

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

ROBERTA NUNES NERY DOS SANTOS

NITRETAÇÃO POR EDM DA LIGA Ti-6Al-4V COM ADIÇÃO DE CARBETO DE SILÍCIO EM PÓ

Belo Horizonte

Junho de 2019

Roberta Nunes Nery dos Santos

**NITRETAÇÃO POR EDM DA LIGA Ti-6Al-4V COM ADIÇÃO DE CARBETO DE SILÍCIO EM PÓ**

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

Junho de 2019

Santos, Roberta Nunes Nery dos.  
S237n Nitretação por EDM da liga Ti-6Al-4V com adição de carvão de silício em pó / Roberta Nunes Nery dos Santos. – 2019.  
92 f. : il.  
Orientador: Ernane Rodrigues da Silva

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

1. Usinagem por eletroerosão. 2. Nitretação. 3. Ligas de titânio.  
4. Carvão de silício. I. Silva, Ernane Rodrigues da. III. Título.

CDD: 671.35

## **NITRETAÇÃO POR EDM DA LIGA Ti-6Al-4V COM ADIÇÃO DE CARBETO DE SILÍCIO EM PÓ**

Dissertação apresentada em 07 de junho de 2019 por Roberta Nunes Nery dos Santos, ao Curso de Mestrado em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, avaliada pela banca examinadora constituída dos professores:

---

Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva - Orientador

Doutor, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG

---

Prof. Dr. Rogério Felício dos Santos

Doutor, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG

---

Prof. Dr. Hermes de Souza Costa

Doutor, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG

Belo Horizonte, 07 de Junho de 2019.

Ao meu marido Eduardo pelo apoio incondicional, aos meus pais João e Maria pelo carinho, aos meus irmãos, cunhados e sobrinhos, pela confiança. Sem o apoio e carinho da minha família, nada disso seria possível.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Dr. Ernane Rodrigues da Silva, pela oportunidade, orientação, ensinamentos e profissionalismo, que mesmo no período de férias e nos fins de semana esteve presente me auxiliando em todas as etapas.

Ao CEFET-MG pela grata oportunidade de realizar um sonho.

Aos professores do programa de pós-graduação em Engenharia de Materiais pelos ensinamentos.

A professora Ms. Vânia Auxiliadora de Moraes Rodrigues pela valiosa contribuição na correção ortográfica do artigo científico produzido.

Ao professor Dr. Rogério Felício dos Santos pelo estudo pioneiro que impulsionou todos os trabalhos posteriores ao seu. Pelas contribuições como membro da banca examinadora e principalmente pelas conversas informais que me proporcionaram compreender a grandiosidade desse processo.

Ao professor Dr. Hermes de Souza Costa por todas as contribuições como membro da banca examinadora.

A professora Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa pela disponibilidade e colaboração na utilização do laboratório de metalografia.

Ao amigo Victor Souza Esteves Lima pela ajuda nos testes, ensaios e discussões sobre o tema.

Ao colega Aderci de Freitas Filho pelo empréstimo de dispositivos utilizados em testes preliminares.

Ao colega Carlos Eduardo dos Santos pela ajuda com softwares para edição e melhorias das imagens.

Ao colega Odilon Soares da Silva por disponibilizar o certificado da liga utilizada.

Aos funcionários do laboratório da PUC-Minas campus Contagem pela disponibilidade e auxílio na execução de ensaios fundamentais para elaboração do trabalho.

Aos amigos do DEMAT, professores, técnicos de laboratório e administrativo que de forma cordial e motivadora me ajudaram a chegar até aqui.

A todos que direta e indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

*“Um trabalho te dá um propósito e um significado. A vida é vazia sem ambos.”*

Stephen Hawking

## RESUMO

A aplicação de ligas de titânio no mercado tem boa aceitação e notoriedade em diversos segmentos, como na indústria aeroespacial, naval, biomédica e aeronáutica. A diversidade em suas aplicações se deve basicamente pela associação de propriedades mecânicas e físicas que são interessantes na atividade industrial, como por exemplo, resistência à tração, resistência à corrosão, estimável capacidade criogênica e baixa densidade. Contudo as ligas de titânio não apresentam boa resistência ao desgaste por deslizamento, impedindo frequentemente de utilizá-las como matéria prima de peças sujeitas à deslizamento. Com o intuito de melhorar a resistência ao desgaste, estudos realizados mostraram capacidade de nitretar à camada superficial de amostras de titânio através da NDE (Nitretação por Descargas Elétricas), associando o processo de EDM ao tratamento termoquímico, possibilitando combinar técnicas outrora realizadas separadamente. Pesquisas mostraram que ao combinar pós-abrasivos como carbeto de silício ao fluido dielétrico, significativas mudanças foram alcançadas, como melhoria na taxa de remoção do material, redução da rugosidade superficial e na taxa de desgaste do eletrodo. O presente trabalho tem como proposta nitretar por implantação iônica uma liga de titânio Ti-6Al-4V utilizando máquina de EDM (Usinagem por Descargas Elétricas) utilizando com fluido dielétrico água deionizada e uréia com adição do pó de carbeto de silício. Os eletrodos ferramenta utilizados foram o cobre eletrolítico e a grafita. Foram avaliadas as taxas de remoção do material (TRM), desgaste do eletrodo (TD) e o desgaste volumétrico relativo (DVR). Avaliou-se a qualidade do SiC, por meio do ensaio granulométrico. Técnicas de caracterização como microscopia óptica (MO), difração de raios-X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), microdureza e medição da rugosidade superficial foram empregadas para atestar as análises.

*Palavras chave:* Usinagem por eletroerosão, Nitretação, Ligas de titânio, Carbeto de silício.

## ABSTRACT

The application of titanium alloys in the market has good acceptance and notoriety in several segments, such as aerospace, naval, biomedical and aeronautics. The diversity in its applications is basically due to the association of several interesting mechanical and physical properties in the industrial application, such as strain strength, corrosion strength, critical cryogenic capacity and low density. However, titanium alloys do not exhibit good wear resistance by sliding, often preventing them from being used as raw material for parts subject to slippage. In order to improve the wear strength, studies have shown the ability to nitrate the surface layer of the titanium sample through NDE (Nitriding by Electrical Discharge), joining EDM process with the heat treatment, making it possible to combine techniques once performed separately. Research has shown that by combining powder mixed with the dielectric fluid, such as silicon carbide significant changes were achieved as in the improved rate of removal of the material, the reduction of surface roughness, the wear rate of the electrode. The purpose of the present work is to nitrate by ion implantation a Ti-6Al-4V titanium alloy using EDM (Electrical discharge machining) machine using deionized water and urea with the addition of the carbide abrasive powder of silicon. The material removal rates (TDM), wear rate (TD) and relative volumetric wear (DVR) were evaluated. The SiC quality was evaluated by means of the granulometric test. The electrodes used were electrolytic copper and graphite. The characterization techniques such as optical microscopy (OM), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), microhardness and surface roughness measurements were used to confirm the analyzes.

*Keywords:* Electroerosion machining, Nitriding, Titanium Alloy, Silicon carbide.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação da remoção do material no processo de EDM .....	25
Figura 2: Microscopia óptica da amostra de aço AISI D6 beneficiada, usinada por EDM em regime de acabamento. Ataque: Nital 2% .....	26
Figura 3: Representação da fase de ignição da faísca .....	28
Figura 4: Representação da fase de formação do canal de plasma .....	28
Figura 5: Representação da fase de fusão e evaporação .....	29
Figura 6: Representação da fase de ejeção do material .....	30
Figura 7: Perda de peso por ensaio de desgaste pino sobre disco em amostras de usinagem abrasiva e por EDM .....	33
Figura 8: Variação de microdureza na seção transversal da superfície usinada com diferentes dielétricos .....	33
Figura 9: Seção transversal indicando três regiões distintas: camada refundida, camada enriquecida com nitretos e matriz .....	34
Figura 10: Modelo 3D proposto para o canal de plasma em NDE .....	35
Figura 11: Esquema da máquina de EDM .....	37
Figura 12: Análise do fluido dielétrico no acabamento superficial .....	40
Figura 13: Análise do fluido dielétrico na microdureza .....	41
Figura 14: Dispersão da energia de descarga: a) centelhamento típico em EDM, b) dispersão da descarga com adição de SiC no fluido dielétrico e c) estado isolante após centelhamento .....	43
Figura 15: Seção transversal da superfície após EDM .....	44
Figura 16: Camada branca ou refundida gerada após EDM em uma amostra da liga de Ti-6Al-4V .....	44
Figura 17: Resistência específica versus temperatura em uso para seleção de materiais comparados à ligas de titânio e aluminetos .....	46
Figura 18: Estrutura cristalina das fases $\alpha$ e $\beta$ do titânio a temperatura ambiente e a 882° C .....	47
Figura 19: Fluxograma da pesquisa .....	48
Figura 20: Amostras da liga Ti-6Al-4V utilizadas no ensaio .....	50
Figura 21: Eletrodo ferramenta, a) eletrodo de cobre e b) eletrodo de grafita .....	50
Figura 22: Dissolução do pó ao fluido dielétrico e dispositivos adaptados à máquina .....	52

Figura 23: Máquina eletroerosão por penetração utilizada no processo .....	53
Figura 24: Suportes para ensaio em EDM .....	54
Figura 25: Painel de comando da máquina de EDM com parâmetros ajustados .....	55
Figura 26: Rugosímetro portátil .....	60
Figura 27: Microscopia óptica – ampliação de 200X de amostras de Ti-6Al-4V nitretadas com eletrodo de cobre, a) com adição de pó SiC ao fluido dielétrico e b) uréia e água deionizada como fluido dielétrico.....	63
Figura 28: Microscopia óptica – ampliação de 200X de amostras de Ti-6Al-4V nitretadas com eletrodo de grafita, a) com adição de pó SiC ao fluido dielétrico e b) uréia e água deionizada como fluido dielétrico.....	64
Figura 29: Microscopia óptica de toda a extensão da amostra – ampliação de 100X da amostra de Ti-6Al-4V nitretada com eletrodo de cobre .....	65
Figura 30: Microscopia óptica de toda a extensão da amostra – ampliação de 200X da amostra de Ti-6Al-4V nitretada com eletrodo de grafita .....	66
Figura 31: Leitura da condutividade, a) após processamento no deionizador, b) após dissolução da uréia na água e c) após adição do carbetto de silício.....	67
Figura 32: Comparação da taxa de remoção do material com eletrodo de cobre e grafita em fluidos dielétricos distintos.....	69
Figura 33: Comparação da taxa de desgaste do eletrodo de cobre e grafita em fluidos dielétricos distintos .....	70
Figura 34: Comparação do desgaste volumétrico relativo dos eletrodos de cobre e grafita em fluidos dielétricos distintos.....	71
Figura 35: Difratoograma da amostra nitretada com eletrodo de cobre .....	72
Figura 36: Difratoograma da amostra nitretada com eletrodo de grafita .....	73
Figura 37: Perfil de dureza da seção transversal das amostras usinadas com eletrodo de cobre com e sem pó adicionado ao fluido dielétrico.....	75
Figura 38: Perfil de dureza da seção transversal das amostras usinadas com eletrodo de grafita com e sem pó adicionado ao fluido dielétrico.....	76
Figura 39: Avaliação da rugosidade superficial das amostras usinadas com eletrodo de cobre .....	77
Figura 40: Avaliação da rugosidade superficial amostras usinadas com eletrodo de grafita .....	78
Figura 41: MEV com eletrodo de cobre, a) com pó de SiC e b) sem pó de SiC.....	79

Figura 42: MEV da superfície NDE usinada com eletrodo de grafita, a) usinada com pó de SiC e b) usinada sem pó de SiC .....80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química da liga Ti-6Al-4V.....	49
Tabela 2: Divisão das amostras em grupos de experimento.....	49
Tabela 3: Parâmetros operacionais selecionados da máquina EDM para o NDE.....	55
Tabela 4: Peso específico dos materiais.....	56
Tabela 5: Parâmetros adotados no ensaio de DRX.....	59
Tabela 6: Condutividade dielétrica da solução durante o processo.....	67
Tabela 7: Desempenho do processo NDE utilizando como fluido dielétrico água deionizada, uréia e pó com eletrodos de cobre e grafita.....	68
Tabela 8: Valores da microdureza Vickers da liga de Ti-6Al-4V utilizando eletrodo de cobre e grafita em NDE com e sem pó SiC no fluido dielétrico.....	74
Tabela 9: Comparação da rugosidade superficial das amostras usinadas com eletrodo de cobre.....	77
Tabela 10: Comparação da rugosidade superficial amostras usinadas com eletrodo de grafita.....	79
Tabela 11: Granulometria a laser do carbeto de silício antes da NDE.....	81

## LISTA DE SÍMBOLOS

%	: por cento
A	: amperes
°C	: grau centígrado
C	: carbono
cm	: centímetro
Cu	: cobre
Fe	: ferro
gf	: grama-força
g.mm <sup>-3</sup>	: grama por milímetro cúbico
H13	: aço para trabalho a quente
K	: temperatura Kelvin
KCN	: cianeto de Potássio
KCNO	: cianato de Potássio
l	: litro
min	: minuto
mm	: milímetro
µm	: micrometro
MPa	: mega Pascal
µs	: microssegundo
µS	: microsiemens
µS.cm <sup>-1</sup>	: microsiemens por centímetro
N	: nitrogênio
NH <sub>3</sub>	: amônia
PCBs	: policlorobifenilos
Ra	: rugosidade média aritmética
Rz	: rugosidade média
Rq	: desvio médio quadrático
Rt	: rugosidade total
RC	: dureza Rockwell
RC	: circuito resistor capacitor
seg.	: segundo
Ti	: titânio

Ti-6Al-4V : liga de Titânio

TiAl : liga de Titânio

TiN : nitreto de titânio

torr : unidade de pressão em mm de mercúrio

## LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

ABNT	: Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	: <i>American Iron and Steel Institute</i> (Instituto Americano do Ferro e Aço)
AJEDM	: <i>Abrasive Jet Electrical Discharge Machining</i>
CCC	: cúbica de corpo centrado
CEFET	: Centro Federal de Educação e Tecnologia de Minas Gerais
CIM	: Manufatura Integrada por Computador
CNC	: Comando Numérico Computadorizado
DEMAT	: Departamento de Engenharia de Materiais
DRX	: Difração de Raios-X
DVR	: Desgaste Volumétrico Relativo
EDM	: Eletroerosão por Descargas Elétricas
EUA	: Estados Unidos da América
HC	: hexagonal compacta
HRC	: dureza Rockwell C
MEV	: Microscopia Eletrônica de Varredura
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 .....	19
1.1 Justificativa.....	20
2. OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS .....	21
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	22
3.1. Nitretação .....	22
3.2. Usinagem por Descargas Elétricas – EDM.....	23
3.3. Material para eletrodo ferramenta.....	30
3.4. Nitretação por EDM .....	32
3.5. Fluido dielétrico.....	36
3.6. Pós adicionados ao fluido dielétrico.....	41
3.7. Camada refundida .....	43
3.8. Titânio .....	45
3.8.1 Liga Ti-6Al-4V .....	46
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	48
4.1. Material do eletrodo peça .....	48
4.2. Material do eletrodo ferramenta.....	50
4.3. Fluido dielétrico .....	51
4.4. Equipamento de usinagem por descargas elétricas .....	52
4.5. Desempenho da usinagem por EDM.....	56
4.6. Metalografia .....	58
4.7. Dureza .....	58
4.8. Difração de raios X .....	59
4.9. Medição da rugosidade.....	60
4.10. Microscopia eletrônica de varredura – MEV .....	61
4.11 – Análise granulométrica .....	61
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	62

5.1. Formação das camadas nitretadas.....	62
5.2. Condutividade do fluido dielétrico .....	66
5.3. Desempenho do processo NDE .....	68
5.4. Difração de Raio X.....	71
5.5. Microdureza .....	74
5.6. Rugosidade.....	76
5.7. Microscopia Eletrônica de Varredura.....	79
5.8. Análise granulométrica .....	80
6. CONCLUSÃO.....	82
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	84
7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	85
APÊNDICE A – Certificado de Qualidade da liga Ti-6Al-4V .....	92

## 1. INTRODUÇÃO

A usinagem por descargas elétricas - EDM tornou-se um processo importante para produção industrial moderna, principalmente pela capacidade de produzir peças de geometrias complexas e de alto grau de precisão em materiais de difícil usinabilidade, tais como ligas resistentes ao calor, aquelas denominadas superligas e carbonetos.

A EDM é um processo amplamente empregado e diversas pesquisas são realizadas com o intuito de se obter melhorias e integração de processos industriais. Yan, Tsai e Huang (2005), Camargo, Costa e Raslan (2009) mostraram que é possível enriquecer a superfície do titânio puro e da liga de titânio Ti-6Al-4V com nitretos a partir do processo de EDM. Os pesquisadores utilizaram como fluido dielétrico água destilada ou deionizada e uréia, sendo esta a fonte do nitrogênio. Santos, R. (2013) e Silva, S. (2016) obtiveram nitretação do aço ABNT 4140 por meio de uma máquina de EDM por penetração com camadas nitretadas e zona refundida de 25  $\mu\text{m}$  e 45  $\mu\text{m}$ , respectivamente, utilizando como fluido dielétrico água deionizada e uréia com concentrações distintas.

O titânio e suas ligas possui ampla aplicação industrial em diversos segmentos como aeroespacial, biomédico e ambientes corrosivos. Essa gama de aplicações se dá principalmente por possuir propriedades atraentes, como alta resistência mecânica, excelente resistência à corrosão e propriedades criogênicas. Porém, em operações de elevadas cargas e que induzem ao desgaste severo, o titânio não é recomendável, pois possui baixa resistência ao desgaste abrasivo, adesivo e alto coeficiente de atrito (YAN; TSAI; HUANG, 2005). Dessa maneira, busca-se melhorar as propriedades superficiais do titânio. A nitretação é uma delas.

## 1.1 Justificativa

A integração da máquina de EDM aos processos computacionais integrados – CIM, reduziram ainda mais os tempos de processo, manutenção e operação (EL-HOFY, 2005). As melhorias crescentes no processo de EDM que permitem a usinagem de qualquer material condutor elétrico, geometria e dureza diversas, associando bom desempenho e boa relação custo-benefício, têm atraído diversas pesquisas para garantir ganhos mais significativos a esse processo.

Associar processos de usinagem a tratamentos superficiais reduzem custo de fabricação e geram melhorias nos processos. Pesquisas mostraram que a usinagem por descargas elétricas (EDM) é viável e podem trazer ganhos significativos na cadeia produtiva.

## 2. OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O objetivo do presente trabalho é explorar a metodologia já estabelecida para obter camada nitretada pelo processo de NDE em liga de titânio Ti-6Al-4V, utilizando como fluido dielétrico água deionizada, uréia (concentração  $33 \text{ g.L}^{-1}$ ) e carbeto de silício - SiC (concentração  $16,7 \text{ g.L}^{-1}$ ) em pó (granulometria de 600 mesh). Os objetivos específicos são:

- a) Medir a espessura da camada nitretada por NDE com e sem pó de SiC através da microscopia óptica;
- b) Avaliar a usinabilidade com solução de uréia com acréscimo de carbeto de silício em pó relacionando taxa de remoção de material (TRM), taxa de desgaste (TD) e desgaste volumétrico relativo (DVR);
- c) Identificar os nitretos presentes na camada nitretada;
- d) Quantificar a dureza da camada nitretada por meio de ensaios de microdureza das amostras usinadas com e sem pó de SiC;
- e) Medir a rugosidade superficial após nitretação com adição do carbeto de silício em pó ao fluido dielétrico.
- f) Analisar a morfologia da superfície da camada nitretada por meio de microscopia eletrônica de varredura.
- g) Avaliar a qualidade do pó SiC por meio de análise granulométrica

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico está descrito os principais temas estruturais deste trabalho necessários para fundamentar a elaboração do projeto.

#### 3.1. Nitretação

A nitretação é um processo termoquímico de introdução de nitrogênio na superfície do material pelo aquecimento em temperaturas entre 500 °C a 570 °C para formar uma camada dura de nitretos. Nesse processo, utilizam-se temperaturas menores que as temperaturas utilizadas no processo de cementação, e por essa razão, a nitretação produz menor distorção e tendência a trincas ao material (SILVA; MEI, 2010).

Segundo Silva e Mei (2010), as principais razões para se utilizar o tratamento termoquímico da nitretação, são:

- Obter elevada dureza superficial (aproximadamente 70 HRC) e alta resistência ao desgaste;
- Melhorar a resistência à fadiga e à corrosão;
- Obter superfície resistente ao amolecimento por aquecimento até temperaturas próximas à de nitretação.

Segundo Chiaverini (2012) após a nitretação, não requer têmpera posterior, pois o endurecimento obtido não é fruto da formação da martensita e sim à formação de nitretos abaixo da superfície, geralmente de alumínio ou cromo (esses metais são os principais formadores de nitretos).

O processo de nitretação produz uma camada superficial fina, que no ensaio micrográfico tem uma aparência branca, com espessura em torno de 25 µm. Essa camada possui boa resistência ao enrijamento e à corrosão, mas não possui elevada dureza. Abaixo desta camada, tem-se a formação da camada escura, composta de nitretos de ferro, nitretos dos elementos de liga e de compostos de Fe-C-N que apresenta elevada dureza. A espessura dessa camada depende, entre

outros fatores, do tipo de material e dos elementos de liga presentes (CHIAVERINI, 2012).

### **3.2. Usinagem por Descargas Elétricas – EDM**

A história da usinagem por descargas elétricas (EDM) data da segunda guerra mundial quando o casal B.R. e N. I. Lazarenko inventaram o circuito resistor-capacitor (RC) (EL-HOFY, 2005). Eles foram designados pelo governo soviético para investigar o desgaste causado entre os contatos elétricos de tungstênio, um problema crítico para manutenção dos motores automotivos durante a Segunda Guerra Mundial. Os pesquisadores descobriram que ao colocar os eletrodos em óleo, as faíscas eram mais uniformes e previsíveis do que ao ar. (PANDEY; SINGH, 2010).

Eles desenvolveram o sistema conhecido como circuito Lazarenko, onde peça e ferramenta ficam submersas em um fluido dielétrico dentro de uma cuba de trabalho, conectadas a resistores e capacitores carregados por uma fonte de corrente contínua (JAMESON, 2001). Esses cientistas russos desenvolveram durante a guerra as primeiras máquinas de EDM, que foram muito úteis na usinagem de materiais de elevada dureza, como o tungstênio e seus carbonetos (PANDEY; SINGH, 2010).

Na década de 1950 progressos foram obtidos na compreensão do fenômeno de eletroerosão e nesse período iniciou-se a produção de máquinas de EDM em larga escala, mas devido à má qualidade de componentes eletrônicos, o desempenho das máquinas era limitado. Na década seguinte, uma extensa pesquisa levou ao progresso das máquinas de EDM, solucionando problemas relacionados à modelagem matemática e o desenvolvimento de servocontroladores. Assim, foi possível produzir máquinas de EDM com significativas melhorias de desempenho (PANDEY; SINGH, 2010 e ABBAS et al., 2007). A partir de 1970, houve potencial desenvolvimento da tecnologia a fio, influenciada principalmente pelos potentes geradores, desenvolvimento de novos eletrodos ferramenta a fio, aprimorando as máquinas e melhorando a descarga elétrica (EL-HOFY, 2005). As operações

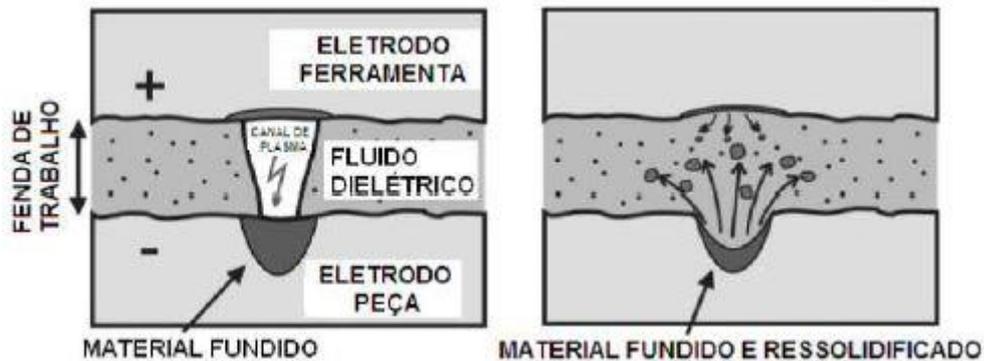
envolvendo micro usinagens tornaram-se importantes na década de 1980, e é a partir desse período que o mercado mundial avançou em pesquisas aplicadas ao processo de EDM (PANDEY; SINGH, 2010). Muito se desenvolveu nesse processo, e atualmente a velocidade da usinagem por EDM aumentou em 20 vezes, o que gerou significativa redução do custo de produção em pelo menos 30% (EL-HOFY, 2005).

Usinagem por descargas elétricas é um processo não convencional de usinagem, que apresenta diversas vantagens sob os processos convencionais principalmente em materiais com propriedades mecânicas cada vez mais exigentes, como alta resistência mecânica e dureza, o que os torna materiais de difícil usinabilidade (PANDEY; SINGH, 2010). A EDM permite usinagem em cavidades de paredes muito finas sem que se deformem, é possível usinar geometrias difíceis e complexas. O procedimento não afeta a dureza do material de trabalho e mantém o processo livre das indesejáveis rebarbas geradas pela maioria dos processamentos convencionais (EL-HOFY, 2005).

A usinagem por descargas elétricas é um processo de remoção de material onde a energia elétrica é convertida em térmica. Durante a descarga em EDM, a energia elétrica é convertida em calor e o canal de plasma é gerado entre o eletrodo peça e ferramenta, inicia-se o processo de aquecimento e fusão de ambos e uma pequena porção do material das superfícies são liquefeitas. No final da descarga, o canal de plasma entra em colapso permitindo que o fluido dielétrico circule. Parte do metal fundido é removido, deixando uma cratera na superfície (BLEYS ET AL. 2006).

As descargas de curta duração (medidas em microsegundos) são geradas nesse fluido dielétrico que separa a ferramenta e a peça de trabalho. No final do sentelhamento, o canal de plasma colapsa e parte do material fundido, na forma de detritos, se desprende em partículas microscópicas e são removidos pela circulação do fluido dielétrico deixando uma cratera sob a superfície da peça conforme ilustrado na figura 1. Na usinagem por EDM não há contato direto entre eletrodo e peça de trabalho. A abertura entre eletrodo e peça é denominada fenda de trabalho, também chamada de *gap*, e é fundamental para obtenção de êxito no processo (EL-HOFY, 2005).

**Figura 1: Representação da remoção do material no processo de EDM**



Fonte: BLEYS, et al., 2006.

Conforme descreveu Bleys et al. (2006), por se tratar de um método predominantemente de remoção térmica do material, as camadas afetadas do eletrodo e peça, apresentam modificações estruturais e de composição química. O fluido apresenta função de limpar e refrigerar os detritos desprendidos do material e eletrodo, contudo, nem todas as partículas são expelidas, algumas delas se solidificam na própria cratera. Essa região é chamada de “zona refundida” que apresenta mudança na composição química e na sua estrutura devido à rápida solidificação, pois há interação dos subprodutos oriundos do fluido dielétrico e do eletrodo ferramenta.

Logo abaixo, como mostra a figura 2, encontra-se a região denominada ZAC – zona afetada pelo calor. Essa região é parcialmente afetada pela alta temperatura do processo de descargas elétricas, pois o material não apresentou temperatura suficiente para fusão, mas atingiu temperatura suficiente para mudanças estruturais e da composição química devido ao processo de difusão atômica, com migração dos átomos de regiões de maior concentração para aquelas de menor concentração (PANDEY; SINGH, 2010).

**Figura 2: Microscopia óptica da amostra de aço AISI D6 beneficiada, usinada por EDM em regime de acabamento. Ataque: Nital 2%**



Fonte: Santos, R., 2007.

Os parâmetros de entrada da máquina de EDM são facilmente imputados e podem ser modificados com facilidade por meio do painel de comando. A combinação correta dos parâmetros garantem qualidade do processo e melhor desempenho. Dentre os principais parâmetros pode-se destacar:

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

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

c) Tempo de onda ligado ( $T_{on}$ ): É a duração do tempo de onda medida em microsegundos. Durante esse período de tempo a corrente é transmitida através do eletrodo em direção à peça dentro de um pequeno intervalo de centelhamento. Em

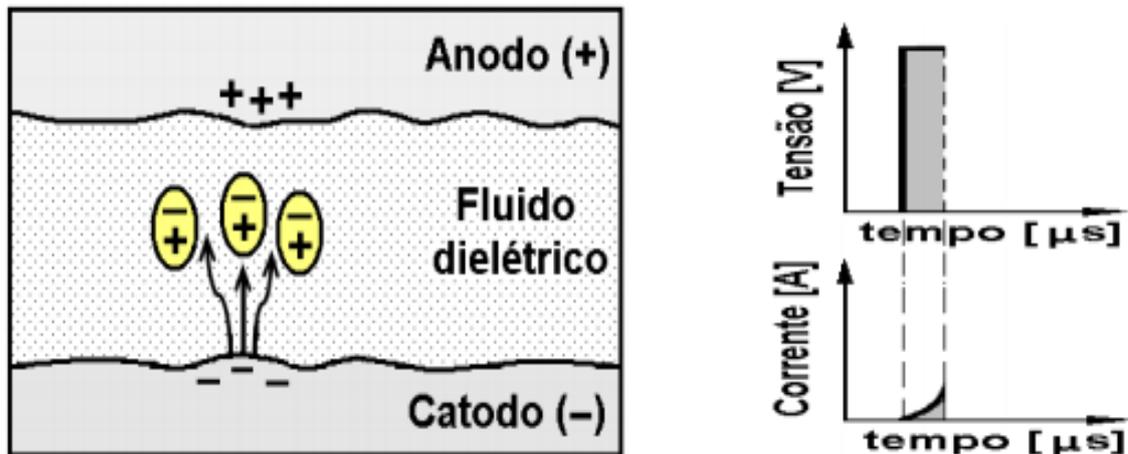
EDM a erosão ocorre na forma de fusão e vaporização do material, a duração de pulso é proporcional ao material fundido e/ou vaporizado e, portanto, a cratera produzida será maior se comparada com o pulso mais curto. (MOHAN; RAJADURAI; SATYANARAYANA, 2004).

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

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

a) Fase de ignição: Nessa etapa o eletrodo ferramenta se aproxima da peça de trabalho (em torno de 0,05 mm e 1 mm). Há uma resistência oferecida pelo fluido dielétrico, e por essa razão, mesmo com tensões altas (variado de 60 a 300 V), não há fluxo de corrente. Na sequência, o eletrodo ferramenta se aproxima da peça até a distância da fenda de trabalho, gerando um aumento do campo elétrico entre as faces dos eletrodos provocado pela aproximação das partes. A partir daí, os elétrons acelerados liberados no catodo colidem com as moléculas do fluido dielétrico conforme representado na figura 3. Esse mecanismo favorece a liberação de mais elétrons e íons positivos que estão em direção ao catodo, dando início ao fenômeno de ionização por impacto (AMORIM, 2002).

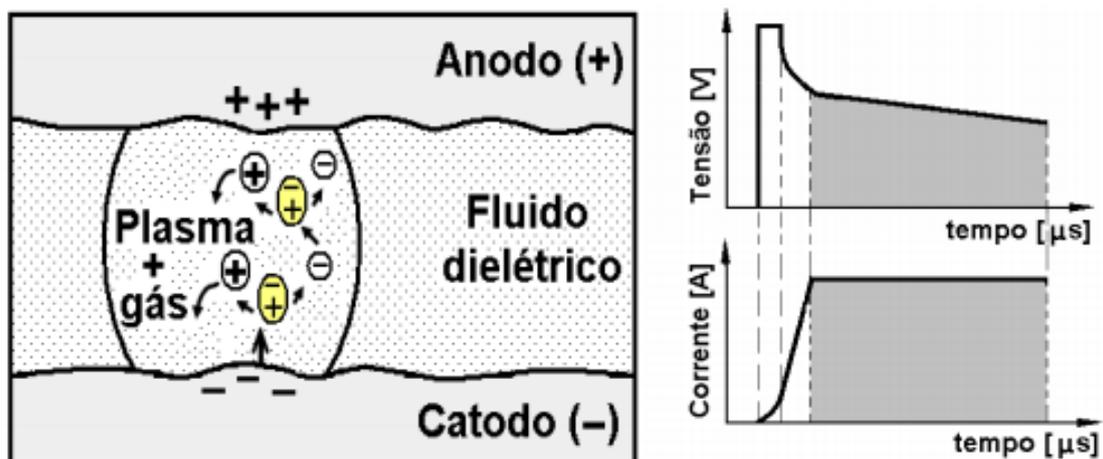
Figura 3: Representação da fase de ignição da faísca



Fonte: Stevens, 1998.

b) Formação do canal de plasma: Após início da ionização por impacto, o fenômeno se multiplica em altíssima velocidade e como consequência produz um superaquecimento e vaporização de pequenas porções do dielétrico. Nesse momento, acontece a redução de resistência do dielétrico e aumento da corrente elétrica e observa-se formação e intensificação do que se conhece como túneis transportadores de energia elétrica para o catodo e anodo. Em seguida há formação do canal de plasma, gerado pela queda da tensão e aumento drástico da corrente elétrica, como demonstrado na figura 4. O nível energético atinge inicialmente  $3 \text{ J/mm}^3$ , temperaturas  $40.000 \text{ K}$  e pressão dinâmica de  $3 \text{ kbar}$  (AMORIM, 2002).

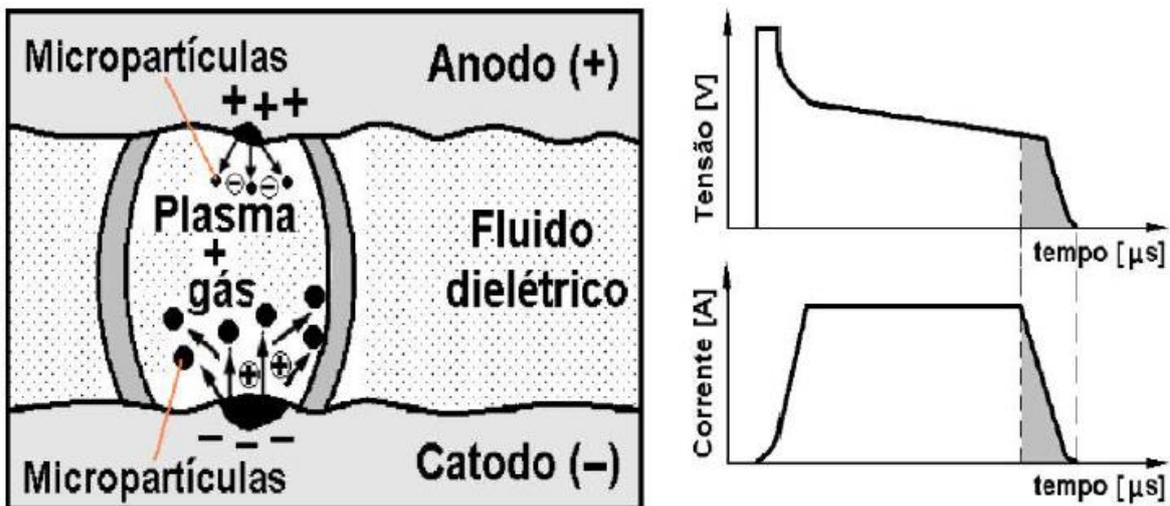
Figura 4: Representação da fase de formação do canal de plasma



Fonte: Stevens, 1998.

c) Fusão e evaporação de pequena porção do material: Ainda segundo Amorim (2002), o tempo de conservação do canal de plasma é definido pelo operador ( $T_{on}$ ) e ao longo desse tempo, o plasma de alta energia se funde constantemente por conduções térmicas e assim, pequenas porções do material, tanto na peça quanto no eletrodo, se liquefazem. Entretanto, pouca quantidade desse material líquido evapora. Na figura 5 pode-se observar que no decorrer do tempo da descarga ( $T_{on}$ ) há o prosseguimento da fusão dos materiais, tanto do eletrodo quanto da peça, e um progressivo aumento do canal de plasma (AMORIM, 2002).

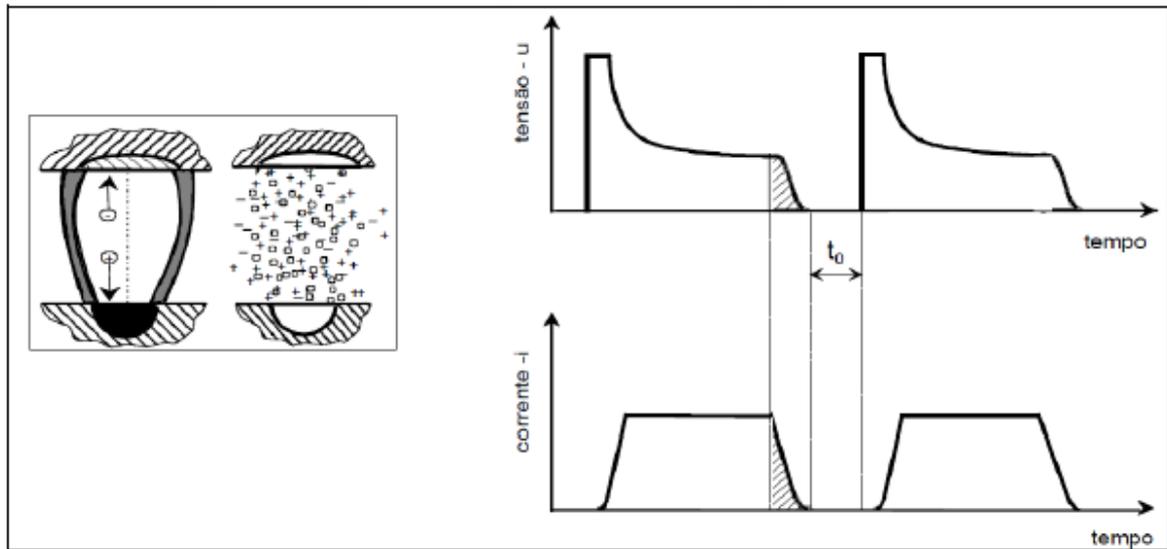
**Figura 5: Representação da fase de fusão e evaporação**



Fonte: Stevens, 1998.

d) Ejeção do material: Santos R. (2013) explica que por meio da interrupção da descarga, conforme imagem 6, uma pequena cavidade é formada na superfície da peça e do eletrodo causada pela abrupta queda de pressão que extingue o canal de plasma. Parte do material fundido acaba se resolidificando na cratera e a outra parte é removida pelo fluido dielétrico.

**Figura 6: Representação da fase de ejeção do material**



Fonte: König e Klocke, 1996.

### 3.3. Material para eletrodo ferramenta

A correta seleção do material para fabricação do eletrodo é um fator importante no plano de processo em qualquer trabalho em EDM. Segundo Dorf e Kusiak (1994) as principais exigências para seleção do material para fabricação do eletrodo ferramenta no processo de EDM são:

- alta condutividade elétrica;
- alto ponto de fusão;
- e alta condutividade térmica.

Outros pesquisadores, como Pandey e Singh (2010) acrescentam a esta lista:

- a taxa de remoção do material desejada;
- a resistência ao desgaste do material do eletrodo;
- o acabamento superficial desejado;
- custo do eletrodo;
- e usinabilidade do material do eletrodo.

Como no processo de EDM a corrente elétrica é a propulsão necessária para efetuar o corte, materiais de maior condutividade ou menor resistividade, promovem cortes

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

Ainda segundo Jha, Ram e Rao (2011) muitos materiais têm sido utilizados para a fabricação de eletrodos, tais como: o cobre eletrolítico, grafita, carbonetos de tungstênio, latão, ligas de prata e cobre, cobre-tungstênio. Esses materiais se dividem em duas categorias principais: metálica e grafita. Os metálicos apresentam melhor desempenho em materiais de baixo ponto de fusão como o latão, cobre e alumínio, já a grafita é aplicada em materiais de alta temperatura de fusão como, por exemplo, o aço e suas ligas.

A grafita é um material muito comum aplicado à produção de eletrodo uma vez que possui boa usinabilidade. O cobre apresenta razoável desgaste e melhor condutividade, geralmente utilizado em situações que visam melhores acabamentos superficiais, em torno de  $0,5 \mu\text{m Ra}$  (METALS HANDBOOK, 1989).

Segundo Jha, Ram e Rao (2011) o cobre requer maiores valores condutividade elétrica e térmica, entretanto a grafita tolera mais calor oriundo pelo canal de plasma, podendo algumas vezes apresentar taxas mais baixas de desgaste e assim atuar com maiores taxas de remoção do material. Contudo, a grafita apresenta um custo em torno de 4 a 6 vezes maior que o cobre, mas por apresentar peso específico menor, ela pode equiparar o custo ao cobre ao relacionar o mesmo volume de eletrodo.

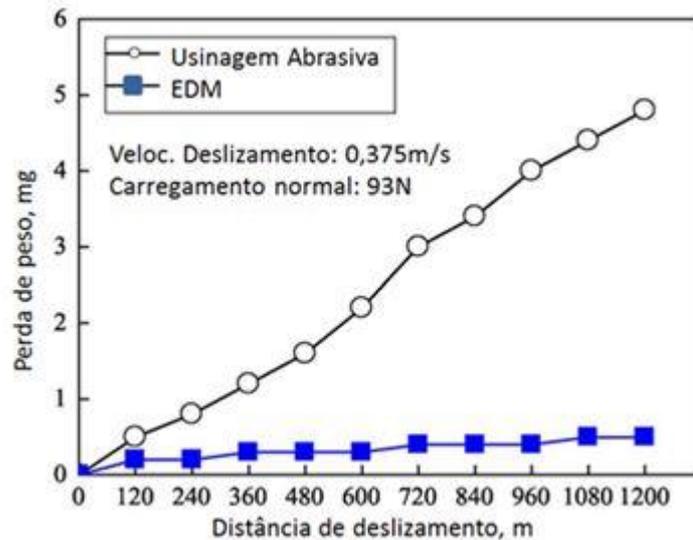
### 3.4. Nitretação por EDM

Ainda é recente, e muito se tem a desenvolver sobre o processo de nitretação por EDM. A técnica que consiste em enriquecer com nitretos a superfície de um material através de descargas elétricas, pode se tornar uma atraente alternativa do ponto de vista técnico e econômico (CAMARGO; COSTA; RASLAN, 2009). Até então, materiais usinados pelo processo de EDM deveriam passar por procedimento posterior com o intuito de melhorar a dureza superficial, quando em serviço, esta característica fosse importante. Segundo Yan, Tsai e Huang (2005) esse tratamento subsequente produz superfícies que podem ser usadas em aplicações industriais, mas aumentam significativamente o tempo de produção e conseqüentemente o custo.

Yan, Tsai e Huang (2005) avaliaram a modificação da superfície do titânio comercialmente puro pela adição de uréia dissolvida em água destilada como fluido dielétrico em um processo de EDM. Os resultados experimentais identificaram que houve migração do nitrogênio presente no fluido dielétrico para a superfície usinada, formando um composto de relativa dureza: o nitreto de titânio (TiN), o que ocasionou melhorias à resistência ao atrito e desgaste.

A figura 7 mostra a distância de deslizamento versus a perda de peso cumulativa em um teste de desgaste de pino sobre disco. É possível observar, a partir do resultado experimental, que a resistência ao desgaste da superfície usinada por EDM usando a solução aquosa de uréia é maior que a superfície por usinagem abrasiva. Isso se deve ao composto cerâmico TiN formado na superfície da peça. Esse composto é formado devido à elevada temperatura do processo e à alta velocidade de resolidificação, que muda a estrutura no material e impede que a difusão atômica seja aplicada (YAN; TSAI; HUANG, 2005).

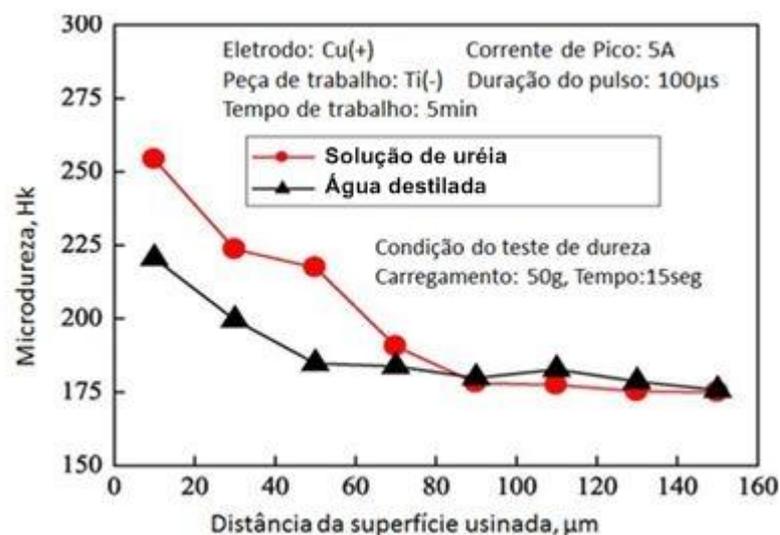
**Figura 7: Perda de peso por ensaio de desgaste pino sobre disco em amostras de usinagem abrasiva e por EDM**



Fonte: Yan, Tsai e Huang, 2005.

Observa-se na figura 8 melhorias significativas de dureza ao comparar fluídos dielétricos distintos: água destilada com uréia e apenas água destilada. Ambos fluídos dielétricos promoveram uma camada endurecida de profundidade de 60 $\mu$ m aproximadamente, contudo a solução aquosa de uréia produziu valores de microdureza maiores.

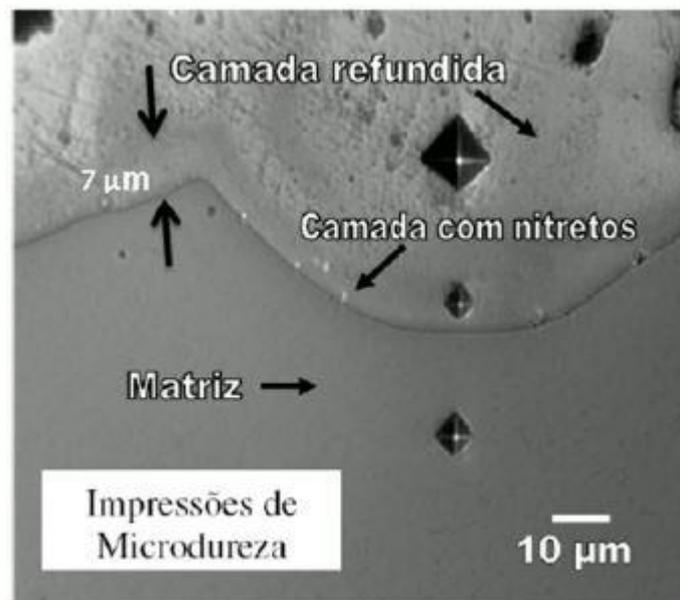
**Figura 8: Variação de microdureza na seção transversal da superfície usinada com diferentes dielétricos**



Fonte: Yan, Tsai e Huang, 2005.

Camargo, Costa e Raslan (2009) também estudaram o enriquecimento da superfície com nitretos através de descargas elétricas. Eles utilizaram a liga de titânio Ti-6Al-4V. Como fluido dielétrico, utilizou-se água deionizada e uréia ( $10 \text{ g.L}^{-1}$ ). Em seus resultados, observou-se um aumento significativo do valor na microdureza da camada enriquecida com nitretos em relação à matriz. Essa camada, conforme mostra a figura 9, apresentou espessura em torno de  $7 \mu\text{m}$  consideravelmente menor que a espessura da camada refundida, na ordem de  $54 \mu\text{m}$ .

**Figura 9: Seção transversal indicando três regiões distintas: camada refundida, camada enriquecida com nitretos e matriz**

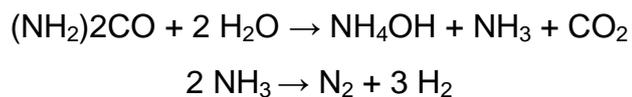


Fonte: Camargo, Costa e Raslan, 2009.

Santos R. (2013) também estudou a mudança superficial através do processo de EDM na superfície do aço AISI 4140 utilizando como fluido dielétrico água deionizada e uréia, concentração  $10 \text{ g.L}^{-1}$ . Ele propôs um modelo para explicar o fenômeno de enriquecimento da superfície do material através do processo de EDM. A figura 10 mostra a geometria do canal de plasma em corte para mostrar o que acontece internamente ao canal. Próximo ao catodo encontra-se o raio  $a_c$ , que no decorrer da descarga permanece praticamente constante, ele é bem inferior ao raio  $a_A$  observado na região do anodo, isso se deve principalmente à emissão de elétrons pelo catodo e o seu valor é inferior a  $5 \mu\text{m}$ . Em compensação, o raio  $a_A$ , (na região do anodo) cresce constantemente durante a evolução da descarga. Conforme pode



Segundo Santos R. (2013), o nitrogênio decomposto presente na superfície da amostra é oriundo da uréia e tem sua formação na fase de ignição, no início do fenômeno de ionização por impacto, detalhado anteriormente no item 2.2. A colisão dos íons na etapa de ignição gera a ruptura do dielétrico e há uma dissociação gerando  $\text{NH}_3$  e  $\text{CO}_2$  na forma de gás. Há uma nova dissociação, e o  $\text{NH}_3$  da origem ao  $\text{N}_2$  e  $\text{H}_2$  conforme mostrado nas reações abaixo:



Santos R. (2013) ainda explica que o  $\text{N}_2$  e  $\text{H}_2$  se difundem como íons no canal de plasma na forma  $\text{N}_2^+$ ,  $\text{N}^+$ ,  $\text{H}_2^+$ , além desses, formam-se íons de cobre oriundos do eletrodo ferramenta (anodo). Como esses íons são positivos, eles são impulsionados para a superfície da peça (catodo) e devido à alta energia cinética que adquirem, são implantados na superfície da peça.

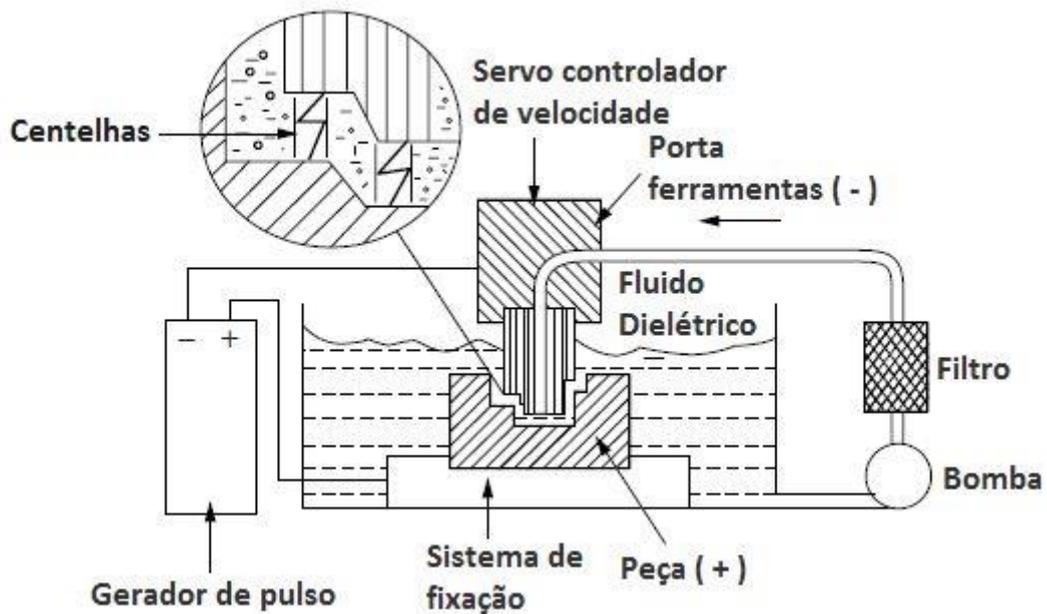
Devido ao pioneirismo na análise, entendimento e experimento do fenômeno envolvendo o processo NDE, destaca-se o pedido de depósito de patente realizado por Raslan, Santos e Silva (2012), que previamente, estudaram o enriquecimento superficial com nitretos por meio de descargas elétricas geradas no processo de EDM.

### 3.5. Fluido dielétrico

Segundo Leão e Pashby (2004) a usinagem por descargas elétricas tornou-se um vantajoso processo após a descoberta da relevância do fluido dielétrico que afeta fatores como produtividade e qualidade. Meio ambiente, saúde e segurança, também se tornaram coeficientes muito importantes, particularmente quando se utilizam fluidos à base de óleos. Já Chakraborty, Dey e Ghoshb (2015) afirmam que os parâmetros do processo são testados de acordo com o fluido dielétrico utilizado e como diferentes dielétricos possuem formação e composição de resfriamentos diferentes, a escolha do dielétrico desempenha papel importante no processo de EDM.

O processo de usinagem por descargas elétricas foi um dos primeiros processos não convencionais de usinagem desenvolvidos e é até hoje um processo de elevada precisão dimensional. É baseado na energia termoelétrica entre os eletrodos peça e ferramenta. O fluido dielétrico usado na EDM desempenha um papel importante quanto aos aspectos produtivos do processo: na taxa de remoção do material, na taxa de desgaste da ferramenta e nas características da superfície usinada. A figura 11 mostra o esquema de funcionamento da máquina EDM e o caminho do fluido dielétrico. Selecionar o fluido dielétrico de forma correta é uma importante decisão para resultados significativos no processo (KUMAR D., et al. 2017).

**Figura 11: Esquema da máquina de EDM**



Fonte: El-Hofy, 2005.

Segundo El-Hofy (2005), as principais funções do fluido dielétrico são:

- remover da região erodida as partículas geradas do processo de EDM;
- garantir isolamento entre o eletrodo e a peça de trabalho;
- e arrefecer a região aquecida pelo efeito da descarga;

Ainda segundo El-Hofy (2005), os principais requisitos para seleção do fluido dielétrico processo de EDM são a viscosidade adequada, ponto de fulgor elevado,

boa estabilidade à oxidação, odor mínimo, baixo custo e rigidez dielétrica suficiente para permanecer eletricamente não condutor até que a tensão de ruptura seja alcançada.

Segundo Chakraborty, Dey e Ghoshb (2015) existem diversos fluidos que podem ser utilizados como fluidos dielétricos, o querosene, por exemplo, foi um dos primeiros líquidos a serem utilizados como fluido dielétrico, tornando-se um dos mais populares. Seu primordial benefício é a baixa viscosidade, mas infelizmente possui diversas desvantagens, como: baixo ponto de inflamação, alta volatidade, odor forte. No passado, aconteceram vários incendios e explosões em EDM devido ao uso do querosene.

Outro óleo usado como fluido dielétrico desde os primórdios do desenvolvimento do processo EDM, é o óleo mineral a base de petróleo, amplamente empregado na indústria e utilizado até hoje na indústria aeroespacial. Contudo, estudos realizados mostraram que esse óleo possui elementos potencialmente cancerígenos, e portanto, seu uso não é mais recomendado (KERN, 2009). O óleo mineral para transformadores era também utilizado nos primórdios do processo EDM. Devido as suas propriedades dielétricas, era muito importante e grande aplicação na usinagem. As primeiras gerações desse óleo eram combinadas com os compostos PCBs (policlorobifenilos), que são altamente tóxicos em quantidades acima do recomendado. Por essa razão, este fluido não tem mais aplicação nos processos atuais de EDM (KERN, 2009).

Silva E. (2007) estudou o comportamento do óleo vegetal para transformadores, em operações de EDM, e o comparou ao querosene e a um fluido mineral sintético, próprio para eletroerosão. Ele concluiu que, no regime de desbaste, o fluido mineral sintético, removeu maior quantidade de material da peça se comparado aos outros dois. E no regime de acabamento, o fluido vegetal apresentou menor remoção que o mineral sintético, mas remoção maior que o querosene. Com relação ao desgaste dos eletrodos, Silva E. (2007) constatou que ocorreu de forma acentuada quando se utilizou o fluido vegetal em relação aos demais, tanto na operação de desbaste, quanto de acabamento.

Muitos estudos têm sido realizados com o intuito de substituir os óleos minerais por água pura ou água com aditivos como fluido dielétrico no processo de EDM. Isso porque os óleos tem origem de recursos esgotáveis como o petróleo e em muitos casos, os produtos da sua decomposição são tóxicos. Segundo Abbas, Solomon e Baharu (2007) pesquisas dos últimos 25 anos envolveram o uso de água pura e água com aditivos.

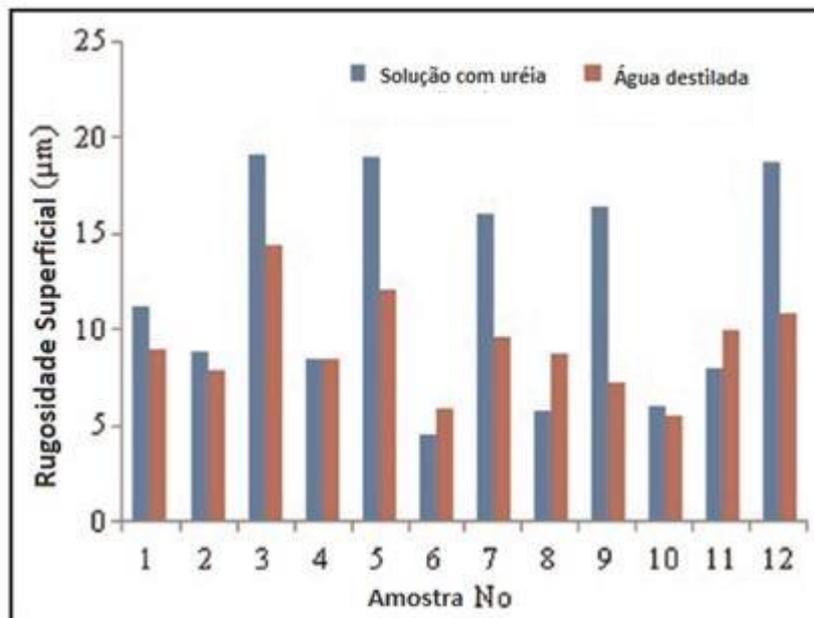
Segundo Chakraborty, Dey e Ghoshb (2015) pesquisas foram realizadas variando o fluido dielétrico. Bons resultados foram alcançados utilizando água pura e água destilada, como por exemplo, melhor TRM (taxa de remoção do material) e acabamento superficial, além de se obter desgaste zero da ferramenta quando se utilizou eletrodo de cobre conectado à polaridade negativa.

Santos et al. (2016) realizaram experimentos variando o teor de uréia na solução de água deionizada como fluido dielétrico no aço AISI 4140. Os resultados mostraram que a concentração de uréia impacta na capacidade dielétrica do fluido e uma mudança notável na cinética da formação do plasma. Com concentrações superiores a  $10 \text{ g.L}^{-1}$  não houve formação correta dos canais, gerando uma consequente diminuição da taxa de remoção do material (TRM). Por outro lado, variações de concentração de uréia não alteraram significativamente características como o aspecto superficial, espessura da camada nitretada, os tipos de nitretos formados ou dureza final da superfície enriquecida. O nitrogênio decomposto do fluido dielétrico da solução que continha uréia, migrou para a peça de trabalho formando uma camada rígida de nitretos resultando em uma boa resistência ao desgaste na superfície após EDM (CHAKRABORTY; DEY; GHOSHB 2015).

Santos C. (2015) identificou que a qualidade da uréia utilizada no processo pode melhorar significativamente a taxa de remoção do material. Ao comparar o seu experimento realizado no aço AISI H13 ao de outro pesquisador sob mesmas condições, verificou que houve um ganho de 273% na taxa de remoção do material, devido à baixa condutividade elétrica da uréia utilizada no processo que melhorou significativamente a usinabilidade.

Ndaliman, Khan e Ali (2013) analisaram a influência da adição da uréia à água destilada nas propriedades da superfície na liga de titânio Ti-6Al-4V. Eles analisaram e compararam superfícies sob dois tipos de fluidos dielétricos: uma solução de água destilada e uréia e outra apenas com água destilada. Conforme demonstra a figura 12, a rugosidade superficial encontrada em parâmetro Ra com solução de uréia, apresentou valores maiores que aqueles apresentados quando se utilizou solução de água destilada. Setenta e cinco por cento das amostras apresentaram melhores resultados, ou seja, valores menores de rugosidade quando se utilizou apenas água destilada como fluido dielétrico. Dois fenômenos podem explicar rugosidades maiores em solução de uréia. Primeiramente, a taxa de resfriamento da solução uréia é ainda maior que a de água destilada. Estudos mostraram que a alta taxa de resfriamento da água destilada em EDM resulta em microfissuras na peça, o que produz superfícies mais irregulares. A segunda razão seria pela reação dos eletrodos e do fluido dielétrico junto à superfície da peça. Há uma tendência da superfície da peça ser submetida a uma força térmica intensiva, que pode aumentar e multiplicar as crateras da superfície da peça.

**Figura 12: Análise do fluido dielétrico no acabamento superficial**

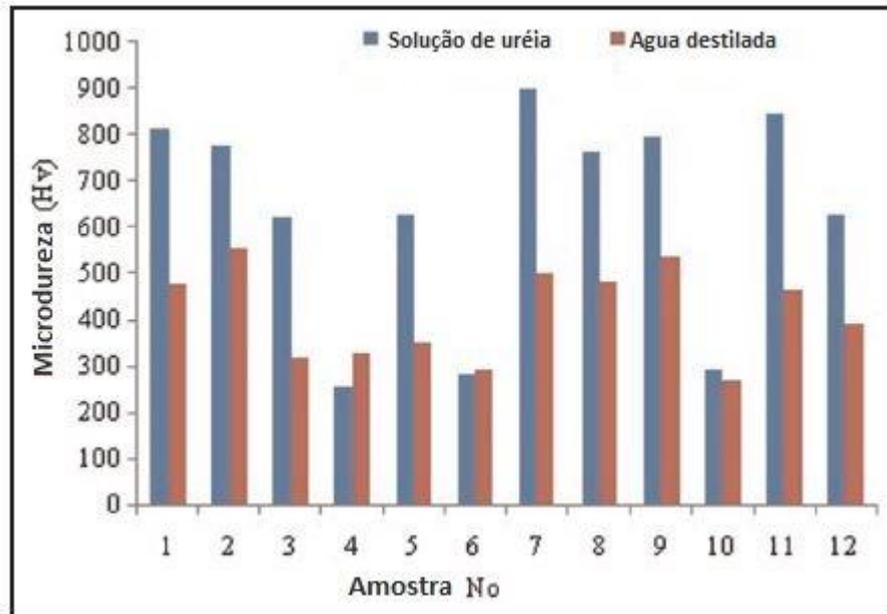


Fonte: Ndaliman, Khan e Ali. 2013.

Outra alteração significativa é devido à adição de uréia ao fluido dielétrico, é a melhoria na microdureza. Nos experimentos de Ndaliman, Khan e Ali (2013)

constatarem durezas 48% maiores ao comparar com a água destilada conforme mostra a figura 13.

**Figura 13: Análise do fluido dielétrico na microdureza**



Fonte: Ndaliman, Khan e Ali. 2013.

### 3.6. Pós adicionados ao fluido dielétrico

Muitas pesquisas têm sido realizadas com o intuito de identificar melhorias significativas para o processo de EDM associado a custo e sustentabilidade. Leão e Pashby (2004) concluíram que fluidos à base de óleos são mais eficientes do que em água deionizada ou destilada, no entanto, ao adicionar compostos orgânicos à água obtem-se um desempenho superior aos óleos tanto em operações de desbaste, quanto de acabamento.

Foi pesquisada por Jeswani (1981) uma alternativa para melhorar o desempenho da EDM com adição de grafita em pó ao fluido dielétrico. Suas pesquisas mostraram um aumento de 60% na taxa de remoção do material em aço macio utilizando o cobre como eletrodo ferramenta. A adição do pó de grafita ao querosene altera as características de ionização do líquido para permitir mais descargas de faíscas por unidade de tempo. Este aumento na frequência de faíscas está diretamente relacionado com a tensão de ruptura à qual ocorre a descarga de faísca.

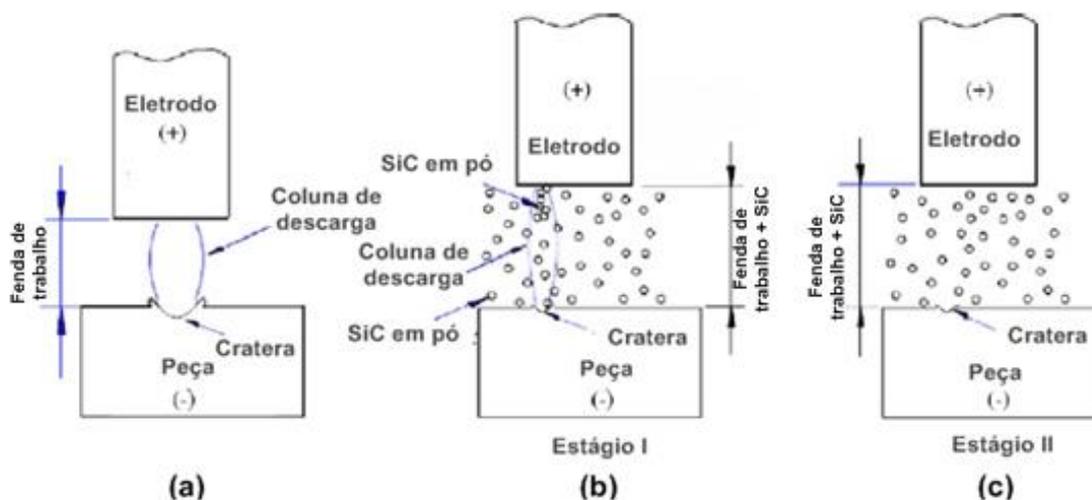
Rodrigues (1999) analisou a topografia do aço rápido ABNT M2, após usinagem por descargas elétricas, com e sem adição de carbeto de silício, em três fluidos dielétricos a base de hidrocarbonetos. Em sua pesquisa, concluiu que a adição do pó abrasivo melhorou o acabamento superficial e que não houve aumento médio do comprimento das microtrincas. Concluiu também que, o pó penetrou na fenda de trabalho, o *gap*, entre a peça e a ferramenta, resultando em descargas elétricas mais uniformes e direcionadas.

Kolli e Kumar (2015) analisaram o efeito do pó de grafita sob a superfície da liga de titânio Ti-6Al-4V em EDM. Eles concluíram que a adição do pó de grafita ao fluido dielétrico agregou significativas melhorias na taxa de remoção do material, redução da rugosidade superficial, redução da taxa de desgaste da ferramenta e também na redução da espessura da camada refundida, variando alguns parâmetros como a corrente e a concentração do pó ao fluido.

Silva et al. (2012) analisaram o desempenho dos abrasivos, carbeto de silício e óxido de alumínio, no processo de usinagem híbrido AJEDM, com granulometria de 600 mesh. Eles identificaram que, ao utilizar o SiC em pó na pressão de 240 bar, houve melhor desempenho de usinagem, já que a taxa de remoção do material foi 50% maior quando comparado ao pó de  $Al_2O_3$ . Constataram também que não houve alteração significativa no DRV durante o ensaio comparando os dois pós abrasivos.

Chow et al. (2008) adicionaram pó de carbeto de silício a água pura e utilizaram como fluido dielétrico para micro EDM da liga de titânio Ti-6Al-4V. O experimento comparou desempenho, acabamento superficial, impacto da polaridade e concentração do pó quando usinado com e sem o carbeto de silício. Os resultados evidenciaram que a adição de pó à água pura produziu maior taxa de remoção de material e desgaste do eletrodo relativamente baixo. Quando se utilizou água pura com carbeto de silício em pó, o *gap* (fenda de trabalho) foi maior devido à alta condutividade gerada no fluido, e por essa razão, podem dispersar a energia de descarga que refina a aspereza da superfície (redução da rugosidade) de forma eficaz. A figura 14 apresenta o fenômeno que envolve a dispersão das descargas e o aumento da fenda de trabalho quando há adição do pó de SiC.

**Figura 14: Dispersão da energia de descarga: a) centelhamento típico em EDM, b) dispersão da descarga com adição de SiC no fluido dielétrico e c) estado isolante após centelhamento**



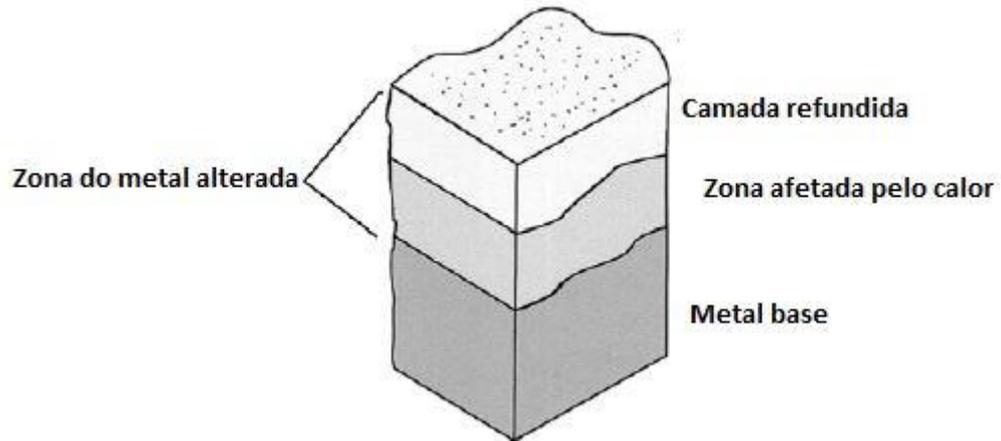
Fonte: Chow et al. 2008.

### 3.7. Camada refundida

As temperaturas atingidas durante o processo de EDM são elevadas, geralmente entre 8.000 °C a 12.000 °C, e por essa razão, mudanças metalúrgicas ocorrem na camada superficial da peça de trabalho. A camada refundida, que pode variar de 1µm a 25µm dependendo do parâmetro empregado, é gerada devido às mudanças metalúrgicas. Essa camada reduz significativamente a resistência à fadiga da liga e pode ou não conter microfissuras inerentes ao processo (EL-HOFY, 2005).

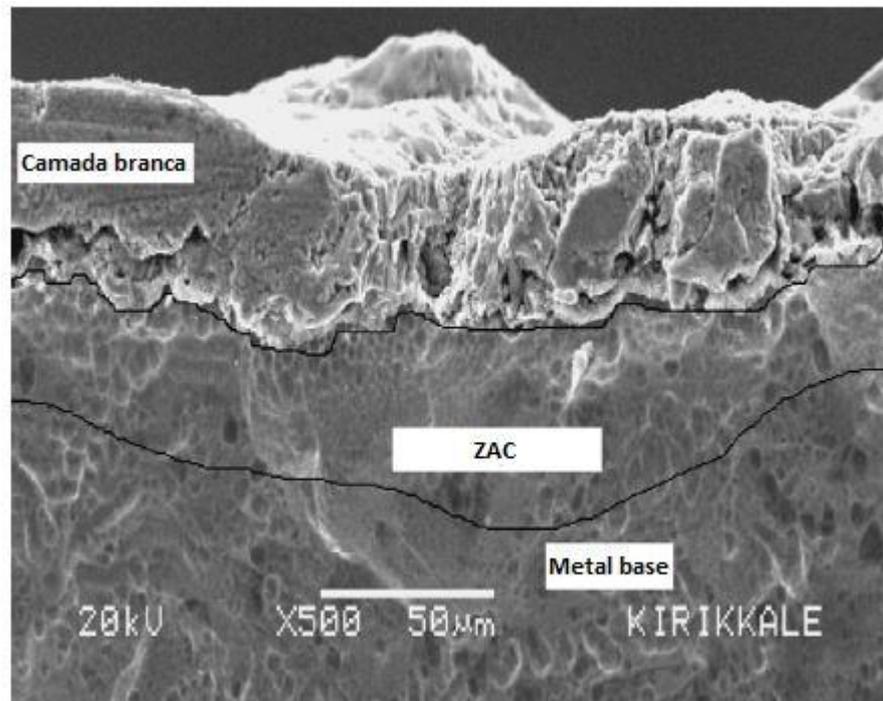
Ao examinar as camadas produzidas por EDM, Kumar et al. (2009), identificaram uma camada branca superior, que cristaliza a partir do líquido arrefecido a alta velocidade, essa camada é chamada de camada refundida e pode ser observada nas figuras 15 e 16. A profundidade dessa camada depende da energia e duração do pulso aplicado à máquina. Abaixo da camada refundida, há uma região termicamente afetada pelo calor (ZAC) com possíveis alterações na composição química e mudanças de fase, apesar de não ter sofrido fusão. Essa região, mesmo não tendo contato com o fluido dielétrico, recebe o calor irradiado pelo plasma que possui temperatura suficiente para propiciar as transformações citadas acima por difusão atômica (SANTOS R., 2013).

**Figura 15: Seção transversal da superfície após EDM**



Fonte: Kumar et al. 2009.

**Figura 16: Camada branca ou refundida gerada após EDM em uma amostra da liga de Ti-6Al-4V**



Fonte: Haşçalık e Çaydas. 2007.

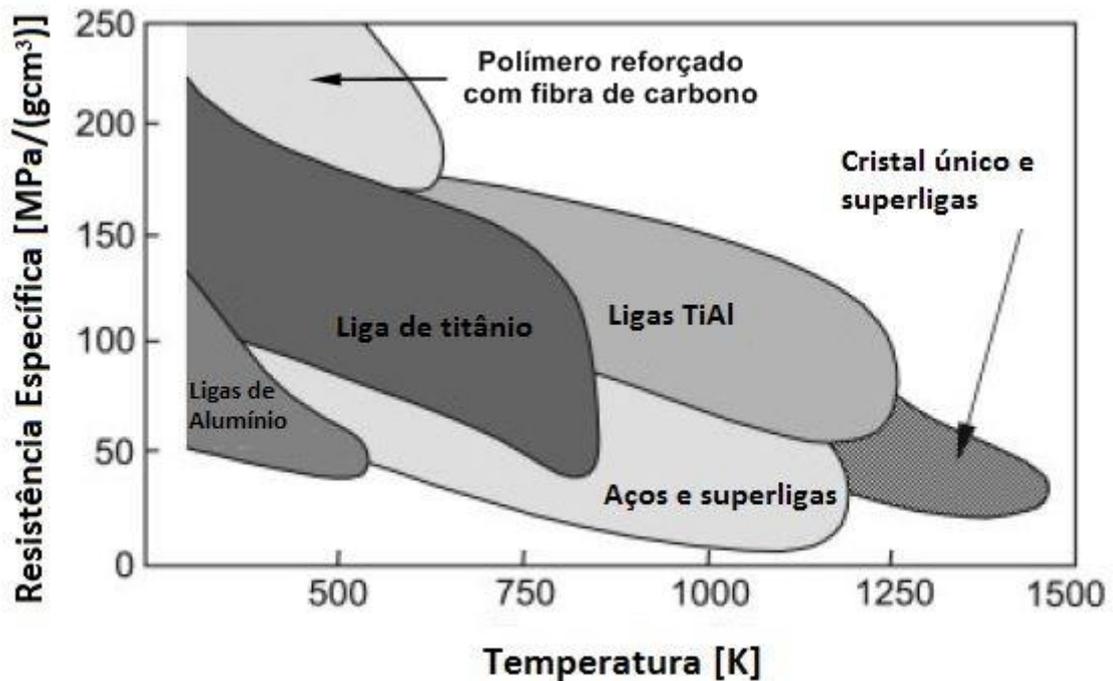
### 3.8. Titânio

O titânio é um metal valorizado por diversas características, uma delas é pela sua baixa densidade:  $4,51\text{g/cm}^3$  que representa cerca de 60% da densidade do aço, metade da densidade do ferro, níquel, cobre e apenas 1,7 vezes maior que a do alumínio. Outras características importantes desse material são: a boa resistência mecânica, à corrosão, alta condutividade elétrica ( $2,34 \times 10^6/\text{m}\Omega$ ) e baixa condutividade térmica ( $21,9 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ), ponto de fusão e ebulição elevados ( $1.668 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $3.287 \text{ }^\circ\text{C}$ ), resistência à fadiga e sua estimável capacidade criogênica. Por essas propriedades, associadas a uma excelente relação resistência/peso (a resistência à tração do titânio puro é de até  $740 \text{ MPa}$  e uma liga contendo alumínio, vanádio e estanho podem chegar até  $1.200 \text{ MPa}$ ), boa rigidez e suas propriedades mecânicas a altas temperaturas, levaram o titânio a uma ampla e crescente aplicação na indústria aeroespacial, automobilística, militar, biomédica e naval (LEYENS; PETERS, 2003).

De forma geral, o titânio puro, sem elementos de liga, tem aplicação limitada, mesmo sendo mais fácil para processar e fabricar, sendo aplicado em situações em que a relevância seja apenas a resistência à corrosão. Por outro lado, as ligas de titânio são amplamente empregadas em fabricação de elevada relação resistência/peso. Para essas aplicações, reprodutibilidade de propriedades e baixo índice de defeitos, como inclusões e segregações, são exigidos e essas normalmente, elevam o custo de produção da matéria prima.

Somente a temperaturas inferiores a  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  materiais poliméricos reforçados com fibra de carbono apresentam resistência específica maiores do que as ligas de titânio, isso mostra que em temperaturas mais elevadas as ligas de titânio possuem resistência específica bem atraente conforme mostra a figura 17.

**Figura 17: Resistência específica versus temperatura em uso para seleção de materiais comparados à ligas de titânio e aluminetos**



Fonte: Leyens e Peters, 2003.

### 3.8.1 Liga Ti-6Al-4V

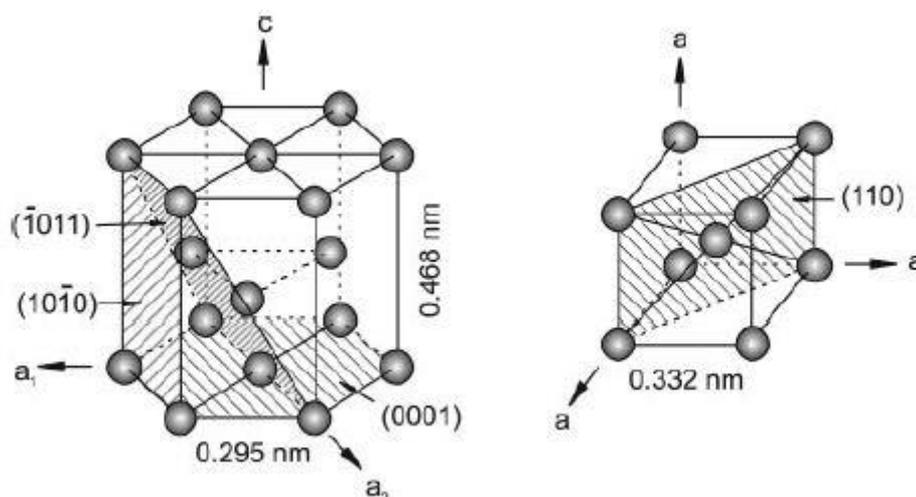
Atualmente existem mais de 100 ligas de titânio disponíveis, porém, apenas 20 a 30 delas atingiram a escala comercial, entre elas a mais usada é a liga de titânio Ti-6Al-4V que representa mais de 50% das ligas em uso, as demais, cerca de 20% a 30% são de titânio não ligados (LEYENS; PETERS, 2003).

As ligas de titânio podem ser classificadas como  $\alpha$ , *near* de  $\alpha$  (próximo de  $\alpha$ ),  $\alpha+\beta$ , metaestável  $\beta$  ou estável  $\beta$  dependendo da microestrutura a temperatura ambiente (BANERJEE; MUKHOPADHYAY, 2007). Estas ligas contem elementos de liga que são classificados em três categorias: na fase  $\alpha$  os elementos estabilizadores são Al, O, N e C; na fase  $\beta$  os estabilizadores são Mo, V, Nb, Ta (isomorfo), Fe, W, Cr, Si, Co, Mn e H (eutetóide) e fase neutra, que contem elementos como o zircônio. (RAZAVI; GORDANI, 2011).

A liga  $\alpha$  e próximo de  $\alpha$  possuem elevada resistência à corrosão, mas tem resistência limitada a baixas temperaturas, já a liga  $\alpha+\beta$  apresenta alta resistência devido à presença das duas fases. A liga Ti-6Al-4V é um exemplo de liga pertencente à fase  $\alpha+\beta$ . As propriedades obtidas dependem de vários fatores, entre eles a proporção relativa das fases  $\alpha$  e  $\beta$ , do tratamento térmico e das condições termodinâmicas de processamento. A liga  $\beta$  apresenta características como baixo módulo de elasticidade e elevada resistência à corrosão (MOISEYEV, 2005).

O titânio puro, bem como suas ligas, se cristaliza a baixas temperaturas, e a temperatura ambiente, a fase  $\alpha$ , por exemplo, apresenta estrutura cristalina hexagonal compacta (HC). Em altas temperaturas, no entanto, a estrutura cristalina se transforma alotropicamente em cúbica de corpo centrado (CCC) a  $882^{\circ}\text{C}$ , dando origem a fase  $\beta$  conforme pode ser visto na figura 18 (RAZAVI; GORDANI, 2011).

**Figura 18: Estrutura cristalina das fases  $\alpha$  e  $\beta$  do titânio a temperatura ambiente e a  $882^{\circ}\text{C}$**



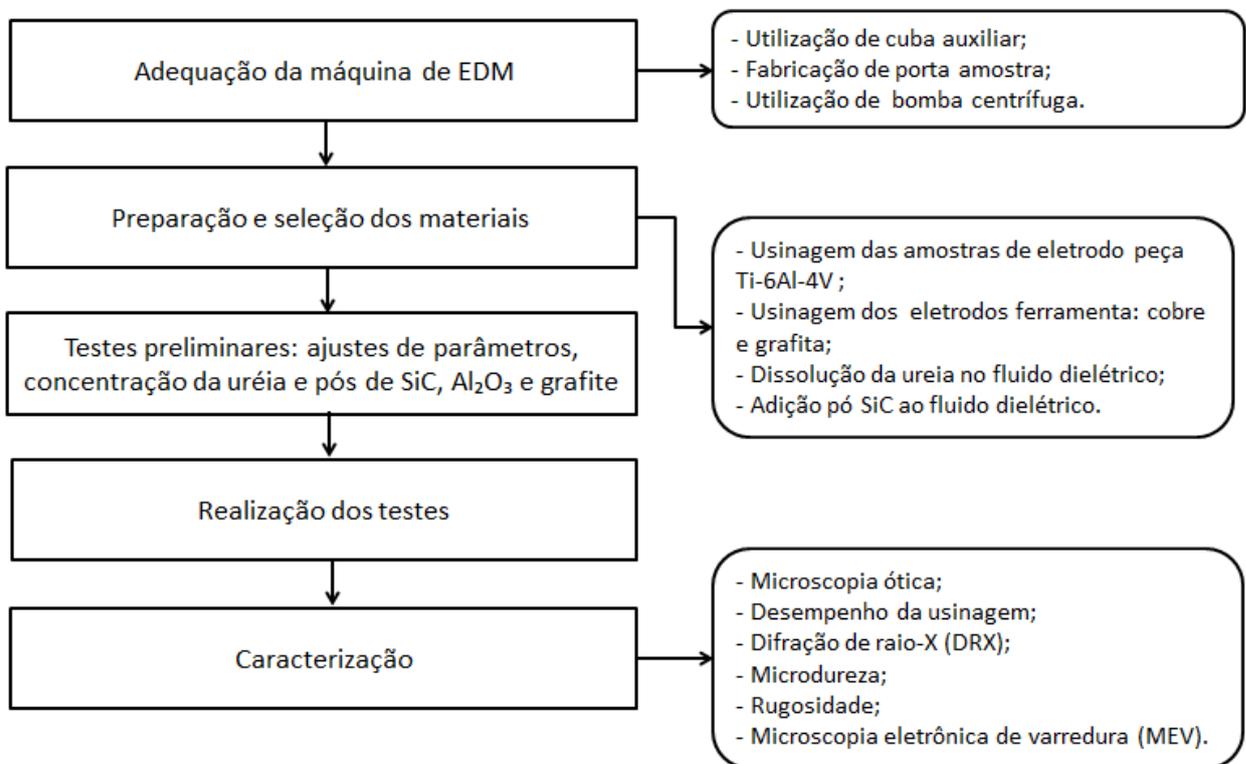
Fonte: Leyens e Peters, 2003.

Mesmo que amplamente aplicado na indústria, o titânio e suas ligas possuem limitações especialmente devido às suas propriedades tribológicas pobres, como a baixa resistência ao desgaste abrasivo, baixa dureza e alto coeficiente de atrito. A fim de melhorar significativamente o comportamento tribológico das ligas, aplicam-se tratamentos termoquímicos de superfície (LENG et al., 2001; YEROKHIN et al., 2000; JOHNS, 1996).

## 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O trabalho experimental foi realizado nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Amostras de titânio Ti-6Al-4V foram submetidas à nitretação por descargas elétricas (NDE), utilizando-se água deionizada e uréia como fluido dielétrico; e acrescentando-se à este fluido, pó de carbeto de silício. As etapas do experimento estão descritas no fluxograma da figura 19.

**Figura 19: Fluxograma da pesquisa**



Fonte: Autora, 2019.

### 4.1. Material do eletrodo peça

O material utilizado para realização dos corpos de prova foi a liga de titânio Ti-6Al-4V. A tabela 1 apresenta a composição química da liga. As amostras produzidas pertencem à mesma barra trefilada utilizada por Silva O. (2016) em seus experimentos. No Apêndice 1 consta o certificado enviado pelo fornecedor do material.

**Tabela 1: Composição química da liga Ti-6Al-4V**

<b>Elemento</b>	<b>N</b>	<b>C</b>	<b>H</b>	<b>Fe</b>	<b>O</b>	<b>Al</b>	<b>V</b>	<b>Ti</b>
<b>Teor (%)</b>	0,01	0,03	0,0019	0,16	0,12	6,12	4,18	saldo

Fonte: Silva O., 2016.

Doze corpos de prova com dimensões de 19 mm de diâmetro e 12 mm de comprimento foram preparadas em torno de usinagem convencional. As amostras foram divididas em grupos: seis delas usinadas utilizando como fluido dielétrico água deionizada e uréia, sendo que em três utilizou-se eletrodo de cobre e outras três eletrodo de grafita. Em outro grupo, também composto por seis amostras, foi adicionado ao fluido dielétrico pó de carbeto de silício e três amostras foram usinadas com eletrodo de cobre e outras três com eletrodo de grafita. A tabela 2 apresenta a distribuição das amostras nos grupos de experimento.

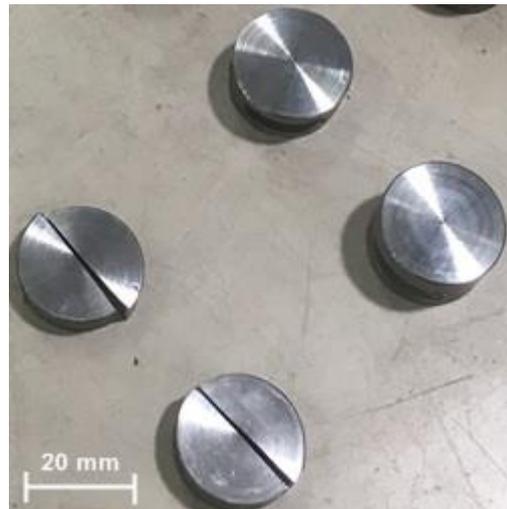
**Tabela 2: Divisão das amostras em grupos de experimento**

<b>Amostras</b>	<b>Eletrodo</b>	<b>Quant.</b>	<b>Fluído dielétrico</b>
Grupo 1	Cobre	3	Uréia em água deionizada
Grupo 2	Grafita	3	
Grupo 3	Cobre	3	Uréia em água deionizada e pó SiC
Grupo 4	Grafita	3	

Fonte: Autora, 2019.

Com o intuito de facilitar a preparação metalográfica da amostra, algumas foram seccionadas ao meio, conforme figura 20, no sentido da espessura antes da usinagem pelo processo de NDE. Santos R. (2013) verificou que não ocorre influencia do efeito de borda ao usinar peças bipartidas.

**Figura 20: Amostras da liga Ti-6Al-4V utilizadas no ensaio**

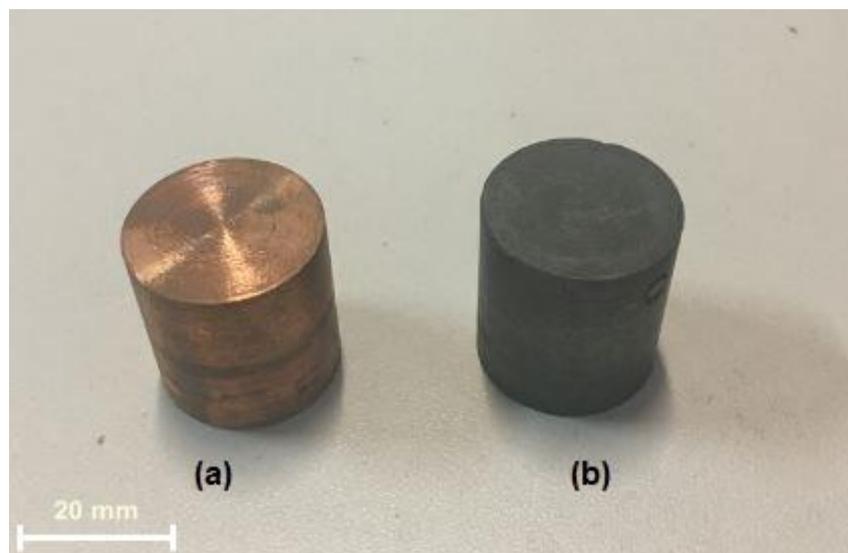


Fonte: Autora, 2019.

#### **4.2. Material do eletrodo ferramenta**

A figura 21 ilustra os eletrodos ferramenta. Foram utilizadas barras de cobre eletrolítico e de grafita com diâmetro de 22 mm. Os eletrodos foram usinados em torno convencional com 25 mm de comprimento. Todos os eletrodos foram pesados antes e após NDE em balança analítica de precisão, com resolução 0,0001g e linearidade  $\pm 0,0003g$ .

**Figura 21: Eletrodo ferramenta, a) eletrodo de cobre e b) eletrodo de grafita**



Fonte: Autora, 2019.

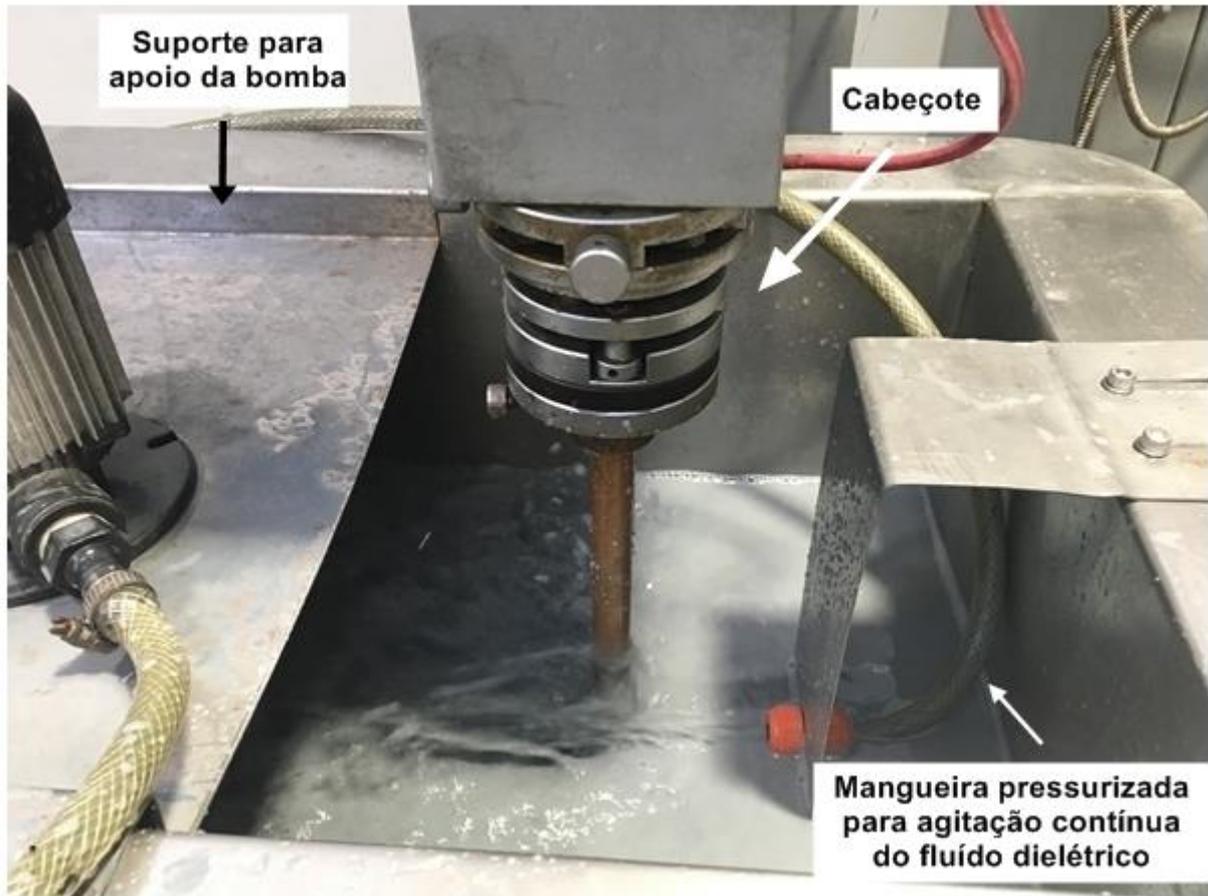
### 4.3. Fluido dielétrico

Como fluido dielétrico foi utilizada água deionizada e uréia. A água potável fornecida pela companhia de saneamento da região metropolitana de Belo Horizonte possui condutividade em média  $150 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Um aparelho deionizador com elemento filtrante foi usado para reduzir a condutividade para  $0 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ .

A condutividade foi medida utilizando condutímetro portátil que opera com incertezas de  $\pm 2\%$ , em leituras na faixa de 0 a  $1999 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . A leitura da condutividade foi realizada nas seguintes etapas: imediatamente após a água ser processada pelo deionizador, após dissolução da uréia no fluido dielétrico, depois da adição do pó de carbeto de silício, no fim da usinagem com eletrodo de cobre e após finalizada a usinagem com o eletrodo de grafita.

Baseado nos trabalhos de Silva S. (2016) e Santos C. (2015) foram preparados 30 litros de solução aquosa de uréia em concentração de  $33 \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . Após primeira etapa de realização dos testes, onde seis amostras foram usinadas com água e uréia como fluido dielétrico, foram adicionados 500g de carbeto de silício em pó, formando uma concentração de  $16,7 \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . A figura 22 mostra o fluido após a adição do pó.

**Figura 22: Dissolução do pó ao fluído dielétrico e dispositivos adaptados à máquina**



Fonte: Autora, 2019.

#### **4.4. Equipamento de usinagem por descargas elétricas**

O processo de usinagem foi realizado em máquina de EDM por penetração adaptada, modelo Eletroplus – 540/SERVSPARK conforme figura 23.

A adaptação consistiu em utilizar uma cuba removível com capacidade de 105 litros para armazenar a solução aquosa de uréia, fabricada de aço inoxidável AISI 304, impedindo a contaminação dos componentes originais do equipamento por meio da solução.

**Figura 23: Máquina eletroerosão por penetração utilizada no processo**

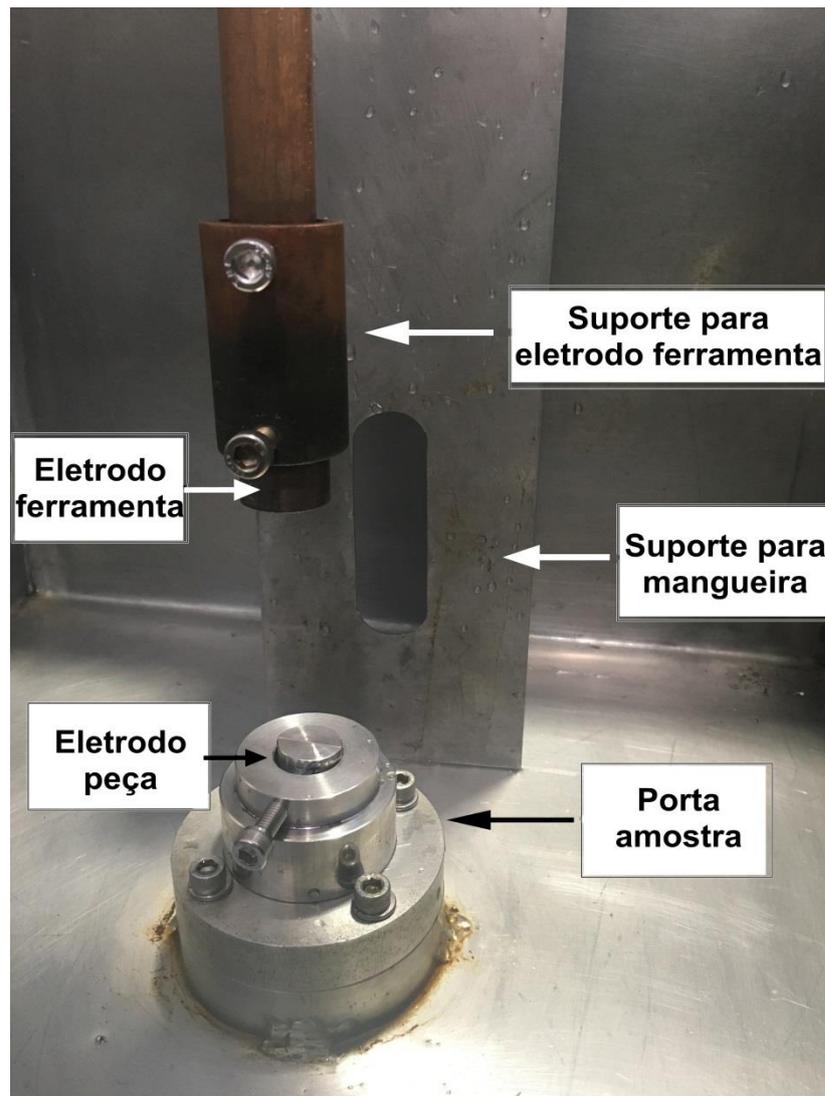


Fonte: Autora, 2019.

Outra adaptação foi a utilização de bomba centrífuga, modelo CD 30002 com vazão de 51 litros por minuto e pressão de 2 metros de coluna d'água, com objetivo de realizar a limpeza da fenda de trabalho entre o eletrodo ferramenta e a peça, mantendo o fluido sempre em agitação. Uma mangueira pressurizada fixada a um suporte facilita a circulação do fluido conforme pode ser visto na figura 22.

No interior da cuba, foi adaptado um sistema de fixação da amostra, também denominado porta amostra e um suporte para fixação do eletrodo ferramenta durante a NDE. A figura 24 ilustra o sistema de fixação dos eletrodos, que por parafusos, prende tanto a peça em seu porta amostra, quanto o eletrodo ferramenta em seu suporte, garantindo intercambiabilidade.

**Figura 24: Suportes para ensaio em EDM**



Fonte: Autora, 2019.

Para realização dos testes, diversos parâmetros foram selecionados no painel de controle da máquina. Esses parâmetros estão listados na tabela 3.

**Tabela 3: Parâmetros operacionais selecionados da máquina EDM para o NDE**

Parâmetro	Especificação	Unidade
Polaridade do eletrodo ferramenta	Positiva	+
Corrente	40	A
Tempo de pulso ( $T_{on}$ )	100	$\mu s$
Tempo de pausa ( $T_{off}$ )	1,5*	
Fenda de trabalho (Gap)	1,0*	
Afastamento periódico da ferramenta	3,0*	
Velocidade do servo	5,0*	
Tempo de erosão	5,0*	

\*Parâmetros ajustados diretamente no painel da máquina de EDM

Fonte: Autora, 2019.

A figura 25 ilustra o painel de controle da máquina de EDM com as indicações dos parâmetros definidos para execução dos testes. O tempo de execução para realização de usinagem de cada amostra foi cronometrado em 10 min.

**Figura 25: Painel de comando da máquina de EDM com parâmetros ajustados**



Fonte: Autora, 2019.

#### 4.5. Desempenho da usinagem por EDM

No processo de EDM o desempenho da usinagem foi mensurado por meio de três parâmetros principais:

- TMR – Taxa de remoção do material
- TD – Taxa de desgaste do eletrodo
- DVR – Desgaste volumétrico relativo

Para que fosse possível caracterizar esses parâmetros, a massa dos eletrodos e amostras foram medidas em balança de precisão antes e após a usinagem. A tabela 4 apresenta o peso específico desses materiais.

**Tabela 4: Peso específico dos materiais**

<b>Material</b>	<b>Peso específico <math>\delta</math> (g.mm<sup>-3</sup>)</b>
Ti-6Al-4V	0,00443
Cobre eletrolítico	0,00829
Grafita	0,00167

Fonte: Autora, 2019.

A variação de massa foi determinada pela diferença das massas das amostras e eletrodos antes e depois dos ensaios pela relação dada pela eq. (4.1).

$$\Delta m = m_i - m_f \quad (4.1)$$

Onde:

$m_i$ = massa inicial (antes da usinagem)

$m_f$ = massa final (após usinagem)

É possível caracterizar o volume de material removido da peça durante determinado tempo pela eq. (4.2), dada em mm<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>.

$$TRM = \frac{\Delta m}{(\delta) \cdot t} \quad (4.2)$$

Onde:

$\Delta m$  = variação de massa da amostra (g)

t = tempo de usinagem (min)

$\delta$  = peso específico do material ( $\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$ )

É possível também, determinar o volume de material perdido pelo eletrodo ferramenta durante a usinagem, conforme eq. (4.3), dada em  $\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ .

$$TD = \frac{\Delta m}{\delta \cdot t} \quad (4.3)$$

Onde:

$\Delta m$  = variação de massa do eletrodo (g)

t = tempo de usinagem (min)

$\delta$  = peso específico do material do eletrodo ( $\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$ )

O desgaste volumétrico relativo que relaciona o volume perdido pelo eletrodo ferramenta e o volume retirado do eletrodo peça é dado pela razão TD e TRM expresso percentualmente conforme eq. (4.4).

$$DVR = \frac{TD}{TRM} \cdot 100 \quad (4.4)$$

Para as equações 4.2, 4.3 e 4.4 considerou-se um tempo de 10 minutos que foi o tempo estipulado para usinagem de cada amostra por NDE.

Antes de cada pesagem, os eletrodos de grafita foram secados em forno do tipo mufla na temperatura de 400 °C por 3 horas.

#### 4.6. Metalografia

Quatro amostras, pertencentes a cada grupo da tabela 2, previamente seccionadas transversalmente ao sentido de usinagem foram preparadas por técnicas metalográficas após término da usinagem por EDM.

No embutimento, utilizou-se resina epóxi termoendurecedora carregada com minerais que possui baixa contração e boa aderência e é recomendada para minimizar abaulamento das amostras e para preservação das bordas, evitando assim, que a camada refundida se desprenda durante a preparação metalográfica da amostra. Após o embutimento, as amostras foram lixadas manualmente com auxílio de lixas de carvão de silício nas seguintes granulometrias: 180, 220, 360, 400, 500, 600, 1200, 1500 e 2000, 2200 mesh. Um polimento posterior foi aplicado às amostras utilizando-se politrizes manuais com pasta de diamante de 3 e 1  $\mu\text{m}$  até que a superfície apresentasse aspecto espelhado.

Após espelhamento da superfície, ataque químico foi realizado utilizando solução de ácido fluorídrico e ácido nítrico ( $\text{HF} + \text{HNO}_3$ ) recomendado para ligas de titânio. As micrografias foram realizadas em microscópio óptico Fortel, com sistema integrado de captura de imagens Kontrol modelo M713 que permitiu a medição da camada refundida e da camada nitretada.

#### 4.7. Dureza

Seguindo os critérios estabelecidos pela norma E384 – 17 da ASTM, a dureza da camada nitretada e do substrato foi mensurada pelo ensaio de microdureza Vickers (HV), com auxílio de um microdurômetro Shimadzu modelo HMV-2T E com capacidade de carga de 10 a 100 gramas-força pertencente ao laboratório da PUC-Minas-Contagem. Para o ensaio, utilizou-se carga de 10 gf por 15 segundos. As indentações foram realizadas na seção transversal de quatro amostras, pertencentes aos quatro grupos da tabela 2, que tiveram as superfícies lixadas e polidas com pasta de diamante de 3 e 1  $\mu\text{m}$ . Duas amostras usinadas com adição do pó de SiC, sendo uma com eletrodo de cobre e outra com eletrodo de grafita, bem como duas amostras usinadas sem adição do pó e com eletrodos distintos. Essas indentações

foram executadas em regiões definidas, sendo realizadas nas amostras em conjunto de três e espaçadas igualmente em torno de 25  $\mu\text{m}$ , concentradas na camada nitretada e na matriz do material, com o objetivo de acompanhar a variação da dureza ao se afastar da borda do material e próxima ao centro dessas regiões, para evitar interferências da borda no resultado da dureza.

Não houve medição em camada refundida, visto que, onde ocorreu a formação desta, sua espessura foi inferior aos 25  $\mu\text{m}$  estabelecidos pela norma. O perfil de dureza pôde ser gerado após realização das indentações.

Incorporado ao durômetro, o microscópio óptico software Easy Test HMV-AD com auxílio de câmara digital, capturou imagens das endentações realizadas.

#### 4.8. Difração de raios X

O ensaio foi realizado por difração de raio-X convencional utilizando o difratômetro modelo Shimadzu XRD – 7000 X-Ray. O principal objetivo dessa caracterização foi identificar nitretos formados na superfície do titânio após NDE e outros compostos possíveis pela adição do carbetto de silício em pó. Os parâmetros empregados no ensaio estão listados na tabela 5.

**Tabela 5: Parâmetros adotados no ensaio de DRX**

<b>Parâmetro</b>	<b>Especificação</b>
Radiação	CuK $\alpha$
Tensão	40 kV
Corrente	30 mA
Tipo de varredura	$\theta - 2\theta$
Ângulo inicial de varredura ( $2\theta$ )	20°
Ângulo final de varredura ( $2\theta$ )	120°
Modo de varredura	Tempo fixo
Passo de amostragem	0,04°
Tempo de varredura por ponto	1 s

Fonte: Autora, 2019.

Quatro amostras pertencentes aos grupos da tabela 2, duas usinadas com eletrodo de grafita e duas com eletrodo de cobre, variando o fluido dielétrico foram submetidas à difração.

#### 4.9. Medição da rugosidade

Para determinar os valores de rugosidade das superfícies erodidas com os diferentes fluídos dielétricos e eletrodos ferramenta, foi utilizado rugosímetro modelo Rugosurf 20, ilustrado na figura 26.

Os parâmetros selecionados estão de acordo com a norma NBR ISO 4287: 2002 e manual do usuário fornecido pelo fabricante. Por se tratar de valores significativamente altos de rugosidade, foi utilizado “cut-off” (comprimento de amostragem) de 2,5 mm e leitura nos parâmetros Ra, Rz, Rq e Rt, respectivamente denominadas rugosidade média aritmética, rugosidade média, desvio médio quadrático e rugosidade total. Todas as amostras foram medidas e para adquirir maior confiabilidade, cada amostra foi avaliada por cinco vezes, considerando direções de medição perpendiculares entre si.

**Figura 26: Rugosímetro portátil**



#### **4.10. Microscopia eletrônica de varredura – MEV**

A morfologia da superfície das amostras da liga de titânio Ti-6Al-4V foi verificada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando o equipamento Hitachi TM 3000. Quatro amostras foram submetidas ao ensaio: duas delas usinadas com eletrodo de cobre, sendo uma com adição do pó SiC e outra sem; e duas com eletrodo de grafita, na mesma condição do grupo anterior, com e sem adição de SiC em pó.

#### **4.11 – Análise granulométrica**

Uma parcela do carbeto de silício de 600 mesh foi submetida à análise granulométrica utilizando o equipamento Analisador de Partículas a Laser – CILAS, modelo 1090. O equipamento fornece a distribuição de tamanhos por número, área e volume, bem como o diâmetro médio.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

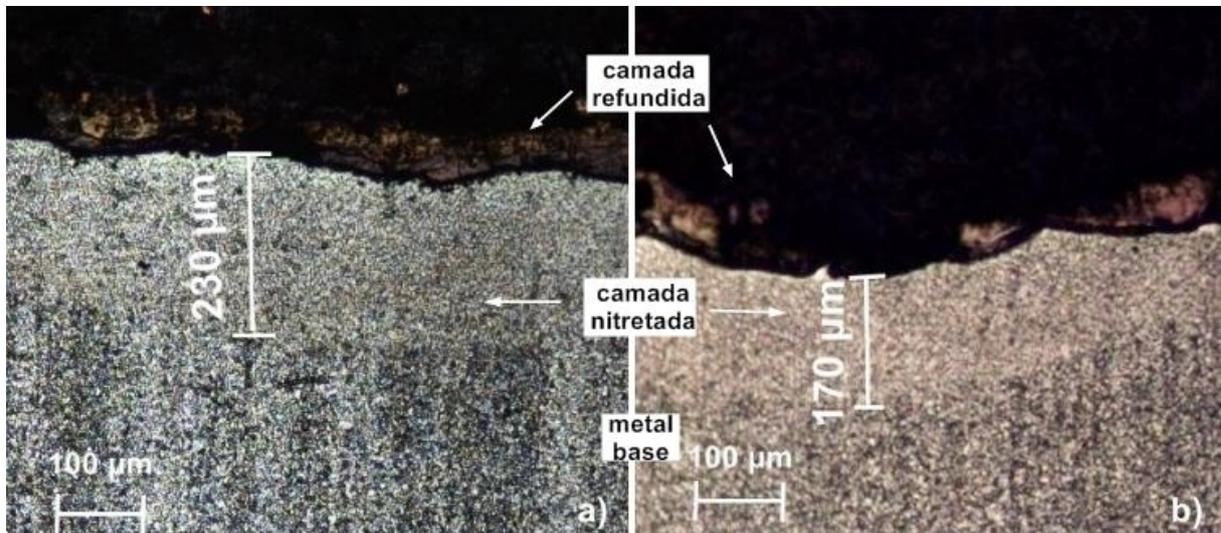
Neste capítulo são apresentados resultados da camada superficial obtidos após nitretação por EDM da liga Ti-6Al-4V utilizando como fluido dielétrico água deionizada, uréia e pó de carbeto de silício. São apresentados além das espessuras das camadas usinadas com eletrodos distintos, o desempenho do processo NDE, comparando a usinagem com e sem a adição do pó; difratogramas de raio-X identificando os picos dos nitretos formados; a dureza da camada nitretada; a rugosidade superficial em diferentes parâmetros de rugosidade e a morfologia da superfície da amostra via MEV.

### 5.1. Formação das camadas nitretadas

A figura 27 apresenta microscopia óptica das amostras usinadas por NDE pertencentes aos grupos 1 e 3, ambas usinadas com eletrodo de cobre. Na figura 27a o fluido dielétrico continha pó de SiC e na figura 27b, apenas água deionizada e uréia foram utilizados como fluido dielétrico. Nota-se a formação das camadas características do processo: ZR, ZAC e metal base. A formação da camada central, ou seja, a camada nitretada, pode estar associada à incorporação de nitrogênio liberado pela uréia, já que, em experimentos, realizados sem a adição da uréia; observa-se apenas a camada refundida e o metal base (CAMARGO; COSTA; RASLAN, 2009).

A espessura máxima da camada nitretada encontrada com a adição de pó SiC foi de 230  $\mu\text{m}$ . Houve aumento médio de 35% da camada nitretada com a incorporação do SiC em pó, já que a camada máxima visualizada e medida, quando se utilizou água deionizada e uréia como fluido dielétrico, foi de 170  $\mu\text{m}$ .

**Figura 27: Microscopia óptica – ampliação de 200X de amostras de Ti-6Al-4V nitretadas com eletrodo de cobre, a) com adição de pó SiC ao fluido dielétrico e b) uréia e água deionizada como fluido dielétrico**



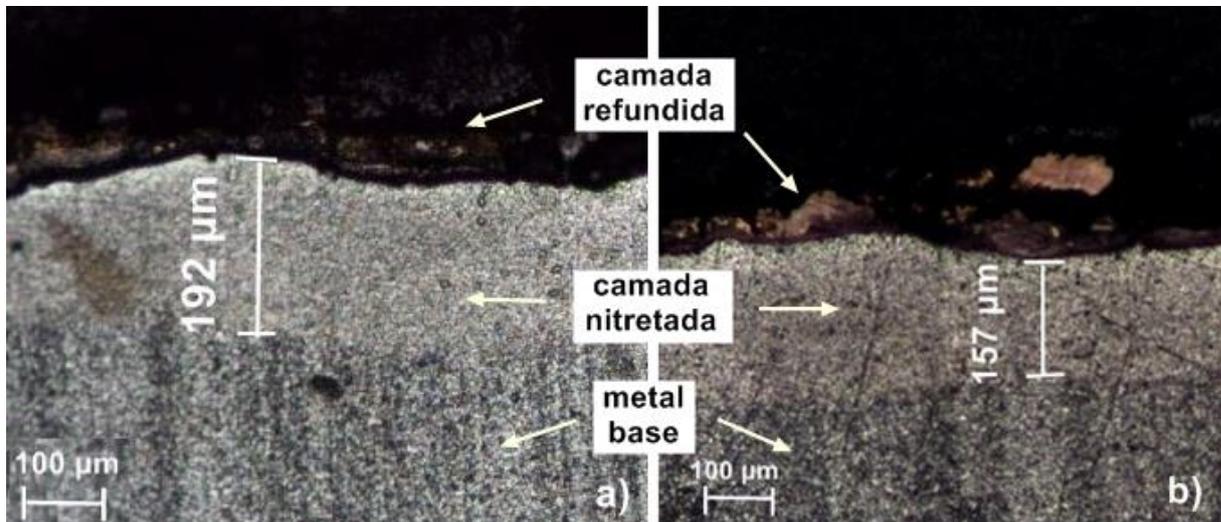
Fonte: Autora, 2019.

Em todos os casos, a formação da camada refundida não é observada em toda extensão da amostra. Há uma formação irregular e fragmentada na superfície, por essa razão, sua espessura não pôde ser estimada.

A figura 28 apresenta microscopia da seção transversal de amostras usinadas por NDE pertencentes aos grupos 2 e 4 da tabela 2. Na figura 29a utilizou-se o eletrodo de grafita e pó de carvão de silício adicionado ao fluido dielétrico. A figura 29b, apresenta a microscopia da amostra usinada também com eletrodo de grafita, nesse caso, o fluido dielétrico continha apenas água deionizada e uréia. Assim como no eletrodo de cobre, a profundidade da camada nitretada foi maior quando o pó de SiC foi adicionado ao fluido dielétrico.

A espessura máxima observada da camada nitretada sem pó foi de 157 µm e ao incluir o pó de SiC ao fluido dielétrico, obteve-se espessura de 192 µm. Nessa condição, observa-se também ganho de espessura de camada nitretada em torno de 22%.

**Figura 28: Microscopia óptica – ampliação de 200X de amostras de Ti-6Al-4V nitretadas com eletrodo de grafita, a) com adição de pó SiC ao fluido dielétrico e b) uréia e água deionizada como fluido dielétrico**



Fonte: Autora, 2019.

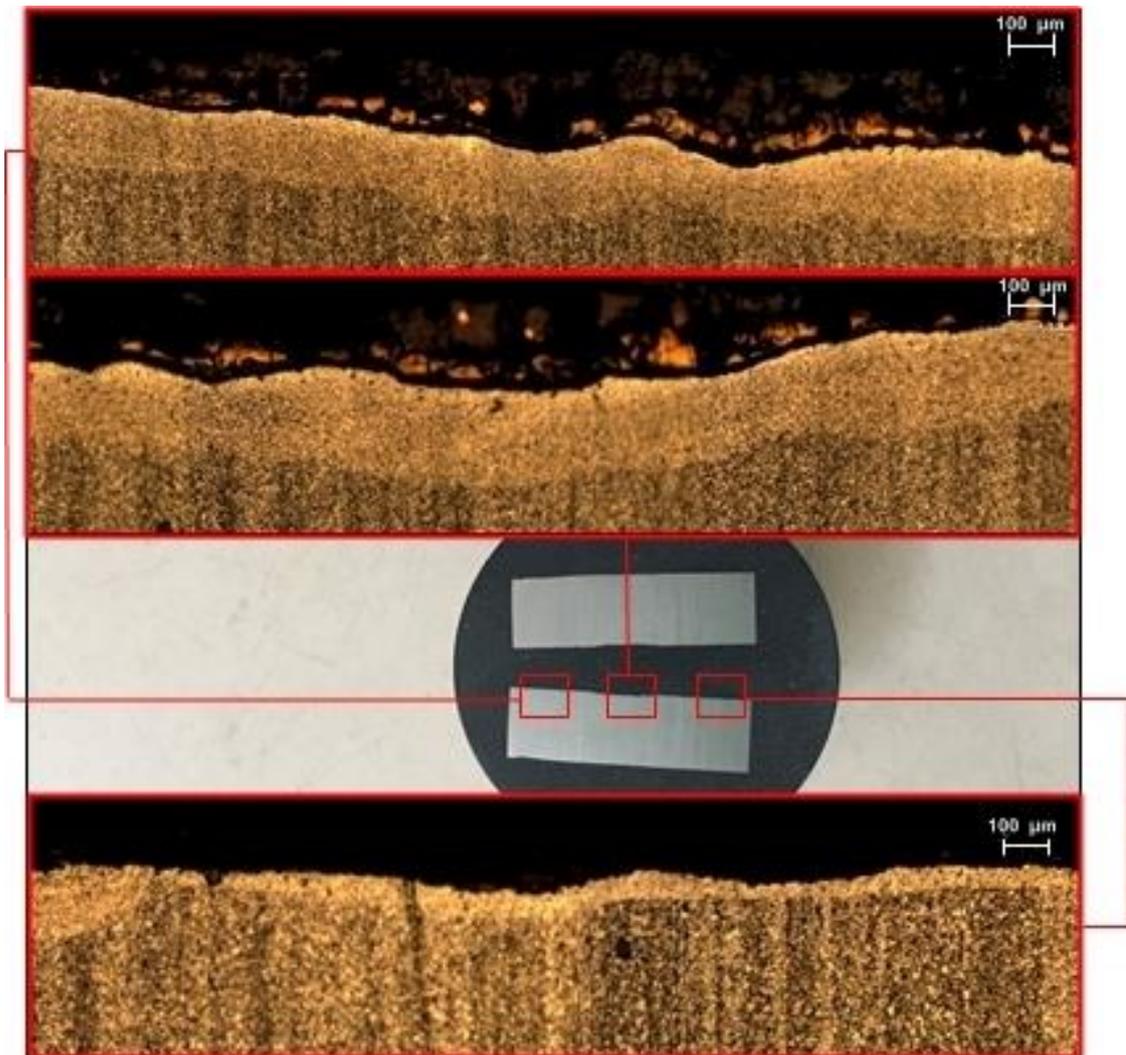
Ao analisar as figuras 27 e 28, nota-se formação de camadas nitretadas mais espessas quando se adicionou o pó de carbeto de silício ao fluido dielétrico, independentemente do eletrodo ferramenta utilizado, o que pode estar associado à alteração da intensidade e à concentração da descarga (KLOCKE; ANTONOGLUO; THOMAIDIS, 2004). O fato de o pó misturar-se ao fluido, além de permitir maior dispersão da descarga, reduz a capacitância no *gap* pelo aumento do seu comprimento em pelo menos cinco vezes em relação ao EDM convencional (TAKAWASHI; KOBAYASHI, 1989), reduzindo a possibilidade de descargas anormais; devido ao *gap* maior, gerar mais estabilidade na usinagem.

Em ambos os casos, usinagem com e sem a adição do SiC em pó ao fluido dielétrico, observa-se maior espessura de camada nitretada ao utilizar o eletrodo de cobre. Essa observação vai de encontro com os experimentos realizados por Murta (2017), que investigou a nitretação por EDM na liga de titânio Ti-6Al-4V utilizando água e uréia como fluido dielétrico e identificou camadas nitretadas mais espessas quando utilizado o eletrodo de cobre.

A adição do pó de SiC ao fluido dielétrico garantiu maior profundidade das camadas, porém não foi possível verificar regularidade e uniformidade da mesma. Contudo foi

possível verificar camada nitretada em toda a extensão das amostras, conforme pode ser observado nas imagens 29 e 30.

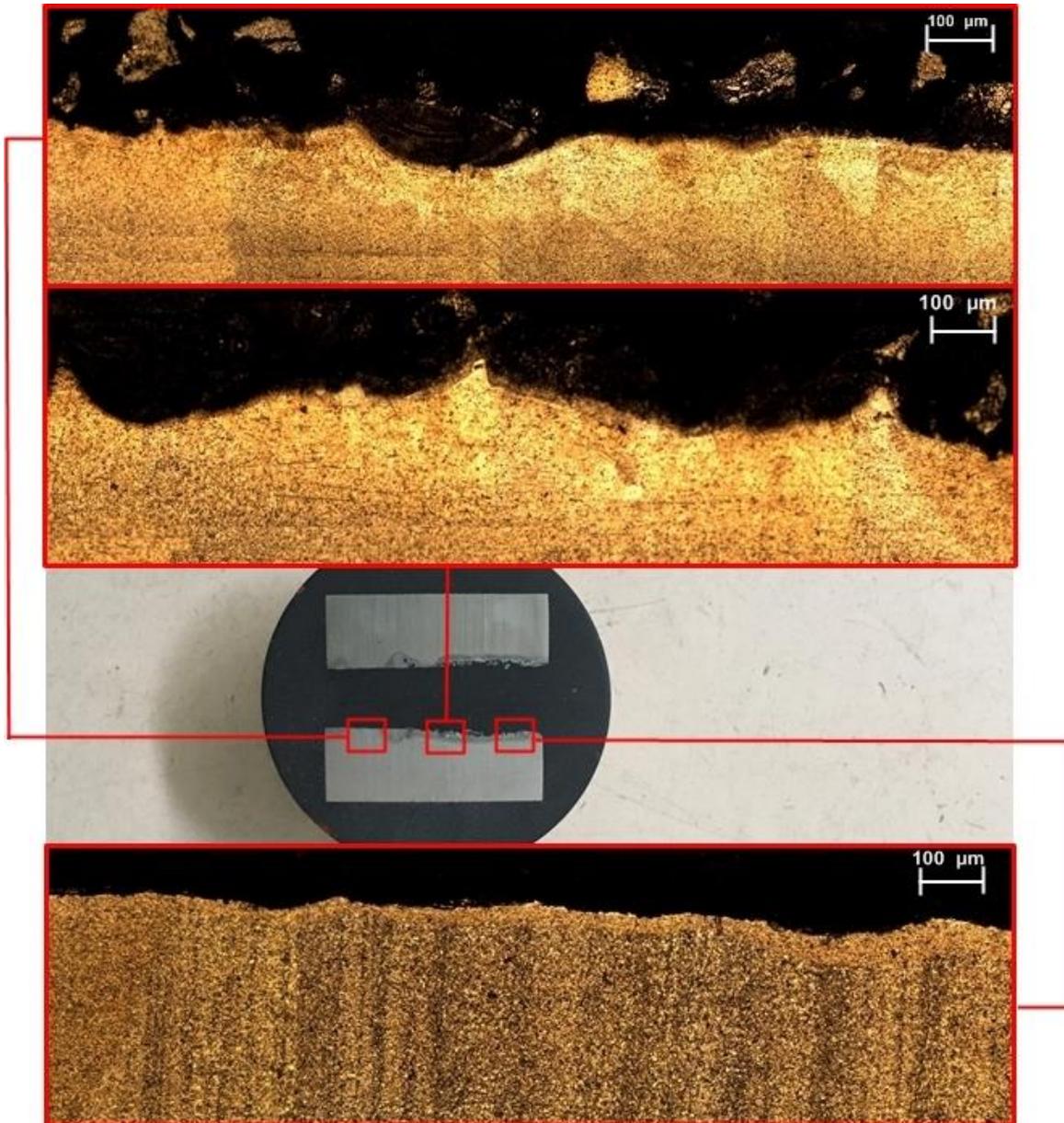
**Figura 29: Microscopia óptica de toda a extensão da amostra – ampliação de 100X da amostra de Ti-6Al-4V nitretada com eletrodo de cobre**



Fonte: Autora, 2019.

Foi possível identificar camada nitretada em toda a superfície da amostra da figura 30, contudo não há uniformidade da camada e algumas regiões possuem espessuras maiores que outras. Nota-se também, que ao utilizar o eletrodo de grafita a superfície obtida tem característica ainda mais irregular, conforme pode ser observado na figura 30. A adequação de parâmetros de usinagem e concentração do pó de carbeto de silício podem mitigar as imperfeições superficiais geradas na superfície da amostra.

**Figura 30: Microscopia óptica de toda a extensão da amostra – ampliação de 200X da amostra de Ti-6Al-4V nitretada com eletrodo de grafita**



Fonte: Autora, 2019.

## 5.2. Condutividade do fluido dielétrico

Ao final da usinagem das amostras pertencentes a cada grupo (grupo 1 ao 4) a condutividade foi medida. A tabela 6 resume as condutividades encontradas em cada etapa do processo.

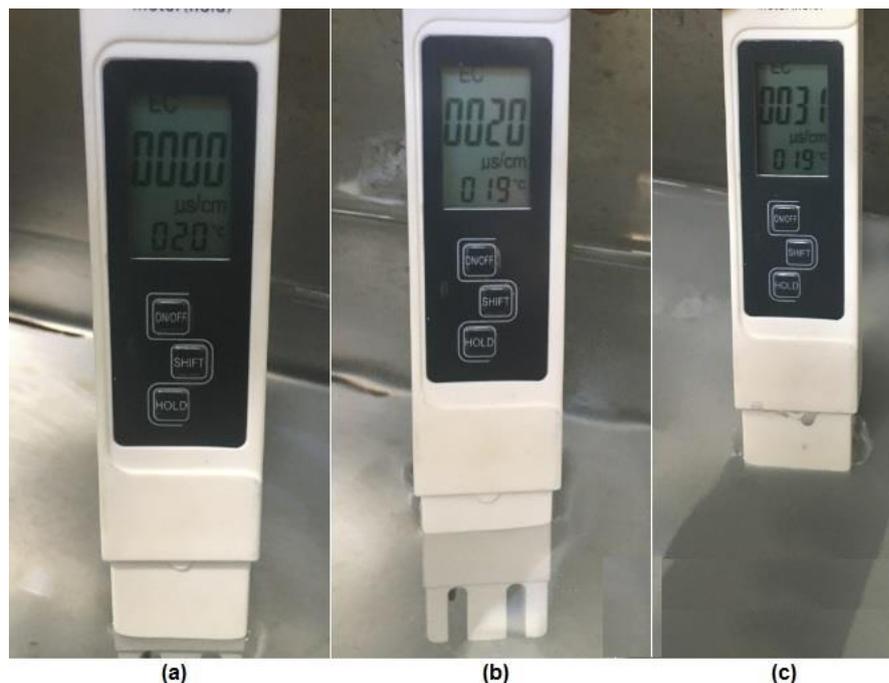
**Tabela 6: Condutividade dielétrica da solução durante o processo**

<b>Fluido dielétrico</b>	<b>Eletrodo</b>	<b>Condutividade da solução (<math>\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}</math>)</b>
Água deionizada	-	0
Água deionizada e uréia	-	20
Após usinagem das amostras	Cobre	26
Após usinagem das amostras	Grafita	31
Água deionizada, uréia e SiC	-	31
Após usinagem das amostras usando SiC	Cobre	63
Após usinagem das amostras usando SiC	Grafita	68

Fonte: Autora, 2019.

A figura 31 ilustra algumas etapas da medição da condutividade, em 31(a), após processamento no deionizador, em 31(b), após dissolução da uréia na água e em 31(c), após dissolução do pó ao fluido dielétrico.

**Figura 31: Leitura da condutividade, a) após processamento no deionizador, b) após dissolução da uréia na água e c) após adição do carvão de silício**



Fonte: Autora, 2019.

### 5.3. Desempenho do processo NDE

Foi avaliado o desempenho do processo NDE por meio das análises de TRM, TD e DVR para ambos eletrodos (cobre e grafita) e fluidos dielétrico (com e sem adição do pó de SiC). A tabela 7 apresenta os resultados das médias e desvio padrão para o desempenho da usinagem das amostras por NDE.

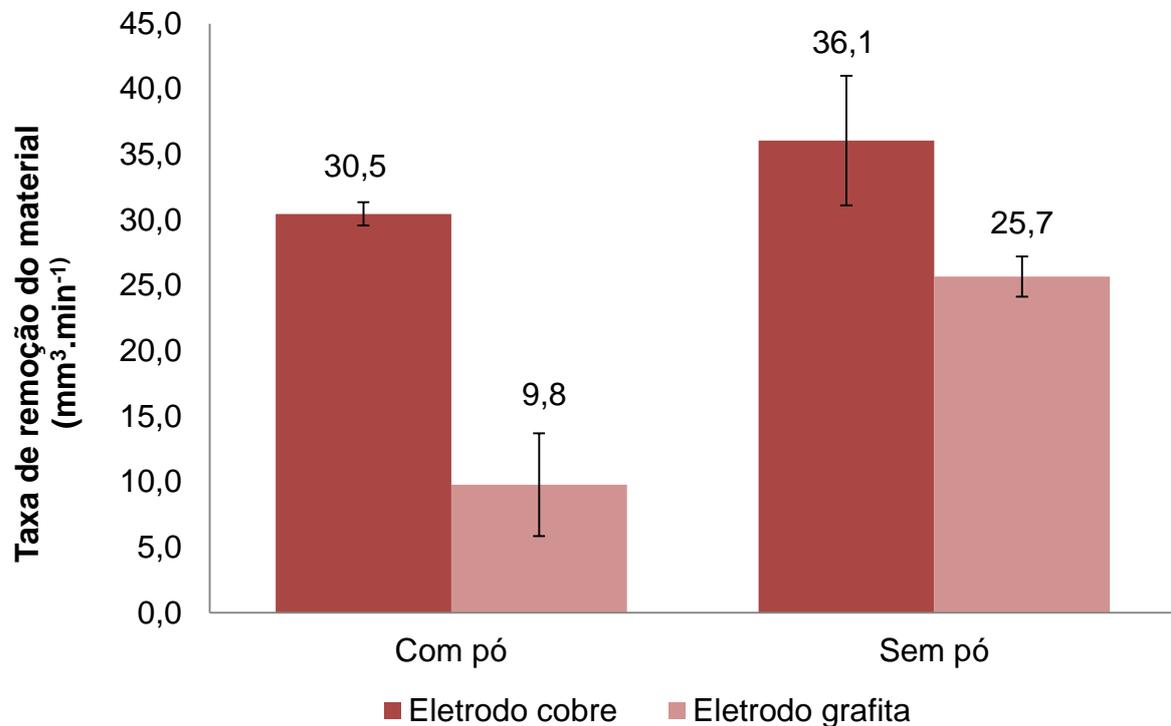
**Tabela 7: Desempenho do processo NDE utilizando como fluido dielétrico água deionizada, uréia e pó com eletrodos de cobre e grafita**

Fluido dielétrico	Com pó SiC			Sem pó SiC			
	Eletrodo ferramenta	TRM (mm <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> )	TD (mm <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> )	DVR (%)	TRM (mm <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> )	TD (mm <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> )	DVR (%)
Cobre		30,46	1,47	4,83	36,06	1,47	4,07
		± 0,89	± 0,23	± 0,72	± 4,94	± 0,20	± 0,08
Grafita		9,77	5,8	64,03	25,67	5,67	22,04
		± 3,93	± 0,53	±17,07	± 1,53	± 0,61	±1,15

Fonte: Autora, 2019.

A figura 32 apresenta uma análise da taxa de remoção do material, comparando os diferentes eletrodos e fluídos dielétricos. Com o eletrodo de cobre, independentemente do fluido dielétrico utilizado, há maior taxa de remoção de material. Esse resultado demonstra considerável eficiência do eletrodo de cobre perante o eletrodo de grafita, uma vez que seu rendimento é pelo menos 40% maior que o eletrodo de grafita. Esses resultados corroboram com a pesquisa de Murta (2017), que recomendou a utilização do eletrodo de cobre para operações NDE em amostras de titânio Ti-6Al-4V.

**Figura 32: Comparação da taxa de remoção do material com eletrodo de cobre e grafita em fluidos dielétricos distintos**



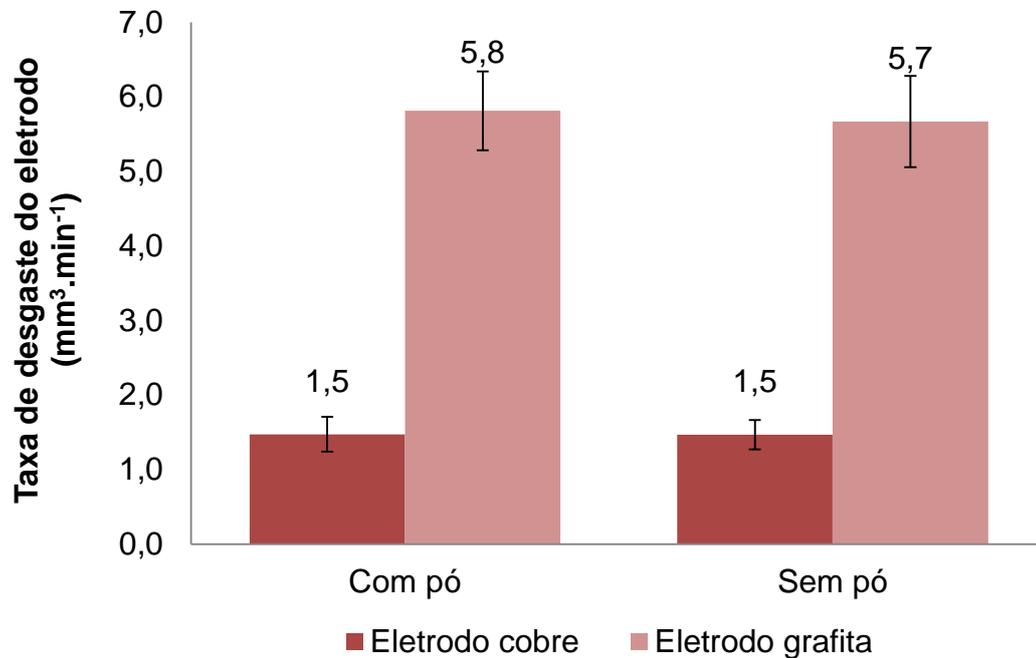
Fonte: Autora, 2019.

Ao comparar o desempenho de ambos os eletrodos, há uma redução da TRM ao acrescentar o pó de carbeto de silício ao fluido dielétrico. A queda na performance é ainda maior para o eletrodo de grafita, que pode estar associada à baixa condutividade elétrica do pó de SiC e do eletrodo de grafita perante o cobre, intensificando a queda no desempenho. Observa-se que a inserção do pó não impulsionou a TRM em nenhuma condição, o que poderia sugerir que o pó dificultou a remoção do material, tornando o processo menos produtivo.

Este fenômeno pode estar associado ao tamanho da partícula do pó abrasivo. Segundo Rizi, et al. (2012) que estudaram o efeito do pó de SiC no processo de EDM na liga de titânio, quando o tamanho das partículas aumenta significativamente, diminui a eficiência do processo devido a baixa densidade das partículas de pó. Os testes realizados com o SiC de 600 mesh corroboram com a análise experimental realizada pelos pesquisadores, que concluíram melhoria no TRM ao utilizar o pó com granulometria acima de 1000 mesh.

A figura 33 apresenta uma comparação da taxa de desgaste dos eletrodos de cobre e grafita no processo de NDE em condições diferentes de fluido dielétrico, com e sem adição de SiC em pó. Nota-se que a taxa de desgaste entre os eletrodos é significativa, pois o eletrodo de grafita desgastou-se quatro vezes mais que o eletrodo de cobre. Ao comparar a TD em fluidos dielétricos com e sem pó, não há alteração no desgaste da ferramenta, mostrando que a inserção do pó de SiC não acelera o consumo dos eletrodos, cobre ou grafita, no processo de NDE.

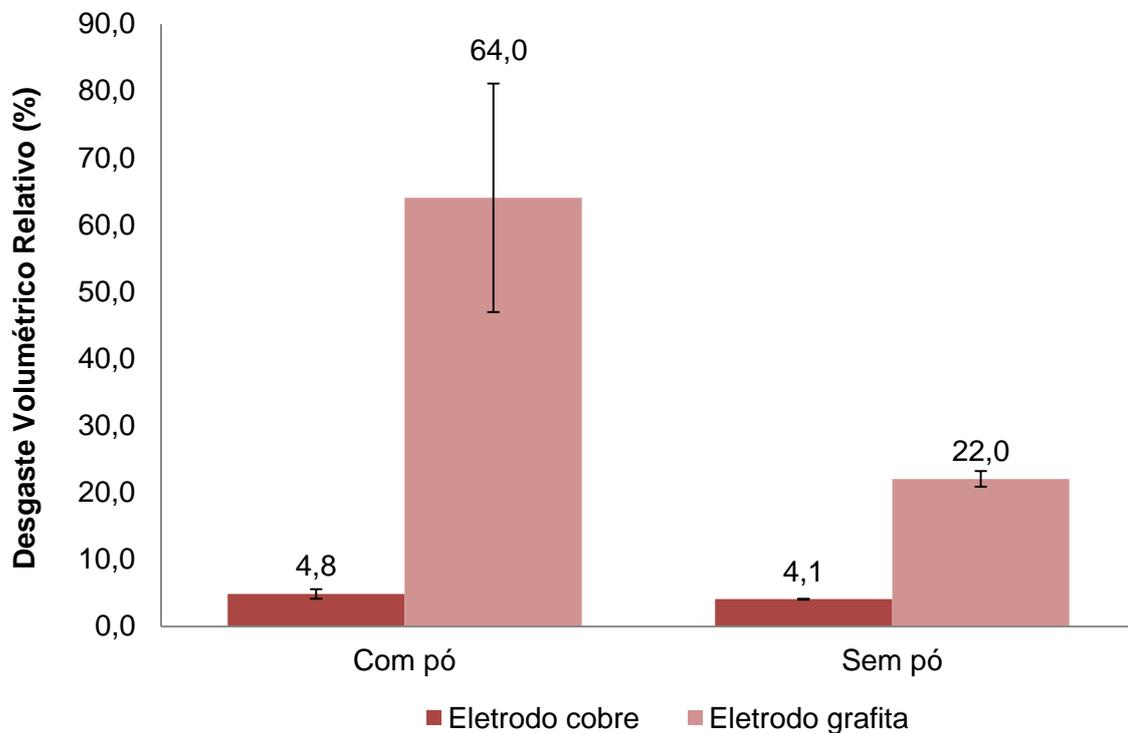
**Figura 33: Comparação da taxa de desgaste do eletrodo de cobre e grafita em fluidos dielétricos distintos**



Fonte: Autora, 2019.

A partir da observação da figura 34, pode-se concluir que o DVR, que relaciona TD com TRM, indicando melhor desempenho quanto menor o seu valor, é melhor quando a usinagem foi realizada com eletrodo de cobre. Enquanto o eletrodo de cobre apresentou DVR de aproximadamente 5% com pó e 4% sem pó, o eletrodo de grafita apresentou valores de 64% com pó e 22% sem pó, mostrando que independentemente do fluido dielétrico utilizado, o eletrodo de cobre apresentou melhor performance, pois retirou-se mais material da peça com menor desgaste do eletrodo.

**Figura 34: Comparação do desgaste volumétrico relativo dos eletrodos de cobre e grafita em fluidos dielétricos distintos**



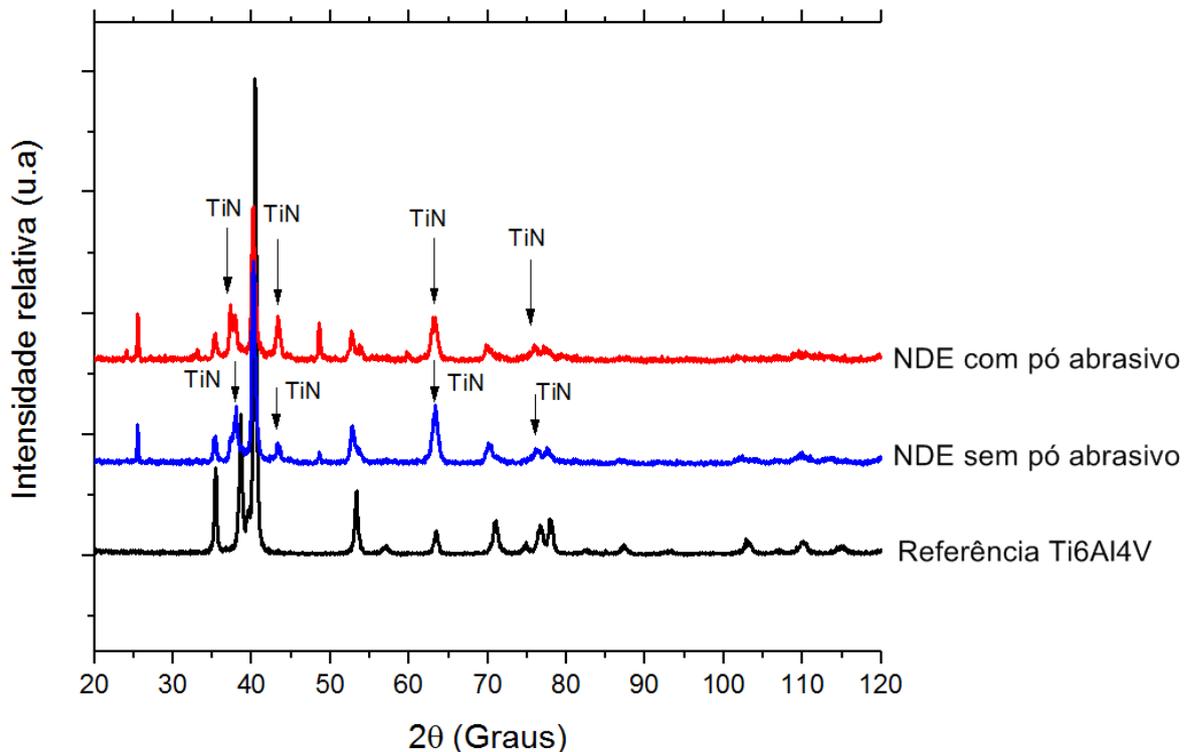
Fonte: Autora, 2019.

#### 5.4. Difração de Raio X

A análise difratográfica possibilitou identificar a presença do titânio como fases majoritárias e alguns picos identificados como nitretos de titânio. As figuras 35 e 36 apresentam a sobreposição da análise da amostra da liga de titânio Ti-6Al-4V antes e após usinagem NDE com eletrodos de cobre e grafita.

No difratograma da figura 35 utilizou-se amostra usinada com eletrodo de cobre. Compara-se o material base, que é a referência da liga, com amostras usinadas por NDE com e sem pó de SiC.

**Figura 35: Difratoograma da amostra nitretada com eletrodo de cobre**



Fonte: Autora, 2019.

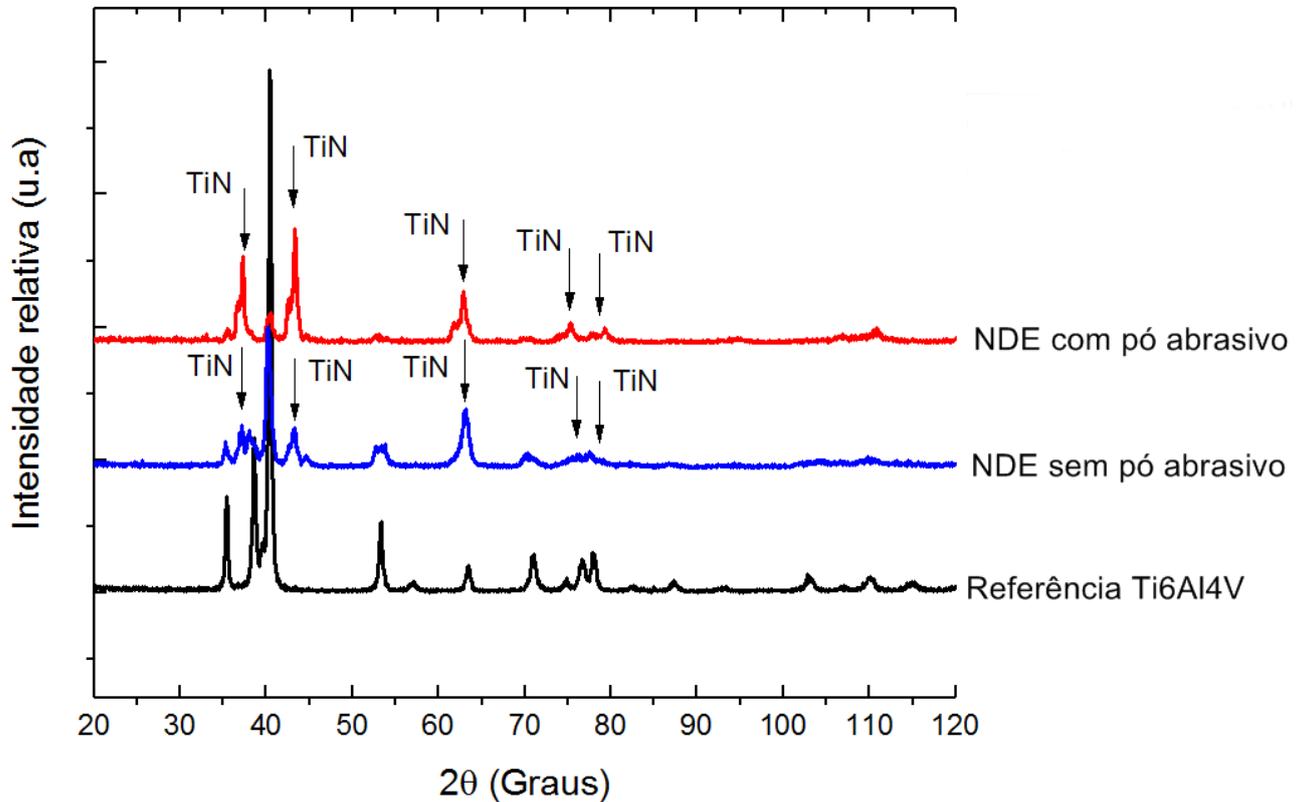
Foi possível observar a presença de picos caracterizados como nitretos de titânio nas posições 37°, 44°, 63° e 76°. Os picos identificados como nitretos de titânio são compatíveis com aqueles apontados por Yan, Tsai e Huang (2005) e Murta (2017).

O difratograma da figura 36 refere-se a uma amostra nitretada utilizando eletrodo de grafita. Os picos identificados nas posições 37°, 43°, 63°, 75° e 79°, de nitretos de titânio são compatíveis com os picos identificados por Yan, Tsai e Huang (2005).

As análises de DRX revelaram que, em ambas as condições de NDE, com e sem pó, há formação de nitretos de titânio e, de acordo com Yan, Tsai e Huang (2005), o nitreto de titânio é formado pela reação química entre o metal base e o nitrogênio decomposto da solução aquosa contendo uréia. Pesquisas realizadas por Sahu et al. (2018) indicam que a pirólise do fluido dielétrico também pode contribuir para o enriquecimento na superfície usinada e que, além disso, as partículas de pó adicionadas ao fluido dielétrico podem contribuir para a migração do material para a

superfície usinada. Os picos não identificados na análise de DRX apresentada podem ser do SiC em pó.

**Figura 36: Difratoograma da amostra nitretada com eletrodo de grafita**



Fonte: Autora, 2019.

Kuriachen e Mathew (2014) confirmaram a transferência de materiais da ferramenta e do dielétrico para a superfície usinada devido à dissolução de ambos os eletrodos (peça e ferramenta), bem como devido à decomposição do dielétrico. Em seu estudo, adicionando pó de SiC durante a usinagem por EDM, concluíram que este também é liquefeito, absorvendo a energia do canal de plasma junto com a peça de trabalho e os eletrodos ferramenta. As partículas fundidas são solidificadas na superfície usinada devido ao efeito de resfriamento do dielétrico.

## 5.5. Microdureza

A tabela 8 apresenta os resultados médios e desvio padrão da microdureza Vickers obtidos em eletrodo de cobre e grafita quando se utilizou como fluido dielétrico água deionizada e uréia com e sem SiC em pó.

**Tabela 8: Valores da microdureza Vickers da liga de Ti-6Al-4V utilizando eletrodo de cobre e grafita em NDE com e sem pó SiC no fluido dielétrico**

Eletrodo		Metal base (Ti-6Al-4V)	NDE com pó	NDE sem pó
<b>Cobre</b>	Dureza (HV)	293,33 ± 4,04	499,90 ± 19,31	455,96 ± 21,03
	Aumento em relação ao metal base		70%	55%
<b>Grafita</b>	Dureza (HV)	294,35 ± 5,51	465,54 ± 24,13	399,25 ± 31,90
	Aumento em relação ao metal base		58%	36%

Fonte: Autora, 2019.

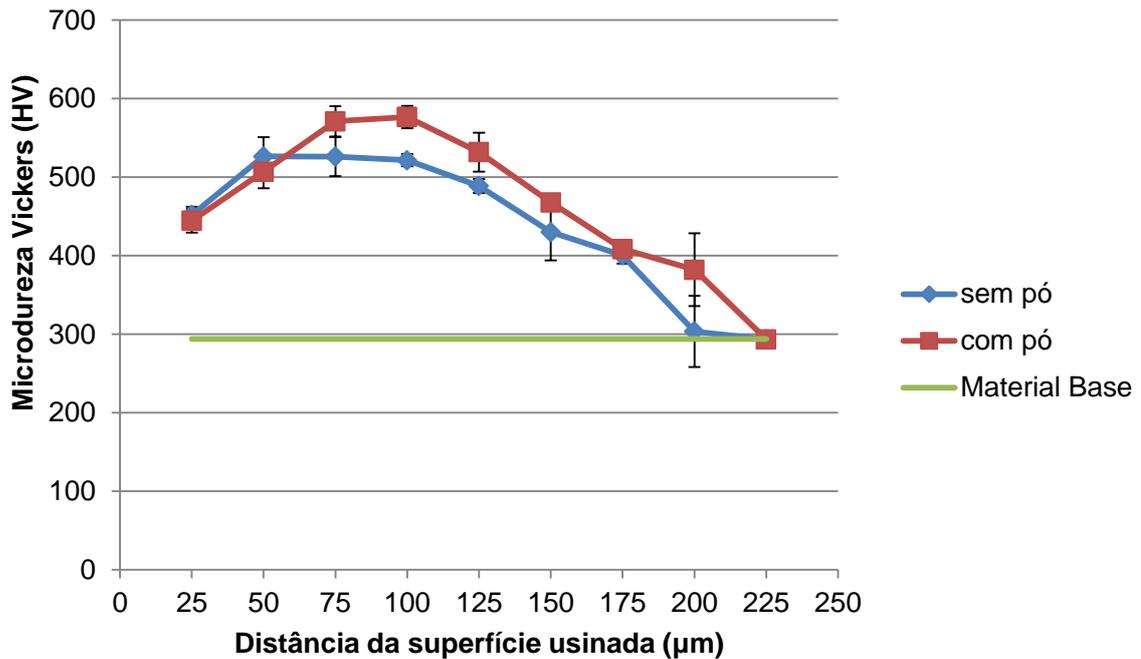
Na usinagem utilizando o eletrodo de cobre, observa-se aumento relativo da dureza do material, comparado ao metal base, tanto na usinagem com o pó de SiC adicionado ao fluido dielétrico, quanto na usinagem sem pó. Os resultados mostraram um acréscimo médio de 70% da dureza da amostra quando a usinagem foi realizada com o pó e 55% quando o fluido dielétrico foi composto de água deionizada e uréia.

Quando na usinagem NDE utilizou-se o eletrodo de grafita, também se observou aumento da dureza superficial da amostra nas duas condições de usinagem, com e sem adição do pó ao fluido dielétrico. Houve um acréscimo médio de 58% da dureza da amostra quando a usinagem foi realizada utilizando o abrasivo e cerca de 36% quando o fluido dielétrico foi composto de água deionizada e uréia apenas.

A figura 37 apresenta o perfil de dureza para amostra usinada a partir de NDE para o eletrodo de cobre comparando as duas condições de fluido dielétrico utilizados no

ensaio. Nota-se que além de obter camadas de espessuras diferentes (NDE com pó apresentou camada mais espessa) a dureza obtida nessa condição também foi maior.

**Figura 37: Perfil de dureza da seção transversal das amostras usinadas com eletrodo de cobre com e sem pó adicionado ao fluido dielétrico**

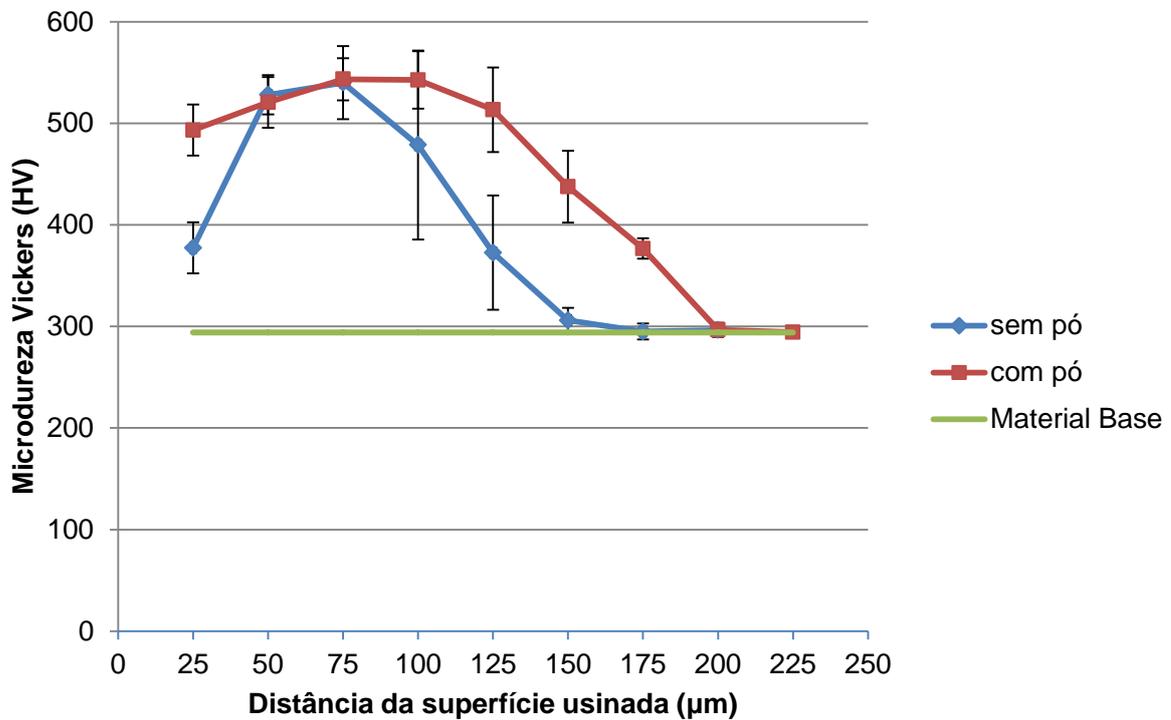


Fonte: Autora, 2019.

Inicialmente a dureza na superfície é menor, após deslocar-se para o interior do material a dureza vai aumentando progressivamente e decai quando não se tem mais camada composta por nitretos, o que corrobora com a pesquisa de Haşçalik e Çaydas (2007) que investigaram a superfície da liga de titânio após EDM. Eles identificaram que abaixo da camada refundida há uma camada ligeiramente macia devido à baixa condutividade térmica da liga Ti-6Al-4V.

A figura 38 apresenta o perfil de dureza para amostra usinada por NDE para o eletrodo de grafita, comparando as duas condições de fluido dielétrico, com e sem SiC em pó. Nota-se que além de obter camadas de espessuras diferentes (NDE com pó apresentou camada mais espessa) a dureza obtida nessa condição também é maior.

**Figura 38: Perfil de dureza da seção transversal das amostras usinadas com eletrodo de grafita com e sem pó adicionado ao fluido dielétrico**



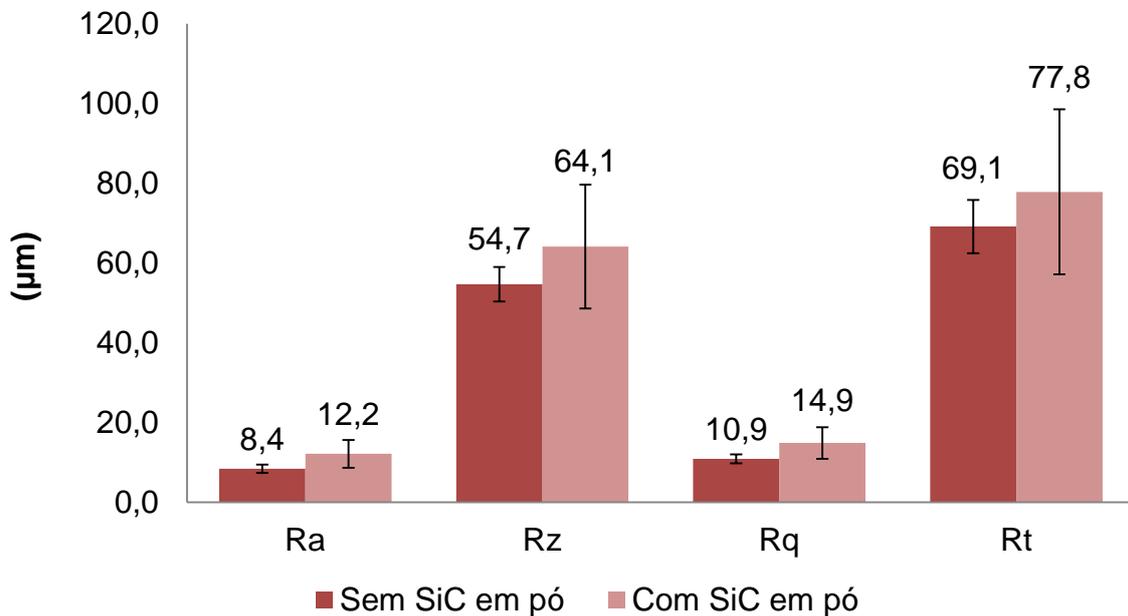
Fonte: Autora, 2019.

Outra importante observação, é que, além de obter camadas mais profundas, quando a usinagem foi realizada com o pó, a dureza obtida também foi maior. Além da incorporação do nitrogênio, oriundo da uréia, formando nitretos de titânio na superfície do material, acredita-se haver incorporação de partículas do carbeto de silício na superfície do material, formando compostos intermetálicos e precipitados de carbonetos (SAHU, et al. 2018).

## 5.6. Rugosidade

A figura 39 apresenta a média e o desvio padrão de cinco medições de amostras usinadas com e sem pó de SiC, utilizando eletrodos de cobre e grafita. Compara-se os valores obtidos em diferentes parâmetros de rugosidade quando utilizou-se o eletrodo de cobre.

**Figura 39: Avaliação da rugosidade superficial das amostras usinadas com eletrodo de cobre**



Fonte: Autora, 2019.

Nos parâmetros avaliados, nota-se aumento da rugosidade superficial quando a usinagem foi realizada acrescentando o pó de carbeto de silício ao fluido dielétrico.

A tabela 9 apresenta a rugosidade média e desvio padrão da usinagem realizada com eletrodo de cobre com e sem pó. Observa-se um aumento médio de 44% no valor da rugosidade superficial pelo parâmetro Ra.

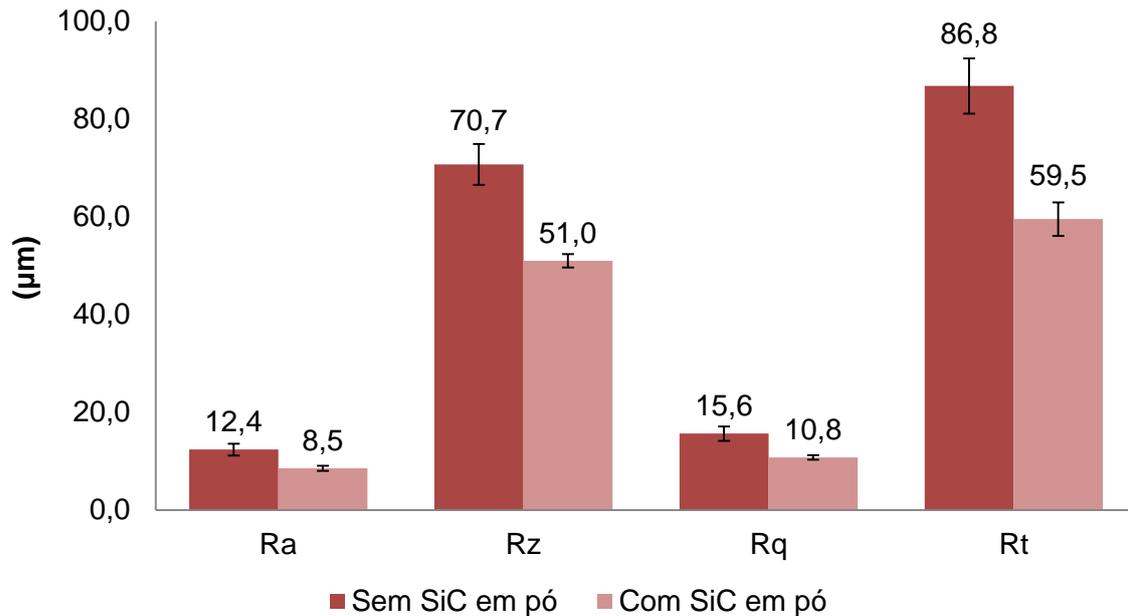
**Tabela 9: Comparação da rugosidade superficial das amostras usinadas com eletrodo de cobre**

Fluído dielétrico	Parâmetro de rugosidade (µm)			
	Ra	Rz	Rq	Rt
Sem SiC em pó	8,4 ± 1,0	54,7 ± 4,3	10,9 ± 1,1	69,1 ± 6,7
Com SiC em pó	12,2 ± 3,5	64,1 ± 15,5	14,9 ± 4	77,8 ± 20,7
Acréscimo rugosidade	44%	17%	36%	13%

Fonte: Autora, 2019.

A figura 40 apresenta um gráfico com rugosidades em diferentes parâmetros, comparando a NDE com e sem pó adicionado ao fluido dielétrico quando utilizou-se eletrodo de grafita.

**Figura 40: Avaliação da rugosidade superficial amostras usinadas com eletrodo de grafita**



Fonte: Autora, 2019.

Em geral, houve redução da rugosidade superficial em torno de 30%, essa redução vai de encontro com a pesquisa de Chow et al. (2008) que afirmam redução da rugosidade em processo de EDM quando adiciona-se o pó de carbeto de silício. Segundo o autor, esse fenômeno se deve pela baixa resistência elétrica das partículas em pó que tornará a solução mais dielétrica (mais condutora) e a distância do *gap* mais ampla, dispersando a energia de descarga que irá reduzir a rugosidade.

Quando a tensão necessária é estabelecida entre a peça de trabalho e o eletrodo ferramenta, as partículas de pó, presentes no dielétrico, energizam-se e atuam como meio condutor entre a peça de trabalho e a ferramenta, promovendo maior fenda de trabalho. Devido à formação de cadeias de partículas condutoras, ocorre a ponte entre os eletrodos e reduz o efeito isolante do dielétrico. Assim, existem chances de curtos-circuitos aumentarem e há maior dispersão da descarga (KURIACHEN; MATHEW,

2014). A tabela 10 apresenta os valores de rugosidade e desvio padrão quando a NDE foi realizada com eletrodo de grafita em diferentes parâmetros, comparando a usinagem com e sem pó no fluido dielétrico quando utilizou-se eletrodo de grafita.

**Tabela 10: Comparação da rugosidade superficial amostras usinadas com eletrodo de grafita**

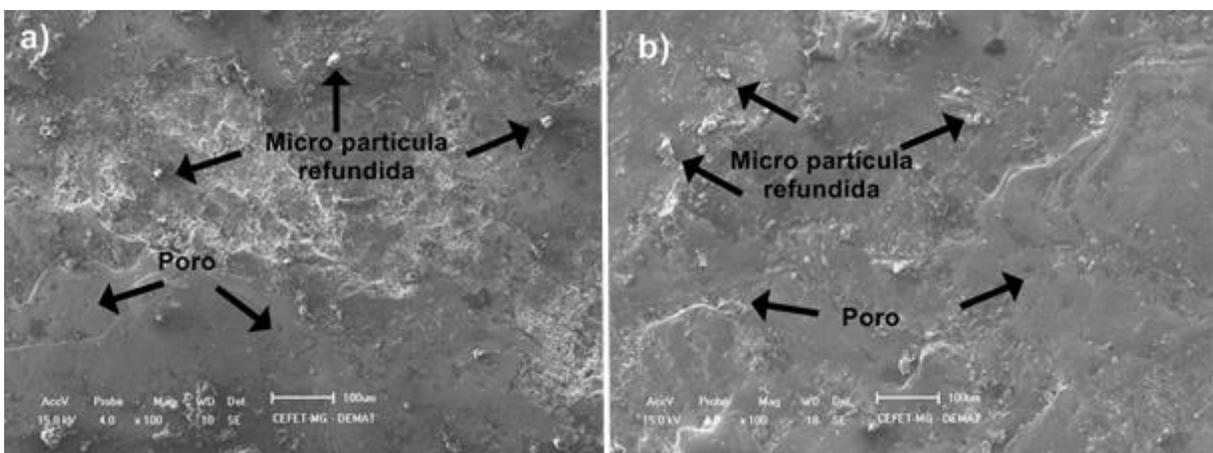
Fluído dielétrico	Parâmetro de rugosidade ( $\mu\text{m}$ )			
	Ra	Rz	Rq	Rt
Sem SiC em pó	$12,4 \pm 1,2$	$70,7 \pm 4,2$	$15,6 \pm 1,5$	$86,8 \pm 5,6$
Com SiC em pó	$8,5 \pm 0,5$	$51 \pm 1,3$	$10,8 \pm 0,5$	$59,5 \pm 3,4$
Redução rugosidade	31%	28%	31%	31%

Fonte: Autora, 2019.

### 5.7. Microscopia Eletrônica de Varredura

A figura 41 apresenta imagens de MEV das amostras usinadas com eletrodo de cobre, com e sem pó de SiC. A morfologia da superfície é característica da usinagem por EDM, na qual é possível observar, poros e partículas refundidas, que são ocasionadas pela alta temperatura oriunda do processo. É possível observar superfície com maior densidade de poros quando a usinagem foi realizada utilizando o pó de SiC.

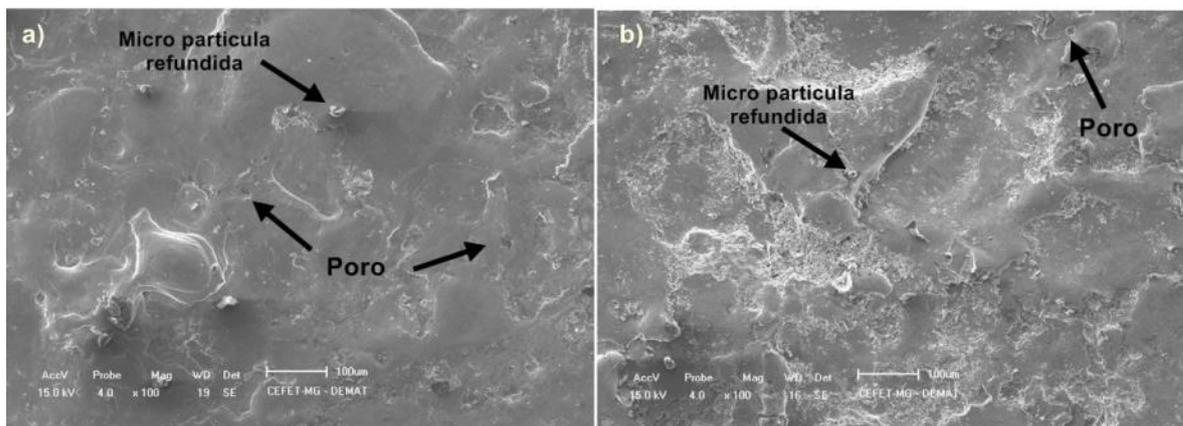
**Figura 41: MEV com eletrodo de cobre, a) com pó de SiC e b) sem pó de SiC**



Fonte: Autora, 2019.

Quando a usinagem por descargas elétricas foi realizada utilizando eletrodo de grafita, observa-se uma morfologia característica do processo de EDM na qual é possível se observar crateras, poros e partículas refundidas, que são ocasionadas pela alta temperatura oriundas do processo conforme figura 42. Ao comparar o aspecto superficial da NDE, é possível notar uma redução das irregularidades das crateras da superfície na usinagem com a adição do pó.

**Figura 42: MEV da superfície NDE usinada com eletrodo de grafita, a) usinada com pó de SiC e b) usinada sem pó de SiC**



Fonte: Autora, 2019.

Segundo Sahu et al. (2018) devido ao aumento da condutividade térmica, provocada pelo acréscimo do pó ao fluido dielétrico, faz com que o calor seja distribuído uniformemente na fenda de trabalho, devido ao aumento da descarga. Além disso, múltiplas descargas ocorrem por um longo período de tempo. Esses fatores contribuem para melhor morfologia superficial, reduzindo irregularidades da superfície, depósito de detritos e trincas.

### 5.8. Análise granulométrica

A análise do grão abrasivo foi realizada antes da usinagem NDE, com o intuito de verificar a dimensão média dos grãos. A tabela 11 apresenta as dimensões percentuais dos grãos presentes na amostra.

**Tabela 11: Granulometria a laser do carbetto de silício antes da NDE**

<b>Parâmetro</b>	<b>Análise</b>	<b>Unidade</b>
Diâmetro a 10%	5,85	µm
Diâmetro a 50%	13,70	µm
Diâmetro a 90%	23,75	µm
Diâmetro médio	14,38	µm
Ultrassom	60	seg.
Obscuração (%)	22	-

Fonte: Autora, 2019.

Observa-se que 90% dos grãos da amostra encontram-se menores que 23,75 µm e grãos médios de 14,38 µm. A análise confirma a granulometria informada pelo fornecedor que foi de 600 mesh. Conforme a norma NBR NM-ISO 3310-1:1997, malhas de 635 devem garantir particulados médios menores que 0,020mm.

## 6. CONCLUSÃO

Ensaios foram conduzidos com o objetivo de avaliar a formação da camada nitretada por NDE utilizando eletrodo de cobre e grafita, quando adicionado ao fluido dielétrico (composto de água deionizada e uréia) o pó de carbetto de silício. Na análise, quando na NDE foi utilizado eletrodo do cobre, observou-se formação de camadas com espessuras significativas. Espessura máxima em torno de 230  $\mu\text{m}$  para usinagem com adição de pó e 170  $\mu\text{m}$  sem adição do pó SiC ao fluido dielétrico. Quando a usinagem foi realizada utilizando eletrodo de grafita, as camadas obtidas também foram significativas. Nas regiões mais espessas de 190  $\mu\text{m}$  com adição de SiC em pó e 150  $\mu\text{m}$  quando o fluido dielétrico continha apenas água deionizada e uréia.

Apesar da formação irregular da camada nitretada, nota-se formação de camada em toda extensão da amostra, tanto para testes com eletrodo de cobre, quanto para eletrodo de grafita, bem como nas condições com e sem pó.

Sobre o desempenho da usinagem, foi possível comparar os eletrodos utilizados e o efeito da adição do pó ao desempenho do processo. É possível concluir que o DVR é pelo menos 5 vezes melhor quando se utilizou o eletrodo de cobre e que não há influência significativa no desempenho do processo, para o eletrodo de cobre, ao incorporar o pó de SiC, já que o DVR nas duas condições, com e sem pó, permaneceu praticamente inalterado.

O nitrogênio desprendido do fluido dielétrico implantou-se na superfície da amostra formando nitretos de titânio tanto na amostra com pó de SiC, quanto na amostra sem pó adicionado ao fluido dielétrico. O ensaio de difração de raio-X evidenciou a formação desses nitretos.

A partir do ensaio de microdureza Vickers foi possível identificar acréscimo médio na dureza do material, independente do eletrodo, quando o pó foi adicionado ao fluido dielétrico. Para o eletrodo de cobre, quando o pó estava presente na usinagem, o acréscimo de dureza foi de 70% e sem o pó em torno de 55%. Quando o eletrodo de

grafita foi utilizado, o acréscimo de dureza com relação ao material base foi de 58% na usinagem com SiC em pó e 36% na usinagem sem pó.

Com relação ao acabamento superficial, quando o pó foi adicionado, houve aumento de rugosidade utilizando eletrodo de cobre, em torno de 44% e redução de rugosidade utilizando o eletrodo de grafita em torno de 31%.

A análise de MEV mostrou características típicas de usinagem por descargas elétricas e uma redução das imperfeições quando a usinagem foi realizada com eletrodo de grafita e SiC em pó no fluido dielétrico. Quando o pó foi adicionado ao fluido e utilizou-se o eletrodo de cobre, o aspecto superficial apresentou maior densidade de crateras e imperfeições.

Após investigação, conclui-se que os resultados obtidos são satisfatórios e indicam viabilidade no processo de nitretação por descargas elétricas da liga de titânio Ti-6Al-4V ao acrescentar o pó de carbetto de silício ao fluido dielétrico.

Com a exigência contínua do mercado industrial em integração e redução de custos dos processos industriais, a NDE, com adição de SiC em pó, pode ser uma solução desejável para a integração de processos. Visto que não houve nenhuma mudança significativa na característica da máquina de EDM, com o aprimoramento de pesquisas relacionadas ao assunto, pode-se, no futuro, viabilizar o uso industrial dessa tecnologia.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar influência da granulometria do pó de SiC no desempenho do processo e rugosidade superficial;
- Comparar desempenho entre pós como o carbetto de silício, óxido de alumínio e grafite;
- Avaliar a profundidade da camada nitretada por fatiamento testando diferentes pós;

## 7. 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.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 4287:2002** Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM-ISO 3310-1** Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificações – Parte 1: Peneiras com telas de tecido metálico. Rio de Janeiro, 1997.

BANERJEE, S.; MUKHOPADHYAY, P. **Phase Transformations, Pergamon Materials Series**. 1 ed. London: Elsevier, 2007. 840p.

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

BLEYS, P. et al. Surface and Sub-Surface Quality of Steel after EDM. **Advanced Engineering Materials**. N. 1-2. p. 15-25, 2006.

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, S. A review on the use of dielectric fluids and their effects in electrical discharge machining characteristics. **Science Direct Precision Engineering**. N. 40. p. 1-6. 2015.

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.; et al. 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.

DORF R.; KUSIAK A. **Handbook of Design, Manufacturing and Automation - No traditional manufacturing processes**. EUA: Wiley, 1994. cap. 13.

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.

HASÇALIK A.; ÇAYDAS U. Electrical discharge machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V). **Science Direct**. N. 253 p. 9007-9016. 2007.

JAMESON, Elman 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 B.; RAM K.; RAO M. 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.

JOHNS, S.M. et al. Wear resistance of plasma immersion ion implanted Ti-6Al-4V. **Surface and Coatings Technology**, N. 85. p. 7-14. 1996.

KERN R. Sinker dielectric fundamentals. EDM Today Tech Tips. **Net**, EUA January/February 2009. Disponível em: <<http://www.edmtodaymagazine.com/2015/index.php/edm-today-archives/new-archives>>. Acesso em: 30 nov. 2017.

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

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

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

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

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

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

LEÃO F.; PASHBY I. 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.

LENG, Y.; et al. Fabrication of Ti-O/Ti-N duplex coatings on biomedical titanium alloys by metal plasma immersion ion implantation and reactive plasma nitriding/oxidation. **Surface and Coatings Technology**, N. 138. p. 296-300. 2001.

LEYENS C.; PETERS M. **Titanium and Titanium Alloys**. 1 ed. Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003. 513p.

LIMA, R. M. – **Utilização de fluidos dielétricos à base de óleos vegetais na usinagem por descargas elétricas por penetração**. 2008. 104f. Dissertação do Mestrado - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2008.

METALS HANDBOOK. **Machining, Materials Park, OH: ASM International, 1989. Vol. 16.**

MOISEYEV, V.N. **Titanium Alloys, Russian Aircraft and Aerospace Applications**. 1 ed. Moscow: CRC Press, 2005. 216p.

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.

MURTA, R. M. A. **Avaliação da camada Nitretada por Descargas Elétricas na liga de titânio Ti-6Al-4V**. 2017. 88 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

NDALIMAN M.; KHAN A.; ALI M. Influence of dielectric fluids on surface properties of electrical discharge machined titanium alloy. **Journal of Engineering Manufacture**. N. 227. p. 1310-1316. 2013.

PANDEY A.; SINGH S. 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.

RASLAN, A. A.; SANTOS, R. F.; SILVA, E. R. **Método de Nitretação através da usinagem com descargas - NDE**. INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial (Rio de Janeiro, RJ). BR 10 2012 030523-2. 30 de novembro de 2012.

RAZAVI R.; GORDANI G. A review of the corrosion of laser nitrided Ti-6Al-4V. **Anti-Corrosion Methods and Materials**. N. 58. p. 140-154. 2011.

RIZI M.; et al. Optimization electro discharge machining of Ti-6Al-4V alloy with silicon carbide powder mixed. **Advanced Materials Research**. N. 566. p.466-469. 2012.

RODRIGUES, J. R. P., **Efeito da adição de carboneto de silício em pó na geração de microtrincas e na topografia da superfície usinada por descargas elétricas do aço-rápido ABNT M2**. 1999. 47f. Dissertação do Mestrado – UFU – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

SAHU, S; et al. Effect of using SiC powder-added dielectric media during electrodischarge machining of Inconel 718 superalloys. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**. N. 330, p. 1- 19. 2018.

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

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

SANTOS, R. F.; SILVA, E. R.; SALES, W. F.; RASLAN, A. A. Influence of urea content blended with deionized water in the process of nitriding using electrical

discharge machining on AISI 4140 steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. N. 89. p.1251-1257. 2016.

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. **Comparação do desempenho do fluido dielétrico vegetal com mineral sintético e querosene na eletroerosão do aço AISI H13**. 2007. 110f. Dissertação do Mestrado – PUC – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

SILVA, E. R.; SANTOS, R.F.; SOUZA, L. B. F; RASLAN, A. A. Comparação de desempenho entre os pós-abrasivos de carbetto de silício (SiC) e alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) no processo híbrido AJEDM.. In: Simpósio do programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica – 20º POSMEC, 2012, Uberlândia, 2012.

SILVA, O. S. **Avaliação da usinabilidade da liga Ti-6Al-4V no torneamento com alta velocidade de corte com diferentes métodos de lubri-refrigeração**. 2016. 141f. Dissertação do Mestrado – CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

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.

STEVENS, L. **Improvement of Surface Quality in Die Sinking**. 1988. 181 f. Tese de Doutorado – Department of Mechanical Engineering, K. U. Leuven, Belgium.

TAKAWASHI, T.; KOBAYASHI, K. EDM by powder suspended working fluid. **Proceedings of the International Symposium for Electro-Machining**, In: Proceedings of the ISEM- 9, Nagoya, Japan, 5–8. 1989.

YAN, B.; TSAI, H.; HUANG, F. 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.

YEROKHIN, A.; et al. Characterisation of oxide films produced by plasma electrolytic oxidation of a Ti-6Al-4V alloy. **Surface and Coatings Technology**, N. 130. p. 195-206. 2000.

## APÊNDICE A – Certificado de Qualidade da liga Ti-6Al-4V



### Certificado de Qualidade Nº.: 23283/14

**Cliente :** CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS - CEFETMG  
**Pedido Cliente :** 2014NE801900  
**Referências Internas:** SANDINOX **Nota Fiscal Nº.:** 7.403  
**Certificado de Origem Nº.:** 7210001070 -

<b>Liga / Material:</b> Titânio 6Al 4V ELI	<b>Especificações:</b> ASTM F136 e ISO 5832-3	<b>Tratamento Térmico:</b> Recozido	
<b>Acabamento:</b> Retificado	<b>Produto ( Estado Físico ):</b> Barra redonda	<b>Dimensões (mm):</b> 25,40	<b>Tolerância:</b> -0,052
<b>Comprimento (mm):</b> 3000 a 3200	<b>Peso:</b> 7,07 KG	<b>Quantidade:</b> 3,00 metros	
<b>Composição Química (%)</b>		<b>Corrida :</b> J1122G	
C	V	Al	Ti
0,03	4,18	6,12	Galdo
O	Fe	H	N
0,12	0,16	0,0019	0,01
<b>Propriedades Mecânicas</b>			
Alongamento: 17 %			
Escoamento: 876 MPa			
Resistência a Tração: 925 MPa			
<b>Obs :</b>			
Alguns dados foram extraídos do certificado de origem do fabricante da matéria prima.			
Redução de área: 49%			

Data 10/11/2014 18:08:03