desempenho do processo de usinagem do aço ABNT 4340;
- ✓ Avaliar a rugosidade Ra e Rz da superfície usinada do aço ABNT 4340 testando diferentes pós, como por exemplo, óxido de alumínio e grafite;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, Norliana Mohd; SOLOMON, Darius G; BAHARI, MD. Fuad. A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47 p. 1214–1228. 2007.

ARAÚJO,R;B Caracterização de um aço AISI/SAE 4340 com diferentes microestruturas através da técnica de tríplice ataque. Disponível em: *Rev. Bras. Apl. Vac.*, Campinas, Vol. 34, N°2, pp. 71-74, Maio - Ago, 2015.

AMORIM, Fred L. Tecnologia da eletroerosão por penetração da liga de alumínio AMP 8000 e da liga de cobre CuBe para ferramentas de moldagem de materiais plásticos. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). UFSC. Florianópolis. 2002.

AMORIM, Fred L.; WEINGAERTNER, Walter L. The behavior of graphite and copper electrodes on the finish die-sinking electrical discharge machining (EDM) of AISI P20 tool steel. *Journal of Brazilian Society of Mechanical Science & Engineering*. Vol XXIX. No. 4 p 366-371. 2007.

AMORIM, F. L.; SILVA, N. H. Usinagem de furos de pequeno diâmetro na liga de titânio Ti6Al4V. *Máquinas e Metais* ano 46, número 531 p. 100-117. Aranda Editora. São Paulo. Abril 2010.

ARANTES, Luciano José. Avaliação do desempenho de fluidos dielétricos no processo de usinagem por descargas elétricas. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2001. 53 p.

ARCHEM. Boletim técnico: Electron. Araras, SP. 2010. 1p. ASM HANDBOOK – VOLUME 02 – Properties and selection: nonferrous alloys and special purpose materials.

ASM International. 1997. ASM HANDBOOK – VOLUME 16 – Machining. ASM International. 1997.

BENEDICT, Gary, F. Nontraditional manufacturing processes. Marcel Dekker. New York. 1987.

BRITANNICA ACADEMIC. Urea. Novembro, 2017. Disponível em <<http://academic-eb-britannica.ez107.periodicos.capes.gov.br/levels/collegiate/article/urea/74456>>. Acesso em 21 abr. 2019.

CAMARGO, B. C.; ARANTES, L. J.; RASLAN, A. A. Estudo da viabilidade da nitretação de liga de titânio através do processo de usinagem por descargas elétricas. Uberlândia-MG, 2006. In: POSMEC, 16. FEMEC/UFU, Anais...

CHIAVERINI, VICENTE (2008) Tratamento térmico das ligas metálicas. ABM. São Paulo. 272 p.

CHEN, S. L.; YAN, B. H.; HUANG, F. Y. Influence of kerosene and distilled water as dieléctrics on the electric discharge machining characteristics of Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology* 87 p 107-111. 1999.

CHOW, H. M.; YANG, L. D.; LIN, C. T.; CHEN, Y. F. The use of SiC powder in water as dielectric for micro-slit EDM machining, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 195, p. 160-170. 2008.

EKMEKCI, Bülent; ELKOCO, Oktay; ERDEN, Abdulkadir. A comparative study on the surface integrity of plastic mold steel due to electric discharge machining. *Metallurgical and material Transactions B*. Volume 36B p 117-124. 2005.

GUITRAU, E. P. The EDM Handbook. Hansen Gardner Publications. Cincinnati , OH. 1997. 306p.

KANSAL, H. K., SINGH, S., KUMAR, P. Technology and research developments in powder mixed electric discharge machining (PMEDM), **Journal of Materials Processing Technology**, v. 184, p. 32-41. 2007.

KERN R. Sinker dielectric fundamentals. EDM Today Tech Tips. Net, EUA January/February 2009. Disponível em: <<http://www.edmtodaymagazine.com/2015/index.php/edm-today-archives/new-archives>> Acesso em: 30 dez. 2018.

KLOCKE, F.; ANTONOGLU, G.; THOMAIDIS, D. The effects of powder suspended dielectrics on the thermal influenced zone by electrodischarge machining whit small discharge energies. Journal of Materials Processsing Technology. N.149. P. 191-194. 2004.

KOBAYASHI, K. et al., (1989), EDM by Powder Suspended Working Fluid, Toyota Technological Institute and Mitsubishi Electrical Corporation, Nagoya/Japan.

KOBAYASHI, K., 1995, The Present and Future Developments of EDM and ECM, ISEM XI International Symposium for Electromaching, Lausanne

KOLLI, M.; KUMAR A. Effect of dielectric fluid with surfactant and graphite powder on Electrical Discharge Machining of titanium alloy using Taguchi. Engineering Science and Technology, an International Journal. N.18. P. 524-535. 2015.

KONIG, W.; KLOCKE, F.; LENZEN, R. The Electrical Machining Processes: What demands will they face in the future. International Journal of Electrical Machining. V.1 n.1, p. 3-7. 1996.

KURIACHEN, B.; MATHEW, J. Experimental Investigations into the Effects of Microelectric-Discharge Milling Process Parameters on Processing Ti-6Al-4V. Journal Materials and Manufacturing Processes. N.8. P. 983-990. 2014.

KUMAR, D.; et al. A State-of-the-art Review on Dielectric fluid in Electric Discharge Machining: Uses and Its Effects. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). N. 4. P.7. 2017.

KUMAR, S.; et al. Surface modification by electrical discharge machining: A review. Journal of Materials Processing Technology. N. 209. P. 3675-3687. 2009.

KURAFUJI, H., e Suda, K., 1965, Study on Electrical Discharge Machining, Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo (B), Vol XXVIII, No.1, pg. 1-18.

LIMA, F.; CORRÊA, M. Efeitos da eletroerosão sobre a superfície de peças usinadas. UNICAMP, Rev. Tecnol. Fortaleza, v 27. N.1, Brasil. P.26-33. 2006

LIRA, Ignacio. Evaluating the measurement uncertainty. Fundamentals and practical guidance. Institute of Physics Publishing. 243p. 2002.

MAHARDIKA, Muslim; TSUJIMOTO, Takayuki; MITSUI, Kimiyuki. A new approach on the determination of ease of machining by EDM processes. International Journal of Machine Tools & Manufacture 48 p. 746–760. 2008.

MARASHI, H.; JAFARLOUA, D. M.; SARHANA, A. A. D.; HAMDI, M. State of the art in powder mixed dielectric for EDM applications, **Precision Engineering**, v. 46, p. 11-33. 2016.

Manual de instalação, operação e manutenção: EDM 200 NC e EDM 440 NC. Caxias do Sul. 2002 EKMEKCI, Bülent. Residual stresses and white layer in electric discharge machining (EDM). Applied Surface Science 253 p 9234-9240. 2007. 109

NBR 6405, 1995, Rugosidade das superfícies, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 9pgs.

NISÉSIO, I. C.; SILVA S. P.; FREITAS A. F.; SANTOS, R. F.; SILVA, E. R. 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, 2015.

RASLAN, A. A.; SANTOS, R. F.; SILVA, E. R.; FAPEMIG, Fundação de Apoio a Pesquisa de Minas Gerais; UFU, Universidade Federal de Uberlândia. Método de Nitretação através da Usinagem com Descargas – NDE”. BR 10 2012 030523-2. 2012.

RASLAN, A. A. 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.

RODRIGUES, J. R. P., 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, R. F. Nitretação por EDM do aço AISI 4140. 2013. 109f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SANTOS, R. F. **Nitretação por EDM no aço AISI 4140**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Uberlândia, 2013.

SANTOS, R. F.; SILVA, E. R.; SALES, W. F.; RASLAN, A. A. 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**, v. 89, p. 1251-1257. 2017.

SANTOS, C. E. Influência da corrente elétrica no processo de nitretação por descargas elétricas no aço AISI H13. 2015. 95f. Dissertação do Mestrado – CEFET-MG –Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

SANTOS, R. F. – Nitretação por EDM no aço AISI 4140. 2013. 129f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2013.

SANTOS, R. F.; SILVA, E. R.; SALES, W. F.; RASLAN, A. A. 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*. N. 89. p.1251-1257. 2016.

SANTOS, ROBERTA NUNES NERY DOS. Nitretação por EDM da liga Ti-6Al-4V com adição de carbeto de silício em pó. 2019.

UNO, Y. e Okada A., 1997, Surface Integrity in EDM of Aluminum Bronze with Nickel Powder Mixed Fluid, International Journal of Electrical Machining, N ° 2, January 1997.

WEINGAERTNER, Walter L. Tecnologia de fabricação volume 3. Material didático da disciplina EMC 6316. POSMEC. UFSC. Florianópolis. 1993. 301p.