

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

HENRIQUE GUSTAVO SANTOS

**NITRETAÇÃO POR DESCARGAS ELÉTRICAS DO AÇO ABNT 4140 COM  
ADIÇÃO DE PÓ DE CARBETO DE SILÍCIO AO FLUIDO DIELÉTRICO EM  
DIFERENTES PROPORÇÕES**

Belo Horizonte  
Novembro de 2022

Henrique Gustavo Santos

**NITRETAÇÃO POR DESCARGAS ELÉTRICAS DO AÇO ABNT 4140 COM  
ADIÇÃO DE PÓ DE CARBETO DE SILÍCIO AO FLUIDO DIELÉTRICO EM  
DIFERENTES PROPORÇÕES**

Texto de 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  
Novembro de 2022

Santos, Henrique Gustavo.  
S237n Nitretação por descargas elétricas do aço ABNT 4140 com adição de pó de carvão de silício ao fluido dielétrico em diferentes proporções / Henrique Gustavo Santos. – 2022.  
93 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, 2022.  
Bibliografia.

1. Aço. 2. Carvão de silício. 3. Solução (Química). 4. Ureia. 5. Usinagem por eletroerosão. I. Silva, Ernane Rodrigues da. II. Título.

CDD: 671.35



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 44/2022 - POSMAT (11.52.07)

Nº do Protocolo: 23062.059906/2022-25

Belo Horizonte-MG, 29 de novembro de 2022.

*DISSERTAÇÃO DE MESTRADO*

*“NITRETAÇÃO POR DESCARGAS ELÉTRICAS DO AÇO ABNT 4140 COM ADIÇÃO DE PÓ DE CARBETO DE SILÍCIO AO FLUIDO DIELÉTRICO EM DIFERENTES PROPORÇÕES”*

Autor: Henrique Gustavo Santos

Orientador: Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou em 30 de novembro de 2022 esta Dissertação:

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

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

Prof. Dr. Sival Pedroso da Silva (EXAMINADOR EXTERNO)  
instituto Federal de Minas Gerais – IFMG

*(Assinado digitalmente em 30/11/2022 17:07)*  
ERNANE RODRIGUES DA SILVA  
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO  
CEMAT (11.51.06)  
Matrícula: ###23#8

*(Assinado digitalmente em 11/12/2022 20:54)*  
LEONARDO NEVES  
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO  
DEMAT (11.55.06)  
Matrícula: ###465#3

*(Assinado digitalmente em 30/11/2022 17:08)*

SINVAL PEDROSO DA SILVA

ASSINANTE EXTERNO

CPF: ###.###.676-##

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **44**, ano: **2022**, tipo: **ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**, data de emissão: **29/11/2022** e o código de verificação: **123dad7410**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, meu Criador, por ter me dado saúde, força e sabedoria para concluir este trabalho. Sem sua Divina proteção e cuidado nada disso seria possível.

À minha querida esposa Verônica Alves Santos pelo incentivo, por me fortalecer e motivar diariamente, por me substituir em diversas tarefas no dia a dia para que eu pudesse dedicar ao curso e pelo apoio incondicional até aqui.

Aos meus pais e irmãos que acreditaram no meu potencial e sempre me apoiaram em minhas decisões e me incentivaram a priorizar os estudos.

Ao professor Dr. Ernane Rodrigues da Silva, pelos ensinamentos, paciência, oportunidade e confiança em mim depositada para conduzir esta pesquisa. Obrigado por ter dedicado tanto tempo, inclusive em dias de férias e finais de semana, para orientação e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Ms. Victor Souza Esteves Lima, por abrir as portas para mim e confiar no meu potencial. Obrigado por toda ajuda na parte experimental e ensaios e por sempre me incentivar a buscar novas fontes de conhecimento e desenvolvimento pessoal e profissional.

Ao CEFET-MG, por meio do seu Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, pelo acolhimento e pela grata oportunidade de realizar este sonho.

Aos professores do programa de pós-graduação em Engenharia de Materiais por toda contribuição e ensinamentos ao longo do curso.

Aos professores Dr. Leonardo Neves e Dr. Sinval Pedroso da Silva pelas correções, discussões técnicas e contribuições valiosas como membros da banca examinadora

Aos colaboradores do DEMAT, professores, técnicos de laboratório e administrativo que de forma cordial e motivadora contribuíram para que eu chegasse até aqui.

À empresa Suppress, que me liberou muitas vezes de minhas atividades empregatícias, para que eu pudesse dedicar às disciplinas do curso e empenhar no desenvolvimento deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelos auxílios.

A todos que, embora não tenham sido citados, contribuíram direta e indiretamente para a realização deste trabalho. A todos vocês, meus sinceros agradecimentos.

*“São fúteis e cheias de erros as ciências que não nasceram da experimentação, mãe de todo o conhecimento.”*

Leonardo da Vinci

## RESUMO

A usinagem por descargas elétricas é um processo que permite modificações superficiais ao mesmo tempo em que a peça é usinada. Estudos já demonstraram que é possível aumentar a dureza superficial de uma peça quando usinada por descargas elétricas, utilizando uma solução aquosa de água deionizada e ureia como fluido dielétrico. Além de se utilizar água deionizada e ureia como fluido dielétrico, estudos mais recentes mostraram que a utilização de pós abrasivos misturados ao fluido pode melhorar o desempenho da usinagem. Esta pesquisa objetiva investigar a influência da adição de pó de carbetto de silício (SiC) de granulometria 600 mesh em diferentes proporções ao fluido dielétrico, composto por água deionizada e ureia, no processo de nitretação por descargas elétricas do aço ABNT 4140 utilizando cobre eletrolítico e grafita como eletrodos ferramenta. Como critérios de avaliação do processo, técnicas de caracterização como microscopia óptica, difração de raios-X (DRX), análise da rugosidade, medições de microdureza Vickers e das espessuras das camadas, foram empregadas para comparar os resultados obtidos da usinagem das amostras nas diferentes composições do fluido dielétrico. Além disso, foi investigado o desempenho da usinagem a partir dos principais parâmetros, como a taxa de remoção do material (TRM), desgaste do eletrodo (TD) e o desgaste volumétrico relativo (DVR). Com base nos resultados,  $30 \text{ g.L}^{-1}$  de SiC como pó abrasivo adicionado ao fluido dielétrico e diferentes tipos de eletrodos influenciou no processo, que apresentou melhor desempenho de usinagem quando foi utilizado cobre eletrolítico, e aumento de 156,4% na espessura das camadas nitretadas quando grafita foi utilizada como eletrodo.

**Palavras chave:** Aço ABNT 4140, pós-abrasivos de carbetto de silício (SiC), solução aquosa contendo ureia, Usinagem por descargas elétricas (EDM).

## ABSTRACT

Electrical discharge machining is a process that allows surface modifications while the part is being machined. Studies have already demonstrated that it is possible to increase the surface hardness of a part when machined by electrical discharges, using an aqueous solution of deionized water and urea as dielectric fluid. In addition to using deionized water and urea as a dielectric fluid, studies that are more recent have shown that the use of abrasive powders mixed with the fluid can improve machining performance. This research aims to investigate the influence of the addition of Silicon Carbide Powder (SiC) of granulometry 600 mesh in different proportions to the dielectric fluid, composed of deionized water and urea, in the nitriding process by electrical discharges of AISI 4140 steel using electrolytic copper and graphite as tools. As process evaluation criteria, characterization techniques such as optical microscopy, X-ray diffraction (XRD), roughness analysis, Vickers microhardness and layer thickness measurements were used to compare the obtained results for the machining samples in different compositions of the dielectric fluid. In addition, the machining performance was investigated based on the main parameters, such as material removal rate (MRR), electrode wear (EW) and relative volumetric wear (RVW). Based on the results, 30 g.L<sup>-1</sup> of SiC as abrasive powder added to the dielectric fluid and different electrodes influenced the process, which showed better machining performance when electrolytic copper was used, and an increase of 156.4% in the thickness of the nitrided layers when graphite was used as electrode.

**Keywords:** ABNT 4140 steel, aqueous solution containing urea, silicon carbide abrasive powder, EDM (Electrical Discharge Machining).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática de funcionamento do processo EDM.....	27
Figura 2 - Representação da camada refundida formada no processo EDM.....	27
Figura 3 - Representação esquemática da fase de ignição da centelha .....	29
Figura 4 - Representação esquemática da formação do canal de plasma.....	29
Figura 5 - Representação da fusão de pequenas partículas dos eletrodos ferramenta e peça .....	30
Figura 6 - Representação esquemática da ejeção do material durante EDM .....	31
Figura 7 – Avaliação de Microdureza Hk com água destilada e solução de ureia como fluidos dielétricos .....	40
Figura 8 - Imagem de microscopia óptica do aço AISI 4140 usinado por EDM.....	41
Figura 9 - Modelo 3D em corte proposto para o canal de plasma no processo de nitretação por descargas elétricas.....	42
Figura 10 - Dispersão da energia de descarga com e sem adição de SiC ao fluido dielétrico .....	46
Figura 11 - Detalhamento da sequência de trabalho da pesquisa .....	48
Figura 12 - Corpos de prova fabricados em aço ABNT 4140 .....	49
Figura 13 - Fotografia dos eletrodos ferramenta – a) cobre eletrolítico e b) grafita...	50
Figura 14 - Realização da medição da condutividade elétrica no fluido dielétrico.....	52
Figura 15 - Máquina de usinagem por eletroerosão utilizada no processo EDM .....	53
Figura 16 - Cuba auxiliar adaptada na máquina EDM.....	54
Figura 17: Dispositivos de fixação das amostras e dos eletrodos ferramenta.....	55
Figura 18 - Painel de controle da máquina EDM para ajustes dos parâmetros.....	56
Figura 19 - Rugosímetro digital marca Tesa com dispositivo projetado para fixação das amostras.....	59
Figura 20 - Imagens de microscopia óptica do processo de nitretação por eletroerosão sem adição de pó. Em a) com eletrodo de cobre eletrolítico e em b) com eletrodo de grafita. ....	62
Figura 21 - Imagens de microscopia óptica do processo de nitretação por eletroerosão com adição de pó de SiC na concentração de 10 g.L <sup>-1</sup> . Em a) com eletrodo de cobre eletrolítico e em b) com eletrodo de grafita. ....	63

Figura 22 - Imagens de microscopia óptica do processo de nitretação por eletroerosão com adição de pó SiC na concentração de 20 g.L <sup>-1</sup> . Em a) com eletrodo de cobre eletrolítico e em b) com eletrodo de grafita. ....	63
Figura 23 - Imagens de microscopia óptica do processo de nitretação por eletroerosão com adição de pó SiC na concentração de 30 g.L <sup>-1</sup> . Em a) com eletrodo de cobre eletrolítico e em b) com eletrodo de grafita. ....	64
Figura 24 - Imagens de microscopia óptica do processo de nitretação por eletroerosão com adição de pó SiC na concentração de 40 g.L <sup>-1</sup> . Em a) com eletrodo de cobre eletrolítico e em b) com eletrodo de grafita. ....	64
Figura 25 - Espessuras das camadas refundidas e intermediária usinadas com eletrodo de cobre eletrolítico .....	66
Figura 26 - Espessuras das camadas refundidas e intermediária usinadas com eletrodo de grafita .....	67
Figura 27 – Valores de TRM encontrados na usinagem com eletrodo de cobre eletrolítico e grafita nas diferentes composições de fluidos dielétricos .....	68
Figura 28 - Valores de TD encontrados na usinagem com eletrodo de cobre eletrolítico e grafita nas diferentes composições de fluidos dielétricos.....	70
Figura 29 – Análise do DVR na usinagem com eletrodo de cobre eletrolítico e grafita nas diferentes composições de fluidos dielétricos.....	71
Figura 30 - Difratoogramas das superfícies usinadas com eletrodo de cobre eletrolítico .....	73
Figura 31 - Difratoogramas das superfícies usinadas com eletrodo de grafita.....	73
Figura 32 – Microdureza das camadas após usinagem por EDM com eletrodo de cobre eletrolítico.....	75
Figura 33 - Microdureza das camadas após usinagem por EDM com eletrodo de grafita. ....	77
Figura 34 – Valores de rugosidade das amostras usinadas por EDM com eletrodo de cobre eletrolítico .....	79
Figura 35 - Valores de rugosidade das amostras usinadas por EDM com eletrodo de grafita .....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço ABNT 4140.....	22
Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço ABNT 4140.....	22
Tabela 3 - Composição química da ureia encontrada no Brasil .....	41
Tabela 4 - Representação dos testes de EDM nas amostras em função da composição do fluido dielétrico .....	51
Tabela 5 - Parâmetros de entrada utilizados na usinagem .....	56
Tabela 6 - Massa específica dos materiais .....	58
Tabela 7 - Parâmetros adotados no ensaio de DRX.....	61
Tabela 8 – Microdureza Vickers das amostras usinadas com eletrodo de cobre eletrolítico.....	74
Tabela 9 - Microdureza das amostras usinadas com eletrodo de grafita .....	76
Tabela 10 - Rugosidade no parâmetro Ra das amostras usinadas por EDM com eletrodo de cobre eletrolítico .....	80
Tabela 11 - Rugosidade no parâmetro Ra das amostras usinadas por EDM com eletrodo de grafita .....	81
Tabela 12 - Comparação dos valores de rugosidade Ra das amostras usinadas com eletrodo de cobre eletrolítico e grafita .....	82

## LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

- ABNT : Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AISI : *American Iron and Steel Institute* (Instituto Americano do Ferro e Aço)
- AJEDM : *Abrasive Jet Electrical Discharge Machining*
- CEFET : Centro Federal de Educação e Tecnologia de Minas Gerais
- DEMAT: Departamento de Engenharia de Materiais
- DRX : Difração de Raios-X
- DVR : Desgaste Volumétrico Relativo
- EDM : Usinagem por Descargas Elétricas
- FD : Fluido Dielétrico
- HV : *Hardness Vickers*
- HRC : Dureza Rockwell C
- NBR : Norma Brasileira Regulamentadora
- NDE : Nitretação por Descargas Elétricas
- TD : Taxa de Desgaste do Eletrodo
- TRM : Taxa de Remoção de Material
- ZAC : Zona Afetada pelo Calor
- ZR : Zona Refundida

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	17
1.1 Justificativa.....	18
2. OBJETIVO GERAL .....	20
2.1. Objetivos Específicos .....	20
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	21
3.1. O Aço ABNT 4140 .....	21
3.2. Nitretação .....	22
3.3. Usinagem por Descargas Elétricas - EDM.....	24
3.3.1. Fenômenos (fases do processo) .....	28
3.3.2. Parâmetros de usinagem no processo EDM .....	32
3.3.3. Desempenho do processo EDM .....	33
3.3.4. Materiais para eletrodo ferramenta no processo EDM.....	35
3.3.5. Fluidos dielétricos do processo EDM.....	36
3.4. Nitretação por Descargas Elétricas - NDE .....	38
3.5. Adição de Pós Abrasivos no Processo EDM .....	44
4. METODOLOGIA.....	47
4.1. Material do Eletrodo Peça (amostras).....	48
4.2. Material do Eletrodo Ferramenta.....	49
4.3. Fluido Dielétrico .....	50
4.4. Preparação da Máquina de EDM.....	53
4.5. Desempenho da Usinagem por EDM .....	57
4.6. Avaliação do Aspecto Superficial (Rugosidade) .....	58
4.7. Análise Metalográfica do Aço ABNT 4140 .....	59
4.8. Análise de Microdureza .....	60
4.9. Difração de Raios X.....	60
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	62

5.1. Formação das Camadas das Amostras Usinadas por EDM com Eletrodo de Cobre Eletrolítico e Grafita.....	62
5.3. Avaliação do Desempenho da Usinagem por EDM.....	67
5.4. Difração de Raios X.....	72
5.5. Análise de Microdureza .....	74
5.6. Avaliação da Rugosidade .....	78
6. CONCLUSÃO.....	83
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	85
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	86

## 1. INTRODUÇÃO

A usinagem por descargas elétricas (EDM) é um processo termoelétrico que efetua a remoção de material da superfície da peça por meio de descargas elétricas. Uma de suas principais vantagens é a possibilidade de se usinar peças de geometrias complexas e de elevada dureza, que seriam dificilmente realizadas por processos convencionais (PANDEY; SINGH, 2010). O princípio básico de remoção de material por esse processo é a ocorrência de sucessivas descargas elétricas entre os eletrodos peça e ferramenta que são separados por uma fenda de trabalho conhecida como “*gap*”. McGeough (1988) e Fuller (1989), mostraram que partículas são arrancadas por fusão ou sublimação e erodidas das faces dos eletrodos.

O processo EDM possui uma característica muito atrativa do ponto de vista acadêmico e industrial que vem sendo fortemente investigada nos últimos anos, a possibilidade de conseguir modificações superficiais na peça. Essas modificações afetam as propriedades do material e ocorrem devido ao canal de plasma formado, contendo elementos químicos de outros materiais diferentes do material base. O canal de plasma formado durante a usinagem pode ser aproveitado para fazer a implantação de elementos químicos na superfície do substrato e alterar suas propriedades superficiais. Kumar (2009), afirma que os elementos químicos implantados na superfície devem estar presentes no eletrodo ferramenta ou no fluido dielétrico.

Raslan *et al.* (2012), mostraram que é possível utilizar o processo EDM para promover a nitretação de superfícies por meio da adição de ureia ao fluido dielétrico. Anteriormente, Yan *et al.* (2005) e Camargo *et al.* (2009), estudaram esse método no titânio e mostraram que existe a formação de nitretos na superfície do material e, conseqüentemente, ganho de resistência ao desgaste por deslizamento. Nas pesquisas de Santos (2013) e Nicésio (2017), foi demonstrada uma metodologia para nitretação por descargas do aço AISI 4140, sendo evidenciada a formação das camadas nitretadas e da camada refundida, utilizando como fluido dielétrico água deionizada e ureia. Na tentativa de aprimorar e buscar melhorias no processo de usinagem por EDM, estudos mostram que ao adicionar pós abrasivos ao fluido dielétrico é possível alcançar maiores taxas de remoção de material e em alguns casos melhorar a rugosidade. Silva *et al.* (2012), analisaram o desempenho do pó de

SiC e de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (óxido de alumínio) no processo de usinagem híbrido AJEDM, *Abrasiva Jet Electrical Discharge Machining* (Usinagem por Descargas Elétricas e Jato de Água Abrasivo) e concluíram que o desempenho de usinagem foi melhor quando utilizado o pó de SiC, quando comparado com o pó de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Nunes (2019), em seu trabalho de nitretação por descargas elétricas da liga Ti-6Al-4V mostrou que ao incorporar o pó abrasivo de carbeto de silício ao fluido dielétrico, houve uma diminuição de aproximadamente 31% na rugosidade utilizando eletrodo de grafita e aumento de 58% e 70% na dureza quando utilizado eletrodo de grafita e cobre eletrolítico, respectivamente. Ao realizar a nitretação por EDM do aço AISI 4140 com adição de pó de carbeto de silício ao fluido dielétrico, Barbalho (2021), mostrou discreto aumento na taxa de remoção de material na usinagem com eletrodo de cobre eletrolítico quando comparado com a usinagem sem a adição deste pó.

Diante disso, como forma de ampliar o conhecimento existente e dar prosseguimento à essa linha de trabalho em busca de desenvolvimento de novas técnicas de fabricação, esta pesquisa propõe uma análise da nitretação por descargas elétricas do aço ABNT 4140 realizada com adição de pó de carbeto de silício (SiC) de 600 mesh em diferentes proporções ao fluido dielétrico.

## **1.1 Justificativa**

A indústria busca por constante desenvolvimento de materiais com melhores propriedades mecânicas, como resistência ao desgaste, resistência à corrosão, resistência mecânica, dentre outras, para se obter maior produtividade. A crescente evolução tecnológica dos materiais, motivada pelas constantes pesquisas acadêmicas na área, permite a indústria utilizar materiais com melhor desempenho, mais resistentes, leves e, conseqüentemente, com menores custos de produção.

Neste sentido, a indústria visa produzir de forma sustentável e ofertar ao cliente produtos inovadores, versáteis, com qualidade e preços justos. Além de buscar materiais mais tecnológicos e para severas aplicações, a indústria busca reduzir seus custos com a redução do tempo de processos de fabricação. Isso faz com que diversos estudos sejam realizados não somente no desenvolvimento de novos

materiais, mas, também, no sentido de busca por otimização de processos visando agregar ganhos para as sociedades fabris.

O processo EDM possui uma característica atrativa e que vem sendo investigada nos últimos anos, a possibilidade de conseguir modificações superficiais na peça. Estas modificações podem ser promovidas através da implantação de elementos químicos na superfície do substrato. O desenvolvimento no processo EDM, que permite a usinagem de peças com geometrias complexas e durezas elevadas, apresentando boa relação custo-benefício ao seu bom desempenho, tem levado o meio acadêmico a desenvolver pesquisas em busca de melhores resultados e otimização do processo. Santos (2013), por exemplo, mostrou ser possível unir dois processos de fabricação em apenas um, ao realizar a nitretação por descargas elétricas do aço AISI 4140.

Ao realizar a usinagem por descargas elétricas é possível adquirir, simultaneamente, maior endurecimento superficial promovido pela implantação de elementos químicos na superfície da peça usinada. Este processo é promissor, uma vez que a associação dessas duas operações pode reduzir custos no processo de fabricação de componentes que necessitem deste enriquecimento superficial e gerar melhorias na cadeia produtiva. Outro fator importante é o acabamento superficial das peças usinadas, que é essencial para a indústria, pois está diretamente ligado às diversas propriedades mecânicas, como resistência ao desgaste por deslizamento e à corrosão. Em caso de melhoria na rugosidade, que poderá, eventualmente, ser alcançada com a adição de pó abrasivo ao fluido dielétrico, haverá redução no tempo necessário para esta etapa e, conseqüentemente, menor custo e maior produtividade.

Portanto, fica evidente que o processo de nitretação por descargas elétricas possui grande potencial para a indústria e precisa ser explorado do ponto de vista científico e tecnológico como meio de ampliação dos conhecimentos na área. Explorar os aspectos tecnológicos já conhecidos, incluindo variáveis como a adição de aditivos em diferentes proporções, no caso desta pesquisa, o pó de SiC, permite um desdobramento dos conhecimentos da comunidade científica sobre o tema e possibilita o desenvolvimento de novas técnicas e metodologias do processo.

## 2. OBJETIVO GERAL

Explorar a metodologia de NDE já estabelecida para realizar a usinagem e nitretação por descargas elétricas de amostras do aço ABNT 4140, utilizando como fluido uma solução de água deionizada, ureia e pó abrasivo de SiC de 600 mesh em diferentes proporções, com o intuito de avaliar a influência da sua concentração no processo.

### 2.1. Objetivos Específicos

- Preparar as amostras de aço ABNT 4140 e submetê-las ao processo de nitretação por eletroerosão, utilizando como eletrodos ferramenta a grafita e o cobre eletrolítico e uma solução de água deionizada e ureia com adição de pó de SiC em diferentes proporções como fluido dielétrico;
- Avaliar as alterações microestruturais provenientes da nitretação por eletroerosão, através da microscopia óptica da seção transversal das amostras;
- Através das imagens de microscopia óptica, medir e quantificar a espessura das camadas nitretadas e refundidas para avaliar a influência da adição do SiC ao fluido dielétrico;
- Identificar, por meio da técnica de difração de raios X (DRX), a formação de nitretos;
- Mensurar a dureza da camada nitretada por meio de ensaios de microdureza Vickers e comparar com a dureza do material base;
- Avaliar a usinabilidade relacionando taxa de remoção de material (TRM), taxa de desgaste (TD) e desgaste volumétrico relativo (DVR) para comparar o desempenho da usinagem nas diferentes configurações de teste;
- Mensurar a rugosidade da superfície usinada por meio dos parâmetros Ra, Rq, Rt e Rz para avaliar se adição do SiC influencia no processo;

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo estão descritos os principais temas estruturais, necessários como referencial teórico, para fundamentar a elaboração do projeto de pesquisa. No primeiro tópico há uma abordagem sobre o aço ABNT 4140 e suas características, na sequência destacam-se a nitretação e usinagem por descargas elétricas, com descrições da máquina, principais características, insumos, parâmetros e fenômenos envolvidos. Posteriormente, é feita uma associação da nitretação por eletroerosão e, finalmente, uma abordagem sobre a adição de carbeto de silício (SiC) ao fluido dielétrico e sua influência no processo.

#### 3.1. O Aço ABNT 4140

As indústrias de Construção de Estruturas Metálicas e Equipamentos têm considerado o emprego do aço ABNT 4140 em projetos por questões técnicas (trabalhar em condições mais severas de esforços) e econômicas (menor peso, menor área e economicamente mais viável quando comparado com outros materiais como os aços ABNT 1010 e 1020, por exemplo). Em função das suas propriedades mecânicas, o aço ABNT 4140 é desenvolvido para atender aos mercados das indústrias automotivas, aeroespaciais e em áreas onde as solicitações mecânicas são mais exigentes. Suas características permitem sua aplicação em larga escala em diversos ramos para a fabricação de eixos, engrenagens, bielas e em peças que necessitem suportar esforços mecânicos consideráveis. Ele possui alta resistência à fadiga, à abrasão, ao impacto e boa resistência à torção (PHILIP; MCCAFFREY, 1990).

Lima (2006) afirma que o aço ABNT 4140 pode ser utilizado em aplicações de engenharia na condição “temperado e revenido” ou “normalizado, temperado e revenido”, este último quando é necessário garantir elevados níveis de tenacidade. Colombo (2012), pontua que este aço apresenta também boas combinações de propriedades, das quais, destacam-se: boa resistência mecânica, média usinabilidade por processos convencionais, baixa soldabilidade, boa ductilidade e tenacidade.

A ABNT classifica os aços segundo a NBR NM 172/2000. O aço ABNT 4140, é um aço liga cromo-molibdênio que possui em média 0,4% de carbono, de 0,8 a 1,1 % de

cromo e de 0,15 a 0,25% de molibdênio em sua composição, porcentagem, esta, em referência ao peso de cada elemento. Ele é classificado como aço para construção mecânica, ligado e especial. A combinação dos elementos de liga deste aço, faz com que suas propriedades mecânicas, tais como limite de resistência à tração e limite de escoamento, sejam superiores às dos aços carbonos comuns com teor de carbono inferior a 0,45%. A Tabela 1 mostra a composição química (% em peso) do aço ABNT 4140 de acordo com a fabricante brasileira de aços, Gerdau Açominas. A ABNT NBR NM 87/2000 designa e indica a composição química dos aços carbono e ligados para construção mecânica (ABNT, 2000).

**Tabela 1 - Composição química do aço ABNT 4140**

AÇO ABNT	Composição Química (% em peso)						
	Cr	Mn	C	Si	Mo	S máx.	P máx.
<b>4140</b>	0,80-1,10	0,75-1,00	0,38-0,43	0,15-0,35	0,15-0,25	0,04	0,03

Fonte: GERDAU, 2003. pág. 35 – (Adaptado, 2022).

Como pode ser visto na Tabela 1, este aço possui em sua composição a presença de elementos de liga fortes formadores de nitretos como o cromo e molibdênio. A adição destes dois elementos visa a obtenção de uma boa combinação de resistência mecânica e dureza com ductilidade e tenacidade. A presença destes dois elementos de liga faz com que o aço tenha uma boa resposta ao processo de nitretação mesmo que já possua boas propriedades mecânicas. A Tabela 2 lista as propriedades mecânicas do aço ABNT 4140.

**Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço ABNT 4140**

<b>Massa específica a 20°C</b>	7700 -8000 kg/m <sup>3</sup>
<b>Resistência à tração</b>	1020 MPa
<b>Limite de escoamento</b>	655 MPa
<b>Dureza Vickers</b>	228 HV

Fonte: ASM, 1998; McPHERSON, 2008. - (Adaptado, 2022).

### 3.2. Nitretação

A nitretação é um tratamento termoquímico que tem como objetivo a obtenção de aumento de dureza superficial do aço, através de reações químicas entre o metal base

e o nitrogênio. Estes elementos podem ser fornecidos por meios sólidos, líquidos e gasosos (CHIAVERINI, 2012). Este processo visa a formação de nitretos para aumentar dureza superficial da peça ou componente e, conseqüentemente, garantir maior resistência ao desgaste por deslizamento, ao atrito, à fadiga e à corrosão, características, que irão conferir maior vida útil à peça ou material (KNERR *et al.*, 2004).

Em sua pesquisa, Santos (2013), afirma que no processo de nitretação, o nitrogênio é introduzido em sua forma atômica, por difusão intersticial na rede cristalina de ligas ferrosas, em temperaturas entre 500 a 590 °C, no campo de estabilidade da ferrita. Este processo permite alterar as propriedades de dureza superficial, resistência ao desgaste e resistência à corrosão e pode ser utilizado em metais ferrosos e alumínio.

Por ser um tratamento que utiliza temperaturas relativamente baixas comparadas à de outros tratamentos térmicos, ela produz menor distorção e menor tendência de trincas e, ainda, reduz a probabilidade de empenamento das peças. Além disso, após a realização da nitretação, não é necessário realizar têmpera, pois o endurecimento obtido não ocorreu devido à formação da martensita, mas da formação de nitretos abaixo da superfície (SILVA; MEI, 2010) e (CHIAVERINI, 2012).

A nitretação iônica ou nitretação a plasma, utiliza o fenômeno de descarga de corrente contínua para introduzir o elemento químico nitrogênio na superfície das peças, para, em seguida, realizar o processo de difusão deste elemento no reticulado cristalino do metal base. O processo ocorre em uma câmara de vácuo, onde amostra é conectada a um cátodo e as paredes da câmara atuam como ânodo. Alta tensão é aplicada entre o cátodo e ânodo com o intuito de gerar um plasma em uma mistura de gases de baixa pressão, normalmente composta de N<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>. Esta tensão empregada pode ser influenciada pela geometria e dimensões do cátodo, tipos de gases e a fenda de trabalho.

O processo de nitretação ocorre pela difusão de átomos de nitrogênio da superfície em direção ao núcleo. Esta camada adquirida é consideravelmente mais dura e tem melhor resistência ao desgaste e à corrosão do que o metal base não tratado (RAMOS, 2003; SIRIN *et al.*, 2008; SKONIESKI, 2008; DÍAZ GUILLÉN *et al.*, 2013).

Santos (2013) explica que um grande campo elétrico estabelecido gera uma descarga elétrica que produz um bombardeio na superfície da peça (cátodo) de íons de nitrogênio livres no espaço da atmosfera gasosa. Cada íon que colide na peça faz gerar novos elétrons que, por sua vez, se colidem com outros íons fazendo com que se torne um processo contínuo ou colisões em cascata. Skonieski (2008) afirma que para que ocorra maior excitação e, conseqüentemente, resulte em maior ionização, é importante que essas colisões sejam do tipo inelásticas. Para Schmitz (2014), este processo ganhou notoriedade no mercado industrial em função da sua versatilidade no controle microestrutural da superfície nitretada, baixo custo de operação e adequado a legislação ambiental.

### **3.3. Usinagem por Descargas Elétricas - EDM**

A usinagem por descargas elétricas (Electrical Discharge Machining - EDM), originou-se durante a segunda guerra mundial e foi inicialmente conduzida por Boris R. Lazarenko e Natalie I. LAzarenko que, juntos, desenvolveram um circuito resistor-capacitivo (EL-HOFY,2005). Tudo ocorreu em função da designação feita pelo governo soviético ao casal, para investigar e solucionar diversos problema de desgastes produzidos nos contatos elétricos de tungstênio nos motores automotivos durante a guerra. Eles descobriram que submetendo os eletrodos mergulhados em óleo, as centelhas eram mais uniformes quando comparado a mesma operação ao ar atmosférico (PANDEY; SINGH, 2010).

O casal desenvolveu um sistema de usinagem em que o eletrodo e a peça de trabalho, conectados a resistores e capacitores carregados por corrente contínua, ficam mergulhados em um reservatório com fluido oleoso. Tal sistema ficou conhecido como circuito Lazarenko (JAMESON, 2001). Durante a guerra, as primeiras máquinas de EDM construídas foram muito úteis na usinagem de materiais com dureza elevada, como Tungstênio, por exemplo (PANDEY; SINGH, 2010). Apesar da má qualidade de componentes eletrônicos da época, que influenciava diretamente no desempenho, em 1950 iniciou-se o processo de fabricação dessas máquinas em larga escala. Na década seguinte, alguns problemas foram solucionados devido ao desenvolvimento de servo controladores, fazendo com que as novas máquinas produzidas apresentassem significativas melhorias de desempenho.

Em 1970 houve grande aprimoramento nas máquinas em função do desenvolvimento de geradores de maior capacidade, novos tipos de materiais a serem utilizados como eletrodo ferramenta e o emprego de novos materiais para fabricação dos componentes eletroeletrônicos que, por sua vez, permitiram maior eficiência das descargas elétricas e, como efeito, melhor formação do canal de plasma. Com o aumento das pesquisas e o notório desenvolvimento do processo, em 1980 as micro usinagens tornaram-se extremamente importantes, principalmente em componentes de alta dureza. Com estes avanços, as novas máquinas garantiram aumento de 20 vezes na velocidade de usinagem, o que gerou 30% de redução no custo de fabricação comparado com os modelos anteriores (PANDEY; SINGH, 2010; EL-HOFY, 2005 e ABBAS *et al.*, 2007).

A EDM apresenta diversas vantagens em relação aos processos convencionais, principalmente quando se compara materiais de alta resistência mecânica e dureza e de difícil usinabilidade. Além de permitir a usinagem de cavidades e paredes muito finas sem que sofram deformações, é possível usinar superfícies de geometrias complexas, operação difícil nos processos convencionais como torneamento, fresagem, entre outros (PANDEY; SINGH, 2010) e (EL-HOFY, 2005). Para Kobayashi (1995), o processo EDM foi o que se popularizou primeiro dentre os processos de usinagens não convencionais e Raju *et al.* (2017) citam que é o mais popular atualmente na área industrial.

Diferente dos processos convencionais de usinagem, a EDM é um processo termoelétrico. Este mecanismo emprega a energia térmica proveniente das descargas elétricas de alta frequência, produzidas entre o eletrodo e a peça imersos no fluido dielétrico, para erodir as superfícies usinadas. O espaçamento entre a peça a ser usinada e o eletrodo é denominado fenda de trabalho (*gap*). A centelha é gerada devido à uma diferença de potencial entre a peça e o eletrodo, e a energia elétrica do processo é convertida em calor e faz gerar um canal de plasma entre eles com temperaturas que variam entre 8000 a 10000 K para diferentes pulsos de corrente, resultando em aquecimento e fusão da superfície. Quando a corrente é interrompida, o canal de plasma entra em colapso e reduz rapidamente a temperatura, permitindo a circulação do fluido dielétrico para retirar e transportar partículas microscópicas de

material fundido da peça usinada e do eletrodo (ALBINSK *et al.*, 1996; EL-HOFY, 2005; RASLAN, 2015; MONDAL, 2018).

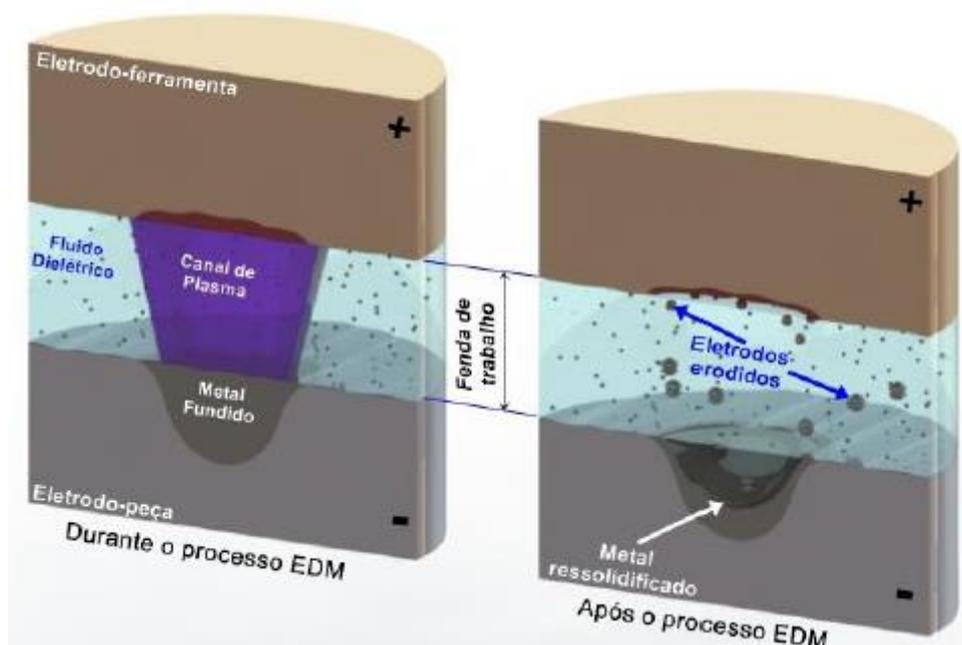
Segundo El-Hofy (2005), o controle da fenda de trabalho é fundamental para se obter êxito no processo e é através dele que ocorrem as descargas elétricas pulsantes e possibilita a realização do trabalho. Essa distância é controlada pelo servo mecanismo da máquina, que faz a aproximação do eletrodo ferramenta em relação à peça, e pode sofrer oscilações durante a operação em função dos detritos retirados que ficam flutuando no fluido na região da fenda de trabalho. McGeough (1988), afirma que uma série de pulsos elétricos de magnitude de 80 a 120 V e frequência na ordem de 5 kHz é aplicada entre os eletrodos com uma fenda de trabalho.

Ao aplicar pulsos elétricos, é formado um canal de plasma que inicia o aquecimento e fusão (e/ou vaporização) do material dos eletrodos. Ao interromper a fonte de corrente, o centelhamento, o canal de plasma colapsa e ocorre uma redução abrupta da temperatura (HO, 2003). Com isso, parte do material fundido na forma de detritos, se desprende em partículas microscópicas e são removidos pela circulação do fluido dielétrico e uma outra parte solidifica novamente na peça (KUNIEDA *et al.*, 2005).

O fenômeno das descargas de corrente elétrica no processo EDM pode ser melhor esclarecido através da Figura 1. Observa-se, de forma esquemática, a formação do canal de plasma entre o eletrodo ferramenta e a peça, ambos submergidos ao fluido dielétrico. Após o processo EDM, com a interrupção do canal de plasma, ocorre a erosão de micropartículas tanto do eletrodo peça, como também do eletrodo ferramenta, que são arrastados pela ação do fluido dielétrico sobre a região fundida.

Por se tratar de um processo térmico de remoção de material, modificações na sua composição química podem ser evidenciadas nas camadas superficiais. Como o material fundido no processo de usinagem não é totalmente retirado pelo fluido dielétrico, parte acaba ressolidificando novamente na peça e esta região é chamada de zona ou camada refundida.

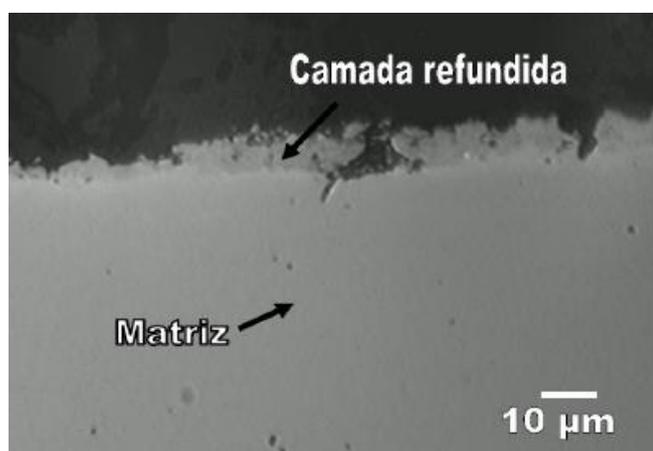
**Figura 1 - Representação esquemática de funcionamento do processo EDM**



Fonte: Barbalho, 2020.

As mudanças químicas ocorrem devido às interações químicas do fluido dielétrico e do próprio material do eletrodo ferramenta e, também, devido à rápida solidificação (SANTOS, 2013). Segundo McGeough (1988), a taxa de remoção de material é muito baixa quando comparada com processos de usinagens convencionais, pois, cerca de 85% do material erodido volta a se depositar superficialmente à peça e forma a camada refundida, dura e frágil. A Figura 2 mostra um exemplo de realização do processo EDM que evidencia a formação da camada refundida.

**Figura 2 - Representação da camada refundida formada no processo EDM**



Fonte: Camargo *et al.*, 2009.

### 3.3.1. Fenômenos (fases do processo)

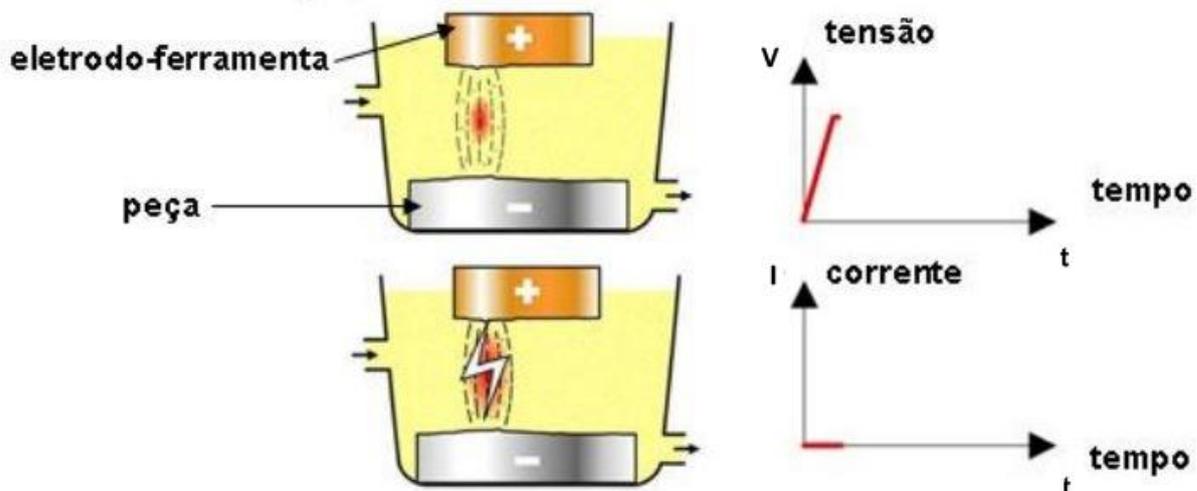
Por serem diversos, não há uma única teoria que aborde e esclareça todos os fenômenos decorrentes das descargas elétricas que geram o canal de plasma para a usinagem por eletroerosão. No entanto, segundo Klocke *et al.* (2004) apud Silva (2012), a teoria mais aceita pelos cientistas é a termoelétrica. Ela descreve que o calor gerado é alto suficientemente para promover a fusão e sublimação de pequenas quantidades do material. Este é retirado no movimento de retorno do fluido dielétrico, quando ocorre o colapso do canal de plasma e, por consequência, forma na superfície da peça uma pequena cratera com o material fundido.

Essa teoria é dividida em quatro etapas principais, sendo elas: fase de ignição, formação do canal de plasma, fusão e sublimação de pequenas partículas de material e, por último, a ejeção do material líquido. Este ciclo, compreendido entre eletrodo ferramenta e peça submersos no fluido dielétrico, ocorre de forma consecutiva (KAHNG, 1977; AMORIM, 2002).

**Fase de ignição:** Nesta fase inicial, ocorre uma aplicação de tensão que varia de 60 a 300 V entre o eletrodo ferramenta e a peça, submersos no fluido dielétrico. O eletrodo ferramenta fica a uma distância em torno de 0,05 a 1,0 mm da peça. Embora, eles estejam tão próximos, não há fluxo de corrente, já que o fluido dielétrico cria certa resistência. O servomecanismo da máquina faz com que o eletrodo ferramenta se aproxime da peça até chegar à distância de trabalho, gerando aumento do campo elétrico.

Nos picos de rugosidade, locais onde a variação da tensão é maior, ocorrem as primeiras emissões de elétrons pelo cátodo. Estes elétrons são atraídos e acelerados pelo campo magnético em relação ao ânodo, como pode ser notado na Figura 3. Em seu caminho, do eletrodo ferramenta à peça, os elétrons chocam-se com moléculas do fluido dielétrico, fazendo com que os átomos do fluido se separem em íons positivos e negativos. Este primeiro fluxo de corrente favorece a liberação de mais elétrons e, juntamente com os íons positivos que se chocam com o cátodo, dá início ao fenômeno de ionização por impacto (AMORIM,2002). A Figura 3 mostra o comportamento da tensão e corrente nesta fase do processo.

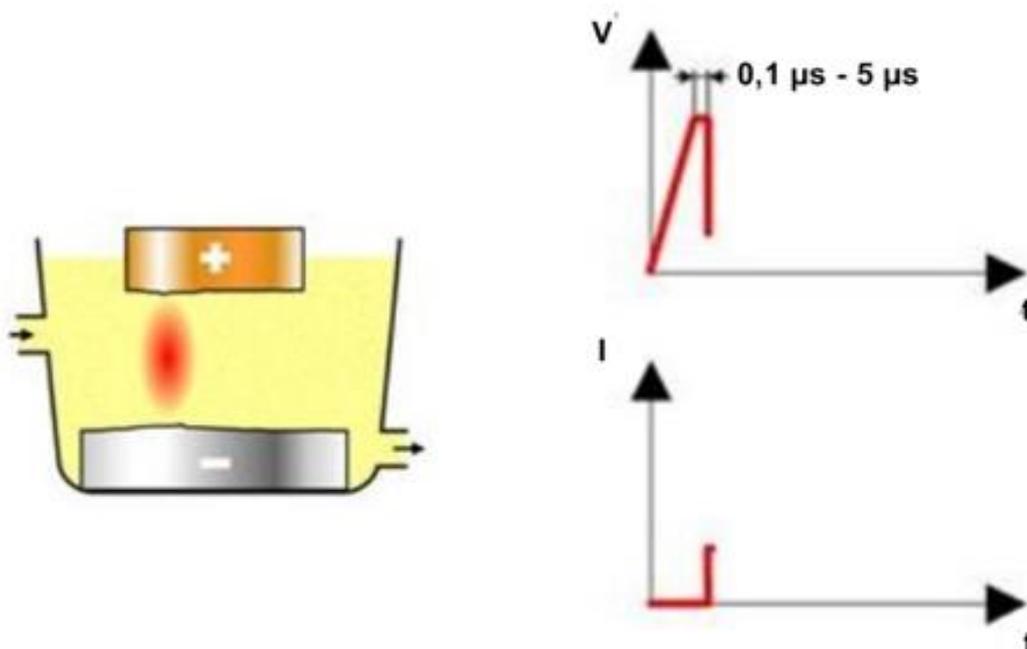
Figura 3 - Representação esquemática da fase de ignição da centelha



Fonte: Lima, 2008.

**Formação do canal de Plasma:** Segundo Stevens (1988) e Amorin (2002), após o início da ionização por impacto, este fenômeno se multiplica rapidamente através de uma reação em cadeia e gera um superaquecimento e evaporação de uma pequena quantidade do fluido dielétrico. Isso faz com que haja um decréscimo na resistência elétrica do fluido e aumento de corrente dando início à formação do canal de plasma, como ilustra a Figura 4.

Figura 4 - Representação esquemática da formação do canal de plasma

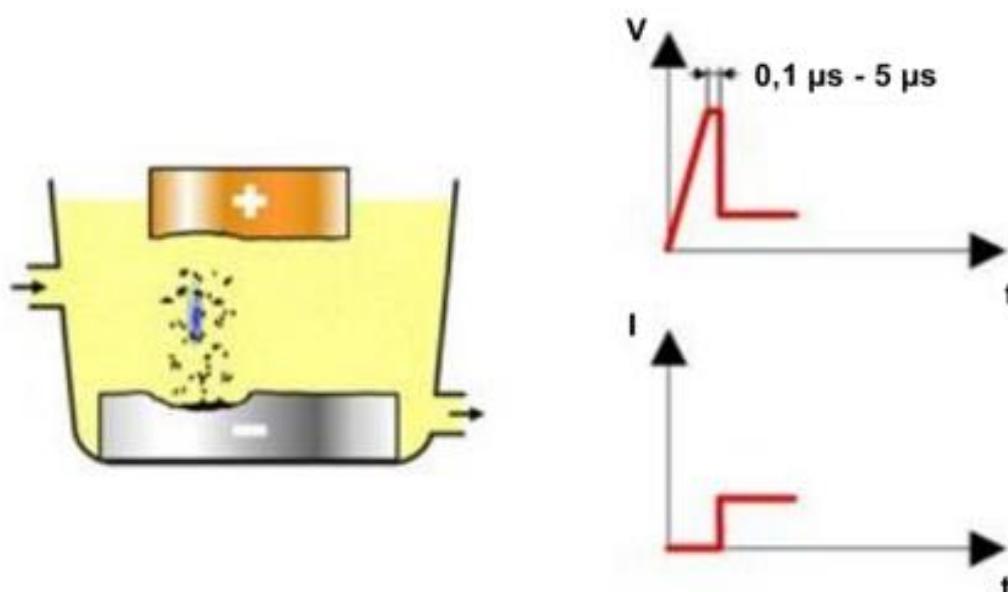


Fonte: Lima, 2008.

No momento de início à formação do canal de plasma, observa-se um decréscimo da tensão e intensificação do fluxo de elétrons com a formação dos túneis transportadores de energia elétrica. Tanto o tempo de duração do canal de plasma como a valor máximo da corrente elétrica, são previamente determinados pelo operador. A formação do canal de plasma pode ser conhecida como colapso da tensão em aberto, pois ocorre um decréscimo abrupto para a tensão de ruptura do fluido dielétrico, a qual depende do material de fabricação do eletrodo ferramenta e da peça usinada (AMORIM, 2002) e (SANTOS, 2013).

**Fusão e sublimação de pequenas partículas de material:** O servomecanismo da máquina EDM tem a função de controlar e manter equilibrada a amplitude da fenda de trabalho, a qual depende do nível de energia da corrente de descarga, para evitar situações indesejadas no processo. A energia gerada no processo, que ocorre em função da transformação da elevada energia cinética dos elétrons e íons que se colidem com o ânodo e cátodo em calor, é suficiente para fundir, por condução térmica, pequenas partículas de material de ambos os eletrodos (AMORIM, 2002). A Figura 5 ilustra o processo de erosão das partículas e o comportamento da tensão e corrente ao longo do processo.

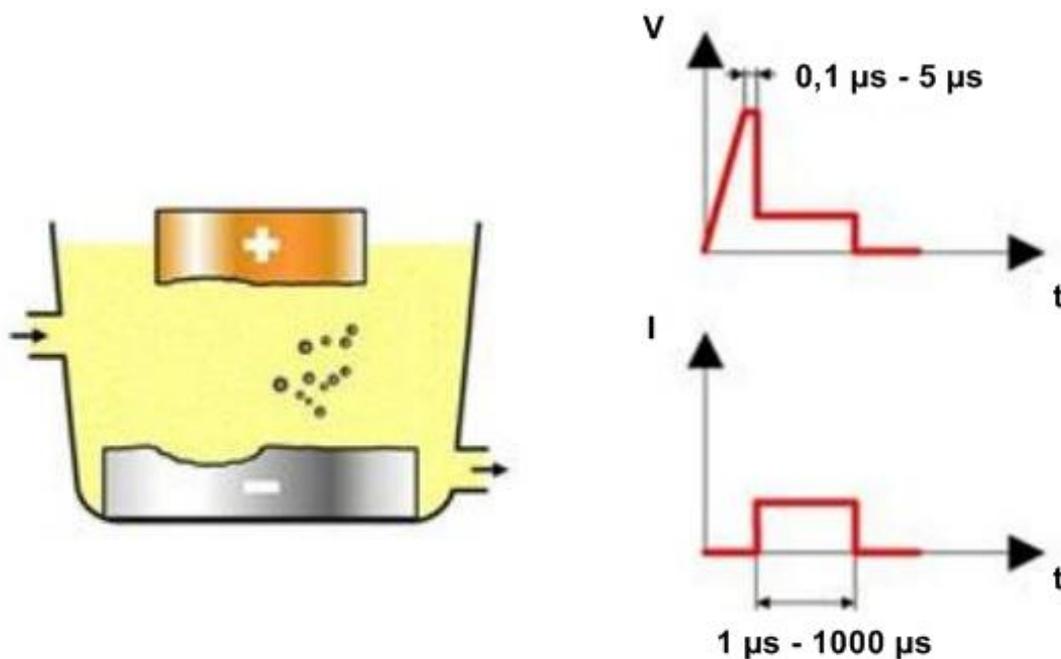
**Figura 5 - Representação da fusão de pequenas partículas dos eletrodos ferramenta e peça**



Para Stevens (1998) e McGeough (1988), quanto maior a quantidade de elétrons e íons gerados em função da intensidade das descargas e do seu tempo de duração, maiores serão as colisões e, por consequência, maior será a geração de calor, resultando em maiores quantidades de partículas erodidas das superfícies dos eletrodos peça e ferramenta.

**Ejeção de material:** O canal de plasma é extinguido após atingir o tempo ajustado pelo operador no painel de controle da máquina. Sua dissipação ocorre em função do interrompimento da corrente elétrica bruscamente, como pode ser visto de forma esquemática e graficamente na Figura 6. Como consequência, a pressão cai, permitindo o fluxo de fluido dielétrico sobre as superfícies. Isso faz com que ocorra evaporação das micropartículas fundidas do metal e a ejeção de gotas líquidas da poça fundida, caracterizando o processo EDM (STEVENS,1998; MCGEOUGH,1988). A Figura 6 mostra o comportamento da tensão nesta última fase do processo.

**Figura 6 - Representação esquemática da ejeção do material durante EDM**



Fonte: Lima, 2008.

### 3.3.2. Parâmetros de usinagem no processo EDM

Para que se tenha êxito no processo EDM, é necessário selecionar os parâmetros de forma adequada. Eles podem ser imputados e/ou modificados através do painel de comando. Qualidade, eficiência e melhor desempenho da usinagem estão atrelados à combinação correta destes parâmetros. É necessário ajustar corretamente a tensão, polaridade, corrente elétrica, regime de trabalho, tempo de duração dos pulsos, tempo entre os pulsos, frequência das descargas elétricas e fenda de trabalho (BENEDICT, 1987; MC GEOUGH, 1998). Em sua pesquisa, Santos (2013) mostra que os parâmetros a serem ajustados são de grande importância no processo. A corrente de descarga, por exemplo, influencia na qualidade e no rendimento da operação. Sua seleção depende da rugosidade esperada, do máximo desgaste do eletrodo, da velocidade de usinagem, condições da fenda de trabalho e da área de contato eletrodo/peça. Frente aos principais parâmetros, destacam-se:

**Tensão (V):** A tensão em aberto aumenta até a criação do caminho de ionização, a partir daí, ela decai para a tensão média de trabalho. Segundo Kumar *et al.* (2009), ela se relaciona com a faísca e a resistência à ruptura do fluido. A tensão tem influência direta na largura da faísca.

**Polaridade:** a direção do fluxo de elétrons é determinada pela polaridade pré definida. Quando o eletrodo ferramenta está conectado ao polo negativo, os íons positivos são atraídos para ele e o fluxo de elétrons bombardeia a peça. O contrário ocorre quando inverte a polaridade. Para Guitrau (1997), a polaridade pode afetar o desgaste do eletrodo ferramenta, a velocidade de usinagem e a estabilidade do processo. Na maioria dos casos, para evitar desgastes prematuros, utiliza-se o eletrodo ferramenta conectado ao polo positivo.

**Corrente (i):** De acordo com Kumar *et al.* (2009), a corrente é um dos parâmetros mais importantes do processo EDM, já que ela está associada à produtividade. Storr (2007), também cita que o processo quando feito em correntes mais altas, têm-se maior produtividade, porém, com pior acabamento. Ao contrário, quando se tem uma corrente mais baixa, apesar de o processo ser mais lento, pode-se obter melhores acabamentos.

**Tempo de duração dos pulsos (Ton):** O parâmetro (Ton) é a duração do tempo em que a corrente é transmitida entre os eletrodos. Como na EDM a remoção de material ocorre por fusão e vaporização do material, a duração do pulso é proporcional ao material fundido e/ou vaporizado. Logo, para tempos mais longo a cratera será maior, quando comparado com tempos mais curtos (MOHAN; RAJADURAI; SATYANARAYANA, 2004). Cruz Jr (2015) mostra em seu trabalho que quanto maior a duração do pulso, maior a quantidade de material fundido e/ou vaporizado.

**Tempo entre os pulsos (Toff):** O parâmetro (Toff) é o tempo em que não ocorre o centelhamento, ou seja, não ocorre usinagem. Conforme Benedict (1987), este intervalo de tempo deve ser suficiente para que as micropartículas que foram arrancadas do material pela descarga elétrica sejam deslocadas para fora da fenda de trabalho. Ambos os parâmetros são medidos em microssegundos ( $\mu$ s).

### 3.3.3. Desempenho do processo EDM

Os principais parâmetros de desempenho da EDM geralmente mensurados para critério de avaliação do processo são a Taxa de Remoção de Material (TRM), a Taxa de Degaste do Eletrodo Ferramenta (TD) e a Relação de Degaste entre os Eletrodos, conhecida como Degaste volumétrico Relativo (DVR) (CRUZ, 1993).

A TRM representa a quantidade de material retirado da peça em um determinado tempo durante a usinagem. A depender da operação a ser realizada de desbaste ou acabamento, pode-se obter diferentes valores de taxas de remoção. É possível potencializar os valores de TRM quando não houver a necessidade de pequenas rugosidades. Para que este parâmetro seja mensurado, é necessário ter conhecimento da variação da massa da peça no processo. Essa variação pode ser obtida através da equação (1):

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

Onde,

$\Delta m$  = Variação da massa da peça, [g];

$m_i$  = massa inicial [g];

$m_f$  = massa final [g];

Com a variação da massa mensurada e o tempo de usinagem devidamente registrado e a massa específica do material da peça usinada referenciada pelo fabricante do material, é possível quantificar a TRM. Ela é expressa em  $\text{mm}^3/\text{min}$  e pode ser calculada através da equação (2).

$$TRM = \frac{\Delta m}{\rho \cdot t} \quad (2)$$

Onde:

$\Delta m$  = Variação da massa da peça, [g];

$\rho$  = massa específica do material, [ $\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$ ];

$t$  = tempo da usinagem, [min].

A TD representa o volume de material do eletrodo ferramenta perdido durante a usinagem em um determinado tempo e também é expressa em  $\text{mm}^3/\text{min}$ . Como não se deseja desgastar a ferramenta de trabalho, assim como em outros processos de usinagem, menores valores de TD representa que o processo está em boa performance. Para quantificar a TD, a equação (3) é aplicada.

$$TD = \frac{\Delta m}{\rho \cdot t} \quad (3)$$

Onde:

$\Delta m$  = Variação da massa do eletrodo, [g];

$\rho$  = massa específica do material, [ $\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$ ];

$t$  = tempo da usinagem, [min].

E, por último, o DVR relaciona o volume de material perdido pelo eletrodo ferramenta em relação ao volume de material removido da peça. Esse parâmetro é composto pela razão entre TD e TRM em percentual e a equação que o representa é a (4).

$$DVR = \frac{TD}{TRM} \cdot 100 \quad (4)$$

Onde,

DVR = Desgaste volumétrico relativo (%);

TD = Taxa de desgaste do eletrodo ferramenta ( $\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ );

TRM = Taxa de remoção do material ( $\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ).

Quanto menor o DVR, melhor o desempenho operacional, ou seja, ocorre maior remoção de material da peça usinada com pouco desgaste do eletrodo ferramenta.

### **3.3.4. Materiais para eletrodo ferramenta no processo EDM**

Existem diversos materiais que podem ser utilizados como eletrodo ferramentas como, por exemplo, o latão, carboneto de tungstênio, cobre eletrolítico, liga de cobre tungstênio, liga de prata tungstênio, liga de cobre telúrio, outras ligas de cobre, grafita, etc. Para usinar aços e suas ligas, geralmente utiliza-se o eletrodo de grafita (MÜLLER, 2015).

Segundo McGeough (1988), a escolha do material do eletrodo ferramenta será influenciada pelas dimensões, pelo tipo de máquina, requisitos da peça e pelos métodos de fabricação. O material selecionado deve possuir boa condutividade elétrica e alto ponto de fusão. Além disso, devem possuir boa usinabilidade e baixo custo comercial. Segundo Benedict (1987), os parâmetros que estão associados diretamente às características dos eletrodos no processo são: as formas geométricas, o ponto de fusão e a microestrutura.

Devido à sua boa usinabilidade e baixo desgaste, o eletrodo de grafita é o mais utilizado como eletrodo ferramenta no processo EDM. Ele pode ser facilmente encontrado no mercado em diversos formatos e tamanhos. O cobre também é amplamente utilizado no processo devido ao seu bom desempenho e boa condutividade. Na prática, qualquer operação de EDM realizada com grafita pode ser realizada com cobre com resultados semelhantes. (MECGEOUGH,1988; FULLER,1989).

Guitrau (1997) mostra em seus estudos que a seleção do material do eletrodo depende não somente do custo de fabricação e sua matéria prima, mas também da

taxa de remoção do material, de sua resistência ao desgaste no processo e do acabamento que ele é capaz de produzir na peça usinada. Embora o cobre seja mais suscetível a danos térmicos quando comparado com a grafita, em operações de acabamento, por exemplo, ele é o preferido já que é mais denso que a grafita. No entanto, em operações com o uso do eletrodo de grafita, poderá gerar um aumento das partículas de impureza no fluido dielétrico e, eventualmente, causar irregularidades na superfície da peça usinada (LIMA E CORRÊA, 2006). Vale ressaltar que em operações de acabamento o calor gerado é menor, o que justifica o uso do eletrodo de cobre.

Para Jha, Ram e Rao (2011), apesar de o cobre apresentar maiores valores de condutividade elétrica e térmica, a grafita tolera maior calor proveniente do canal de plasma, podendo apresentar menores taxas de desgastes e assim atuar com maiores taxas de remoção do material em operações de desbastes. Silva *et al.* (2016) concluíram que o desempenho do eletrodo de grafita na usinagem por EDM de uma liga de titânio foi superior ao do eletrodo de cobre. Murta *et al.* (2017) demonstraram maior DVR quando se utiliza eletrodo de grafita na usinagem EDM, comparado o mesmo processo com eletrodo de cobre.

Embora os eletrodos mais empregados no processo EDM sejam fabricados em cobre eletrolítico e grafita, todo material que conduza eletricidade pode ser utilizado. Mendonça *et al.* (2006) em seus estudos, mostraram que existe uma razoável viabilidade técnica e econômica ao empregar eletrodos ferramenta de latão e bronze no processo. Os eletrodos apresentaram boa usinabilidade e bom acabamento superficial, porém, a TRM e a rugosidade foram inferiores quando comparado com o cobre eletrolítico.

### **3.3.5. Fluidos dielétricos do processo EDM**

O fluido dielétrico deve possuir algumas características específicas para que o processo EDM seja corretamente realizado e apresente boa performance. McGeough (1988), afirma que ele deve possuir alta rigidez elétrica, baixa viscosidade, capacidade para refrigerar e obter rápida deionização. Com alta rigidez ele não conduzirá a corrente elétrica antes da tensão atingir o valor especificado, resultando maior

precisão da usinagem por permitir maior aproximação do eletrodo ferramenta à superfície a ser usinada. Ao deionizar rapidamente após a descarga elétrica, facilitará a ionização do meio para a formação do canal de forma mais rápida evitando, conseqüentemente, a formação de curtos circuitos. Sua baixa viscosidade aliada à capacidade de refrigeração, permite uma retirada mais eficiente das micropartículas erodidas da cratera após a interrupção do canal de plasma.

Fredriksson e Hogmark (1995) citam que os fluidos dielétricos devem ser líquidos, pois um fluido gasoso não cumpriria a função de remover o material usinado por descargas elétricas, já que a baixa pressão do canal de plasma apenas fundiria o material sem ocorrer a ejeção e remoção das micropartículas da poça de fusão.

De acordo com Leão e Pashby (2004), a EDM tornou-se um relevante e vantajoso processo após a descoberta da relevância do fluido dielétrico, que possui papel fundamental na operação e afeta fatores como produtividade e qualidade da usinagem. Guitrau (1997) afirma que os parâmetros operacionais do processo EDM possuem relação próxima com as características do fluido dielétrico. Lima (2009) cita que a remoção do material no processo EDM é feita sob um líquido não condutor de eletricidade, ao qual é denominado dielétrico.

Por possuírem diferentes composições, sua correta seleção é extremamente importante no processo. Eles devem ser selecionados e aplicados de forma a manter o máximo desempenho e controle das descargas elétricas (CHAKRABORTY *et al.*, 2015). El-hofy (2005), cita que as principais características a serem observadas na seleção do fluido dielétrico são a viscosidade adequada a cada aplicação, ponto de inflamação elevado, boa estabilidade à oxidação, baixo custo e boa eficiência em descargas elétricas.

Suas principais funções segundo Lima (2009) e Chakraborty *et al.* (2015) são:

- I. É por meio dele que ocorrem as descargas elétricas controladas;
- II. Atuar como meio de resfriamento para solidificar partes fundidas dos eletrodos oriundas das descargas elétricas;
- III. Remover material sólido da fenda de trabalho para o sistema de filtragem;
- IV. Transferir e transportar calor gerado pelas descargas elétricas.

Os fluidos devem possuir baixa condutividade térmica e alto calor específico para que tenham maior capacidade de absorção de energia sem que ocorra elevação da temperatura. Isso resulta em uma menor camada refundida na superfície e menor alteração na estrutura da peça usinada.

Existem diferentes tipos de fluidos dielétricos para o processo EDM. O processo por penetração, por exemplo, opera com hidrocarboneto enquanto a eletroerosão a fio com água deionizada. Os fluidos dielétricos podem ser querosene, óleos minerais, água deionizada ou soluções aquosas (FULLER, 1989; ARANTES, 2001) e óleos vegetais (LIMA e RASLAN, 2009).

Muitas pesquisas têm sido realizadas com a finalidade de substituir óleos minerais por soluções aquosas como fluido dielétrico no processo EDM. Isso se justifica pelo fato de substituir os produtos que, em muitos casos, são tóxicos e esgotáveis (origem petróleo) por soluções aquosas com ou sem aditivos.

Segundo Chakraborty, Dey e Ghoshb (2015) estudos foram realizados tendo como variante o fluido dielétrico. Resultados satisfatórios foram alcançados utilizando água pura e água destilada. Foi evidenciado melhor taxa de remoção de material, e melhor acabamento superficial.

Do ponto de vista ambiental, Leão (2004), afirma que uma das principais fontes de poluição na EDM é o fluido dielétrico, principalmente se tratando de óleos de hidrocarbonetos. O uso de dielétricos a base de água é, portanto, uma alternativa para minimizar os problemas ambientais e os efeitos nocivos à saúde humana.

### **3.4. Nitretação por Descargas Elétricas - NDE**

Yan *et al.* (2005), concluíram em seus estudos ser possível realizar a nitretação através de descargas elétricas. Eles mostraram que, ao realizar a usinagem por descargas elétricas em uma peça de titânio, parte do nitrogênio presente no fluido dielétrico, oriundo da ureia diluída em água destilada, migrou para a superfície do substrato (Ti) formando um composto extremamente duro, o nitreto de titânio (TiN). Eles notaram que houve uma melhora da resistência ao desgaste da superfície

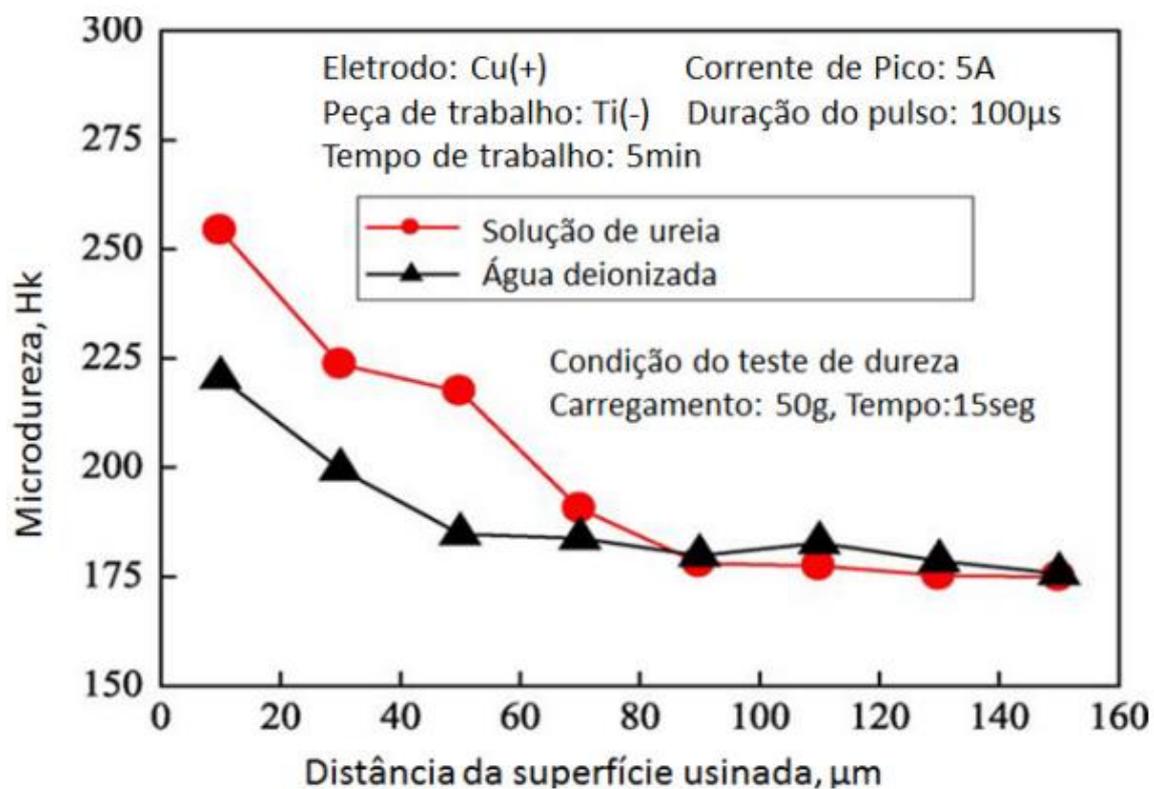
usinada quando comparada com o material base e concluíram que este ganho se deu em função da formação dos nitretos na superfície.

Embora sejam recentes, pesquisas nesta linha mostraram que a técnica pode se tornar uma excelente alternativa do ponto de vista técnico e econômico, já que, posterior ao processo de EDM, é necessário submeter as peças em novos procedimentos para melhorar a dureza e até mesmo o acabamento superficial, quando exigido em projeto. A nitretação por descargas elétricas é, basicamente, uma fusão de dois processos em um, ou seja, ao mesmo tempo em que é feita a usinagem, realiza-se tratamento de nitretação para melhorar a dureza superficial, proporcionando redução no tempo de produção, já que quando necessário, as peças usinadas por EDM precisam, eventualmente, serem submetidas a tratamentos superficiais (CAMARGO *et al.*, 2009). Neste sentido, muitos estudos tem sido realizados por diversos pesquisadores a fim de investigar as modificações superficiais inerentes ao processo de nitretação por descargas elétricas.

A utilização da uréia diluída ao fluido dielétrico proporciona um meio rico em nitrogênio e permite que íons deste elemento, migrem para a superfície da peça, tendo, portanto, grande influência no resultado final. Yan *et al.* (2005) realizaram EDM do titânio comercialmente puro, tendo como variação dois tipos de fluidos diferentes: um composto por água destilada e o outro composto por uma solução de água destilada e ureia. Eles concluíram que os maiores valores de microdureza foram obtidos no processo EDM utilizando a solução contendo ureia como fluido dielétrico, uma vez que foram encontrados maiores valores de microdureza quando se utilizou esta solução como fluido dielétrico. Este comparativo pode ser melhor compreendido através da Figura 7.

Camargo *et al.* (2009), também analisaram a EDM por penetração de uma liga de titânio utilizando ureia na concentração de  $10 \text{ g.L}^{-1}$  diluída em água deionizada. Através de seus estudos, eles evidenciaram a formação de nitretos em ligas Ti6Al4V e comprovaram a viabilidade técnica de enriquecer e elevar a dureza superficial das peças submetidas ao processo.

**Figura 7 – Avaliação de Microdureza Hk com água destilada e solução de ureia como fluidos dielétricos**



Fonte: Yan *et al.* (2005).

Em sua pesquisa, Santos *et al.* (2016), avaliaram a influência da ureia no processo de nitretação por descargas elétricas do aço AISI 4140. Seus estudos mostraram que a variação do teor de ureia impacta na capacidade dielétrica do fluido e ocorre mudança notável na cinética da formação do plasma. Além disso, o nitrogênio decomposto do fluido dielétrico proveniente da ureia, migrou para a peça de trabalho formando uma camada rígida de nitretos, conferindo maior resistência ao desgaste na superfície.

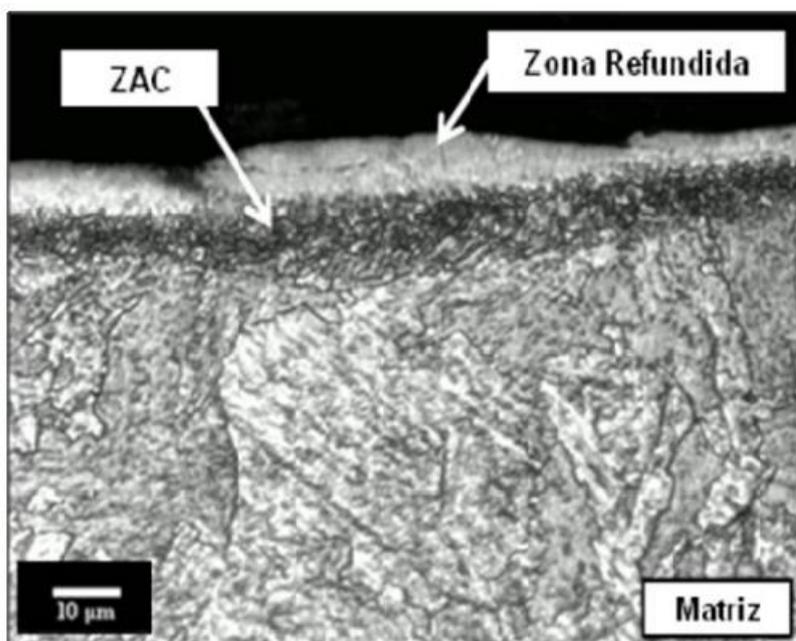
A ureia é uma substância cristalina incolor que se funde a 132 °C e se decompõe antes da ebulição. Ela pode ser utilizada como adubo, suplemento alimentar para animais, material de partida para a fabricação de plásticos e alguns produtos cosméticos. Possui grande importância na agricultura, em função da sua alta concentração de nitrogênio (BRITANNICA ACADEMIC, 2017). A Tabela 3 apresenta sua composição química.

**Tabela 3 - 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: Guimarães Jr, 2016 (Adaptado, 2022).

Santos (2013), evidenciou a formação de nitretos na superfície do aço AISI 4140 usinado por descargas elétricas. A Figura 8 ilustra uma imagem de microscopia óptica da seção transversal do aço AISI 4140, usinado pelo processo EDM, com solução de água deionizada e ureia obtida em seus estudos.

**Figura 8 - Imagem de microscopia óptica do aço AISI 4140 usinado por EDM**

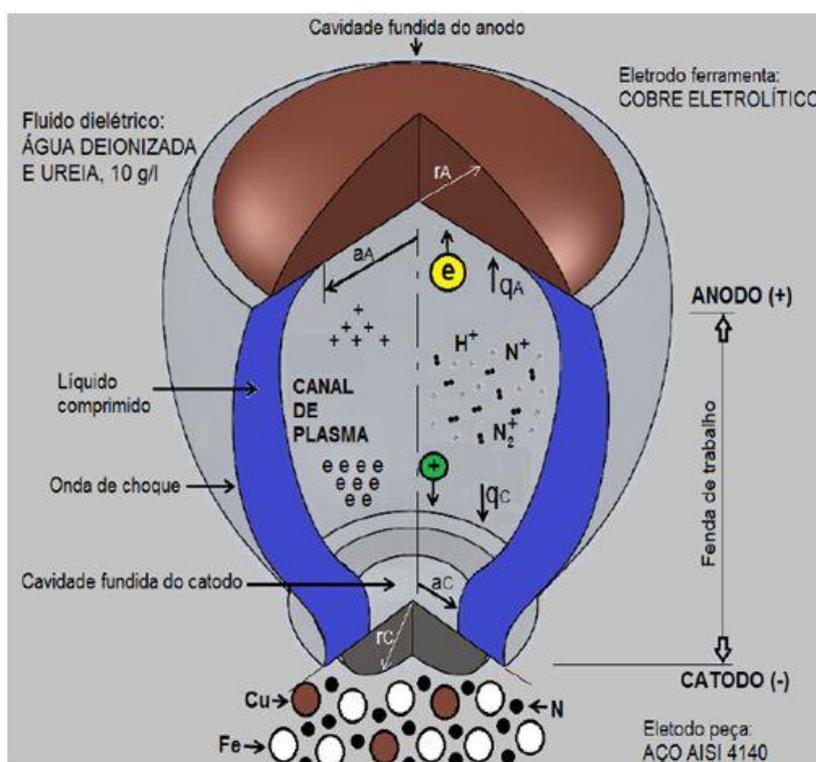
Fonte: Santos, (2013).

Através desta imagem é possível identificar a camada refundida e uma região mais abaixo, onde ocorreram as alterações microestruturais e de cor ligeiramente mais

escura, a qual denominou-se camada intermediária. Os resultados encontrados em sua pesquisa coincidem com os obtidos por Lim *et al.* (1991).

Segundo Santos (2013), o nitrogênio, como elemento principal, originou-se da adição da ureia diluída em água deionizada, formando um fluido dielétrico rico em íons de nitrogênio. Em suas análises, ele mostrou que os íons de nitrogênio penetraram entre 20 a 25  $\mu\text{m}$  no substrato e que esta concentração decai de acordo com a profundidade, mantendo os mesmos tipos de nitretos formados. Além disso, ele sugere que, apesar do processo ocorrer em temperaturas elevadas, o tempo é muito curto para que ocorra uma zona de difusão do nitrogênio. Em suas análises, ele mostra que a inserção deste elemento no substrato, ocorre por implantação iônica e não por difusão. Para melhor explicar o processo, um modelo foi proposto e pode ser melhor compreendido através da Figura 9.

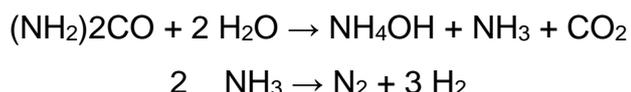
**Figura 9 - Modelo 3D em corte proposto para o canal de plasma no processo de nitretação por descargas elétricas**



Fonte: Santos, 2013.

A Figura 09 mostra a geometria do canal de plasma em corte para ilustrar o que ocorre internamente. Na fase de ignição, há um grande fluxo de elétrons, motivados pelo

campo elétrico, em direção ao ânodo e acabam colidindo com moléculas do fluido dielétrico, enquanto os íons positivos se direcionam ao cátodo. Este processo caracteriza o fenômeno de ionização por impacto. Essa movimentação causa ruptura do fluido dielétrico e gera NH<sub>3</sub> e CO<sub>2</sub> gasosos. Ocorre uma decomposição do NH<sub>3</sub> em N<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>, conforme as reações:



Uma vez que o N<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> irão se difundir no canal de plasma na forma de íons, como N<sub>+2</sub>, N<sub>+</sub> e H<sub>+2</sub> e, por serem positivos, serão impulsionados para a superfície do eletrodo peça (cátodo) e, pela alta energia cinética que adquirem, implantam-se no interior da mesma (SANTOS, 2013).

Raslan (2015) observou que o processo de usinagem e nitretação por descargas elétricas do aço AISI 4140, produziu um ganho significativo de resistência mecânica na camada intermediária, resultando em maior resistência ao desgaste por deslizamento. Mais tarde, Nicésio *et al.* (2016), buscaram entender a influência do tipo de ureia diluída ao fluido dielétrico no processo de nitretação por descargas elétricas. Para isso, realizaram experimentos utilizando três diferentes tipos: a ureia fertilizante, a farmacológica e a de padrão analítico. Eles constataram que a pureza da ureia influencia diretamente na espessura da camada nitretada e em suas durezas, já que eles produziram camadas mais espessas e com maior dureza ao utilizar ureia mais pura, a de padrão analítico.

Mais adiante, Lima *et al.* (2018), também realizaram estudos do processo de nitretação por descargas elétricas. Amostras do aço AISI 4340 foram usinadas, utilizando eletrodos ferramenta de grafita e cobre eletrolítico. Ao utilizar o eletrodo de grafita, perceberam maiores taxas de remoção de material (TRM) e maiores espessuras de camada nitretada. Por outro lado, ao utilizar eletrodo de cobre, obtiveram maiores durezas.

Santos *et al.* (2019), realizou a nitretação por descargas elétricas na liga titânio, utilizando uma solução aquosa de ureia com adição de carbeto de silício (SiC) como

fluido dielétrico. Eles constataram que a adição deste pó abrasivo teve influência no processo e permitiu alcançar uma espessura média de 104  $\mu\text{m}$  de camada nitretada. Além disso, foi evidenciado uma redução da rugosidade das amostras em torno de 31% comparado com o mesmo processo sem a utilização do SiC e aumento de dureza na ordem de 52% em relação ao substrato. Esta pesquisa mostrou, portanto, que o emprego do pó abrasivo adicionado ao fluido dielétrico teve resultados positivos e sinaliza uma viabilidade técnica e econômica do processo.

Recentemente, Barbalho (2021) realizou a nitretação por EDM do aço AISI 4140 utilizando como fluido dielétrico uma solução de água deionizada com ureia e adição de pós abrasivos de carbeto de silício em diferentes granulometrias. Ele aponta que as durezas superficiais da camada aumentam consideravelmente com a realização do processo. Quando o processo foi realizado com eletrodo de grafita e com adição de SiC com granulometria de 1500 mesh, o ganho de dureza em relação ao substrato foi em torno de 125% e com o eletrodo de cobre eletrolítico com adição de SiC com granulometria de 2500 mesh, chegou a 139%.

### **3.5. Adição de Pós Abrasivos no Processo EDM**

Com base no grande potencial que o processo EDM oferece, diversas pesquisas neste ramo têm sido realizadas, o que tornou incessante a busca por inovação tecnológica para se obter melhores desempenhos a um baixo custo. Uma variável importante no processo é o fluido dielétrico que, além de possuir diversas composições, pode receber aditivos para melhorar a performance da operação, conferindo melhores resultados. Um exemplo é a adição de pós abrasivos. A ideia de adicionar pós abrasivos ao fluido dielétrico iniciou-se na década de 1980, com a expectativa de alcançar maiores taxas de remoção de material e melhor desempenho operacional por EDM (RAJU *et al.*, 2017).

Jeswani (1981), adicionou pó de grafita ao querosene para atuar como fluido dielétrico no processo de usinagem por descargas elétricas de uma liga ferrosa de baixo teor de carbono. Utilizando o cobre como eletrodo ferramenta, constatou em sua pesquisa, um aumento de 60% na taxa de remoção de material quando adicionado o pó abrasivo ao fluido dielétrico. Segundo Singh e Bhardwaj (2011), Jeswani foi o pioneiro a realizar

o processo EDM misto em pó, o qual recebeu o nome de PMEDM – *Powder Mixed Electrical Discharge Machine*.

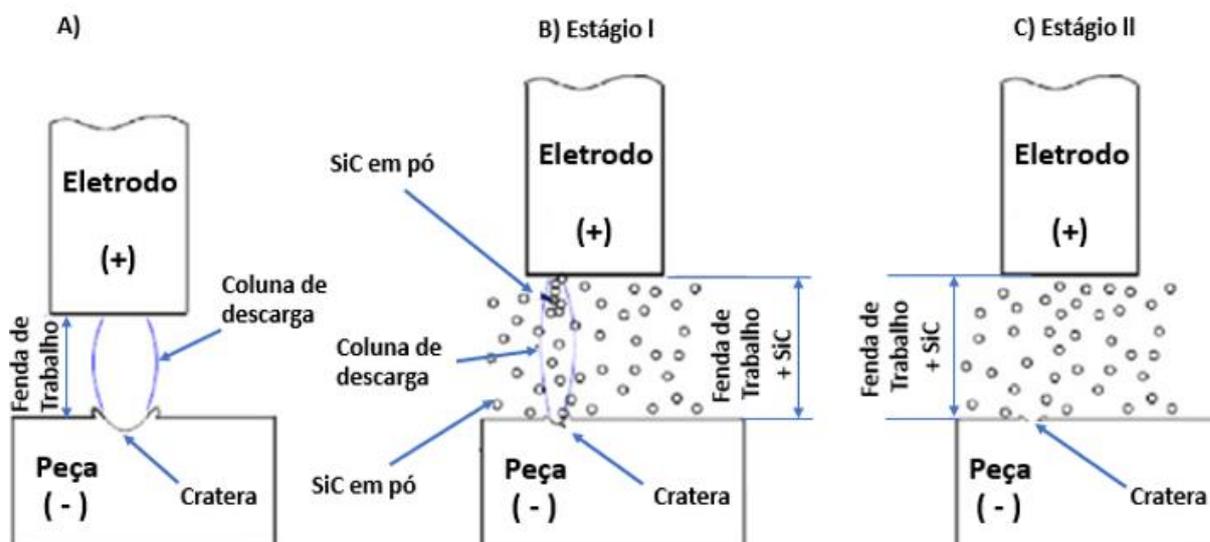
Em seus estudos, Fernandes *et al.* (1999), fizeram a aplicação do abrasivo carbetto de silício ao querosene como fluido dielétrico e compararam os resultados encontrados com o mesmo processo sem a aplicação do abrasivo na usinagem do aço ABNT M2. Eles demonstraram um aumento em torno de 120% na TRM quando utilizado o abrasivo, mas não identificaram diferenças expressivas nos valores de rugosidade nas duas configurações analisadas.

Mais tarde, Peças e Henriques (2003), investigaram o comportamento da EDM, empregando pó de silício misturado em óleo como fluido dielétrico, na concentração de  $2 \text{ g.L}^{-1}$ . Eles evidenciaram influência positiva na diminuição da rugosidade e concluíram que para que se tenha boa eficiência na taxa de remoção de material, é necessário selecionar adequadamente o pó abrasivo utilizado no processo. Chow *et al.* (2008), em seus experimentos de usinagem por descargas elétricas da liga de titânio Ti-6Al-4V, comparou desempenho, acabamento superficial, impacto da polaridade e concentração do pó quando usinado com e sem o SiC. Foi constatado maior TRM e menor TD, quando usinado com adição do pó abrasivo.

Ao adicionar o SiC ao fluido dielétrico, a fenda de trabalho foi maior, em função da alta condutividade gerada no fluido, dispersando, portanto, energia de descarga que refina a aspereza da rugosidade de forma eficiente. A Figura 10 ilustra, esquematicamente, o fenômeno da dispersão das descargas e aumento da fenda de trabalho em razão da adição de pó de SiC. As partículas de pó suspensas no fluido dielétrico aumentam a eficiência das descargas elétricas e estabiliza a abertura do canal de plasma, melhorando a usinagem. Maior estabilidade no processo, melhores são os resultados de TRM e rugosidade (KUMAR *et al.*, 2009).

A Figura 10 a) representa o centelhamento típico de EDM, em 10 b) representa a dispersão da descarga com adição de SiC no fluido dielétrico e 10 c) o estado isolante após o centelhamento.

**Figura 10 - Dispersão da energia de descarga com e sem adição de SiC ao fluido dielétrico**



Fonte: Chow *et al.* 2008, (Adaptado 2022).

Nesta mesma linha, Assarzadeh e Ghoreishi (2013), comprovaram em sua pesquisa que houve melhor desempenho no processo EDM com adição de pós, misturados ao meio dielétrico, levando em consideração alguns parâmetros como a taxa de desgaste do eletrodo, taxa de remoção de material e acabamento superficial.

Mollinet *et al.* (2015), adicionaram pó de Si ao fluido dielétrico à base de hidrocarbonetos e usinaram por meio de descargas elétricas o aço ferramenta AISI H13 e chegaram a uma rugosidade média, em Ra, 5 vezes menor comparada com o processo EDM convencional.

Em estudos mais recentes, Mondal *et al.* (2018) com o intuito de avaliar a TRM e o acabamento superficial do aço EM-19 submetido ao processo EDM, adicionaram pós de nano tubos de carbono e pó de alumínio ao fluido dielétrico. Eles mostraram que os pós de nano tubos tiveram desempenho mais favorável para o acabamento superficial e que o pó de alumínio proporcionou maior vida útil ao eletrodo ferramenta de latão utilizado em suas pesquisas. Isso corrobora com o que foi citado por Lima e Corrêa (2006), que afirmaram que as características da camada refundida são influenciadas pelos parâmetros operacionais do fluido dielétrico.

#### 4. METODOLOGIA

A metodologia da pesquisa foi desenvolvida de acordo com uma sequência embasada nas pesquisas de Santos (2013), Lima (2018) e Barbalho (2021).

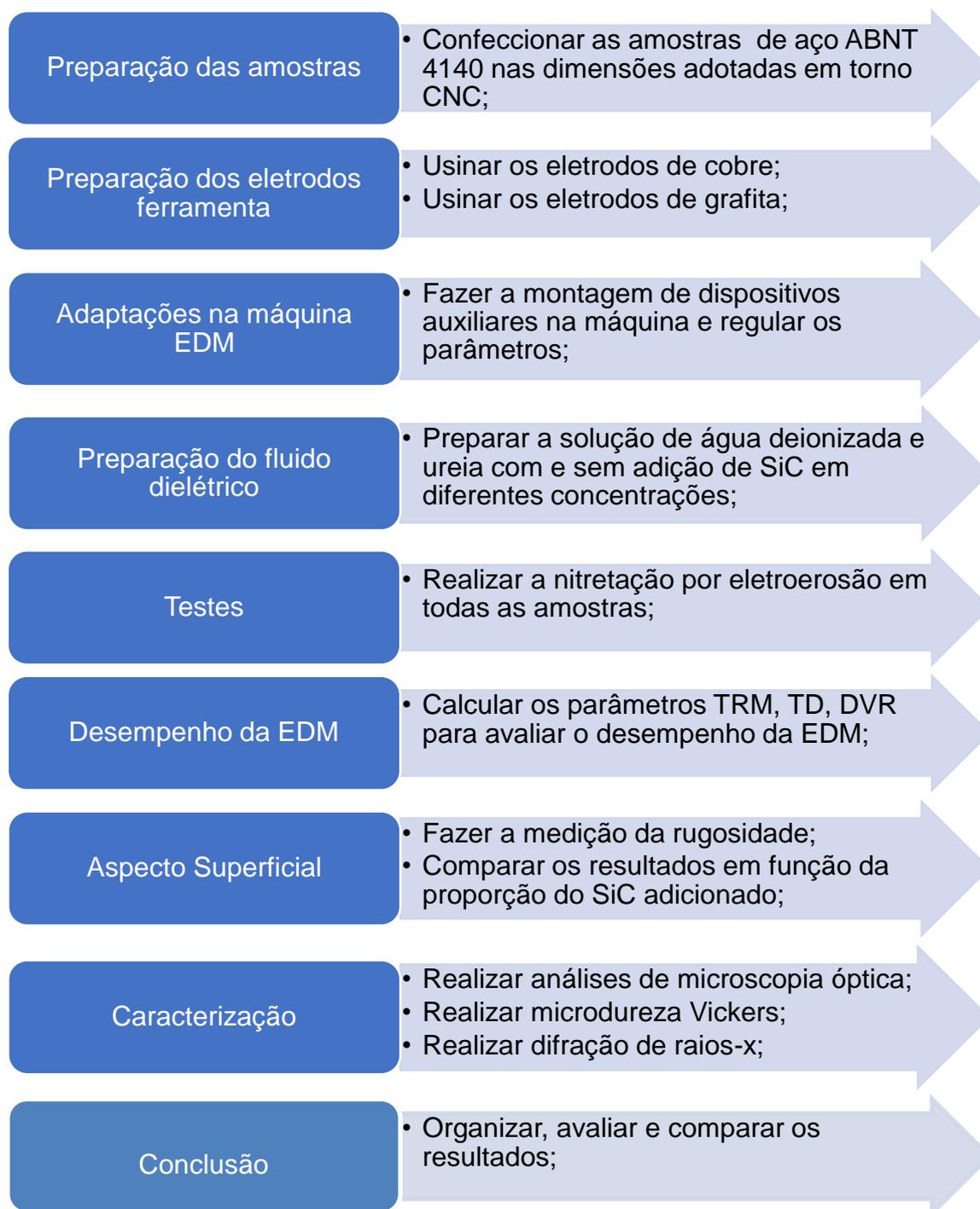
Inicialmente, amostras do aço ABNT 4140 foram usinadas para serem submetidas ao processo de nitretação por eletroerosão, utilizando como fluido dielétrico água deionizada com ureia farmacológica na concentração de  $33,33 \text{ g.L}^{-1}$ , com e sem adição de pó de SiC. Como eletrodos ferramenta, foram utilizados o cobre eletrolítico e a grafita, que também foram usinados com geometria e dimensões específicas para a realização deste experimento. Adaptações na máquina de usinagem por eletroerosão foram realizadas para permitir a prática operacional do experimento sem comprometer, posteriormente, o funcionamento da máquina em sua originalidade. Como fluido dielétrico, foi utilizado uma solução de água deionizada e ureia com adição de pó abrasivo de SiC em diferentes proporções. A mistura deste abrasivo ao fluido dielétrico foi feita nas concentrações de 10, 20, 30 e 40 gramas por litro de fluido, mantendo a mesma granulometria de 600 mesh ( $\pm 24 \mu\text{m}$ ).

Após a realização dos testes, a nitretação por eletroerosão, foi feito o levantamento dos principais parâmetros de avaliação do processo, que são a taxa de remoção de material (TRM), a taxa de desgaste de eletrodo (TD) e o desgaste volumétrico relativo (DVR). Posteriormente, todas as amostras foram submetidas à medição da rugosidade para análises e comparação dos valores em função da concentração de SiC adicionado ao fluido dielétrico.

Através de análises de microscopia óptica, ensaio de microdureza Vickers e difração de raios-x, as amostras foram caracterizadas. Por meio destes ensaios, foi possível mensurar as espessuras e formação das camadas refundidas e intermediária, comparar a microdureza das camadas com o material base e identificar os nitretos formados na superfície do material usinado em todas as configurações testadas, com variação do material do eletrodo ferramenta e da composição do fluido dielétrico.

A Figura 11 apresenta, esquematicamente, a sequência metodológica das atividades realizadas e suas descrições resumidas para a execução deste trabalho.

**Figura 11 - Detalhamento da sequência de trabalho da pesquisa**



Fonte: Autor, 2022.

#### 4.1. Material do Eletrodo Peça (amostras)

Os corpos de prova foram fabricados com geometria cilíndrica com dimensões: diâmetro de 19,05 mm x 13 mm de comprimento. Uma serra de fita foi utilizada para cortar o material para permitir a fixação no torno CNC. Após o corte, as peças foram

usinadas por meio das operações de faceamento e seccionadas através da operação de sangramento. O faceamento foi necessário, primeiramente, para padronizar as medidas de espessura das amostras e, também, para uniformizar as faces do material e garantir o paralelismo entre as faces para posterior usinagem por eletroerosão. Por se tratar de uma usinagem por descargas elétricas por penetração, qualquer ponto mais alto na peça pode afetar o ajuste da fenda de trabalho e, conseqüentemente, comprometer o desempenho da usinagem. Portanto, para que se tenha resultados confiáveis nos testes, é necessário que os eletrodos ferramenta e peça estejam paralelos entre si.

Foram preparadas cinquenta amostras, sendo vinte e cinco usinadas com eletrodo de cobre eletrolítico e vinte e cinco usinadas com eletrodo de grafita. Além de variar o tipo de eletrodo no ensaio, houve também variação da concentração de pós abrasivo. Como pode ser visto na Figura 12, alguns corpos de prova foram previamente seccionados ao meio para facilitar a preparação metalográfica. De acordo com Santos (2013), o fato de seccionar as peças não influencia nos resultados e visualização dos efeitos na borda. As peças foram numeradas de 1 a 50.

**Figura 12 - Corpos de prova fabricados em aço ABNT 4140**



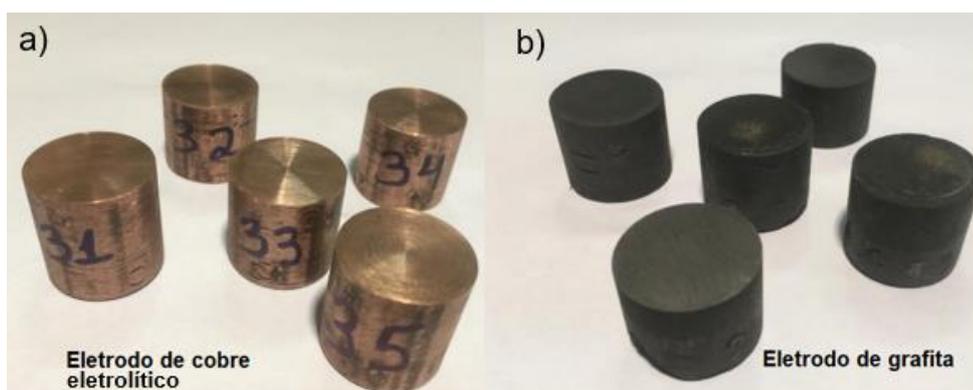
Fonte: Autor, 2022.

#### **4.2. Material do Eletrodo Ferramenta**

A nitreção por eletroerosão nas amostras foi realizada utilizando como eletrodos ferramenta o cobre eletrolítico e a grafita. Ambos foram usinados através do processo de torneamento e preparados com o diâmetro de 22 mm e comprimento de 30 mm. Eles foram fabricados com diâmetro externo maior que o diâmetro dos corpos de prova

para garantir que toda a face das amostras fosse envolvida e usinada. Como mostrado na Figura 13, os eletrodos foram numerados para facilitar a combinação do mesmo com a amostra usinada. Esse procedimento se faz necessário para verificar sua massa antes e depois do processo.

**Figura 13 - Fotografia dos eletrodos ferramenta – a) cobre eletrolítico e b) grafita**



Fonte: Autor, 2022.

As medições da massa dos eletrodos ferramenta e peça, foram realizadas antes e depois de cada etapa da usinagem utilizando uma balança de precisão com capacidade mínima e máxima de 0,5 a 4.210 g e resolução 0,01 g, contribuindo para estimar o desempenho da EDM através dos parâmetros TRM, TD e DVR. No caso dos eletrodos de grafita, foi necessário garantir que os mesmos estivessem isentos de umidade antes de se realizar a medição de suas massas.

Como o material fica submerso no fluido dielétrico durante a EDM, retém umidade e pode, eventualmente, maquiar os cálculos de desempenho da usinagem. Diante disso, foi necessário submeter os eletrodos de grafita a um processo de secagem colocando os por um período de 2 horas em um forno mufla com temperatura equalizada em 200 °C, para eliminar qualquer interferência de umidade.

### **4.3. Fluido Dielétrico**

O fluido dielétrico utilizado foi uma solução de ureia em água deionizada. A ureia utilizada no processo é a mesma que se usa em manipulações farmacológicas e possui cerca de 46% de nitrogênio. Para conseguir água deionizada, foi utilizado um

deionizador portátil à base de resina. Esse equipamento recebe água potável e a deioniza, fazendo com que ela perca sua condutividade elétrica.

Para a realização da nitretação por eletroerosão, foi utilizado um total de 30 litros de fluido dielétrico. Em sua pesquisa Santos (2015), mostrou que a concentração de ureia não influenciou na espessura da camada nitretada. Logo, a concentração foi definida em função da baixa condutividade elétrica, utilizando, portanto, uma concentração de 33,33 gramas de uréia por litro de água deionizada. Sendo assim, para 30 litros de água, foi necessário 1 kg de ureia. Além da ureia, o pó abrasivo Carbetto de Silício (SiC) foi utilizado em diversas concentrações, mas em todos os casos com a mesma granulometria de 600 mesh. Os testes foram realizados de cinco em cinco amostras, sempre iniciando a usinagem com os eletrodos de cobre e, posteriormente, com os de grafita. Para cada conjunto de cinco peças, utilizou-se uma configuração do fluido dielétrico variando a concentração de SiC, conforme mostra a Tabela 4.

**Tabela 4 - Representação dos testes de EDM nas amostras em função da composição do fluido dielétrico**

Teste	Qtd. de Amostras	Eletrodo	SiC [g.L <sup>-1</sup> ]	Configuração do Fluido Dielétrico
1	5	cobre	0	água deionizada + ureia
	5	grafita	0	água deionizada + ureia
2	5	cobre	10	água deionizada + ureia + SiC (10 g.L <sup>-1</sup> )
	5	grafita	10	água deionizada + ureia + SiC (10 g.L <sup>-1</sup> )
3	5	cobre	20	água deionizada + ureia + SiC (20 g.L <sup>-1</sup> )
	5	grafita	20	água deionizada + ureia + SiC (20 g.L <sup>-1</sup> )
4	5	cobre	30	água deionizada + ureia + SiC (30 g.L <sup>-1</sup> )
	5	grafita	30	água deionizada + ureia + SiC (30 g.L <sup>-1</sup> )
5	5	cobre	40	água deionizada + ureia + SiC (40 g.L <sup>-1</sup> )
	5	grafita	40	água deionizada + ureia + SiC (40 g.L <sup>-1</sup> )

Fonte: Autor, 2022.

A cada dez peças usinadas o fluido dielétrico foi substituído por um novo, repetindo o mesmo procedimento de preparação com água deionizada, nova porção de ureia e

pó abrasivo. A mesma quantidade de água deionizada e ureia foi utilizada para todas as amostras, variando apenas a concentração de SiC no fluido.

Como uma das principais características do fluido dielétrico é não ser condutor de eletricidade para que as descargas elétricas ocorram de maneira controlada, foi necessário certificar se essa característica foi atendida. Para isso, foi utilizado um condutímetro portátil que opera na faixa de 0 a 1999  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , incerteza de  $\pm 2\%$ , para verificar a condutividade elétrica do fluido antes de iniciar o processo. A Figura 14 mostra como é feita a medição da condutividade elétrica com este instrumento.

**Figura 14 - Realização da medição da condutividade elétrica no fluido dielétrico**



Fonte: Autor

Para medir a massa da quantidade exata de ureia e pó de SiC a serem adicionados ao fluido dielétrico, foi utilizada uma balança de precisão. Esta mesma balança também foi utilizada para medição das massas das amostras antes e após a EDM, possibilitando avaliar o desempenho da usinagem.

#### 4.4. Preparação da Máquina de EDM

A usinagem foi realizada em um equipamento EDM convencional por penetração, modelo Eletroplus EDM-540/SERVSPARK, conforme Figura 15.

**Figura 15 - Máquina de usinagem por eletroerosão utilizada no processo EDM**



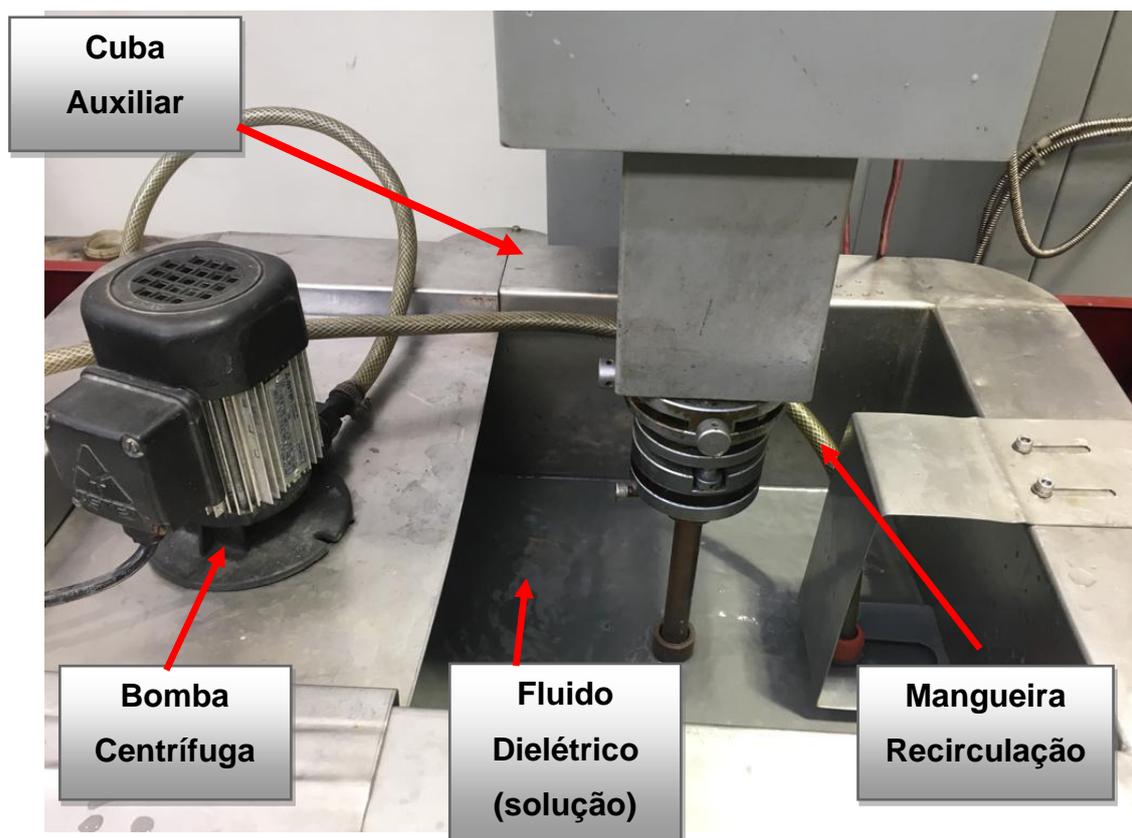
Fonte: Autor, 2022.

Como o experimento proposto apresenta características específicas, foi necessário utilizar uma série de adaptações e recursos para se obter êxito no processo. A utilização de uma cuba auxiliar fabricada em aço ABNT 304 foi necessária para evitar que a solução de água deionizada com uréia mais o pó abrasivo se misture com o

fluido dielétrico original da máquina e, também, com o intuito de evitar corrosão prematura dos componentes da máquina.

Uma bomba centrífuga modelo CD 3002 de fabricação ASTEN com vazão de 51 litros por minuto a uma pressão de 2 metros de coluna de água (0,2 bar), acoplada a um motor elétrico de corrente alternada, com 3100 rpm e potência de 120 Watts, foi utilizada para recircular o fluido dielétrico na cuba auxiliar. Na saída dessa bomba, uma mangueira foi fixada com o bico apontado para baixo, sem direcionar o fluxo direto à região de trabalho como mostra a Figura 16, com o objetivo de manter o fluido em constante circulação e evitar a decantação precipitada do pó de SiC no reservatório.

**Figura 16 - Cuba auxiliar adaptada na máquina EDM**

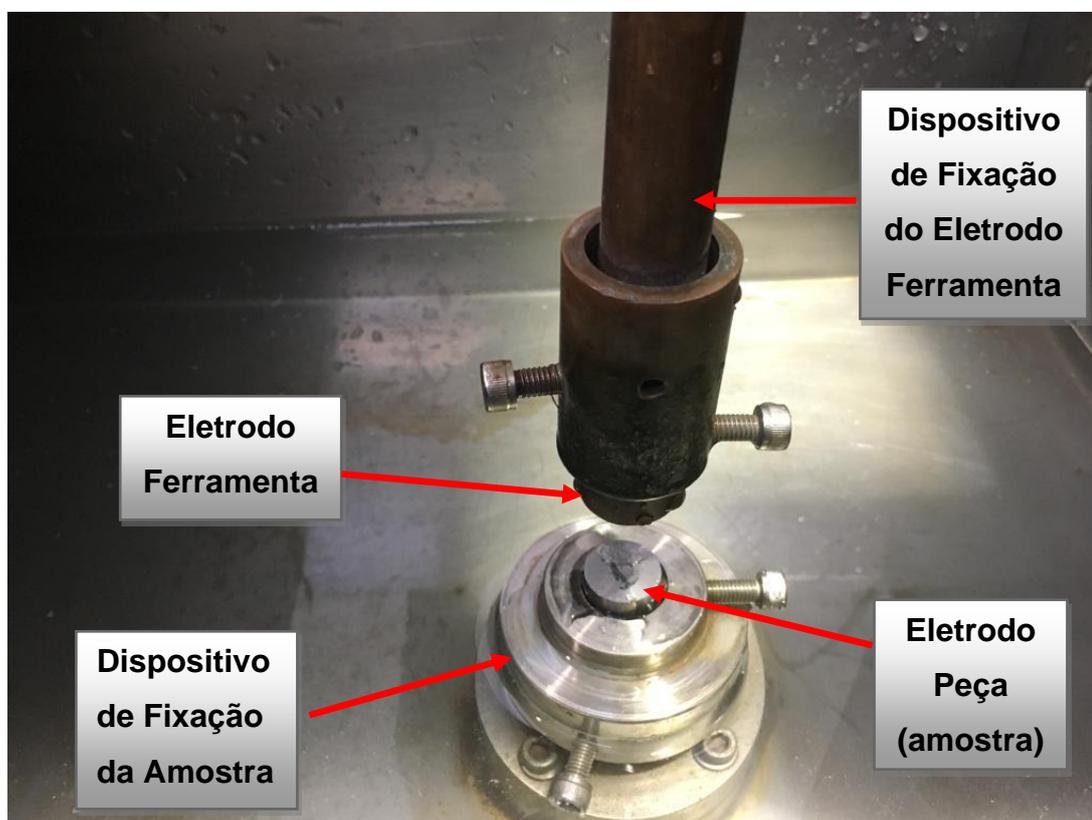


Fonte: Autor, 2022.

Mondal, Surekha e Choudhury (2018) também adaptaram uma bomba no tanque auxiliar para promover a circulação do fluido misturado com pó de SiC, por meio de jato. A circulação do fluido evita o acúmulo de partículas do pó em pontos isolados da cuba auxiliar.

Como foi feita a adaptação de uma cuba auxiliar na máquina, foi necessário instalar um dispositivo para fixação da peça, melhor representado na Figura 17. A geometria do dispositivo foi desenvolvida especificamente para fixação das amostras, uma vez que o diâmetro da cavidade é ligeiramente maior do que o corpo de prova. Essa característica foi necessária para garantir que a peça permanecesse paralela à base durante todo o processo. Um parafuso foi utilizado para o travamento da peça, a fim de impedir qualquer movimentação durante a usinagem. A Figura 17, ilustra o dispositivo utilizado para a fixação da amostra (eletrodo peça) e o suporte do eletrodo ferramenta já posicionado.

**Figura 17: Dispositivos de fixação das amostras e dos eletrodos ferramenta**



Fonte: Autor, 2022.

Para a realização da NDE das 50 amostras, foram utilizados os mesmos parâmetros em todas elas, tanto no eletrodo de cobre como no de grafita. A definição dos parâmetros se deu com base nas pesquisas de Santos (2013), Santos (2015), Lima (2018) e Barbalho (2021). Os parâmetros foram ajustados diretamente no painel de controle da máquina através das botoeiras, como mostra a Figura 18.

Figura 18 - Painel de controle da máquina EDM para ajustes dos parâmetros



Fonte: Autor, 2022.

A Tabela 5 mostra em detalhes os parâmetros utilizados no processo EDM. Todas as amostras foram usinadas utilizando os mesmos parâmetros de entrada.

Tabela 5 - Parâmetros de entrada utilizados na usinagem

PARÂMETROS DE TRABALHO	DEFINIÇÃO
Polaridade eletrodo ferramenta	Positiva (+)
Tempo de Pulso (Ton)	100 $\mu$ s
Tempo de Pausa (Toff)	15 $\mu$ s
Tensão	50 Volts
Corrente	40 Amperes
Fenda de trabalho ( <i>gap</i> ) máximo	84 $\mu$ m
Fenda de trabalho ( <i>gap</i> ) mínimo	45 $\mu$ m

Fonte: Autor, 2022.

Para a realização da usinagem foi especificado o tempo de pulso ( $T_{on}$ ) de 100  $\mu s$ . Desta forma, de acordo com o fabricante da máquina (SERVSPARK, 2010), cada posição da manopla do tempo de pausa ( $T_{off}$ ) equivale a 10% do tempo de pulso ( $T_{on}$ ). Logo, como foi especificado 100  $\mu s$  para este parâmetro, a manopla do tempo de pausa ( $T_{off}$ ) foi direcionada à posição 1,5 que equivale a 15  $\mu s$ . O fabricante cita que quanto menor o  $T_{off}$  maior o rendimento.

A tensão especificada para o processo foi de 50 V e corrente 40 A. Os limites superior e inferior da fenda de trabalho são especificados pelo catálogo da máquina em função da posição das manoplas dos parâmetros: tempo de pulso, tensão e quantidade de resistores ligados. Para esta seleção de parâmetros e por meio de consultas aos catálogos da máquina, foram determinadas as fendas máximas e mínimas, sendo, 84 e 45  $\mu m$ , respectivamente. Percebe-se que alguns parâmetros não possuem unidade de medida especificada diretamente no painel de comando, sendo necessário, portanto, a definição referenciada pelo catálogo da máquina. São os casos da regulagem do afastamento da ferramenta e velocidade do servomecanismo. A polaridade utilizada foi a positiva, ou seja, quando o eletrodo ferramenta está diretamente ligado no polo positivo e a peça no polo negativo.

Com os eletrodos fixados na máquina e os parâmetros ajustados, foi feito o *preset* do eletrodo ferramenta em relação ao eletrodo peça. Esse *preset* ou zeramento se refere à altura em que ele se encontra em relação a peça, para que o servo mecanismo avance automaticamente em relação à altura previamente referenciada. Além disso, foi necessário posicionar o eletrodo peça e o eletrodo ferramenta concêntricos entre si, para que a usinagem atingisse toda superfície da peça. Essa concentricidade pôde ser alcançada regulando o eletrodo peça através da movimentação transversal e longitudinal da mesa de trabalho da máquina. Cada uma das cinquenta amostras foi submetida à usinagem por descargas elétricas por um tempo de 10 minutos, controlado com o auxílio de um cronômetro digital.

#### **4.5. Desempenho da Usinagem por EDM**

Como forma de avaliar o desempenho da EDM, os três parâmetros principais foram analisados:

- Taxa de Remoção de Material (TRM);
- Taxa de Desgaste de Eletrodo Ferramenta (TD) e;
- Desgaste Volumétrico Relativo (DVR).

Todos eles dependem da variação da massa dos eletrodos ferramenta e peça. Por isso, tanto os eletrodos ferramenta como os corpos de prova foram pesados por três vezes cada, antes e depois da usinagem para mensurar estes principais parâmetros de avaliação de desempenho da usinagem.

A Tabela 6 apresenta os valores da massa específica dos materiais em teste utilizados para realização dos cálculos e definição dos parâmetros avaliados.

**Tabela 6 - Massa específica dos materiais**

<b>MATERIAL</b>	<b>MASSA ESPECÍFICA (kg.m<sup>-3</sup>)</b>
<b>Aço ABNT 4140</b>	7850
<b>Cobre Eletrolítico</b>	8920
<b>Grafita</b>	1750

Fonte: CHE HARON, *et al.*, 2008 & GERDAU, 2003 (Adaptado, 2022).

#### **4.6. Avaliação do Aspecto Superficial (Rugosidade)**

A rugosidade dos corpos de prova foi medida utilizando um rugosímetro portátil TESA, modelo RUGOSURF 20 com ponta de diamante, conforme Figura 19. Para diminuir as chances de erros de medição, foi utilizado um dispositivo, que possui uma base para apoio do rugosímetro e uma cavidade de encaixe com a mesma geometria das amostras. Nessa cavidade um parafuso trava levemente as peças para não se movimentarem durante a medição. Durante o processo de medição, a haste do rugosímetro desloca-se sobre a peça, fazendo com que a ponta de medição percorra pela superfície usinada e faça a leitura da rugosidade. Como este deslocamento sobre a peça não gera nenhum esforço significativo, não é necessário torquar o parafuso de fixação da peça, apenas encostar manualmente para evitar qualquer movimentação durante a leitura.

**Figura 19 - Rugosímetro digital marca Tesa com dispositivo projetado para fixação das amostras**



Fonte: Autor, 2022.

Para garantir o paralelismo entre a peça e o instrumento foi necessário apoiar completamente a face inferior da amostra (parte não usinada) na cavidade do dispositivo. O fundo da cavidade é paralelo à base de apoio do instrumento, logo, se apoiada corretamente, irá replicar o paralelismo à amostra a ser avaliada.

Com a finalidade de se obter maior confiabilidade, foram realizadas 3 medições em direções aleatórias em cada uma das 50 amostras. Para cada grupo de cinco amostras, variando a composição do fluido dielétrico e o tipo de eletrodo ferramenta, foram extraídas 15 medições. A partir dessas medições, foi feito o cálculo da média e desvio padrão para assegurar maior confiabilidade nas análises.

Para realizar a medição, a ponta do rugosímetro foi ligeiramente posicionada ao centro da peça, com comprimento de amostragem *cut-off* de 2,5 mm e leitura dos parâmetros da Rugosidade Média Aritmética ( $R_a$ ), Rugosidade Média ( $R_z$ ), Desvio Médio Quadrático ( $R_q$ ) e Rugosidade Total ( $R_t$ ).

#### **4.7. Análise Metalográfica do Aço ABNT 4140**

Uma amostra de cada um dos dez grupos de peças foram seccionadas ao meio, resultando em 10 amostras bipartidas, sendo 05 usinadas com eletrodo de cobre

eletrolítico e 05 usinadas com eletrodo de grafita, para permitir a medição das espessuras, mensurar a dureza e facilitar a visualização das camadas após a nitretação por eletroerosão. Elas foram preparadas de acordo com as técnicas metalográfica, iniciando pela etapa de embutimento. Nesta etapa empregou-se uma resina epóxi termo endurecedora recomendada para preservar as bordas e evitar que a camada refundida se desprenda durante o processo de preparação. Em seguida, foi feito o lixamento utilizando lixas de SiC com granulometria conforme sequência: 180, 220, 360, 400, 500, 600 e 1200 mesh. Posteriormente, foi feito o polimento com pasta de diamante de 9 e 3  $\mu\text{m}$  e o ataque químico com Nital 3%.

As micrografias foram realizadas com o auxílio do microscópio óptico Fortel com sistema de aquisição de imagens Kontrol modelo M713. Uma câmera instalada no dispositivo permitiu fazer a captura das imagens para evidenciar a caracterização das amostras usinadas.

#### **4.8. Análise de Microdureza**

Após preparação metalográfica e a realização da microscopia óptica, as amostras seccionadas foram submetidas ao ensaio de microdureza Vickers. As avaliações foram realizadas nas camadas refundidas, intermediárias e no metal base. Cinco indentações igualmente espaçadas foram executadas com espaçamento mínimo de 20  $\mu\text{m}$  entre si, tendo como carga aplicada 10 gf durante 20 s. O equipamento utilizado foi um microdurômetro Shimadzu modelo HMV-2T E, com microscópio óptico incorporado e software Easy Test HMV-AD para obtenção de imagens capturadas através de uma câmera digital instalada ao equipamento.

#### **4.9. Difração de Raios X**

A DRX é uma técnica relevante na caracterização de materiais, especialmente os cristalinos. Com o emprego desta técnica, é possível obter informações estruturais e microestruturais, como parâmetro de rede, coordenadas atômicas, densidade ocupacional, entre outros (AZEVEDO, 2010). Para evidenciar a possível formação de nitretos na superfície das amostras usinadas por descargas elétricas, foi realizado o ensaio de difração de raio-x (DRX) convencional, utilizando o difratômetro modelo

Shimadzu XRD – 7000 X-Ray. Uma amostra de cada um dos 10 grupos foi submetida ao ensaio de DRX, utilizando modo de varredura por tempo fixo e com parâmetros operacionais conforme descritos na Tabela 7.

**Tabela 7 - Parâmetros adotados no ensaio de DRX**

<b>PARÂMETRO</b>	<b>ESPECIFICAÇÃO</b>
<b>Tensão</b>	40 kV
<b>Corrente</b>	30 mA
<b>Faixa de varredura</b>	20° a 120°
<b>Passo de amostragem</b>	0,04°
<b>Tempo de varredura por ponto</b>	1 s

Fonte: Autor, 2022.

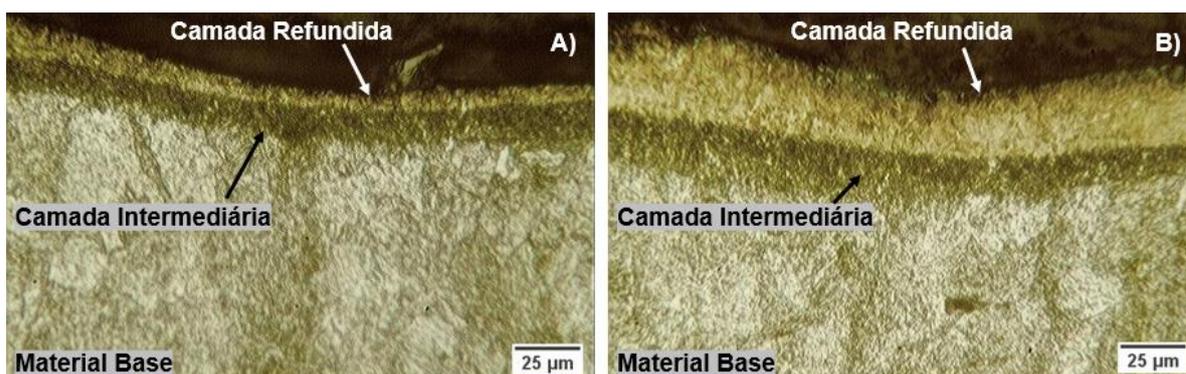
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos da realização do procedimento experimental descrito na metodologia. São apresentadas as evidências de formação da camada nitretada (intermediária), o desempenho da usinagem com base nos principais parâmetros TRM, TD e DVR; os valores de microdureza Vickers das camadas nitretada e refundida; os difratogramas de raio-x que mostram a formação dos nitretos e os valores de rugosidade das amostras usinadas com eletrodo de cobre eletrolítico e grafita nas diferentes variações de composição do fluido dielétrico.

### 5.1. Formação das Camadas das Amostras Usinadas por EDM com Eletrodo de Cobre Eletrolítico e Grafita

Amostras pertencentes aos cinco grupos de cada eletrodo ferramenta foram submetidas à microscopia óptica. Em todos os casos houve formação de três regiões: mais superficial, denominada camada refundida, camada intermediária e mais abaixo, o material base. As Figuras de 20 a 24 evidenciam, através de microscopia óptica de seção transversal da superfície usinada, a formação das camadas obtidas pelo processo de nitretação por eletroerosão com a utilização de eletrodos de cobre eletrolítico e grafita. A Figura 20 refere-se a imagens de microscopia óptica da seção transversal da superfície usinada sem adição de pó, onde: a) refere-se à amostra usinada com eletrodo de cobre eletrolítico e em b) com eletrodo de grafita.

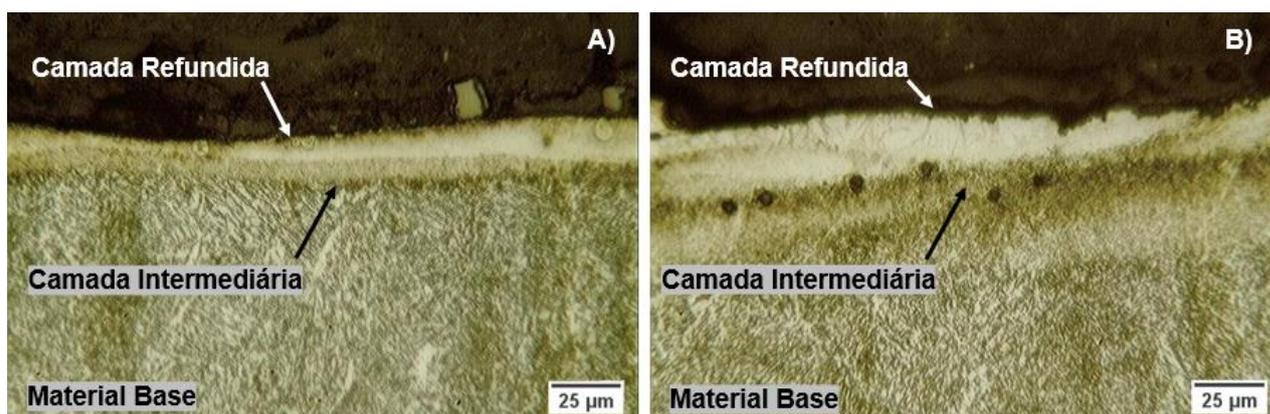
**Figura 20 - Imagens de microscopia óptica do processo de nitretação por eletroerosão sem adição de pó. Em a) com eletrodo de cobre eletrolítico e em b) com eletrodo de grafita.**



Fonte: Autor, 2022.

A Figura 21 refere-se a imagens de microscopia óptica da seção transversal da superfície usinada com adição de SiC na concentração de 10 g.L<sup>-1</sup>, onde: a) refere-se à amostra usinada com eletrodo de cobre eletrolítico e em b) com eletrodo de grafita.

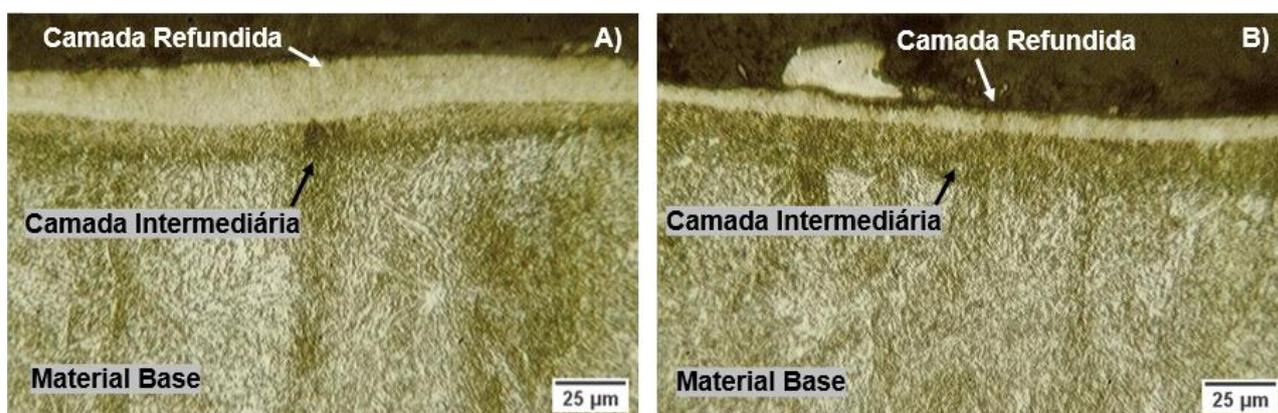
**Figura 21 - Imagens de microscopia óptica do processo de nitretação por eletroerosão com adição de pó de SiC na concentração de 10 g.L<sup>-1</sup>. Em a) com eletrodo de cobre eletrolítico e em b) com eletrodo de grafita.**



Fonte: Autor, 2022.

A Figura 22 refere-se a imagens de microscopia óptica da seção transversal da superfície usinada com adição de SiC na concentração de 20 g.L<sup>-1</sup>, onde: a) refere-se à amostra usinada com eletrodo de cobre eletrolítico e em b) com eletrodo de grafita.

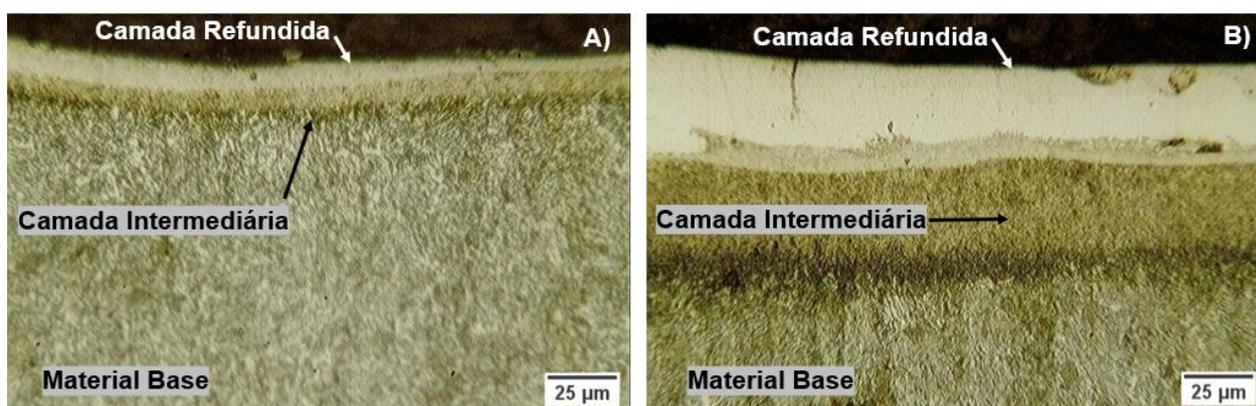
**Figura 22 - Imagens de microscopia óptica do processo de nitretação por eletroerosão com adição de pó SiC na concentração de 20 g.L<sup>-1</sup>. Em a) com eletrodo de cobre eletrolítico e em b) com eletrodo de grafita.**



Fonte: Autor, 2022.

A Figura 23 refere-se a imagens de microscopia óptica da seção transversal da superfície usinada com adição de SiC na concentração de 30 g.L<sup>-1</sup>, onde: a) refere-se à amostra usinada com eletrodo de cobre eletrolítico e em b) com eletrodo de grafita.

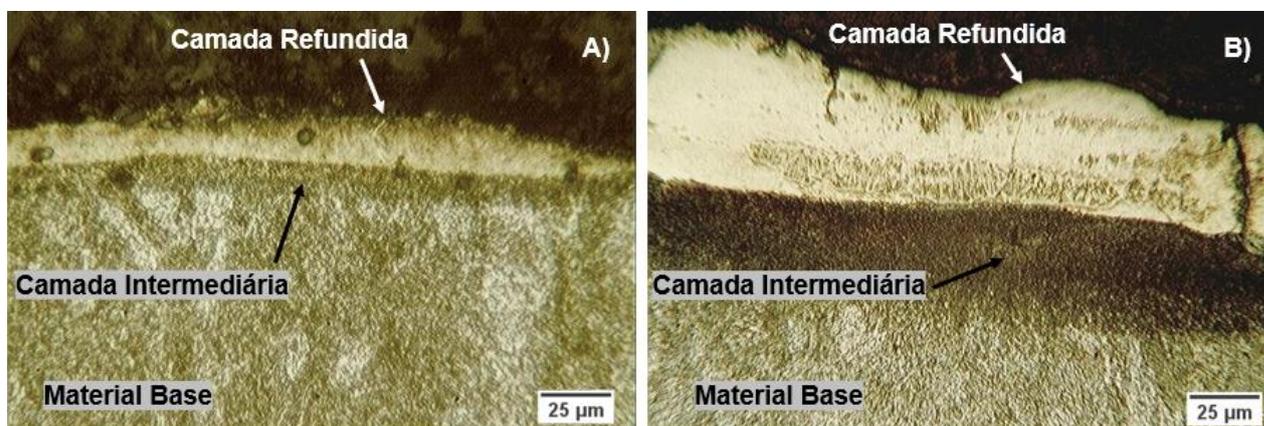
**Figura 23 - Imagens de microscopia óptica do processo de nitretação por eletroerosão com adição de pó SiC na concentração de 30 g.L<sup>-1</sup>. Em a) com eletrodo de cobre eletrolítico e em b) com eletrodo de grafita.**



Fonte: Autor, 2022.

A Figura 24 refere-se a imagens de microscopia óptica da seção transversal da superfície usinada com adição de SiC na concentração de 40 g.L<sup>-1</sup>, onde: a) refere-se à amostra usinada com eletrodo de cobre eletrolítico e em b) com eletrodo de grafita.

**Figura 24 - Imagens de microscopia óptica do processo de nitretação por eletroerosão com adição de pó SiC na concentração de 40 g.L<sup>-1</sup>. Em a) com eletrodo de cobre eletrolítico e em b) com eletrodo de grafita.**



Fonte: Autor, 2022.

Nas imagens registradas, pode-se observar a formação das camadas intermediária e camada refundida nas amostras, tanto na usinagem com adição do pó de SiC nas diferentes proporções, como também sem adição do pó. Estas camadas são típicas em peças submetidas ao processo de usinagem por eletroerosão.

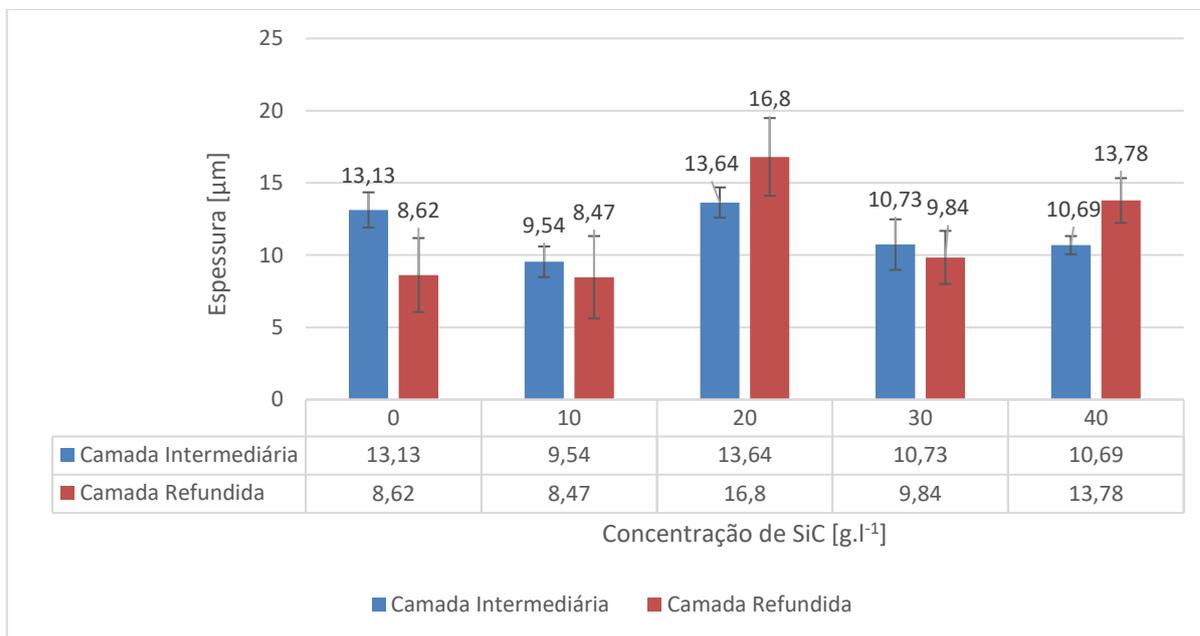
Os resultados corroboram com os obtidos por Santos (2013) em seus estudos. Nota-se que em todas as amostras, a espessura da camada intermediária mantém-se relativamente uniforme ao longo do perfil da peça usinada sem grandes variações nos trechos avaliados. Já a camada refundida não tem o mesmo comportamento, ou seja, não se mantém uniforme ao longo de toda superfície usinada, semelhante ao que foi observado por Mehmood (2016) em sua pesquisa.

É possível perceber que as camadas possuem coloração diferentes entre si. Estudos anteriores associam a diferença na coloração à difusão do nitrogênio no substrato proveniente da ureia para formar os nitretos, uma vez que, em experimentos semelhantes, realizados sem adição de ureia ao fluido dielétrico, observou-se apenas a formação da camada refundida e o substrato (CAMARGO, COSTA e RASLAN, 2009).

Segundo Al-Khazraji, Amin e Ali (2018), as características e espessura da camada refundida estão relacionadas com as transformações de fase que ocorrem durante o processo de solidificação. Bem como, da composição química do material base e dos parâmetros de usinagem por eletroerosão.

Com as imagens obtidas foi possível mensurar as espessuras médias das camadas encontradas através do software Image J. Para cada trecho analisado, foram realizadas dez medições com espaçamentos iguais entre si, tanto na camada intermediária como na camada refundida. A Figura 25 ilustra os valores médios das espessuras, bem como os seus respectivos desvios padrão, das camadas refundida e intermediária, obtidas pelo processo de nitretação por eletroerosão com eletrodo de cobre eletrolítico.

**Figura 25 - Espessuras das camadas refundidas e intermediária usinadas com eletrodo de cobre eletrolítico**



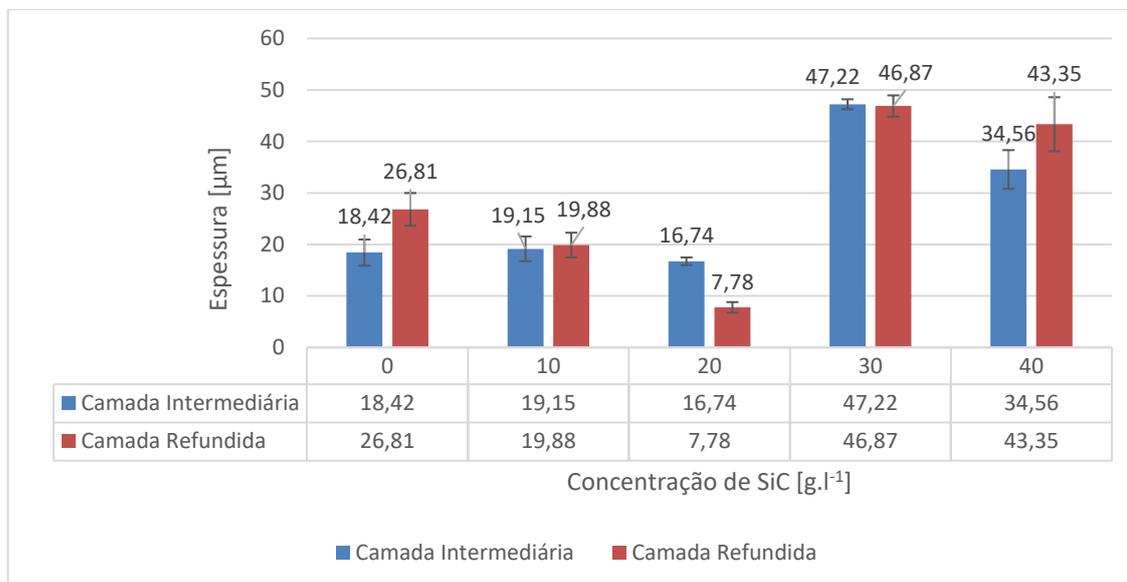
Fonte: Autor, 2022.

Como pode ser visto, levando em consideração os desvios padrão, as espessuras das camadas intermediárias não apresentaram diferença significativa ao variar a composição do fluido dielétrico com o pó abrasivo. No entanto, ao considerar o valor médio, a maior espessura da camada intermediária ocorreu com adição de 20 g.L<sup>-1</sup> de SiC ao fluido dielétrico e a menor ocorreu com adição de 10 g.L<sup>-1</sup>. No caso das camadas refundidas, observa-se aumento quando se utiliza o SiC ao fluido dielétrico, sendo o maior valor também na concentração de 20 g.L<sup>-1</sup> e o menor valor encontrado com 10 g.L<sup>-1</sup>.

Assim como ocorreu na nitretação por eletroerosão com eletrodo de cobre, foi evidenciada, também, a formação das camadas intermediária e refundida nas amostras, tanto na usinagem com adição de SiC nas diferentes proporções, como também sem adição deste abrasivo utilizando o eletrodo de grafita. Nos trechos avaliados, a espessura da camada intermediária foi uniforme ao longo do perfil da peça, sem apresentar grandes variações.

A Figura 26 ilustra de forma gráfica a comparação dos valores médios das medidas de espessura coletadas e seus respectivos desvios padrão.

**Figura 26 - Espessuras das camadas refundidas e intermediária usinadas com eletrodo de grafita**



Fonte: Autor, 2022.

Ao analisar as imagens das amostras, percebe-se aumento na espessura da camada intermediária quando se utilizou o pó de carvão de silício em maiores proporções, especificamente com 30 e 40 g.L<sup>-1</sup>, quando comparado com a usinagem sem adição do pó ao fluido dielétrico. Nas concentrações de 10 e 20 g.L<sup>-1</sup> não foram identificadas diferenças significativas em relação ao teste sem a presença do SiC. Contudo, com a presença de maior quantidade do pó abrasivo ao fluido dielétrico, notou-se influência expressiva do SiC no processo. Os valores médios das medidas de espessura da camada intermediária comprovam a percepção visual das imagens de microscopia óptica, apresentando uma diferença de 156,4% a mais quando se utilizou o SiC na concentração 30 g.L<sup>-1</sup> e de 87,6% a mais com 40 g.L<sup>-1</sup>, comparado com o teste sem adição do pó ao fluido dielétrico. Os resultados obtidos vão de encontro aos resultados alcançados por Barbalho (2021), que também evidenciou aumento na espessura das camadas (intermediária e refundida) quando adicionado pó de SiC ao fluido dielétrico no processo de nitretação por eletroerosão deste mesmo aço.

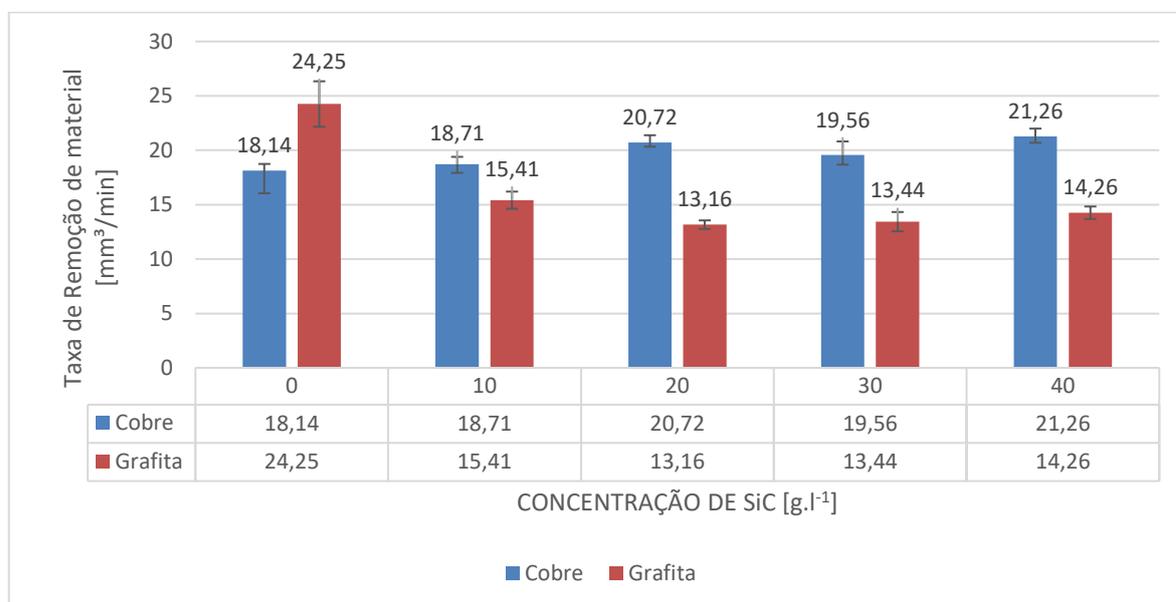
### 5.3. Avaliação do Desempenho da Usinagem por EDM

O desempenho do processo de nitretação por eletroerosão foi avaliado com base nos parâmetros TRM, TD e DVR para a usinagem das amostras com eletrodo de cobre e grafita com fluido dielétrico nas diversas composições de pó de SiC. A Figura 27

apresenta uma análise da taxa de remoção de material TRM, de todas as amostras usinadas, comparando as variações do processo como o tipo de eletrodo ferramenta e a composição do fluido dielétrico. Observa-se que quando utilizado o eletrodo de cobre, a presença do pó de SiC ao fluido dielétrico fez aumentar a TRM, independentemente de sua concentração. Dentre as usinagens com pó abrasivo, a maior TRM foi encontrada na proporção de 40 g.L<sup>-1</sup>, aproximadamente 17,2% maior do que quando usinado sem o SiC adicionado ao fluido dielétrico.

Ao realizar a nitretação por eletroerosão utilizando o eletrodo de grafita, ocorreu o inverso. Ao adicionar o pó de SiC ao fluido de dielétrico, percebe-se uma queda na TRM, tendo como opção de destaque a configuração do fluido dielétrico com 20 g.L<sup>-1</sup> de SiC, que foi aproximadamente 54,27% menor que usinado sem o pó de SiC. Estes resultados vão de encontro e reforçam a pesquisa de Barbalho (2021), que evidenciou influência do pó de SiC no desempenho da usinagem quando adicionado ao fluido dielétrico.

**Figura 27 – Valores de TRM encontrados na usinagem com eletrodo de cobre eletrolítico e grafita nas diferentes composições de fluidos dielétricos**



Fonte: Autor, 2022.

Prihandana, Mahardika e Sriani (2020) observaram uma maior TRM com o aumento da concentração de pó. Porém para concentrações maiores que 15 g.L<sup>-1</sup>, a TRM fica comprometida, já que o excesso de partículas que preenchem a fenda de trabalho

dificulta a retirada dos resíduos do material arrancado da superfície da peça de trabalho.

De acordo com Zhang *et al.* (2012), os elétrons e íons são acelerados e deslocam-se em direção ao ânodo e cátodo, porém, em sua trajetória, colidem com partículas e perdem energia. Como foi evidenciado maiores taxas de desgaste do eletrodo de grafita, é factível que tenha maior quantidade de micropartículas no meio, comparado com o processo com eletrodo de cobre eletrolítico, o que possivelmente contribuiu para menores TRM na usinagem por EDM com eletrodo de grafita.

Segundo Rehman *et al.* (2020) ao aumentar a quantidade de partículas de pó, devido ao aumento da concentração, o efeito ponte causado pelas partículas aumenta o número de descargas, o que promove maior TRM.

Nota-se, portanto, que ao realizar a nitretação por eletroerosão sem adição de SiC ao fluido dielétrico, a TRM utilizando a grafita como eletrodo ferramenta foi maior. No entanto, ao adicionar o SiC ao fluido dielétrico, os resultados foram mais satisfatórios quando se utilizou eletrodo de cobre. De acordo com Joshi e Joshi (2019) o aumento na concentração de partículas do pó pode dificultar a transferência de energia da descarga para a superfície da peça de trabalho, acarretando, em alguns casos, na redução da TRM.

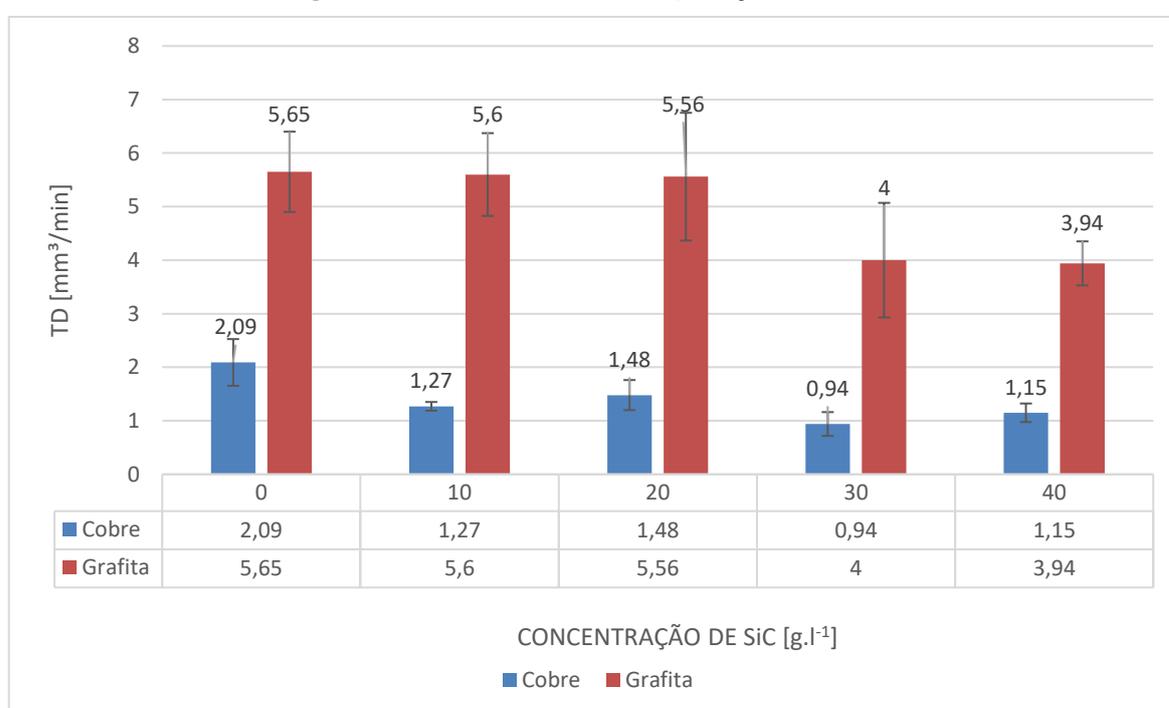
Segundo Mondal, Surekha e Choudhury (2018), quando as partículas do pó são energizadas no interior da fenda de trabalho, as mesmas se deslocam preenchendo o espaço entre os eletrodos provocando descargas elétricas precoces. Como resultado de uma série de descargas antecipadas, ocorre um aumento na TRM do eletrodo peça.

Ao analisar o parâmetro TD, taxa de desgaste do eletrodo, percebe-se ligeira redução quando adicionado o pó de SiC ao fluido dielétrico. A análise é evidenciada através da Figura 28, que mostra a comparação da TD quando o processo foi realizado com eletrodo de cobre eletrolítico e grafita nas diferentes composições de fluido dielétrico.

Na nitretação por eletroerosão com eletrodo de cobre, o menor valor de TD foi evidenciado quando realizada a usinagem com adição de 30 g.L<sup>-1</sup> de SiC ao fluido, apresentando uma diminuição de 44,98% quando comparado com o processo sem adição de pó.

Quando utilizado o eletrodo de grafita, o menor valor médio de TD foi registrado na proporção de 40 g.L<sup>-1</sup> de SiC, representando cerca de 69,73% de redução quando comparado com o processo sem adição de SiC.

**Figura 28 - Valores de TD encontrados na usinagem com eletrodo de cobre eletrolítico e grafita nas diferentes composições de fluidos dielétricos**



Fonte: Autor, 2022.

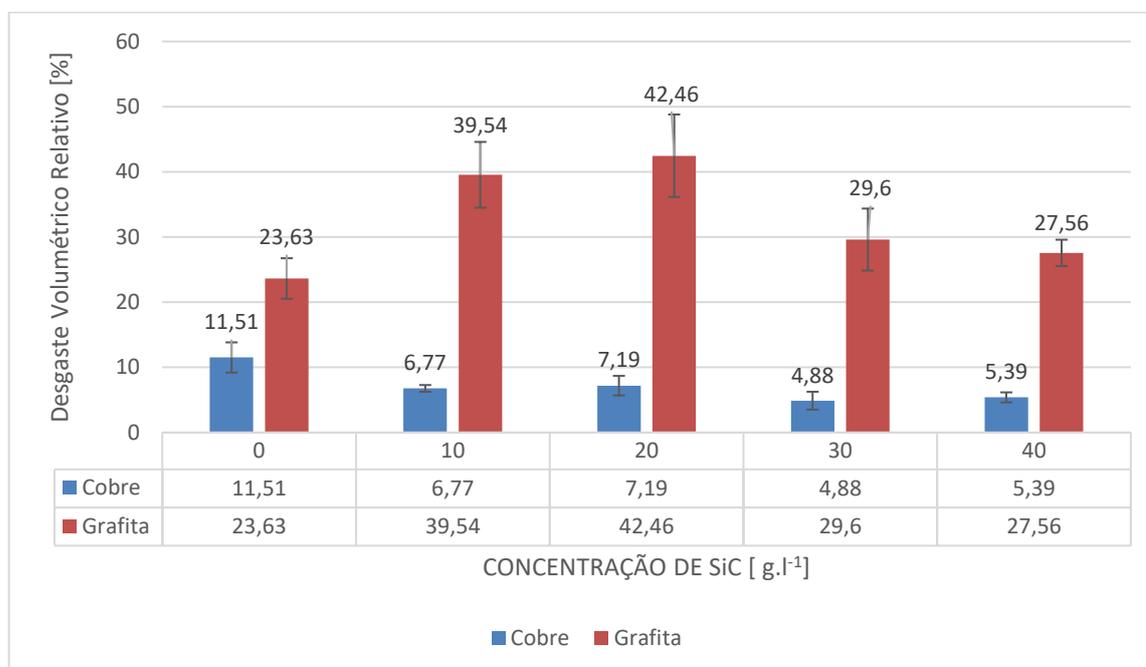
Segundo Parvez e Abuthakeer (2021) o efeito ponte promovido pelas partículas do pó adicionado ao fluido alteram a fenda de trabalho, produzindo maior energia das descargas elétricas que aquecem e vaporizam o material da peça de trabalho, possibilitando aumento da TRM, porém não influenciando o desgaste do eletrodo, ou seja, não altera a TD. De forma geral, percebe-se maior TD quando o processo foi realizado utilizando eletrodo de grafita, fato que já foi demonstrado por Lima (2018), quando realizou a nitretação por eletroerosão do aço AISI 4340, por Santos (2019) que realizou a nitretação por descargas elétricas da liga Ti-6Al-4V com adição de SiC

em pó e por Barbalho (2021), ao realizar o processo no aço AISI 4140 variando a granulometria do pó abrasivo misturado ao fluido dielétrico.

Deve-se ressaltar, que no processo de usinagem por descargas elétricas, quanto menor for o TD, melhor é o desempenho da usinagem. A TD do eletrodo de grafita foi pelo menos 2,5 vezes maior do que a do eletrodo de cobre em todas as composições de fluido dielétrico, fato que colabora para melhor desempenho da usinagem, como pode ser melhor compreendido ao analisar a Figura 29.

Observa-se que o DVR foi consideravelmente menor utilizando eletrodo de cobre no processo. O DVR relaciona a TD com a TRM, logo, quanto menor o valor do DVR, melhor o desempenho da usinagem, já que se deseja retirar maior quantidade de material da peça com o mínimo de desgaste da ferramenta. Sendo assim, a configuração que apresentou o melhor desempenho foi utilizando eletrodo de cobre com adição de pó de SiC, na proporção de 30 g.L<sup>-1</sup>.

**Figura 29 – Análise do DVR na usinagem com eletrodo de cobre eletrolítico e grafita nas diferentes composições de fluidos dielétricos**



Fonte: Autor, 2022.

Ao comparar o desempenho da usinagem utilizando como parâmetros a TRM, TD e DVR, os resultados desta pesquisa mostram que ao utilizar eletrodo de cobre, obtém-

se melhores resultados adicionando pó de SiC ao fluido dielétrico, especificamente na proporção de 30 g.L<sup>-1</sup> em função do menor DVR encontrado. No entanto, ao realizar a nitretação por eletroerosão com eletrodo de grafita, foi evidenciado que os resultados utilizando pó de SiC adicionado ao fluido dielétrico foram piores quando comparado com o processo realizado sem adição deste abrasivo ao fluido dielétrico.

Segundo Khan, Rao e Pabla (2020) vários pesquisadores observam aumento da TRM e redução da TD, devido a adição de pó ao fluido dielétrico. O motivo está relacionado com o preenchimento da fenda de trabalho pelas partículas que se energizam e tornam a fenda de trabalho maior devido às descargas elétricas precoces.

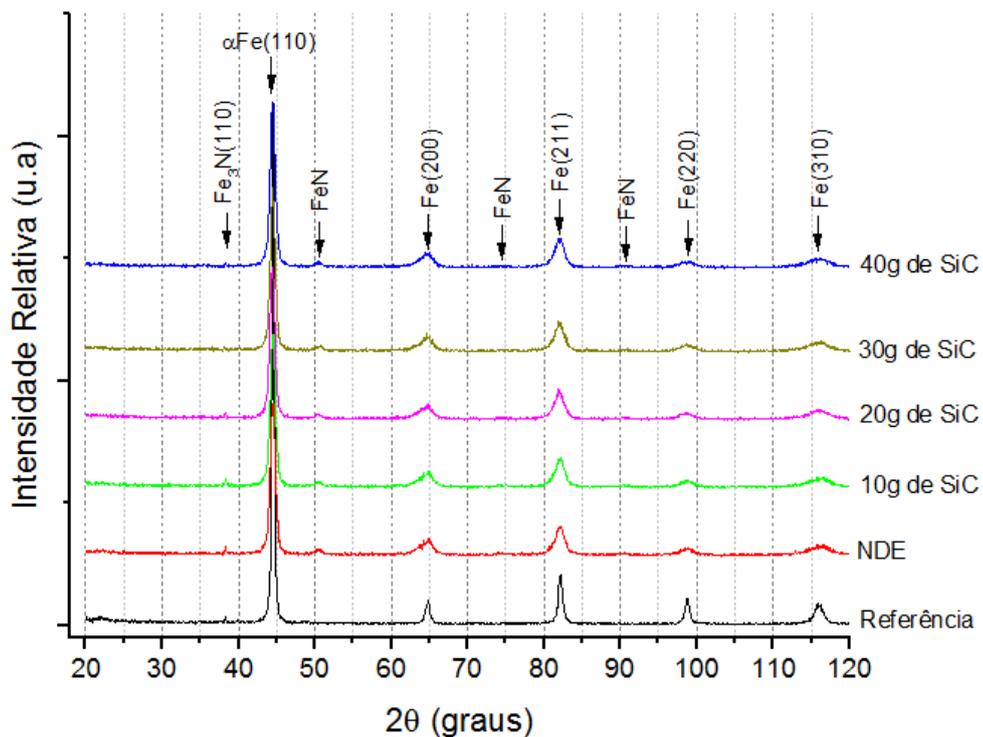
Os resultados mostram que a adição de SiC ao fluido dielétrico tem influência direta no desempenho da usinagem e ratificam o que foi mostrado por Marashi *et al.* (2016), quando afirmaram que, para se obter aumento da eficiência da nitretação por eletroerosão com adição de pó ao fluido dielétrico, é necessário uma adequada escolha do pó abrasivo.

#### **5.4. Difração de Raios X**

Os difratogramas obtidos das amostras usinadas com eletrodo de cobre eletrolítico e grafita podem ser vistos nas Figuras 30 e 31, respectivamente. Cada uma das curvas representa uma amostra com fluido dielétrico diferente, com adição de SiC em diferentes proporções e também isento deste pó, com apenas água deionizada e ureia, além de apresentar uma curva referência do material base.

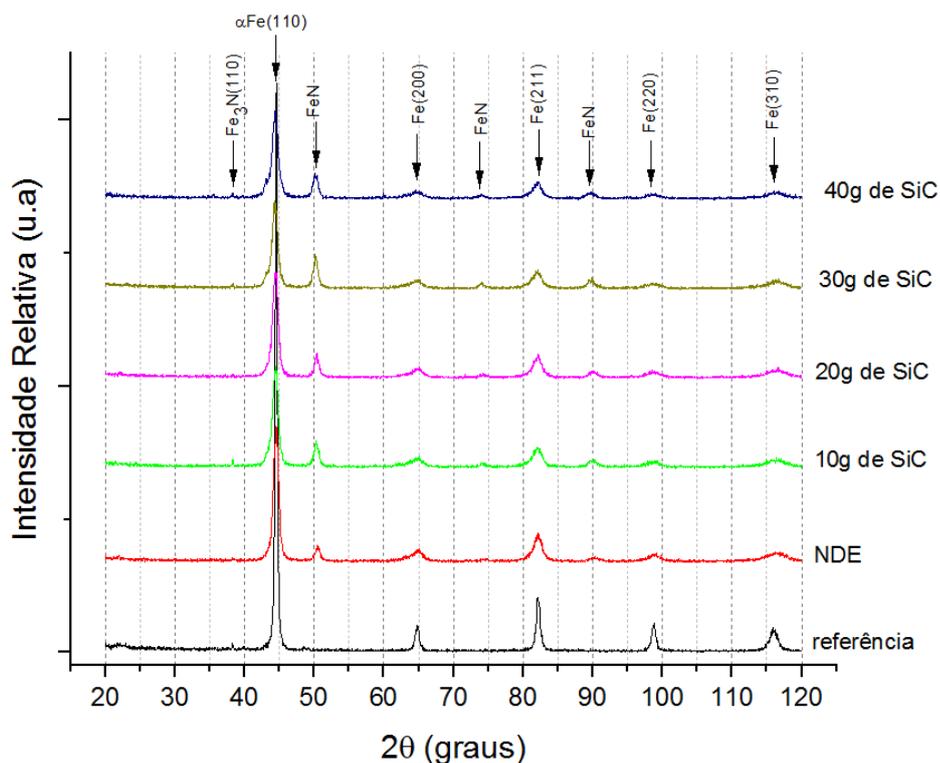
É possível identificar os picos de nitretos de ferro FeN e Fe<sub>3</sub>N formados nas amostras usinadas em comparação com o substrato, o aço ABNT 4140. Conforme observado por Santos (2013), a utilização de ureia, como fonte de nitrogênio, diluída em água deionizada para formação do fluido dielétrico, favoreceu a decomposição do nitrogênio e, conseqüentemente, a implantação nas superfícies das peças usinadas com a formação de nitretos. Para Molinetti *et al.* (2015), isso evidencia que o processo EDM pode ser aplicado para modificar as propriedades mecânicas superficiais dos materiais.

Figura 30 - Difratogramas das superfícies usinadas com eletrodo de cobre eletrolítico



Fonte: Autor, 2022.

Figura 31 - Difratogramas das superfícies usinadas com eletrodo de grafita



Fonte: Autor, 2022.

O requisito fundamental para o enriquecimento por implantação de íons pelo processo de eletroerosão é obter solução aquosa contendo o elemento que se deseja implantar. Os íons do elemento químico são incorporados ao canal de plasma, possibilitando a implantação do mesmo (SANTOS *et al.*, 2017).

Ao analisar os difratogramas das amostras individualmente submetidas à nitretação por eletroerosão nas diferentes proporções de SiC adicionado ao fluido dielétrico, não é possível afirmar que teve diferença expressiva, tanto quando usinado com eletrodo de cobre eletrolítico como também com grafita.

### 5.5. Análise de Microdureza

A Tabela 8 apresenta os valores médios de microdureza obtidos nas camadas refundidas e intermediárias e seus respectivos desvios padrão encontrados nas amostras usinadas com eletrodo de cobre eletrolítico. Foram realizadas cinco medições, tanto na camada refundida como na camada intermediária, para critério de comparação com o material base.

**Tabela 8 – Microdureza Vickers das amostras usinadas com eletrodo de cobre eletrolítico.**

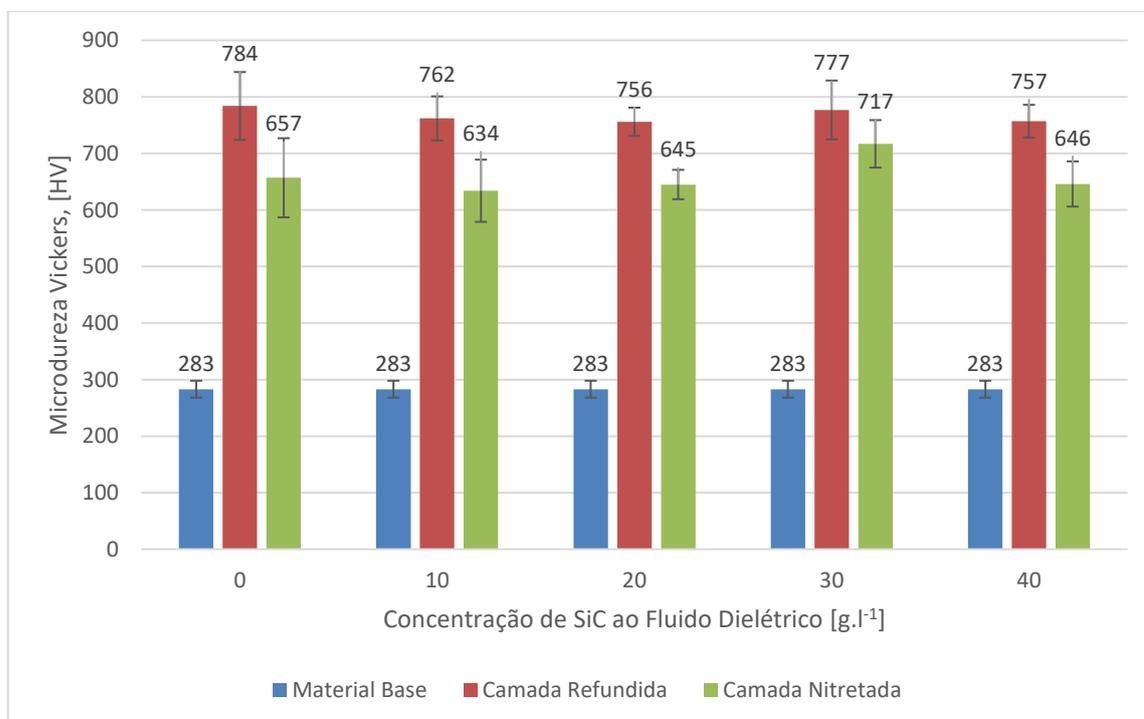
Concentração de SiC ao FD (g.l <sup>-1</sup> )	Matriz	DUREZA HV		GANHO DE DUREZA	
		Camada Refundida	Camada Nitretada	Camada Refundida	Camada Nitretada
0	283±15	784 ± 60	657 ± 70	177%	132%
10		762 ± 39	634 ± 55	169%	124%
20		756 ± 25	645 ± 26	167%	128%
30		777 ± 52	717 ± 42	174%	153%
40		757 ± 29	646 ± 40	167%	128%

Fonte: Autor, 2022.

Segundo Rehman *et al.* (2020) a adição de partículas de pó ao fluido tem pouca ou nenhuma influência no valor da dureza das camadas, já que, a dureza é influenciada pela transferência de calor e subsequente resfriamento pelo fluido dielétrico.

Nota-se que a maior microdureza média encontrada na camada refundida ocorreu na amostra usinada sem adição de SiC ao fluido dielétrico, em torno de 177% a mais que o metal base. Na camada intermediária, o maior valor médio alcançado ocorreu na amostra usinada com adição de 30 g.L<sup>-1</sup> de SiC ao fluido dielétrico, representando cerca de 153% de ganho de dureza quando comparado com a matriz. Todas as amostras, independentemente da quantidade de pó abrasivo adicionado ao fluido dielétrico, apresentaram valores consideravelmente maiores de microdureza nas camadas, evidenciando, portanto, a funcionalidade do processo de nitretação por eletroerosão. A Figura 32 apresenta de forma gráfica os resultados obtidos de dureza de todas as amostras usinadas com eletrodo de cobre. Para cada amostra usinada, variando a composição do fluido dielétrico, consta os valores médios da microdureza da camada intermediária, camada refundida e do metal base. Na usinagem utilizando o eletrodo de cobre eletrolítico, o valor mínimo de ganho de dureza na camada nitretada foi na ordem de 124% a mais do que o material base (matriz).

**Figura 32 – Microdureza das camadas após usinagem por EDM com eletrodo de cobre eletrolítico.**



Fonte: Autor, 2022.

A Tabela 9 apresenta os valores médios de microdureza obtidos nas amostras usinadas com eletrodo de grafita e a Figura 33 apresenta graficamente os resultados

sintetizados. Assim como na usinagem com eletrodo de cobre eletrolítico, foram realizadas cinco medições, tanto na camada refundida como na camada intermediária, para critério de comparação com o material base.

**Tabela 9 - Microdureza das amostras usinadas com eletrodo de grafita**

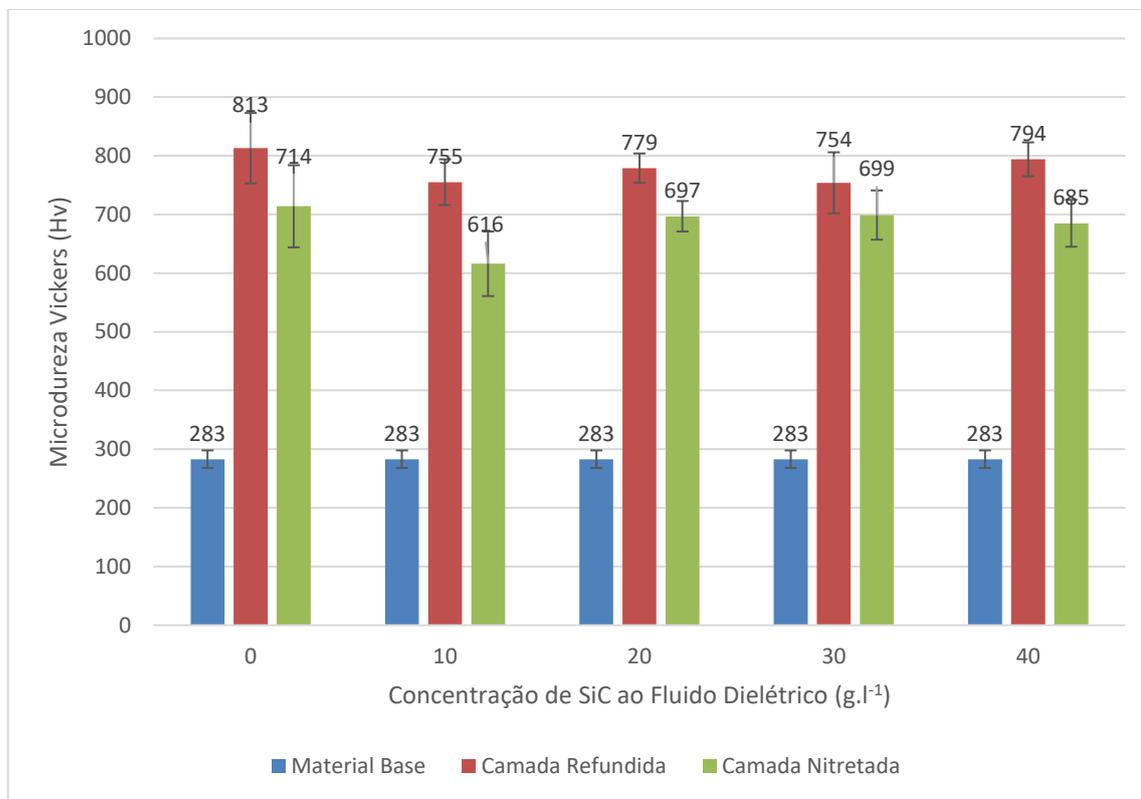
Concentração de SiC ao FD (g.L <sup>-1</sup> )	Matriz	Dureza HV		Ganho de Dureza	
		Camada Refundida	Camada Nitretada	Camada Refundida	Camada Nitretada
0	283±15	813 ± 60	714 ± 70	187%	152%
10		755 ± 39	616 ± 55	167%	118%
20		779 ± 25	697 ± 26	175%	146%
30		754 ± 52	699 ± 42	166%	147%
40		794 ± 29	685 ± 40	180%	142%

Fonte: Autor, 2022.

Os maiores valores médios de microdureza da camada refundida e da camada intermediária encontrados, ocorreram na amostra usinada sem adição de SiC ao fluido dielétrico, registrando cerca de 187% e 152%, respectivamente, de ganho de dureza, quando comparado com o metal base. Todas as amostras submetidas ao processo de nitretação por eletroerosão utilizando eletrodo de grafita apresentaram ganhos significativos de dureza. O menor valor médio de microdureza encontrado ocorreu quando se utilizou a maior concentração de SiC ao fluido (40 g.L<sup>-1</sup>) e, assim, apresentou ganho de 142% quando comparado com o valor de microdureza do material base.

Santos (2013) cita que o ganho de dureza nas camadas intermediárias e refundidas está associado aos nitretos incorporados na superfície do material, sendo mais acentuado na refundida, uma vez que essa camada está mais suscetível à formação destes nitretos devido a maior concentração de nitrogênio nesta região. Além disso, Santos *et al.* (2016), afirmam que a camada refundida pode-se tornar mais dura devido ao resfriamento brusco no material, que ocorre de fora para dentro.

**Figura 33 - Microdureza das camadas após usinagem por EDM com eletrodo de grafita.**



Fonte: Autor, 2022.

De acordo com Muttamara e Kanchanomai (2016), a descarbonetação da superfície usinada por EDM pode ocorrer em função do uso da água deionizada, o que faria com que as camadas superficiais das amostras usinadas apresentassem dureza inferior à do substrato. Como o valor de microdureza encontrado foi consideravelmente maior, tanto com eletrodo de cobre como com o de grafita em todas as amostras, comprovou-se a inserção do nitrogênio nas camadas superficiais das peças usinadas.

Ao comparar o processo de nitretação por eletroerosão com eletrodo de cobre eletrolítico e grafita, com e sem adição de SiC ao fluido dielétrico, observa-se que não ocorreram alterações significativas nos valores médios de microdureza Vickers HV, quando comparados os processos isoladamente. No entanto, ao comparar um processo com o outro, um discreto aumento na dureza da camada nitretada ocorreu quando utilizado o eletrodo de grafita, resultado que corrobora com os trabalhos de Barbalho (2021), que encontrou maiores valores médios de microdureza quando se

realizou a nitretação por eletroerosão do aço AISI 4140 com eletrodo de grafita, com e sem o SiC adicionado ao fluido dielétrico.

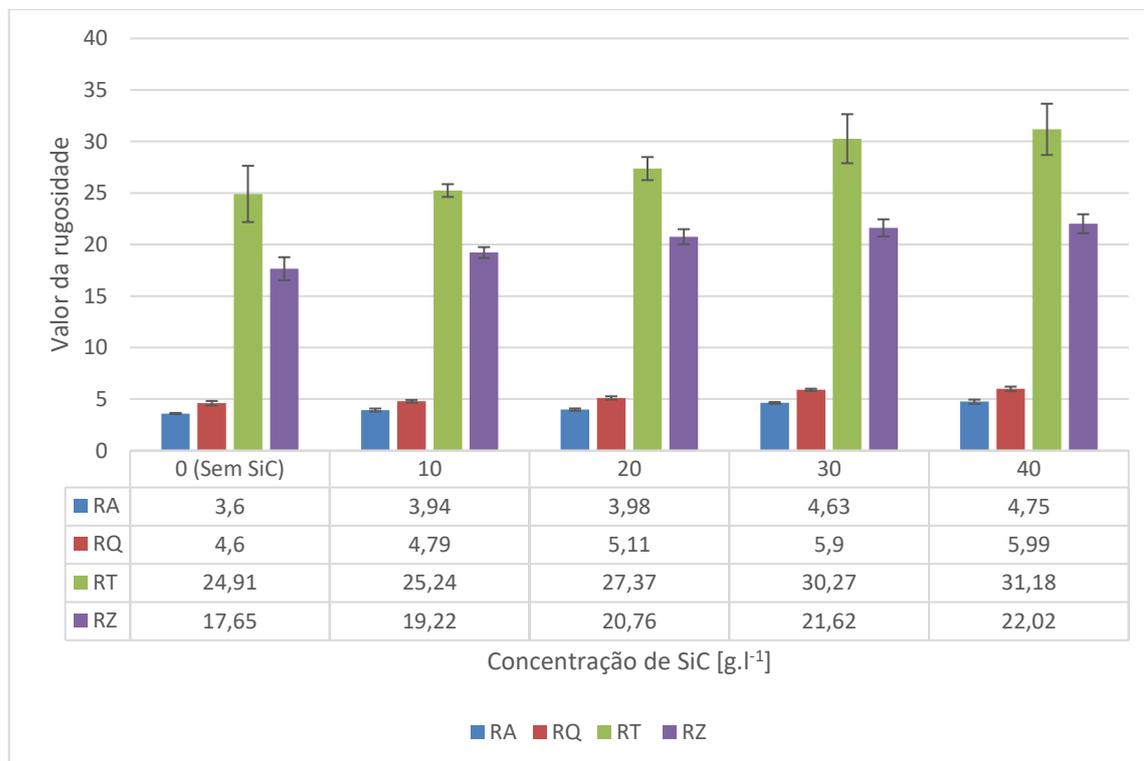
Em seus estudos utilizando o cobre eletrolítico e a grafita como eletrodos ferramenta, Santos et al. (2016), perceberam que, tanto o cobre quanto o carbono, são transferidos por difusão para a superfície do material usinado. Desta forma, este aumento de dureza nas peças usinadas com eletrodo de grafita, pode ter sido motivado pela incorporação de carbono oriundo da grafita à superfície das amostras, formando não apenas nitretos, mas, também, carbonetos de ferro que não foram observados na usinagem com eletrodo de cobre eletrolítico.

## 5.6. Avaliação da Rugosidade

Através das Figuras 34 e 35 pode-se comparar os valores das medidas de rugosidade das amostras usinadas e nitretadas por descargas elétricas com eletrodos de cobre eletrolítico e grafita, respectivamente, com variação da concentração de SiC misturado ao fluido dielétrico. Em todas as amostras foram realizadas três medições e os valores no gráfico representados são resultados da média e desvio padrão das medidas coletadas das amostras nos parâmetros Ra, Rq, Rt e Rz.

Estudos mostram que é possível melhorar a rugosidade de peças usinadas pelo processo EDM quando se adiciona o pó de carbeto de silício ao fluido dielétrico. Isso ocorre pela baixa resistência elétrica das partículas de pó que ficam submersas no fluido, fazendo com que esta solução se torne mais condutora e com uma fenda de trabalho mais ampla. Isso aumentam as chances de ocorrências de curto circuitos, possibilita maior dispersão da energia de descarga e, conseqüentemente, redução da rugosidade. (CHOW *et al.*, 2008; KURIACHEN & MATHEW, 2014). Contudo, os resultados obtidos deste estudo não evidenciaram diminuição das amplitudes de rugosidade quando se adicionou pó de SiC ao fluido dielétrico. De acordo com Rodic *et al.* (2021) a distribuição uniforme das descargas promovidas pelas partículas do pó resulta na remoção uniforme do material da peça e conseqüentemente na qualidade da superfície da peça e alterações no valor da rugosidade.

**Figura 34 – Valores de rugosidade das amostras usinadas por EDM com eletrodo de cobre eletrolítico**



Fonte: Autor, 2022.

De acordo com Parvez e Abuthakeer (2021) a qualidade da superfície usinada com pó adicionado ao fluido é melhorada devido às crateras de menor tamanho, que se formam na superfície. O canal de plasma modificado pela presença do pó promove uma dispersão homogênea da energia de descargas elétricas por toda extensão da superfície usinada. Mondal, Surekha e Choudhury (2018) observaram tamanho reduzido das crateras ao adicionar pó de SiC no fluido, devido a redução do número de micro trincas, o que influencia diretamente na rugosidade da superfície usinada.

Ao comparar os valores de rugosidade nas diferentes configurações de fluido dielétrico levando em consideração o desvio padrão, percebe-se que os valores analisados praticamente não apresentaram diferença significativa. No entanto, ao analisar os valores médios, nota-se discreto aumento na rugosidade com a adição do abrasivo em todos os parâmetros de rugosidade. Estudos recentes de Marashi *et al.* (2016), mostraram que a produção de peças com boa qualidade superficial pode ser favorecida quando se utiliza pós abrasivo ao fluido dielétrico. Porém, os dados obtidos

e analisados deste estudo mostram que não ocorreu diferença expressiva, com tendência, inclusive, de aumento e não decréscimo na rugosidade utilizando o pó misturado ao fluido. No parâmetro Ra, por exemplo, a menor rugosidade ocorreu na usinagem sem adição de SiC ao fluido dielétrico, com valor de  $3,6 \pm 0,05 \mu\text{m}$ , e a maior rugosidade ocorreu na usinagem com adição de SiC na concentração de  $40 \text{ g.L}^{-1}$ , com valor médio de  $4,75 \pm 0,19$ , um aumento em torno de 31,94%. Ao analisar o parâmetro Rt no mesmo cenário, essa diferença cai para 25,17%. A Tabela 10 mostra a variação percentual dos valores das medidas de rugosidade no parâmetro Ra de todas amostras usinadas com eletrodo de cobre eletrolítico.

**Tabela 10 - Rugosidade no parâmetro Ra das amostras usinadas por EDM com eletrodo de cobre eletrolítico**

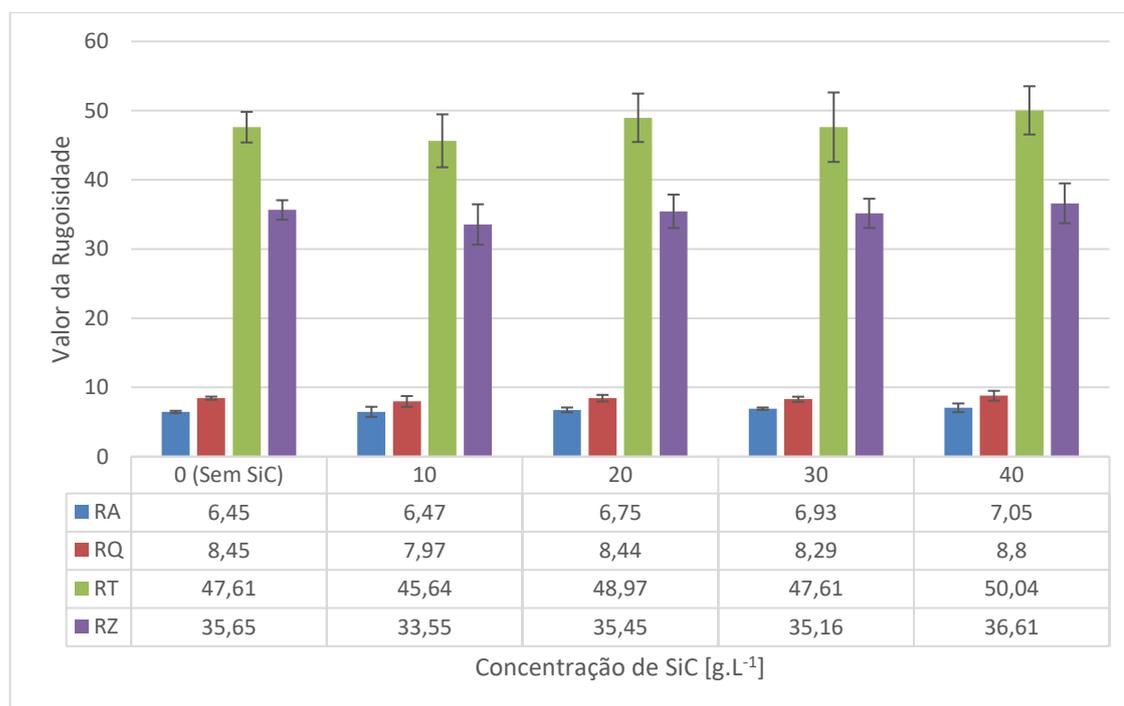
Fluido Dielétrico	CONCENTRAÇÃO DE SiC [ g.L <sup>-1</sup> ]			
	10	20	30	40
Com adição de SiC	3,94 ± 0,14	3,98 ± 0,11	4,63 ± 0,08	4,75 ± 0,20
Sem adição de SiC	3,6 ± 0,05			
Variação Percentual	9,40%	10,60%	28,60%	31,94%

Fonte: Autor, 2022.

Observa-se que os valores médios de rugosidade aumentam à medida em que se aumenta a concentração de SiC ao fluido dielétrico. Barbalho (2021), em sua pesquisa de usinagem por descargas elétricas do aço AISI 4140 utilizando o SiC adicionado ao fluido dielétrico, mostrou que há uma leve tendência de diminuição da rugosidade quando se reduz a granulometria do pó abrasivo. Vale ressaltar que os testes deste estudo foram realizados com a granulometria de 600 mesh em todos os casos.

Assim como na nitretação por eletroerosão utilizando eletrodo de cobre eletrolítico, no processo com o eletrodo de grafita também não foi evidenciada diferença significativa nos valores médios de rugosidade levando em consideração os intervalos de confiança do desvio padrão. Todavia, ao analisar os valores médios, percebe-se pequena diminuição da rugosidade nos parâmetros Rq, Rt e Rz quando se utilizou pó abrasivo na concentração de  $10 \text{ g.L}^{-1}$  ao fluido dielétrico.

**Figura 35 - Valores de rugosidade das amostras usinadas por EDM com eletrodo de grafita**



Fonte: Autor, 2022.

Ao comparar os valores médios das medidas das rugosidades no parâmetro Ra na usinagem com eletrodo de grafita, nota-se que houve pequena variação. Foi registrado um aumento de 9,3% na rugosidade quando se utilizou a concentração de 40 g.L<sup>-1</sup> comparado com a usinagem que se obteve menor valor de rugosidade, a usinagem sem adição de pó ao fluido dielétrico. A Tabela 11 mostra em detalhes a variação percentual dos valores médios das medidas das rugosidades de todas as amostras submetidas ao processo nitretação por eletroerosão com eletrodo de grafita.

**Tabela 11 - Rugosidade no parâmetro Ra das amostras usinadas por EDM com eletrodo de grafita**

Fluido Dielétrico	CONCENTRAÇÃO DE SiC [ g.L <sup>-1</sup> ]			
	10	20	30	40
Com adição de SiC	6,47 ± 0,73	6,75 ± 0,35	6,93 ± 0,17	7,05 ± 0,63
Sem adição de SiC	6,45 ± 0,17			
Variação Percentual	0,30%	4,70%	7,40%	9,30%

Fonte: Autor, 2022.

De forma geral, menores valores de rugosidade foram registrados quando as amostras nitretadas por eletroerosão foram realizadas sem a adição do SiC, tanto com eletrodos de cobre como de grafita. Ao comparar os valores da rugosidade, tomando como critério de comparação o tipo de eletrodo utilizado no processo, percebe-se diferença expressiva e considerável. Quando se utilizou o eletrodo de cobre, o acabamento superficial ficou melhor do que quando utilizado o eletrodo de grafita em todas as configurações de fluido dielétrico. A Tabela 12 apresenta a comparação dos valores das rugosidades das amostras usinadas com eletrodo de cobre e grafita.

**Tabela 12 - Comparação dos valores de rugosidade Ra das amostras usinadas com eletrodo de cobre eletrolítico e grafita**

DESCRIÇÃO	CONCENTRAÇÃO DE SiC [g.L <sup>-1</sup> ]				
	0	10	20	30	40
<b>Eletrodo de Cobre</b>	3,6 ± 0,05	3,94 ± 0,14	3,98 ± 0,11	4,63 ± 0,08	4,75 ± 0,20
<b>Eletrodo de Grafita</b>	6,45 ± 0,17	6,47 ± 0,73	6,75 ± 0,35	6,93 ± 0,17	7,05 ± 0,63
<b>Variação Percentual</b>	79,20%	64,20%	69,60%	49,70%	48,4
<b>Melhor Acabamento</b>	cobre eletrolítico	cobre eletrolítico	cobre eletrolítico	cobre eletrolítico	cobre eletrolítico

Fonte: Autor, 2022.

Como apresentado na Tabela 12, a usinagem com eletrodo de cobre proporcionou melhor acabamento nas peças usinadas em todas as configurações de testes, com e sem adição de SiC ao dielétrico. Estes dados vão de encontro com os estudos de Muttamara *et al.* (2016), que afirmam que o eletrodo de grafita produz maiores valores de rugosidade nas peças usinadas do que o eletrodo de cobre, devido à aspereza na face da peça provocada pelo pó de grafita, fragmento erodido do eletrodo ferramenta.

Prihandana, Mahardika e Sriani (2020) afirmam que é difícil determinar a concentração ideal de pó adicionado ao fluido que promova alta TRM e qualidade da superfície adequada. Pois, para alcançar tais resultados, não depende somente do tipo e concentração do pó, mas também, dos parâmetros de usinagem.

## 6. CONCLUSÃO

Frente aos estudos realizados e com base nos resultados obtidos, foi possível tirar as seguintes conclusões:

- Foi evidenciada a formação das camadas nitretadas e refundidas em todas as amostras usinadas por EDM com eletrodos de cobre eletrolítico e grafita. Nota-se variações irrelevantes nos valores médios de espessura quando comparado o processo com e sem adição de SiC ao fluido dielétrico no processo de nitretação por descargas elétricas com eletrodo de cobre. Contudo, com o eletrodo de grafita, além de produzir camadas mais espessas que o eletrodo de cobre, foi evidenciado aumento de 156,4% a mais na espessura da camada intermediária quando se utilizou o SiC na concentração 30 g.L<sup>-1</sup> e de 87,6% a mais com 40 g.L<sup>-1</sup>, comparado com o teste sem adição do pó de SiC ao fluido dielétrico.
- A adição de SiC ao fluido dielétrico teve influência no desempenho do processo de nitretação por eletroerosão. Quando se utilizou o cobre eletrolítico como eletrodo ferramenta, a TRM foi maior com a adição de SiC, tendo como posição de destaque o teste com maior quantidade do pó, na composição de 40 g.L<sup>-1</sup>. No entanto, ao utilizar a grafita como eletrodo ferramenta a TRM foi menor, ou seja, ao adicionar o SiC ao fluido dielétrico, observou redução neste parâmetro quando comparado com a usinagem sem o pó misturado ao fluido, uma vez que a presença de micropartículas no meio pode fazer com que os elétrons e íons percam energia em sua trajetória em direção à peça;
- A adição de pó abrasivo ao fluido dielétrico quando usinado com eletrodo de cobre eletrolítico fez diminuir o DVR, ou seja, melhorou o desempenho da usinagem. O melhor desempenho foi alcançado utilizando-se o pó na proporção de 30 g.L<sup>-1</sup>. Ao utilizar eletrodo de grafita, o comportamento foi o inverso, o menor DVR foi sem adição do pó abrasivo, ou seja, o melhor desempenho foi registrado quando se fez a usinagem sem adição de pó de SiC. Desta forma, a adição de pó de SiC melhorou o desempenho da usinagem e teve efeito positivo apenas quando realizado a nitretação por eletroerosão com eletrodo de cobre eletrolítico.

- As análises difratográficas possibilitaram a identificação de picos de nitretos de ferro FeN e Fe<sub>3</sub>N, mostrando que a nitretação por eletroerosão pode ser utilizada para a realização de modificações superficiais no material usinado, já que houve incorporação do nitrogênio na camada nitretada;
- Foi evidenciado aumento de dureza em todas as amostras analisadas, tanto com eletrodo de cobre eletrolítico, como também o de grafita, em todas as configurações de composição do fluido dielétrico. Quando utilizado o eletrodo de cobre, a amostra que apresentou maior valor de microdureza na camada intermediária foi aquela usinada com adição de SiC ao fluido dielétrico na concentração de 30 g.L<sup>-1</sup>, tendo registrado um ganho em torno de 153% de dureza comparado com o metal base. Quando feito com eletrodo de grafita, o maior valor médio de microdureza foi obtido na amostra usinada sem adição de pó de SiC ao fluido dielétrico, o que representou ganho de 152% comparado com a matriz. Porém, ao analisar os resultados de microdureza entre as amostras submetidas ao processo nitretação por eletroerosão, levando em consideração a margem de erros, nota-se que não houve diferenças expressivas entre elas;
- Ao comparar os valores médios, nota-se que a rugosidade foi maior quando o processo foi executado com adição do pó abrasivo ao fluido dielétrico. Com eletrodo de cobre o maior valor de rugosidade encontrado foi 31,94% maior do que sem adição do pó. Já com eletrodo de grafita essa variação foi menor, alcançando cerca de apenas 9,3% quando comparado com o processo sem adição deste elemento ao fluido dielétrico. Levando em consideração a margem de erros, não se pode afirmar que apresentaram diferenças significativas no acabamento superficial, tanto com eletrodo de cobre como o de grafita nas diferentes composições de fluido dielétrico.
- A incorporação do pó abrasivo SiC teve influência no processo de nitretação por eletroerosão, resultando em melhor desempenho de usinagem quando feito com eletrodo de cobre eletrolítico e maiores espessuras de camada nitretada quando feito com eletrodo de grafita. Isso mostra que os resultados são satisfatórios e indicam viabilidade no processo com incorporação de aditivos ao fluido dielétrico como meio de alcançar determinadas características.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar o processo nitretação por eletroerosão com adição de SiC nas mesmas concentrações deste trabalho, porém, alterando os parâmetros de usinagem, separando as operações em desbaste e acabamento, para avaliar mais especificamente os efeitos da adição do SiC na rugosidade;
- Refazer o mesmo estudo, utilizando outros tipos de pós como alumina, carbetto de boro, entre outros, e comparar o desempenho entre eles;
- Fazer análise de viabilidade do processo nitretação por eletroerosão em aços de alto carbono como, por exemplo, o aço SAE 1070, 1080 e 1090, e em aplicações específicas.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, N. M.; SOLOMON, D. G.; BAHARU, M. F. **A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)**. International Journal of Machine Tools and Manufacture. N. 7-8. p. 1214- 1228. 2007.

ALBINSKI, K.; MUSIOL, K.; MIERNIKIEWICZ, A.; LABUZ, S.; MALOTA, M. **The Temperature of a Plasma Used in Electrical Discharge Machining**. Plasma Sources Sci. Technol. N.5, p 736-742, 1996.

AL-KHAZRAJ, A.; AMIN, S.A.; ALI, S.M. **Fatigue Life of Graphite Powder Mixing Electrical Discharge Machining AISI D2 Tool Steel**. Journal of Solid Mechanics, v.. 10, n.: 2, pp. 338-353. 2018.

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

ARANTES, L. J. **Avaliação de fluidos dielétricos no processo de usinagem por descargas elétricas**. Dissertação de M.Sc., UFU/Mestrado em Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, Brasil, 2001.

ASSARZADEH, S.; GHOREISHI, M. **A dual response surface-desirability approach to process modeling and optimization of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder-mixed electrical discharge machining (PMEDM) parameters**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. v. 64, pp. 1459-1477. Feb. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 172/2000; Critérios de Classificação dos Aços**. Rio de Janeiro, 2000. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 87/2000; **Aços Carbono e Ligados para Construção Mecânica-Designação e Composição Química**. Rio de Janeiro, 2000. 19p.

AZEVEDO, L. M. S. **Síntese de niobato de sódio a partir do óxido de nióbio e nióbio metálico**. Dissertação de Mestrado em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2010.

Barbalho, Eduardo de Castro. **Efeitos da adição do SiC ao fluido dielétrico na camada nitretada do aço AISI 4140 após nitretação por PMEDM**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte – 2021.

BENEDICT, G. F. **Nontraditional manufacturing processes**. Marcel Dekker. New York. 1987. p. 207-229.

CAMARGO, B. C.; COSTA, H. L.; RASLAN, A. A. **Endurecimento superficial de uma liga Ti-6Al-4V por meio de usinagem por descargas elétricas**. In: COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 5., 2009, Belo Horizonte, MG. Anais...

CHAKRABORTY S., DEY V., GHOSH B. S.K. **A review on the use of dielectric fluids and their effects in electrical discharge machining characteristics**. Science Direct PrecisionEngineering. N. 40. p. 1-6. 2015.

CHAVES, L. E. C.; *et al.* **Benefícios na Adoção de Indicador Não Qualidade Para Prover Reuso de Aço em uma Empresa de Fabricação de Molas**. In: XI Congresso Nacional de Excelência em Gestão n. 1984-9354, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 13-14 ago. 2015.

CHE HARON, CH; GHANI, JA; BURHANUDDIN, Y; SEONG, YK, SWEE, CY. **Copper and Graphite Electrodes Performance in Electrical-Discharge Machining of XW42 Steel**, Journal of Materials Processing Technology 201, 570-573. 2008.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7.ed. ampliada e revista. - São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2012. 599p.

CHOW, 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. N. 195. P. 160-170. 2008.

COLOMBO, T. C. (2012). **Análise numérica do forjamento em matriz aberta para a produção de eixos vazados**. Dissertação de Mestrado – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

CRUZ JR, E. J. – **A influência do tamanho do grão ferrítico da peça na integridade superficial de peças erodida**. 2015. 51f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) UNESP - Campus de Ilha Solteira, 2015.

DÍAZ-GUILLÉN, J.c. *et al.* **Surface Properties of Fe4N Compounds Layer on AISI 4340 Steel Modified by Pulsed Plasma Nitriding**. Journal Of Materials Science & 93 Technology, [s.l.], v. 29, n. 3, p.287-290, mar. 2013. Elsevier BV.

EL-HOFY, H. A.G. **Advanced Machining Processes - Nontraditional and Hybrid Machining Processes**. 1 ed. Egypt: McGraw Hill Professional, 2005. p.115-130.

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

HO, K. H.; NEWMAN, S. T. **State of the art electrical discharge**. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Birmingham, v. 43, n. 13, p. 1287-1300, 2003.

JAMESON, E. C. **Electrical discharge machining**. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 2001. cap. 1, p. 1-21.

JESWANI M. L. **Effect of the addition of graphite powder to kerosene used as the dielectric fluid in electrical discharge machining.** Elsevier Sequoia S.A., Lausanne - Printed in The Netherlands. N. 70. p.133-139. 1981.

JHA Bhola, RAM K. e RAO Mohan. **An overview of technology and research in electrode design and manufacturing in sinking electrical discharge machining.** Journal of Engineering Science and Technology Review. N. 4. P.118-130. 2011.

JOSHI, A.Y; JOSHI, A.Y. **A systematic review on powder mixed electrical discharge machining.** Heliyon. v. 5 n. e02963, p. 1-12. 2019.

KAHNG, C. H.; RAJURKAR, K. P. **Fundamental Theories of the Parameters of EDM Process.** SME Technical Papers. V.1. p. 77-285, 1977.

KHAN, M.Y.; RAO, P.S.; PABLA, B.S. **Powder mixed electrical discharge machining (PM-EDM):** A methodological review. Materials Today: Proceedings. 2020.

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

KNERR, C. H.; ROSE, T. C.; FILKOWSKI, J. H. Gasnitriding – In: **ASM Handbook Vol 4. Heat Treating.** USA ASM International. 6<sup>a</sup> ed, 2004. p. 387-409

KOBAYASHI, K. **The present and future developments of EDM and ECM.** In: International Symposium For Electromachining, pp. 29-47, Lausanne, abr. 1995.

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, S.; SINGH, R.; SINGH, T. P.; SETHI, B.L. **Surface modification by electrical discharge machining: A review.** Journal of Materials Processing Technology. N. 209. P. 3675-3687. 2009.

KUNIEDA, M. *et al.* **Advancing EDM through fundamental insight into the process.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vancouver, v. 54, n. 2, p. 64-87, 2005.

LEÃO Fábio N., PASHBY Ian R. **A review on the use of environmentally-friendly dielectric fluids in electrical discharge machining.** Journal of Materials Processing Technology. N. 149, p. 341–346. 2004.

LIMA, F. B. (2006). **Microestrutura e tenacidade de aços baixa liga tipo 41XX.** Dissertação de mestrado. UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

LIMA, F.; CORRÊA, M. **Efeitos da eletroerosão sobre a superfície de peças usinadas.** Revista Tecnologia, Fortaleza, v. 27, n. 1, p. 26-33. jun. 2006.

LIM, L. C.; LEE, L. C.; WONG, Y. S.; LU, H. H. **Solidification Microstructure of Electrodischarge Machined Surfaces of Tool Steels.** Materials Science and Technology. V. 7, p. 239-248. 1991.

LIMA, R. M.; RASLAN, A. A. **A utilização de Fluidos dielétricos à Base de Óleos Vegetais na Usinagem por Descargas Elétricas por Penetração.** In: COBEF – 5º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 14-17 abr. 2009.

LIMA, V. S. E.; SANTOS, R. N. N.; SILVA, E. R. *et al.* **Nitreção por descargas elétricas do aço AISI 4340.** In: CONEM – X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Salvador, Bahia, Brasil, 20-24 mai. 2018.

MARASHI, H., JAFARLOU, D.M., SARHAN, A.A.D., *et al.* **State of the art in powder mixed dielectric for EDM applications.** Precision Engineering, n. 46, pp. 11-33, mai. 2016.

MCGEOUGH, J. A. **Advanced Methods of Machining**. London: Chapman and Hall, 1988. p. 128-152.

McPHERSON, O. (2008). **Grain Growth in AISI 4140**. Dissertation – Worcester Polytechnic Institute, Massachusetts, USA.

MEHMOOD, S. **Electric Discharge Machining (EDM) Generated Surface Finish and its Effects on the Fatigue Life of Aerospace Alloys. Doctoral Thesis**. 2016. 186p. Department of Mechanical Engineering Faculty of Mechanical and Aeronautical Engineering University of Engineering & Technology Taxila, Pakistan.

MOHAN, B.; RAJADURAI, A.; SATYANARAYANA K. **Electric discharge machining of Al-SiC metal matrix composites using rotary tube electrode**. Journal of Materials Processing Technology. N.153. p. 978-985. 2004.

MOLINETTI, A., AMORIM, F. L., SOARES, P. C., *et al.* **Surface modification of AISI H13 tool steel with silicon or manganese powders mixed to the dielectric in electrical discharge machining process**. International Journal Advanced Manufacture Technology, v. 83, pp. 1057-1068, ago. 2015.

MONDAL, G., SUREKHA, B., CHOUDHURY, S.D. **Investigation on the influence of different powder mixed dielectric in electric discharge machining**. Material Today: Proceedings, v. 5, pp. 18281-18286, 2018.

MÜLLER, Arian; *et al.* **Análise da usinagem por eletroerosão com diferentes eletrodos-ferramenta**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO – COBEF, 2015, Salvador, Anais v.8, Salvador: COBEF, 2015.

MURTA, R. M. A.; SILVA, E. R.; SANTOS, R. F. *et al.* **Avaliação da camada nitretada por descargas elétricas na liga de titânio Ti6Al4V**. 72º Congresso Anual da ABM, v. 72, n. 1, p. 2015-2024, 2017.

MUTTAMARA, Apiwat *et al.* **Effect of Graphite Electrode to Surface's Characteristic of EDM.** *Matec Web Of Conferences*, [s.l.], v. 70, p.1002-1006, 2016. EDPSciences.

MUTTAMARA, Apiwat; KANCHANOMAI, Chaosuan. **Effect of Carbon in the Dielectric Fluid and Work pieces on the Characteristics of Recast Layers Machined by Electrical Discharge Machining.** *Metallurgical And Materials Transactions A*, [s.l.], v. 47, n. 6, p.3248-3255, 23 mar. 2016. Springer Nature.

NICÉSIO, I. C.; SILVA, S. P.; FILHO, A. F. *et al.* **Avaliação da qualidade da ureia no processo de nitretação por descargas elétricas do aço AISI 4140.** In: IX CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, pp. 21-25, Fortaleza, ago. 2016.

NICESIO, I. C. **Nitretação por descargas elétricas do aço AISI 4140 utilizando diferentes categorias de ureia.** 2017. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Cefet-mg, Belo Horizonte, 2017.

PANDEY Anand; SINGH Shankar. **Current research trends in variants of Electrical Discharge Machining: A review.** *International Journal of Engineering Science and Technology*. N. 2-6. p. 2172-2191. 2010.

PARVEZ, Y.A.; ABUTHAKEER, S.S. **Machining Characteristics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Powder Mixed Electric Discharge Machining of AA7050/SiCp/Al<sub>2</sub>O<sub>3p</sub> Hybrid Composites.** *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, v. 20, 2021.

PEÇAS, P., HENRIQUES, E. **Influence of silicone powder-mixed dielectric on conventional electrical discharge Machining.** *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 43, pp. 1465-1471, jun. 2003.

PHILIP, T.V.; McCaffrey, T.J. Ultra high Strength Steels. In: **ASM Handbook: Volume 1, Properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys.** Ohio: ASM International, 1990. p. 430-448.

PRIHANDANA, G.S.; MAHARDIKA, M.; SRIANI, T. **Micromachining in Powder-Mixed Micro Electrical Discharge Machining**. Applied Sciences, v. 10, n 3795, p.1-16, 2020.

RAJU, G.; SANTARAO, K.; GOVINDARAO, P. **Influence of powder mixed dielectric EDM on response variables and methods to optimize the response variables: a review**. International Research Journal of Engineering and Technology, v. 4, n. 8, pp. 98-103, ago. 2017.

RAMOS, Fabiano Dorneles. **A Influência das Tensões Sobre a Difusão de Nitrogênio no Processo de Nitretação a Plasma**. 2003 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

RASLAN, A. A.; SANTOS, R. F.; SILVA, E. R. FAPEMIG, Fundação de Amparado a Pesquisa de Minas Gerais; UFU, Universidade Federal de Uberlândia (MG). **Método de Nitretação através da Usinagem com Descargas - NDE**. BR 10 2012 030523- 2, 30 nov. 2012.

RASLAN, A. A. **Implantação iônica em meio aquoso por EDM: resistência ao desgaste de aço AISI 4140**. In: COBEF – 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, n. 2015-0392, Salvador, Bahia, Brasil, 18-22 mai. 2015.

REHMAN, A.U.; ARIF, W.; HUSSAIN, M.I.; MIRAN, S.; HUSSAIN, S.; LEE, G.H. **Analysis of Particle Size and Concentration in Die Sinking Electric Discharge Machining**. Materials, v. 15, n. 4932. 2022.

RODIC, D.; GOSTIMIROVIC, M.; SEKULIC, M.; SAVKOVIC, B.; STRBAC, B. **Investigation an assisting electrode powder mixed electrical discharge machining of nonconductive ceramic**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 118, p. 2419–2435. 2022.

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 Tencológica 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, R. F.; SILVA, E. R.; SALES, W. F.; RASLAN, A. A. **Influence of the Electrode Material on the Nitriding of Medium Carbon Steel Using Sink Electrical Discharge Machining**, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 90, 2002-2007, 2017.

SANTOS, R. N. N.; SILVA, E. R.; LIMA, V. S. E. *et al.* **Nitretação por descargas elétricas da liga Ti-6Al-4V com adição de pó abrasivo SiC ao fluido dielétrico**. Matéria, v. 24, n. 3, pp. e-12.474, set. 2019.

SCHMITZ, S. **Tratamento termoquímico de nitretação em aço austenítico EN 10090 X50**. 119f. Dissertação M.Sc., Universidade Federal do Paraná/Mestrado em Engenharia Mecânica, Curitiba, PR, Brasil 2014.

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas especiais**. 3 ed. São Paulo: Blucher, 2010. 664p. cap. 4, p. 171 -177.

SILVA, E. R. **Otimização e avaliação dos parâmetros de influência do processo AJEDM**. Tese de D. Sc., UFU/Doutorado em Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, Brasil, 2012.

SILVA, E. R.; SILVA, S. P.; FILHO, A. F.; NICÉSIO, I. C. *et al.* **Nitretação por descargas elétricas da liga Ti6Al4V**. In: IX CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, pp. 21-25, Fortaleza, ago. 2016.

SILVA, S. P. **Avaliação da resistência à fadiga axial do aço ABNT 4140 nitretado por descargas elétricas.** 2016. 130f. Dissertação do Mestrado – CEFET-MG –Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

SINGH, S., BHARDWAJ, A. **Review to EDM by Using Water and Powder-Mixed Dielectric Fluid.** Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, v.10, n. 2, pp.199-230, 2011.

SIRIN, SuleYildiz; SIRIN, Kahraman; KALUC, Erdinc. **Effect of the ion nitriding surface hardening processon fatigue behavior of AISI 4340 steel.** Materials Characterization, [s.l.], v. 59, n. 4, p.351-358, abr. 2008. Elsevier BV.

STEVENS, L. **Improvementof Surface Quality in Die Sinking. Doctoral Thesis.** 1998. 181p. Department of Machanical Engineering, Katholiek Universiteit, Leuven, Belgium.

STORR, M. **Important facts about spark erosion.** Stuttgart: Oelheld, 2007. 44p. Disponível em: < [www.oelheld.de](http://www.oelheld.de)>. Acesso em: 12 dez 2017.

YAN, B. H.; TSAI, H. C.; HUANG, F. Y. **The Effect in EDM of a Dielectric of a urea solution in water on modifying the surface of titanium.** International Journal of Machine Tools & Manufacture. N. 45, p.194-200. 2005.

ZHANG, Y; LIU, Y; SHEN, Y; JI, R; CAI, B; LI, H; WANG, F. **A Review of the Current Understanding and Technology of Powder Mixed Electrical Discharge Machining (PMEDM).** International Conference on Mechatronics and Automation, Aug, Chengdu, 2012.