

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

EDUARDO DE CASTRO BARBALHO

EFEITOS DA ADIÇÃO DO SiC AO FLUIDO DIELÉTRICO NA CAMADA
NITRETADA DO AÇO AISI 4140 APÓS NITRETAÇÃO POR PMEDM

Belo Horizonte
Fevereiro de 2021

Eduardo de Castro Barbalho

**EFEITOS DA ADIÇÃO DO SIC AO FLUIDO DIELÉTRICO NA CAMADA
NITRETADA DO AÇO AISI 4140 APÓS NITRETAÇÃO POR PMEDM**

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

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo dos Santos

Belo Horizonte

Fevereiro de 2021

Barbalho, Eduardo de Castro.

B229 Efeitos da adição do SiC ao fluido dielétrico na camada nitretada do aço AISI 4140 após nitretação por PMEDM / Eduardo de Castro Barbalho. – 2021.

118 f. : il.

Orientador: Ernane Rodrigues da Silva

Coorientador: Carlos Eduardo dos Santos

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2021.

Bibliografia.

1. Rugosidade superficial. 2. Nitretação. 3. Eletroerosão. 4. Abrasivos. 5. Aço cromo-molibdênio. I. Silva, Ernane Rodrigues da. II. Santos, Carlos Eduardo dos. III. Título.

CDD: 671.35



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 2/2021 - POSMAT (11.52.07)

Nº do Protocolo: 23062.008415/2021-35

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Belo Horizonte-MG, 26 de fevereiro de 2021.

"EFEITOS DA ADIÇÃO DO SIC AO FLUIDO DIELETRICO NA CAMADA NITRETADA DO AÇO AISI 4140 APÓS NITRETAÇÃO POR PMEDM"

Autor: Eduardo de Castro Barbalho

Orientador: Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

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

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

Prof. Dr. Hermes de Souza Costa (MEMBRO INTERNO)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG

Prof. Dr. Lucas Paglioni Pataro Faria (MEMBRO EXTERNO)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG

(Assinado digitalmente em 09/03/2021 12:55)

CARLOS EDUARDO DOS SANTOS

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEMAT (11.55.06)
Matricula: 3573881

(Assinado digitalmente em 08/03/2021 15:11)

ERNANE RODRIGUES DA SILVA

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
CEMAT (11.51.06)
Matricula: 392338

(Assinado digitalmente em 09/03/2021 11:12)

HERMES DE SOUZA COSTA

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEMAT (11.55.06)
Matricula: 2528912

(Assinado digitalmente em 04/03/2021 20:22)

LUCAS PAGLIONI PATARO FARIA

ASSINANTE EXTERNO
CPF: 052.175.446-19

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **2**, ano: **2021**, tipo: **ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**, data de emissão: **25/02/2021** e o código de verificação: **0122d2d9e7**

A Deus, meu Criador, que me deu a tranquilidade, a fortaleza e a sabedoria
necessárias para realizar o trabalho.

À minha amada esposa Edilene Lima Barbalho, meu refúgio, meu porto seguro,
minha fonte de inspiração, que me incentivou e apoiou-me em todos os momentos
deste desafio.

À minha filha Bárbara Cristina Lima Barbalho, que compreendeu a minha ausência e
que me enche de alegrias.

Aos meus pais, Plínio Barbalho e Juventina Barbalho que, abaixo de Deus, deram-me a vida.

Às minhas irmãs Silvana, Cibele, Gisele, Patrícia e Cristiane que sempre me
cobriram de carinho.

Aos meus sobrinhos, sobrinhas que são filhos e filhas emprestados ao meu coração.

Aos cunhados e cunhadas, que sempre se fizeram presentes.

A vocês e aos demais amigos, dedico a conclusão desta etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, meu Criador, fonte de toda Sabedoria e Amor, sem o qual nada disso faria sentido. Impossível chegar neste momento e não louvá-lo por tudo de bom que Ele permitiu que comigo se concretizasse.

Ao Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva, pela paciência na orientação, por me conceder a oportunidade de aprendizado, por confiar no meu potencial, pela imensa parceria nos trabalhos experimentais durante as férias e finais de semana, pela dedicação ao ensino e que descortinou no meu horizonte um cabedal enorme de conhecimentos na área de usinagem por eletroerosão e despertou em mim o fascínio pelas pesquisas.

Ao Prof. Dr. Carlos Eduardo dos Santos, pela coorientação, apoio e confiança desde o início deste projeto de Mestrado. Meu muito obrigado.

Aos professores Dr. Lucas Paglioni Pataro Faria e Dr. Hermes de Souza Costa, por todas as contribuições como membros da banca examinadora.

Ao professor Dr. Ezequiel de Souza Costa Júnior pelos ensinamentos em Ensaio Mecânicos.

À professora PhD. Elaine Carballo Siqueira Corrêa pelos ensinamentos em Tratamentos Térmicos e em Fundamentos da Transformação Mecânica dos Metais.

À professora Dr^a. Maria Celeste Monteiro de Souza Costa e ao professor Dr. Cláudio Turani Vaz pelos ensinamentos em Tecnologia da Soldagem.

À professora Dr^a. Aline Bruna da Silva pelos ensinamentos em Metodologia da Pesquisa.

Ao professor Dr. João Paulo Santos pelos ensinamentos em Ciência dos Materiais.

À Caroline Fernandes, secretária do programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, pela ajuda e pelo apoio recebido.

Aos colegas de aula que cursaram comigo as disciplinas do mestrado, principalmente, Gilcélio de Deus Souza, Rithyeli Lage Souza, Raíssa Ribeiro Lima Machado e Denilson Heberth dos Santos, agradeço o compartilhamento de conhecimento e amizades conquistadas.

Ao amigo Professor M.Sc. José Eustáquio Moura de Oliveira por todos os ensinamentos na área da mecânica industrial.

À professora M.Sc. Roberta Nery dos Santos pelo auxílio na medição das camadas nitretadas.

Ao professor M.Sc. Wesley Patrick Teodósio de Souza, pelo auxílio no software Origin para construção dos difratogramas.

Ao engenheiro Guilherme Lourenço Martins, pelo auxílio na construção dos gráficos.

À professora Cristiane de Castro Barbalho, pela valiosa contribuição na correção ortográfica dos artigos científicos produzidos e na revisão dos textos desta dissertação.

Ao técnico de laboratório Jorge Wanderson Barbosa, presente em vários momentos e às suas assistentes Damaris e Verônica.

Ao CEFET-MG, através do seu Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, que permitiu a realização do meu sonho.

Agradeço aos demais professores e funcionários do DEMAT, pela boa convivência e pelo apoio.

À PUC Minas e à UFMG que também disponibilizaram equipamentos para a realização do trabalho.

Em especial, à FAPEMIG, pela liberação de recursos do projeto TEC APQ-01939-17 para a execução do presente trabalho.

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

Enfim, obrigado a todos que, embora não citados, de alguma forma se fizeram presentes por meio de palavras e ações e contribuíram para a concretização deste trabalho. A todos vocês, a minha sincera e eterna gratidão.

“O que sabemos é uma gota. O que ignoramos é um oceano.”

(Isaac Newton)

RESUMO

Esta pesquisa apresenta os resultados obtidos na rugosidade e na morfologia das superfícies em amostras de aço AISI 4140, usinadas e nitretadas através da *Electrical Discharge Machining* (EDM), sem e com adição de pós abrasivos carbeto de silício - SiC ao fluido dielétrico, composto de água deionizada misturada com ureia farmacológica, fonte de nitrogênio para a obtenção dos nitretos. O AISI 4140 é um aço cromo-molibdênio que possui características satisfatórias, empregado onde se deseja razoável resistência mecânica e boa resistência à fratura. Utilizou-se uma máquina de eletroerosão por penetração. Como eletrodos ferramenta foram utilizados o cobre eletrolítico e a grafita. Nitretos de ferro de alta dureza, enriquecidos por plasma eletrolítico rico em nitrogênio, foram detectados com a técnica de Difração de Raio-X (DRX) nas camadas formadas e essas foram avaliadas por meio da técnica Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Com a Microscopia Ótica (MO) mediu-se as espessuras dessas camadas obtendo um valor médio de $8,8 \pm 1,2 \mu\text{m}$ pelo processo EDM e $12,3 \pm 1,2 \mu\text{m}$ pelo processo *Powder Mixed Electrical Discharge Machining* (PMEDM) com SiC 600 mesh, ao longo de toda a superfície nas amostras usinadas com cobre eletrolítico. Por meio do método Vickers constatou-se microdureza média da camada nitretada de $598 \pm 54 \text{HV}$ nas amostras usinadas com grafita. Mensurou-se a rugosidade com o auxílio de rugosímetro e constatou-se que a rugosidade superficial R_a das faces nitretadas usinadas com cobre eletrolítico atingiu valores de $3,2 \pm 0,3 \mu\text{m}$, quando se empregou fluido dielétrico composto apenas por água deionizada e ureia farmacológica.

Palavras chaves: Rugosidade Superficial, Nitretação, Eletroerosão, pó abrasivo SiC, AISI 4140.

ABSTRACT

This research presents the results obtained in the surface roughness and morphology of surfaces in AISI 4140 steel samples, machined and nitrided through Electrical Discharge Machining (EDM), with and without the addition of silicon carbide abrasive powders - SiC to the dielectric fluid, composed of deionized water mixed with pharmacological urea, nitrogen source for obtaining nitrides. AISI 4140 is a chrome-molybdenum steel that has satisfactory characteristics and is used where a reasonable combination of mechanical strength and good fracture resistance are desired. A penetration EDM machine was used. As tool electrodes, electrolytic copper and graphite were used. High hardness iron nitrides, enriched by nitrogen-rich electrolytic plasma, were detected with the X-Ray Diffraction (XRD) technique in the formed layers and these were evaluated using the Scanning Electron Microscopy (SEM) technique. With Optical Microscopy (OM) the thickness of these layers was measured obtaining an average value of $8.8 \pm 1.2 \mu\text{m}$ by the EDM process and $12.3 \pm 1.2 \mu\text{m}$ by the Powder Mixed Electrical Discharge Machining (PMEDM) process with SiC 600 mesh, over the entire surface of the samples machined with electrolytic copper. Through the Vickers method, it was found an average microhardness of the nitrided layer of $598 \pm 54 \text{HV}$ in the samples machined with graphite. The roughness was measured with the aid of a portable stylus type profilometer and it was found that the surface roughness R_a of the nitrided faces machined with electrolytic copper reached values of $3.2 \pm 0.3 \mu\text{m}$, when a dielectric fluid composed only of deionized water and pharmacological urea was used.

Keywords: Surface Roughness, Nitriding, Electroerosion, SiC abrasive powder, AISI 4140.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - CENTRO DE USINAGEM ROMI, DISCOVERY 560.....	23
FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PROCESSO EDM.....	32
FIGURA 3 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DA SUPERFÍCIE NDE USINADA COM ELETRODO DE GRAFITA, A) USINADA COM PÓ DE SiC E B) USINADA SEM PÓ DE SiC.	33
FIGURA 4 - AS QUATRO FASES DE UMA DESCARGA ELÉTRICA NO PROCESSO EDM. 1) FASE DE IGNIÇÃO; 2) FORMAÇÃO DO CANAL DE PLASMA; 3) FUSÃO E SUBLIMAÇÃO DE PEQUENAS PARTÍCULAS DE MATERIAL; 4) EJEÇÃO DO MATERIAL LÍQUIDO.	34
FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO DA ETAPA DE IGNIÇÃO.	35
FIGURA 6 - FORMAÇÃO DO CANAL DE PLASMA.....	37
FIGURA 7 - FUSÃO E SUBLIMAÇÃO DE PEQUENAS PARTÍCULAS DE MATERIAL.	38
FIGURA 8 - EJEÇÃO DO MATERIAL ERODIDO.	39
FIGURA 9 - EVOLUÇÃO DA TENSÃO E DA CORRENTE ELÉTRICA DURANTE A DESCARGA, TEMPOS DE DURAÇÃO DESSES E OUTROS PARÂMETROS ELÉTRICOS DA EDM.....	40
FIGURA 13 - IMAGEM DA CAMADA REFUNDIDA DE UMA AMOSTRA DE AÇO AISI 4140 USINADA POR EDM.	51
FIGURA 14 - SEÇÃO TRANSVERSAL DE UMA CAMADA REFUNDIDA ORIUNDA DE EDM.	52
FIGURA 16 – IMAGEM DE MEV DA SUPERFÍCIE DE AMOSTRA DE AÇO AISI 4140 USINADA COM FLUIDO DIELETRICO FORMADO POR SOLUÇÃO AQUOSA DE ÁGUA DEIONIZADA MAIS UREIA....	54
FIGURA 18 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PROCESSO DE NITRETAÇÃO A PLASMA....	59
FIGURA 27 - A) MÁQUINA DE ELETROEROSÃO UTILIZADA NO PROCESSO NDE B) DETALHES DAS ADAPTAÇÕES REALIZADAS NO EQUIPAMENTO.	71
FIGURA 29 - PAINEL DE CONTROLE DA MÁQUINA EDM.	74

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PROPRIEDADES DA GRAFITA.	65
TABELA 2 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS DO AÇO AISI 4140.	66
TABELA 3 - DIVISÃO DAS AMOSTRAS EM FUNÇÃO DO DIELÉTRICO E DO ELETRODO FERRAMENTA.	71
TABELA 4 - PARÂMETROS OPERACIONAIS SELECIONADOS NA MÁQUINA PARA NDE.	73
TABELA 5 - PARÂMETROS ADOTADOS NO ENSAIO DE DRX.	76
TABELA 6 - MASSA ESPECÍFICA DOS MATERIAIS.	78
TABELA 7 - AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL RA DAS AMOSTRAS USINADAS COM E SEM PÓ ADICIONADO AO FLUIDO DIELÉTRICO COM ELETRODO DE COBRE ELETROLÍTICO.	80
TABELA 8 - VALORES DE MICRODUREZA VICKERS PELOS PROCESSOS EDM E PMEDM COM ELETRODO FERRAMENTA DE COBRE ELETROLÍTICO.	82
TABELA 9 - ESPESSURAS DAS CAMADAS NITRETADAS POR NDE DO AÇO AISI 4140 PELOS PROCESSOS EDM E PMEDM COM ELETRODO FERRAMENTA DE COBRE ELETROLÍTICO.	90
TABELA 10 - AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL RA DAS AMOSTRAS USINADAS COM E SEM PÓ ADICIONADO AO FLUIDO DIELÉTRICO COM ELETRODO DE GRAFITA.	94
TABELA 11 - VALORES DE MICRODUREZA VICKERS PELOS PROCESSOS EDM E PMEDM COM ELETRODO FERRAMENTA DE GRAFITA.	96
TABELA 12 - ESPESSURAS DAS CAMADAS NITRETADAS POR NDE DO AÇO AISI 4140 PELOS PROCESSOS EDM E PMEDM COM ELETRODO FERRAMENTA DE GRAFITA.	103

LISTA DE SÍMBOLOS

A	: Ampere
Al	: alumínio
atm	: pressão atmosférica
°C	: grau Célcus
C	: carbono
Cr	: cromo
C ₆ H ₆	: benzeno
C ₂₀ H ₁₂	: benzopireno
E	: módulo de elasticidade longitudinal
Fe	: ferro
FeN	: nitreto de ferro
g	: grama
gf	: grama força
GPa	: gigapascal
h	: hora
H ₂	: hidrogênio
HB	: dureza Brinell
HV	: dureza Vickers
i _e	: corrente da descarga média [A]
i _m	: corrente da descarga máxima [A]
K	: Kelvin (temperatura termodinâmica)
kgf	: quilograma força
kV	: quilovolt
mA	: miliampere
mca	: metro coluna d'água
mesh	: granulometria
m _f	: massa final
m _i	: massa inicial
min	: minuto
ml	: mililitro
mm	: milímetro
Mn	: manganês

mN	: milinewton
Mo	: molibdênio
MPa	: megapascal
Ni	: níquel
N ₂	: nitrogênio
NaCl	: cloreto de sódio
O	: oxigênio
P	: fósforo
R _a	: rugosidade média aritmética
R _q	: desvio médio quadrático
R _t	: rugosidade total
R _z	: rugosidade média
S	: enxofre
S	: estrição
s	: segundo
Se	: selênio
Si	: silício
SiC	: carboneto ou carbeto de silício
t	: tempo de usinagem [min]
TC	: temperatura Curie
t _d	: tempo de atraso da ignição [μs]
t _e	: duração da descarga [μs]
t _{off}	: tempo de intervalo do pulso [μs]
t _{on}	: tempo de duração do pulso [μs]
Ti	: titânio
TiN	: nitreto de titânio
t _o	: intervalo de tempo [μs]
t _p	: tempo do ciclo [μs]
Ti ₆ Al ₄ V	: liga de titânio
U	: tensão do circuito aberto [V]
u _e	: tensão de trabalho média [V]
U _i	: tensão da descarga [V]
V	: vanádio

V	: volt
Zn	: zinco
°	: grau (ângulo)
%	: por cento
ε	: alongamento
δ	: massa específica do eletrodo peça [$\text{g}\cdot\text{mm}^{-3}$]
σ_e	: limite de escoamento
σ_r	: limite de resistência
σ_s	: magnetização de saturação
ρ	: massa específica do eletrodo ferramenta [$\text{g}\cdot\text{mm}^{-3}$]
Δm	: variação da massa [g]
γ'	: nitreto tipo Fe_4N
μ	: micra
μm	: micrometro
μs	: microssegundo

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)
CCC	: Cúbica de Corpo Centrado
CEFET	: Centro Federal de Educação e Tecnologia de Minas Gerais
CFC	: Cúbica de Face Centrada
CI	: Camada Intermediária
CIM	: Computer Integrated Manufacturing (Manufatura Integrada por Computador)
CNC	: Comando Numérico Computadorizado
DEMAT	: Departamento de Engenharia de Materiais
DRX	: Difração de Raios-X
DVR	: Desgaste Volumétrico Relativo [%]
EDM	: <i>Electrical Discharge Machining</i>
FD	: Fluido dielétrico
HC	: Hexagonal Compacta
LTM	: Laboratório de Tribologia e Materiais
MEV	: Microscopia Eletrônica de Varredura
NDE	: Nitretação por Descargas Elétricas
PMEDM	: Powder Mixed Electrical Discharge Machining
PUC – MG	: Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
RS	: Rugosidade Superficial
SAE	: Society Automotive Engineers
SL	: Sobrecorte Lateral
TD	: Taxa de Desgaste do Eletrodo
TMEF	: Tempo Médio Entre Falhas
TRM	: Taxa de remoção de material
TS	: <i>Transistor Standard</i> – define a quantidade de corrente
UFMG	: Universidade Federal de Minas Gerais
UFU	: Universidade Federal de Uberlândia
ZAC	: Zona Afetada pelo Calor
ZR	: Zona Refundida

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	ASPECTOS GERAIS	22
1.2	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	25
1.3	OBJETIVOS	28
1.3.1	Objetivo Geral	28
1.3.2	Objetivos Específicos	28
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	29
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	30
2.1	USINAGEM POR DESCARGAS ELÉTRICAS – EDM.....	30
2.1.1	Princípios básicos do processo de eletroerosão	33
2.1.2	Parâmetros da EDM.....	40
2.1.3	Parâmetros de desempenho do processo EDM.....	41
2.1.4	Componentes da máquina EDM.....	43
2.1.5	Fluido dielétrico	43
2.1.6	Materiais para eletrodos ferramentas	45
2.1.7	Limpeza da fenda de trabalho (<i>gap</i>).....	47
2.2	USINAGEM POR DESCARGAS ELÉTRICAS COM PÓS ABRASIVOS	47
2.2.1	Integridade das superfícies	50
2.3	TRATAMENTOS TÉRMICOS	54
2.3.1	Tratamentos Termoquímicos	55
2.4	GRAFITA.....	64
2.5	Aço AISI 4140.....	65
3	MATERIAIS E MÉTODOS	67
3.1	ELETRODOS	69
3.2	FLUIDO DIELÉTRICO.....	69
3.3	MÁQUINA PARA USINAGEM POR DESCARGAS ELÉTRICAS	71
3.4	ENSAIO DE METALOGRAFIA	74
3.5	ENSAIO DE DUREZA VICKERS	75
3.6	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X.....	76
3.7	RUGOSIDADE SUPERFICIAL.....	76
3.8	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA – MEV	77
3.9	VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DA USINAGEM.....	77

4	RESULTADOS.....	79
4.1	RUGOSIDADE DAS AMOSTRAS NITRETADAS E USINADAS COM ELETRODO DE COBRE.....	79
4.2	DUREZA DAS AMOSTRAS NITRETADAS E USINADAS COM ELETRODO DE COBRE	80
4.3	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X DAS AMOSTRAS USINADAS COM ELETRODO DE COBRE	82
4.4	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DAS AMOSTRAS USINADAS COM COBRE	84
4.5	FORMAÇÕES DAS CAMADAS NITRETADAS DAS AMOSTRAS USINADAS COM COBRE	88
4.6	DESEMPENHO NAS USINAGENS COM ELETRODO DE COBRE (TD, TRM E DVR)	91
4.7	RUGOSIDADE DAS AMOSTRAS NITRETADAS E USINADAS COM ELETRODO GRAFITA	93
4.8	DUREZA DAS AMOSTRAS NITRETADAS E USINADAS COM ELETRODO GRAFITA	95
4.9	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X DAS AMOSTRAS USINADAS COM ELETRODO GRAFITA	97
4.10	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DAS AMOSTRAS USINADAS COM GRAFITA	98
4.11	FORMAÇÕES DAS CAMADAS NITRETADAS DAS AMOSTRAS USINADAS COM GRAFITA	101
4.12	DESEMPENHO NAS USINAGENS COM ELETRODO GRAFITA (TD, TRM E DVR)	104
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	109
5.1	CONCLUSÕES	109
5.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	110
6	REFERÊNCIAS.....	111

1 INTRODUÇÃO

1.1 Aspectos gerais

A usinagem da indústria mecânica consiste nos processos de fabricação que visam à conferência de geometrias pré-determinadas com dimensões precisas e acabamento superficial especificado. Destacam-se como métodos tradicionais ou convencionais de usinagem torneamento, furação, aplainamento, fresamento, mandrilhamento, retificação, brochamento dentre outros que são caracterizados pelo arranque de cavacos através do cisalhamento na superfície de um sólido com uma ferramenta de corte. No entanto, muitas vezes, em função de fatores diversos, faz-se necessário empregar métodos de usinagens não tradicionais, tais como remoção por ultrassom, remoção química, eletroerosão, laser, reações químicas e eletroquímicas, plasmas, fluxo abrasivo, feixe de elétrons etc. que, cada vez mais, têm sido amplamente empregados nas plantas industriais e nos laboratórios de desenvolvimento de pesquisas experimentais (SILVA, 2007).

Todos os métodos de fabricação, tradicionais ou não, apresentam vantagens e limitações em função dos parâmetros operacionais que o engenheiro de processos deve conhecer para especificar na instrução de trabalho para a operação. Além disso, fatores como custos de produção, disponibilidade, produtividade e qualidade da mão de obra influenciarão na correta tomada de decisão pelo profissional de engenharia de desenvolvimento (MCGEOUGH, 1988).

Os centros de usinagem de comando numérico computadorizado (CNC) que fresam, torneiam, furam e mandrilham, simultaneamente, são as máquinas modernas largamente utilizadas com destaque na fabricação de dispositivos metálicos tais como os moldes e as matrizes.

O desenvolvimento de insertos cerâmicos revestidos, empregados como ferramentas de corte, tem proporcionado usinagens com grandes taxas de remoção nos diversos materiais e excelente acabamento superficial. As velocidades de corte atingem valores de 200 a 300m.min⁻¹ na usinagem dos aços e de 1500 a 2000m.min⁻¹ na usinagem de alumínio em função do tipo de operação, permitindo ótima produtividade e eficiência do processo. Para Santos (2007), as menores rugosidades superficiais são obtidas pela escolha correta da combinação dos parâmetros

operacionais, tais como-avanço, velocidade de corte e profundidade de corte. A Figura 1 mostra um centro de usinagem do Laboratório do CEFET-MG.

Figura 1 - Centro de usinagem ROMI, Discovery 560.



Fonte: Cortesia do CEFET-MG - Campus I, 2020.

Por vezes, quando é necessário usinar materiais metálicos extremamente duros, principalmente quando foram endurecidos por tratamentos térmicos, os processos de usinagem convencionais, mesmo com os centros de usinagem CNC, enfrentam enormes dificuldades na produção dos componentes. A vida útil da ferramenta é reduzida drasticamente, o que, comumente, afeta o acabamento superficial, as tolerâncias dimensionais e geométricas e a qualidade do produto. Além disso, a produtividade e a eficiência são diretamente prejudicadas e os custos de produção sobem (GUITRAU, 1997). Em função disso, são adotados processos não convencionais para obter-se êxito na usinagem de materiais metálicos de extrema dureza. Dentre os não tradicionais, o processo de usinagem por eletroerosão ou usinagem por descargas elétricas (*Electrical Discharge Machining – EDM*) que teve origem com os pesquisadores Lazarenkos em meados da década de 1940, logo após o fim da Segunda Guerra Mundial, tornou-se um valioso método de fabricação para a produção de componentes com microporos, sulcos e cavidades profundas até mesmo em materiais de alta dureza (EL-HOFY, 2005) e (MONDAL *et al.*, 2018). Embora muito utilizado para usinagem de materiais de elevada dureza, é um método que se utiliza de peças condutoras de eletricidade para serem usinadas independentemente da dureza (MOLINETTI *et al.*, 2015).

Segundo Silva (2007), esse processo de usinagem não emprega o contato direto da ferramenta com a peça. A ferramenta é um eletrodo que fica submerso junto à peça a ser usinada em uma solução fluídica denominada dielétrico e a fenda de trabalho entre ambas, denominada *gap*, varia normalmente, entre 0,01 a 0,50mm. Caso não houvesse esse *gap*, haveria um curto circuito impossibilitando a execução do processo. A fenda de trabalho varia em função das partículas erodidas e dos abrasivos que flutuam no fluido dielétrico e, durante a usinagem, encontram-se entre as faces dos eletrodos.

Assim, muitas são as vantagens ofertadas pelo processo EDM, mas devido às limitações como sua baixa taxa de remoção de material (TRM), a morosidade na usinagem e, conseqüentemente, a baixa produtividade é que, até no início do século XXI, tornou-se pouco atraente no mercado frente aos processos convencionais de usinagem, tais como fresamento e torneamento. Como o acabamento superficial não era um dos melhores, o processo ficou restringido às etapas de desbaste e semi-acabamentos nas usinagens necessitando de processos posteriores (MONDAL *et al.*, 2018) e (FREITAS FILHO *et al.*, 2016).

Nessa esteira, Jeswani (1981), a fim de estudar uma possível melhora no processo de usinagem por EDM, adicionou pó de grafite ao fluido dielétrico à base de querosene e constatou que a TRM teve um aumento de 60%. Este foi o primeiro estudo relatado com a aplicação de pó abrasivo no processo da usinagem por EDM. O material utilizado como eletrodo peça foi um aço de baixo teor de carbono e para o eletrodo ferramenta foi utilizado cobre eletrolítico. Segundo Singh e Bhardwaj (2011), assim, foi criado o processo EDM misto em pó ou *Powder Mixed Electrical Discharge Machine* (PMEDM) em que os resultados apresentados nas constantes pesquisas demonstram que a TRM, a rugosidade superficial e a estabilidade do processo foram melhoradas com a aplicação de pós abrasivos no fluido dielétrico. Logo, as partículas de pó em suspensão no fluido dielétrico auxiliam na eficiência das descargas elétricas durante o processo de abertura do arco de plasma (KUMAR, *et al.*, 2009).

Em ação tecnológica inovadora, a Universidade Federal de Uberlândia (UFU) desenvolveu um processo no Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) que, ao mesmo tempo em que usina com um canal de plasma gerado por descargas elétricas produzindo cavidades nas superfícies de ligas metálicas duras, executa a implantação de nitrogênio para nitretar a superfície dos produtos, processo esse conhecido por nitretação por descargas elétricas (NDE). Para tal, foi empregado como fluido

dielétrico uma solução composta por água deionizada e ureia e o novo processo apresentou dados vantajosos e viáveis do ponto de vista tecnológico (SILVA, *et al.*, 2015).

As primeiras tentativas de executar nitretação por descargas elétricas (NDE) foram em 2005 quando Yan *et al.* (2005) empregaram solução de água deionizada e ureia como fluido dielétrico para nitretar a superfície de um eletrodo peça de titânio. A ureia diluída em água deionizada forneceu o nitrogênio necessário para o processo de nitretação da superfície. Camargo *et al.* (2009) repetiram o feito e confirmaram a formação de uma camada de nitretos de titânio na superfície. Os pesquisadores perceberam que a camada de nitretos de titânio da superfície conferiu maior resistência ao desgaste por deslizamento.

Como forma de ampliar o conhecimento existente, influenciar e incentivar os atuais e futuros pesquisadores no desenvolvimento de novas técnicas de fabricação e de distintos usos para os aços comercialmente disponíveis, esta pesquisa propõe uma análise da nitretação por descargas elétricas do aço AISI 4140 através do processo PMEDM.

1.2 Justificativa e relevância

Pesquisas constantes sobre as propriedades físico-químicas e mecânicas dos materiais são de extrema relevância para alavancar o desenvolvimento e, conseqüentemente, o crescimento das engenharias. Acredita-se que, através delas, novas condições de contorno, tais como resistência à tração, resistência ao desgaste, resistência à corrosão se estabelecem para a criação dos novos produtos. Em função das constantes pesquisas, surgem dados que facultam ao engenheiro projetista criar novas geometrias para os componentes estruturais ou orgânicos de máquinas através da redução da aplicação da matéria-prima, diminuição dos coeficientes de segurança, aumento da resistência ao desgaste e à corrosão, maior resistência mecânica, dentre outras importantes características que tornam os produtos mais leves, com melhor desempenho e custos de produção mais baixos. Devido à constante evolução da ciência dos materiais e da tecnologia, engenheiros projetistas e cientistas de materiais são desafiados para projetar, desenvolver elementos, materiais, métodos e processos que permitam alcançar melhores performances. Callister (2015) corrobora essa

afirmação ao citar que engenheiros das diversas áreas e cientistas, são especialistas que se depararão em vários momentos com problemas projetivos envolvendo materiais e, por isso, se envolverão, naturalmente, na investigação para desenvolver projetos e materiais mais adequados para cada situação.

O engenheiro projetista no seu cotidiano, no nascedouro de um novo projeto, visa a obter produtos mais leves fabricados com materiais mais resistentes e, conseqüentemente, com custos menores de produção, menores desperdícios e maior segurança. Callister (2015) elucida com muita propriedade, ao citar quão desastrosas, em termos de segurança e economia, podem ser as tomadas de decisões inapropriadas e/ou inadequadas por engenheiros no tangente à determinação de materiais para os desenvolvimentos dos projetos de produtos.

Ao desenvolver um projeto para atender a uma demanda específica e suprir às mais diversas solicitações decorrentes do trabalho no qual determinado componente estará submetido, o projetista sempre terá à sua disposição inúmeros materiais e processos de fabricação convencionais e inovadores para fazer uma escolha sem perder de vista os custos de produção e de manutenção e as exigências do cliente, ou seja, ele deve, então, optar por um material que preencha os requisitos de projeto. Portanto, o engenheiro projetista deve possuir as competências e as habilidades necessárias para determinar qual material será mais bem aplicado nas diversas áreas de atuação, qual é o processo para obter as devidas transformações das propriedades mecânicas e a produtividade durante a fabricação.

Segundo Chaves *et. al.* (2015), o desafio das indústrias é o de produzir com sustentabilidade e respeito ao meio ambiente, diminuir desperdícios, cortar custos e, ao mesmo tempo, ofertar ao cliente final produtos versáteis com inovações tecnológicas, com qualidade e preços justos.

Por ser vasto o campo pela busca por produtos cada vez mais versáteis, torna-se muito importante e necessário focar na execução de estudos exploratórios de novas técnicas que visam à melhoria e ao aperfeiçoamento dos processos de produção, de forma sustentável e com menor agressão possível ao meio ambiente, a fim de conferir aos produtos melhores propriedades mecânicas e agregar ganhos para as sociedades fabris e acadêmicas.

Conhecendo-se as aplicações possíveis do aço AISI 4140 e ciente que o mesmo pode ser nitretado pelos processos convencionais após a execução dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, objetivou-se nitretá-lo pelo processo

de NDE em uma máquina de eletroerosão para análise da formação de nitretos e das possíveis alterações da dureza superficial desse. No caso de lograr êxito com os experimentos deste estudo, pretende-se, com isso, diminuir, consideravelmente, o consumo de energia evitando tratamentos térmicos anteriores e ganho de tempo, uma vez que os processos de nitretação convencionais necessitam de 20 a 90h para serem concluídos. Também, se o processo proposto nesta pesquisa aumentar a dureza superficial do aço AISI 4140 mantendo uma pequena rugosidade superficial, naturalmente, as resistências ao desgaste, à fadiga e à corrosão e a vida útil do componente aumentarão; conseqüentemente, o tempo médio entre as falhas (TMEF) também aumentará favorecendo, assim, a manutenibilidade e a produtividade da indústria ao evitar paradas e desperdícios desnecessários. Logo, isso corrobora a diminuição dos custos e com a maior maximização do retorno do investimento das empresas, além de, indiretamente, favorecer o meio ambiente ao diminuir os impactos ambientais, pois gera menos resíduo e potencializa a eficiência da aplicação das matérias-primas com menor desperdício em um novo processo produtivo.

Se, após a nitretação por descargas elétricas, o aço AISI 4140 apresentar um acabamento superficial adequado para emprego em componentes onde a baixa rugosidade superficial seja uma exigência do projeto, isso pode ser um fator determinante.

Face ao exposto, fica evidente que o campo para o aprendizado do processo de nitretação por descargas elétricas (NDE) de ligas metálicas é vasto e ainda há muito que ser explorado tecnologicamente para ampliar os conhecimentos na área. Portanto, o presente trabalho tem como objetivos estudar alguns aspectos tecnológicos da introdução de distintas granulometrias do abrasivo carbeto de silício (SiC) ao fluido dielétrico composto de água e ureia farmacológica na usinagem por descargas elétricas (EDM) do aço AISI 4140 empregando o cobre eletrolítico e a grafita como eletrodos ferramenta. Tais aspectos compreendem quantificar e mensurar as espessuras das camadas nitretadas, bem como as formações dos nitretos e as durezas obtidas pelo processo; compreendem, ainda, analisar a morfologia da topografia, mensurar a rugosidade superficial e avaliar o principal parâmetro na usinagem que é a taxa de remoção do material (TRM). Também mensurará a taxa de desgaste (TD) nos eletrodos ferramenta e o desgaste volumétrico relativo (DVR).

Assim, justifica-se a proposição do presente tema quanto às peculiaridades do aço AISI 4140 nitretado pelo processo de NDE, pois enriquece os conhecimentos sobre o processo de usinagem por descargas elétricas (EDM), possibilita uma melhor formação acadêmica e desenvolvimento dos futuros engenheiros. Espera-se também que, com os resultados obtidos, ampliem-se os conhecimentos da comunidade científica sobre o tema para construir uma sociedade mais segura, eficiente e desenvolvida.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Submeter amostras do aço AISI 4140 ao processo de usinagem e nitretação por descargas elétricas tendo como fluido dielétrico uma composição de água deionizada com ureia farmacológica para comparar e avaliar, qualitativamente, a influência do pó abrasivo Carbetto de Silício (SiC) nos aspectos da rugosidade superficial, da dureza e da morfologia da superfície.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar a nitretação por descargas elétricas (NDE) no aço AISI 4140;
- Analisar a integridade da superfície e as possíveis alterações na microestrutura das amostras em função do processo NDE através da microscopia ótica, microscopia de varredura eletrônica e microdureza;
- Mensurar as espessuras das camadas nitretadas após usinagem e nitretação por descargas elétricas com os diversos tipos de fluidos dielétricos;
- Mensurar a rugosidade superficial através dos parâmetros Ra, Rt, Rq e Rz para determinar se o processo de NDE poderá ser aplicado em componentes que necessitam de baixa rugosidade superficial para desempenhar as funções determinadas pelo projeto;

- Quantificar e correlacionar a Taxa de remoção do Material (TRM) com a Taxa de Desgaste (TD) e o Desgaste Volumétrico Relativo (DVR);
- Identificar os nitretos presentes através da técnica de difração de raio-x;

1.4 Organização do trabalho

Este trabalho foi organizado em seis partes para compreensão dos textos. A primeira parte é apenas uma breve introdução ao tema da pesquisa demonstrando os aspectos gerais, a justificativa, os objetivos e a relevância para a comunidade científica.

A segunda parte é uma Revisão Bibliográfica que visa fundamentar a pesquisa sobre a usinagem por eletroerosão, processos convencionais de nitretação e propriedades do material AISI 4140 usado na confecção das amostras. Assim, espera-se facilitar o entendimento acerca dos resultados encontrados.

A terceira parte relata os Materiais e Métodos empregados nos procedimentos experimentais. Nesse capítulo, há uma descrição detalhada da metodologia, das máquinas, dos instrumentos, dos dispositivos e os respectivos parâmetros operacionais para a execução dos ensaios nos laboratórios.

Os Resultados e Discussões são descritos na quarta parte deste trabalho. Nessa parte, executou-se as análises, as avaliações e as comparações sobre a influência do pó abrasivo Carbetto de Silício (SiC) nos aspectos da rugosidade superficial, da dureza e da morfologia da superfície das amostras de aço AISI 4140.

A quinta parte é destinada para as Conclusões tiradas deste trabalho. Além das conclusões, este capítulo apresenta sugestões para temas de trabalhos futuros.

A sexta e última parte do trabalho é composta pelas Referências.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico, estão descritos os principais temas estruturais, necessários para fundamentar a elaboração do projeto e eles foram divididos assim: inicialmente, destacou-se a usinagem por descargas elétricas, descrevendo a máquina, o fluido dielétrico, os parâmetros operacionais e os fenômenos envolvidos. Na sequência, há uma breve abordagem sobre tratamentos térmicos com enfoque no tratamento termoquímico de nitretação através dos métodos convencionais e o processo de NDE. Finalizou-se com a definição do aço liga AISI 4140 e a grafita.

2.1 Usinagem por descargas elétricas – EDM

Embora o emprego do processo de usinagem por descargas elétricas seja largamente empregado, a sua história iniciou-se com o casal russo B.R. e N. I. Lazarenko que desenvolveu um circuito resistor-capacitivo (EL-HOFY, 2005). Durante a Segunda Guerra Mundial ocorreram inúmeros problemas de desgaste produzidos nos contatos elétricos de tungstênio nos motores automotivos que deixaram os engenheiros e técnicos da manutenção desorientados. Então, os Lazarenkos foram convocados pelo governo soviético da época para estudarem o fenômeno e solucioná-lo. A solução descoberta foi introduzir os eletrodos em um fluido oleoso para obter um maior controle das centelhas, pois, assim, elas ficariam mais uniformes e previsíveis do que ao ar atmosférico (PANDEY; SINGH, 2010).

Jameson (2001) cita que os pesquisadores russos desenvolveram o sistema de usinagem em que o eletrodo e a peça de trabalho, conectados a resistores e capacitores carregados por uma fonte de corrente contínua, ficavam dentro de uma cuba, imersos em um fluido dielétrico oleoso. Esse sistema ficou popularizado como circuito Lazarenko.

As primeiras máquinas de eletroerosão de que se tem notícia foram projetadas e produzidas nesse período e tiveram papel relevante na usinagem de materiais de extrema dureza como os carbos de tungstênio, mas com desempenho limitado devido à má qualidade dos componentes eletroeletrônicos da época (PANDEY; SINGH, 2010).

Motivados pela complexidade apresentada pelo processo EDM, muitos foram os pesquisadores que, nas últimas décadas, debruçaram-se sobre o tema para estudá-lo pormenorizadamente desenvolvendo modelos matemáticos e servocontroladores, o que facultou a construção de máquinas que atendessem melhor as exigências de qualidade do mercado (PANDEY; SINGH, 2010) e (ABBAS *et al.*, 2007). Na década de 1970, as máquinas foram muito aprimoradas devido ao desenvolvimento de novos tipos de eletrodos ferramenta, de geradores de maior capacidade e de materiais para os componentes eletroeletrônicos que permitiram um processo mais eficiente das descargas elétricas e, conseqüentemente, do canal de plasma gerado. Com o franco desenvolvimento de pesquisas mundiais aplicadas a essas máquinas na década de 1980, obtiveram-se usinagens de detalhes muito peculiares dos componentes de alta dureza. A velocidade ficou em torno de 20 vezes maior do que no início, o que reduziu os custos de produção desse processo da ordem de 30%. Isso também facultou o avanço das pesquisas acadêmicas (EL-HOFY, 2005).

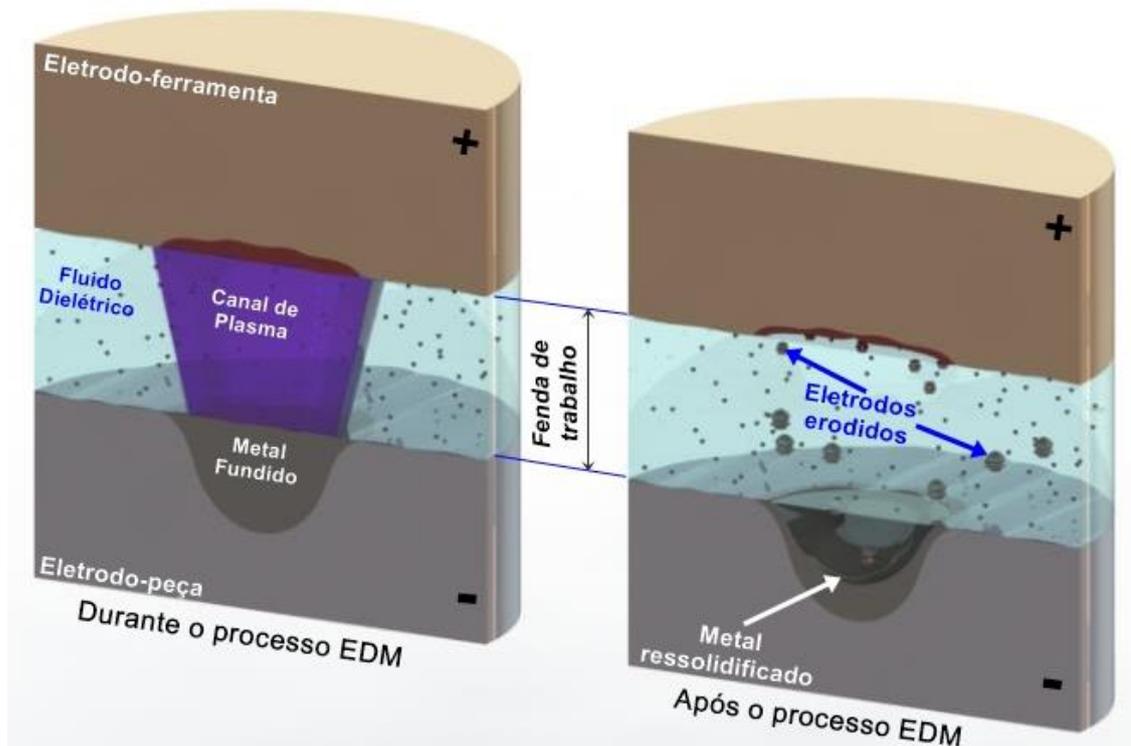
Raslan (2015) afirma que o processo de EDM é termoelétrico e essencialmente térmico. É uma ótima tecnologia que emprega a energia térmica, obtida a partir das infinitas descargas elétricas de alta frequência produzidas no *gap* entre o eletrodo e a peça imersos no fluido dielétrico, para erodir as superfícies a serem usinadas. A centelha é gerada devido à aplicação de uma grande diferença de potencial entre o eletrodo e a peça (MONDAL, 2018). As descargas elétricas de alta frequência produzem um verdadeiro bombardeamento de elétrons e de íons sobre a superfície da peça de trabalho, o que resulta num canal de plasma de intenso calor e, por isso, ocorre uma usinagem em que os materiais eletricamente condutores são arrancados por fusão e/ou sublimação (MACGEOUGH, 1988) e (FULLER, 1989).

Porém, a taxa de remoção de materiais é muito baixa se comparada com os processos de usinagens convencionais. Isso porque cerca de 85% do material erodido por fusão e sublimação volta a se depositar sobre a superfície formando uma camada dura, frágil e quebradiça com aspecto cerâmico denominada camada branca (MCGEOUGH, 1988).

No *gap* formado entre o eletrodo ferramenta e a peça submersos em um fluido dielétrico, ocorrem as descargas elétricas pulsantes que duram apenas alguns microssegundos. O canal de plasma colapsa ao final de cada centelhamento permitindo que o fluido dielétrico volte a circular na fenda de trabalho e, com isso, as partículas que se fundiram desprendem-se da superfície devido ao choque térmico e

são arrastadas. A fenda de trabalho oscila durante a operação em função dos detritos retirados e que flutuam no fluido dielétrico entre os eletrodos (EL-HOFY, 2005). O fenômeno das descargas de corrente elétrica do processo EDM é elucidado esquematicamente na Figura 2.

Figura 2 - Representação esquemática do processo EDM.

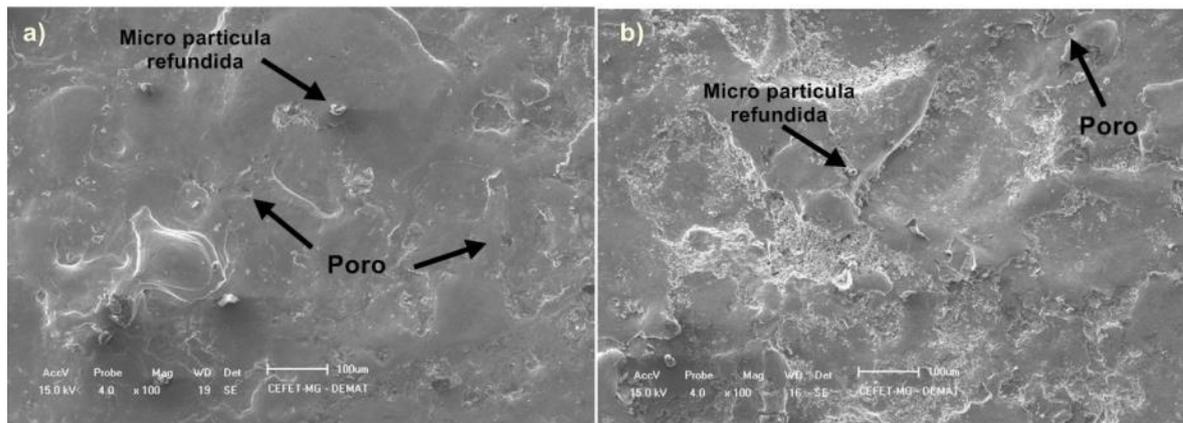


Fonte: O autor, 2020.

Kobayashi (1995) afirma que o processo de EDM foi o primeiro dos não convencionais que se popularizou e Raju *et al.* (2017) aprofundam e afirmam que é o mais popular atualmente na área industrial. Obtêm-se, por esse método, usinagens com razoável acabamento superficial em ligas superduras, o que seria um fator dificultador para se lograr êxito pelos processos de usinagem convencionais (EL-HOFY 2005). A Figura 3 ilustra, por meio da microscopia eletrônica de varredura, a superfície de uma amostra da liga Ti-6Al-4V usinada e nitretada por descargas elétricas (NDE) utilizando eletrodo de grafita (SANTOS *et al.*, 2019). O processo de usinagem e nitretação por descargas elétricas foi executado com e sem a adição de pó abrasivo carbetto de silício (SiC). Santos *et al.* (2019) citam que é possível observar uma morfologia característica do processo de EDM, ocasionada pela alta temperatura

oriunda do processo, onde é possível visualizar poros, partículas refundidas e crateras. Ao comparar o aspecto superficial da NDE, é possível notar, visualmente, uma melhora da superfície na usinagem com a adição do pó abrasivo SiC.

Figura 3 - Microscopia eletrônica de varredura da superfície NDE usinada com eletrodo de grafita, a) usinada com pó de SiC e b) usinada sem pó de SiC.



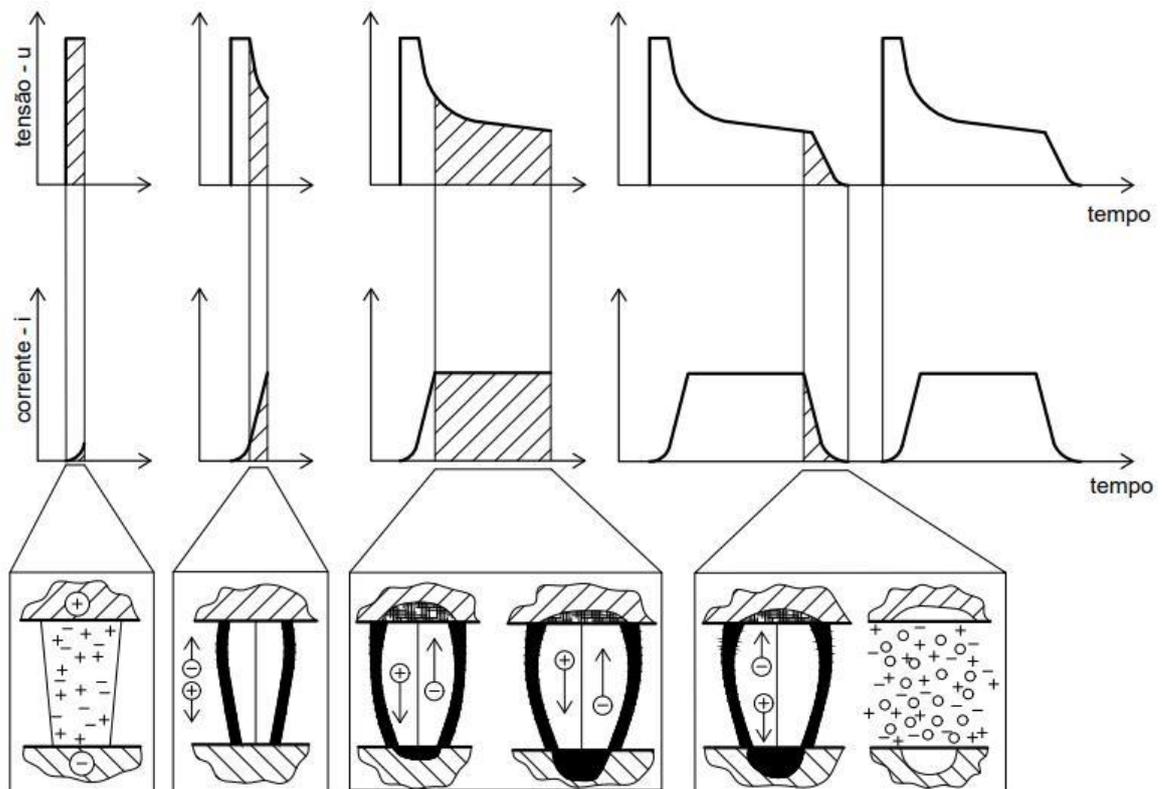
Fonte: Santos *et al.*, 2019

Outros fatores que estimularam o EDM nas indústrias para a usinagem de quaisquer materiais condutores de eletricidade foram os grandes avanços tecnológicos como os das máquinas por comando numérico computadorizado CNC e a possibilidade da manufatura ser integrada por computador – *Computer Integrated Manufacturing CIM* para aperfeiçoar a produção (EL-HOFY, 2005).

2.1.1 Princípios básicos do processo de eletroerosão

Os fenômenos decorrentes das descargas elétricas, que geram um canal de plasma para a usinagem por eletroerosão, são tantos e distintos que não há uma única teoria que aborde e esclareça todos eles (STEVENS, 1998). Klocke e König (2007) *apud* Silva (2012) citam que a mais aceita pelos cientistas, por fornecer maior riqueza de detalhes, é a teoria termoelétrica. A Figura 4 ilustra as quatro etapas que König *et al.* (1996) esquematizaram para elucidar o fenômeno.

Figura 4 - As quatro fases de uma descarga elétrica no processo EDM. 1) Fase de ignição; 2) Formação do canal de plasma; 3) Fusão e sublimação de pequenas partículas de material; 4) Ejeção do material líquido.



Fonte: König *et al.*, 1996 (adaptada, 2020).

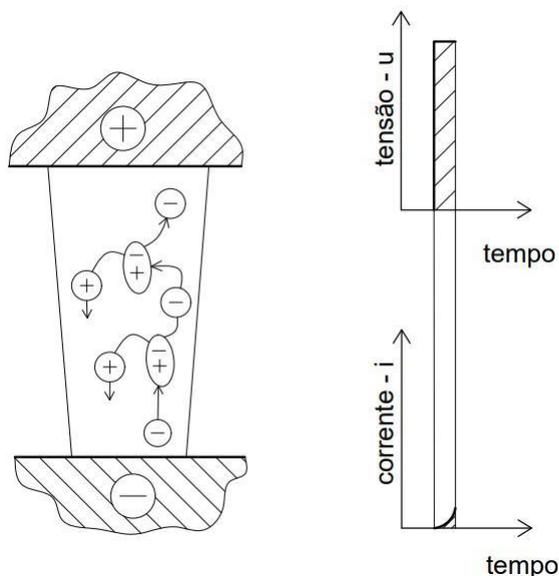
A teoria termoelétrica descreve que o calor gerado é suficientemente alto para que ocorra a fusão e a sublimação do material expulsando-o através do retorno do fluido dielétrico quando o canal de plasma, oriundo das descargas elétricas pulsantes, entra em colapso e, assim, deixa na superfície uma pequena cratera. Essa teoria divide em quatro etapas acerca do que ocorre com as descargas elétricas entre os eletrodos submersos no fluido dielétrico:

- Primeira etapa: fase de ignição;
- Segunda etapa: formação do canal de plasma;
- Terceira etapa: fusão e sublimação de pequenas partículas de material;
- Quarta etapa: ejeção do material líquido.

A) Fase de ignição:

A Figura 5 ilustra as etapas de ignição e de formação de plasma. Essa fase é caracterizada pela aplicação de um aumento da diferença de potencial de 60 até 300V nos eletrodos imersos sem que haja fluxo de descarga elétrica no *gap* que varia, inicialmente, de 0,050 a 1,00mm. A resistência do fluido dielétrico inibe o centelhamento. Então, o eletrodo ferramenta aproxima-se do eletrodo peça através de um sistema de servomecanismo e um campo elétrico é criado em função da variação da tensão elétrica gerada pelas rugosidades superficiais dos eletrodos e partículas existentes na fenda de trabalho.

Figura 5 - Representação da etapa de ignição.



Fonte: König *et al.*, 1996 (Adaptada, 2020).

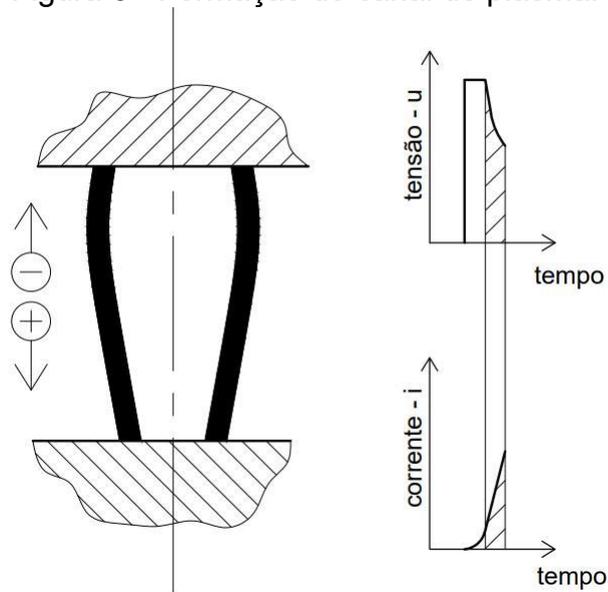
O adequado funcionamento do servomecanismo para o controle da fenda de trabalho é altamente relevante para a usinagem por EDM. Essa variação da tensão elétrica ou simplesmente gradiente de tensão será maior, normalmente, nos picos entre as rugosidades de ambos os eletrodos favorecendo a emissão dos elétrons primários pelo cátodo. Os primeiros elétrons liberados são atraídos e acelerados em direção ao anodo e colisões destes com as moléculas ou átomos neutros do fluido dielétrico facultam uma reação em cadeia de alta energia ao liberar mais íons positivos. Esse fenômeno é devidamente explicado pela teoria da ionização por impacto (STEVENS, 1998).

B) Fase de formação do canal de plasma:

Os íons positivos são atraídos a colidirem com o cátodo e, nessa colisão, ocorre o fenômeno da emissão secundária que consiste na liberação de novos elétrons ou elétrons secundários. Os novos elétrons são atraídos para o anodo, colidem-se com os átomos neutros ou moléculas do fluido liberando novos íons positivos que são atraídos a se colidirem com o cátodo e, na colisão, liberam mais elétrons. A multiplicação em altíssima velocidade ou reação em cadeia desse fenômeno aquece fortemente o dielétrico diminuindo a resistência elétrica. Há, então, um acréscimo do fluxo das descargas elétricas e um decréscimo da resistência do fluido. Isso intensifica o calor na região que culmina com a formação de uma bolha de vapor do dielétrico e dá início à formação do canal de plasma. Nesse momento, o valor da tensão em aberto decresce e o valor da corrente elétrica cresce em função da criação dos “*streamers*” que, na realidade, são túneis que transportam a energia elétrica tanto para o anodo quanto para o cátodo e a corrente elétrica cresce até atingir o valor especificado pelo operador no painel da máquina. O colapso da tensão em vazio é outra nomenclatura para a formação do canal de plasma. O intervalo de tempo compreendido entre o estabelecimento da tensão em aberto e o colapso dessa para a tensão de ruptura do dielétrico em função do fluxo de descargas é denominado tempo de retardo ou tempo de atraso da ignição. Esse tempo é influenciado pelos materiais dos eletrodos, pelo fluido dielétrico e é tanto maior quanto maior for o *gap*. É empregado no controle do deslocamento do eletrodo ferramenta em direção à peça. O tempo de retardo ou de atraso da ignição é aplicado para análise da abertura do *gap*. A regulação estabelecida pelo operador nos controles do painel da máquina de EDM determinará o tempo de duração do canal de plasma, período no qual o bombardeio de elétrons e íons, tanto no anodo quanto no cátodo, é incessante. A fusão de materiais do cátodo ocorrerá alguns microssegundos depois que ocorrer a fusão de materiais do anodo. Esse fenômeno é explicado porque, no início das descargas elétricas, os íons positivos, por possuírem maior massa do que os elétrons, possuem maior inércia e, conseqüentemente, necessitam de um tempo maior para atingir a velocidade ideal para a colisão com o cátodo. A fenda de trabalho depende do fluxo da energia de descarga e a formação de curtos circuitos é evitada pelo equilíbrio da fenda de trabalho controlado pelo servomecanismo da máquina de eletroerosão (STEVENS, 1998) e (KUMAR, 2009). A Figura 6 representa a formação do canal de plasma.

A formação do canal de plasma descrita é para a situação até o momento em que não há a contaminação do fluido dielétrico. O desprendimento de partículas de material dos eletrodos durante a usinagem e a própria decomposição do fluido dielétrico o contaminam. Nos processos em que há a adição de pós abrasivos ao fluido dielétrico, denominados por PMEDM, já ocorre a contaminação. No entanto, as contaminações reduzem a rigidez elétrica e favorecem a ocorrência das descargas elétricas (STEVENS, 1998).

Figura 6 - Formação do canal de plasma.



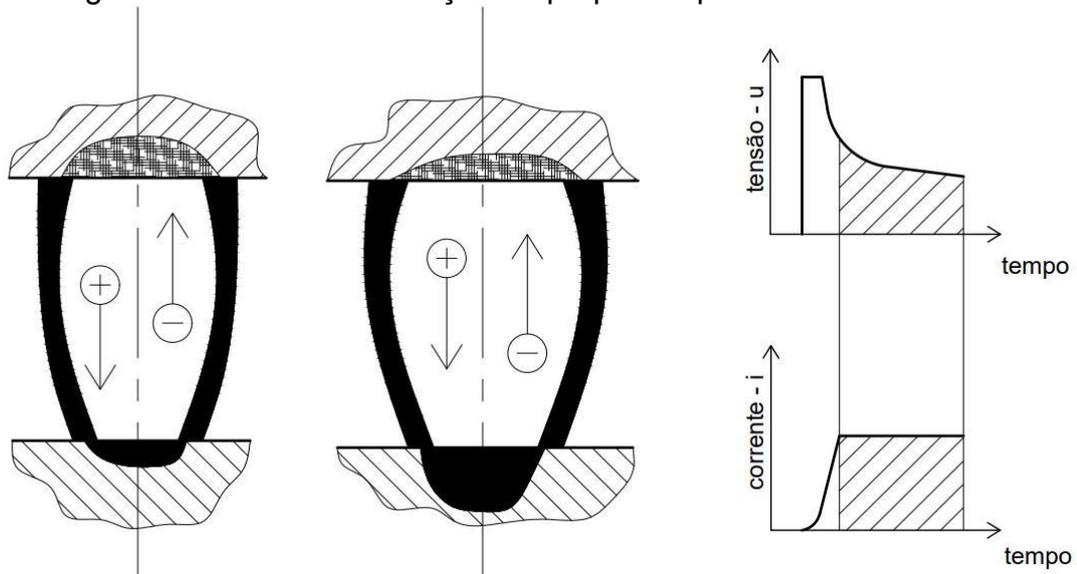
Fonte: König *et al.*, 1996 (Adaptada, 2020).

C) Fusão e sublimação de pequenas partículas de material

De acordo com Stevens (1998) e McGeough (1988), a extrema energia do canal de plasma, induzida pela transformação em calor da energia cinética dos elétrons e íons que se deslocam em altíssimas velocidades e se colidem com o anodo e com o cátodo e, por condução térmica, gera altas temperaturas suficientes para fundir e liquefazer, continuamente, parte dos materiais da peça e do eletrodo, de acordo com o tempo de duração da descarga elétrica. Quanto maior a quantidade de elétrons e de íons gerados em função da intensidade das descargas elétricas e do tempo de duração delas, maiores quantidades de colisões haverá e, conseqüentemente, terá maior geração de calor, com temperaturas que excedem a faixa dos 12.000°C possibilitando maiores quantidades de partículas erodidas. Eubank (1993) cita que a existência de transferência de energia para as regiões vizinhas,

como para as cavidades fundidas, gera o aumento do diâmetro do canal de plasma e influencia, drasticamente, o montante de metal fundido no anodo e no cátodo. A energia do plasma, durante o tempo de duração das descargas elétricas, tem o poder de se irradiar fortemente. Com isso, gera a ionização do meio através da vaporização e da dissociação de um ínfimo volume do fluido dielétrico que circunda o canal. Esse fenômeno produz um acréscimo de gases, de massa e do diâmetro do canal de plasma. Portanto, o canal de plasma aumenta constantemente o seu diâmetro enquanto durar o tempo das descargas elétricas e permite a contínua fusão dos materiais a serem erodidos. A Figura 7 representa fusão e a sublimação de pequenas partículas de material.

Figura 7 - Fusão e sublimação de pequenas partículas de material.



Fonte: König *et al.*, 1996 (Adapatada, 2020).

Segundo Dibitonto *et al.* (1989), a quantidade fundida e evaporada de material é em função das altas pressões dentro do canal de plasma geradas pela diminuição brusca da densidade da corrente, à medida que o eletrodo ferramenta penetra e a profundidade da cavidade na peça aumenta. Esse fenômeno culmina com a redução da temperatura e da pressão no interior das cavidades. À medida que a cavidade no cátodo aumenta, no anodo, inicia-se o processo de solidificação da sua cavidade em decorrência da diminuição do fluxo de energia e da expansão deste cátodo.

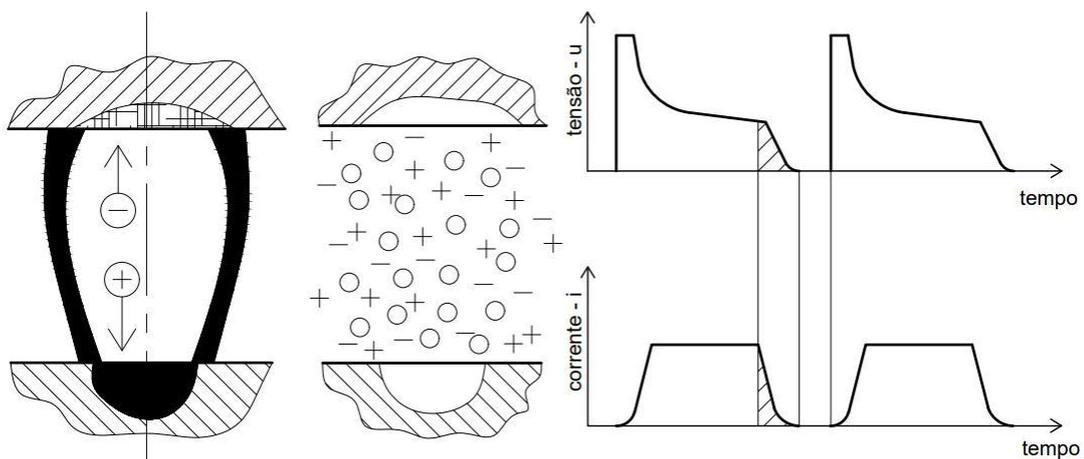
A quantidade fundida e evaporada do material também está intrinsecamente ligada à intensidade das descargas elétricas e às propriedades físicas dos eletrodos

ferramenta e peça. E, como já descrito, o ciclo de descarga é influenciado pela mobilidade dos íons positivos e elétrons que também influenciam, de forma relevante, na fusão dos materiais do cátodo e do anodo.

D) Ejeção do material erodido

Após atingir o tempo ajustado pelo operador no painel de controle da máquina de eletroerosão para a duração das descargas elétricas, ocorre a dissipação do canal de plasma, a temperatura diminui, a pressão que era cerca de 200atm dentro do canal volta aos patamares próximos da pressão atmosférica e isso culmina com a evaporação das micropartículas fundidas do metal. A queda da pressão promove o fluxo do fluido dielétrico no *gap* e esse, conseqüentemente, por meio de forças de natureza hidrodinâmicas e termodinâmicas, promove a ejeção das microscópicas partículas e gotículas do material fundido das crateras que se formam na peça e no eletrodo, caracterizando o processo de EDM. (MCGEOUGH, 1988) e (STEVENS, 1998). A Figura 8 ilustra, esquematicamente, a ejeção do material erodido e fim do canal de plasma.

Figura 8 - Ejeção do material erodido.



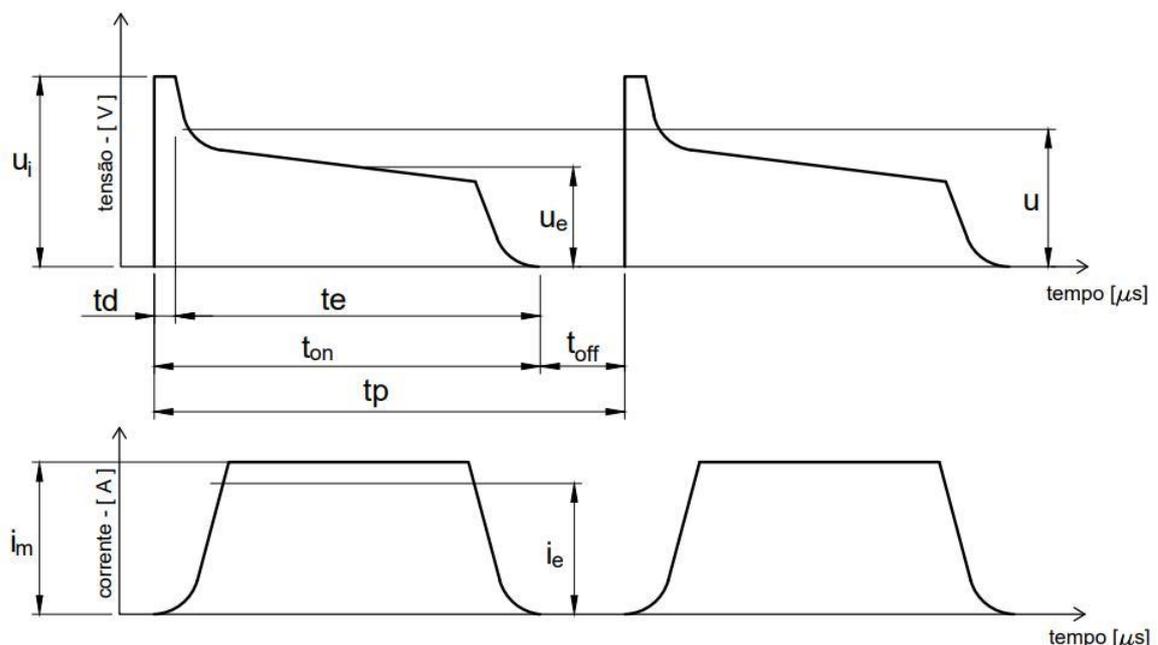
Fonte: König *et al.*, 1996 (Adaptada, 2020).

Erden e Kaftanoglu (1981) citaram que, dos materiais superaquecidos pelo plasma, cerca de 85 a 90% ressolidificam-se na superfície da peça gerando a camada branca ou camada refundida. Assim, somente 10 a 15% dos materiais são ejetados da poça de fusão por causa da queda de pressão ao término das descargas elétricas.

2.1.2 Parâmetros da EDM

Selecionar adequadamente os parâmetros operacionais da máquina EDM é de fundamental importância para a obtenção de êxito no processo. A seleção correta ou não desses parâmetros implicará diretamente no acabamento superficial do produto, na eficiência e produtividade do processo. Vários são os parâmetros operacionais da usinagem EDM que se relacionam diretamente nas intensidades das descargas elétricas e devem ser controlados. Para aplicações específicas, é necessário controlar devidamente a polaridade, a corrente elétrica, a tensão em vazio ou diferença de potencial, o regime de trabalho, o tempo de duração dos pulsos, o tempo entre os pulsos, a fenda de trabalho e a frequência das descargas elétricas (BENEDICT, 1987) e (MCGEOUGH, 1988). A Figura 9 elucida os principais parâmetros elétricos bem como o desenvolvimento da diferença de potencial e da corrente elétrica da EDM.

Figura 9 - Evolução da Tensão e da corrente elétrica durante a descarga, tempos de duração desses e outros parâmetros elétricos da EDM.



Fonte: Stevens, 1998.

Onde:

- U = Tensão do circuito aberto (V);
- U_i = Tensão da descarga (V);
- u_e = Tensão de trabalho média (V);

- i_e = Corrente elétrica da descarga média (A);
- i_m = Corrente elétrica máxima (A);
- t_d = Tempo de atraso ou de retardo da ignição (μs);
- t_e = Tempo de duração da descarga (μs);
- t_{on} = Tempo de duração do pulso (μs);
- t_{off} = Tempo de intervalo do pulso (μs);
- t_p = Tempo do ciclo completo (μs);

Durante o ciclo completo da usinagem EDM vários são os tempos que são mensurados. No entanto, dois deles merecem maior atenção por parte dos pesquisadores, engenheiros, técnicos e operadores, pois são vitais para se lograr êxito no processo: o tempo de duração do pulso (t_{on}) e o tempo de pausa ou intervalo ou tempo entre os pulsos (t_{off}). O canal de plasma é formado durante o tempo de duração de pulso (t_{on}) e compreende o período do tempo de atraso da ignição (t_d) mais o tempo de duração da descarga (t_e). Findado esse período, o canal de plasma entra em colapso e inicia-se o tempo entre pulsos que é o período no qual uma parte das partículas, que foram fundidas e arrancadas pela descarga elétrica, tanto na peça quanto no eletrodo ferramenta, é ejetada para fora do *gap* pelo fluido dielétrico e um novo ciclo se reinicia. Todos os tempos são mensurados em microssegundos (μs), as correntes elétricas em amperes e as tensões ou diferenças de potencial em volts (BENEDICT, 1987).

2.1.3 Parâmetros de desempenho do processo EDM

Segundo Cruz (1993), os principais parâmetros de desempenho do processo de EDM normalmente mensurados para a avaliação do processo são a Taxa de Remoção do Material (TRM), a Relação de Desgaste entre os eletrodos (DVR), o Sobrecorte Lateral (SL) e a Rugosidade Superficial (RS).

A TRM representa o volume de material que é removido a cada minuto no processo EDM com os parâmetros operacionais estabelecidos e sua unidade é $\text{mm}^3.\text{min}^{-1}$. É possível obter taxas maiores, quando não houver necessidade de pequenas rugosidades superficiais. Nessas situações, o operador pode parametrizar a máquina, a fim de intensificar a remoção do material sem se preocupar muito com a integridade da superfície. Para conseguir determinar a TRM, é necessário saber a

variação da massa da peça ao término do processo. A determinação da variação de massa é obtida pela equação (1):

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

Onde,

Δm = Variação de massa do eletrodo-peça (g)

m_i = massa inicial (g) → antes da usinagem

m_f = massa final (g) → após usinagem

De posse da variação de massa, do tempo total de usinagem e da massa específica da peça, a TRM de cada ciclo é obtida pela equação (2):

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

Onde,

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

Δm = Variação de massa do eletrodo peça (g)

ρ = Massa específica do material do eletrodo peça ($\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$)

t = Tempo de usinagem (min)

Para o eletrodo ferramenta, a taxa de remoção é denominada taxa de desgaste, pois o ideal seria um processo em que não houvesse a remoção do material, uma vez que não há interesse em desgastá-lo. Como isso não é possível, devido ao bombardeamento de elétrons a que ele está submetido no canal de plasma, calcula-se a taxa de desgaste do eletrodo (TD). A TD do eletrodo ferramenta é obtida pela equação (3):

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

Onde,

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

Δm = Variação de massa do eletrodo ferramenta (g)

ρ = Massa específica do material do eletrodo ferramenta ($\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$)

t = Tempo de usinagem (min)

O último parâmetro é obtido pela razão entre a TD e a TRM e é dado de forma percentual. Esse parâmetro é denominado desgaste volumétrico relativo ou, simplesmente, DVR e relaciona o volume perdido do eletrodo ferramenta pelo volume retirado do eletrodo peça. Quanto menor for o DVR, significa que está havendo maior remoção de material da peça do que um desgaste do eletrodo ferramenta e é melhor para a usinagem. O DVR é obtido pela equação (4):

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

Onde,

DVR = Desgaste volumétrico relativo (%)

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

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

2.1.4 Componentes da máquina EDM

É possível simplificar os componentes da máquina dividindo-a em três sistemas básicos: o sistema elétrico, o sistema dielétrico e o sistema mecânico.

O gerador de pulsos, os cabos de alimentação da energia elétrica, o painel de controle com seus componentes eletrônicos que controlam e comandam os deslocamentos de avanço e retração do eletrodo ferramenta através do servomecanismo compõem o sistema elétrico.

Toda a estrutura da máquina, a mesa de trabalho e o cabeçote que contém o servo mecanismo de deslocamento da ferramenta são os subconjuntos do sistema mecânico. A mesa de trabalho possui fusos que possibilitam os deslocamentos nos eixos X e Y da máquina situados no plano horizontal. O avanço e retração do eletrodo ferramenta no eixo Z, situado no plano vertical, só é possível devido aos componentes do servo mecanismo.

A motobomba, responsável pela sucção e recalque do fluido dielétrico para a usinagem por EDM, bem como todos os componentes hidráulicos tais como filtros, válvulas de alívio, registros, manômetros, dutos, reservatório do fluido dielétrico etc. fazem parte do sistema dielétrico.

2.1.5 Fluido dielétrico

Guitral (1997) cita que os parâmetros operacionais do processo EDM também estão intimamente relacionados às características do fluido dielétrico (FD).

Óleos minerais, querosenes, óleos vegetais, água deionizada, soluções à base de água, contendo ou não pós abrasivos, são fluidos dielétricos aplicados no processo de EDM (FULLER, 1989) e (ARANTES 2001) e (LIMA E RASLAN, 2009).

Embora o acabamento das peças usinadas por EDM, tendo óleos e querosenes como fluido dielétricos, proporcionem menores amplitudes das rugosidades superficiais, pesquisas atuais demonstram que a utilização da água deionizada, como fluido dielétrico, vem ganhando cada vez mais espaço na usinagem por EDM por eliminar a possibilidade de produção de benzeno (C_6H_6) e benzopireno ($C_{20}H_{12}$), que são componentes carcinogênicos constituindo, assim, um ambiente mais seguro e saudável durante a execução do processo. Além disso, o processo empregando água deionizada gera menos ruídos, quando comparados às usinagens por EDM que utilizam querosenes e óleos como fluidos dielétricos, e isso diminui, consideravelmente, a necessidade de polimentos subsequentes, uma vez que a camada refundida é bem reduzida. Outras vantagens a serem elencadas na utilização da água deionizada de baixa resistividade como fluidos dielétricos são a menor viscosidade, a maior vazão e a menor geração de carbono na fenda em contraste aos fluidos dielétricos à base de hidrocarbonetos. (PEÇAS e HENRIQUES, 2003).

Um fluido dielétrico deve possuir algumas características físicas peculiares para que o processo de EDM atinja os objetivos esperados. MCGEOUGH (1988), afirma que um fluido dielétrico deve possuir alta rigidez elétrica, baixa viscosidade, boa capacidade para refrigerar e obter deionização rápida. Tendo alta rigidez, ele não conduzirá a corrente elétrica antes que a diferença de potencial atinja o valor especificado e faltarão uma maior precisão da usinagem por permitir maior aproximação do eletrodo ferramenta da superfície; deionizando rapidamente após a descarga elétrica, facilitará a ionização do meio para uma rápida formação do canal de plasma e evitará a formação de curtos circuitos. A capacidade de rápida refrigeração aliada a uma baixa viscosidade do fluido permitirá uma ejeção mais eficiente dos materiais erodidos da cratera após o colapso do canal de plasma, principalmente, em cavidades profundas. Além das características físicas já citadas, os fluidos dielétricos devem possuir baixa condutividade térmica e um alto calor específico. Se assim for, haverá menor aderência das partículas na ferramenta, menor camada refundida na superfície do produto e menores alterações na estrutura do material usinado, pois um grande valor para o calor específico implicará numa capacidade de absorver maior aporte de energia sem elevação da temperatura. Essas são as características físicas básicas para avaliação de um fluido dielétrico.

Bleys *et al.* (2006) afirmaram que partículas do eletrodo ferramenta são transferidas para a superfície da peça ou na zona refundida através do fluido dielétrico e que este, de certa forma, interfere na composição química do material.

Outra importante característica dos fluidos dielétricos, apontada por Fredriksson e Hogmark (1995), é que devem ser líquidos para conseguir concentrar, em um canal estreito, a centelha elétrica que culminará com um acréscimo da densidade de energia e, conseqüentemente, maior TRM. Empregando um fluido dielétrico gasoso, o canal de plasma se dispersaria e haveria, conseqüentemente, um decréscimo da pressão. Portanto, um fluido dielétrico gasoso não cumpriria a função de remover o material usinado por descargas elétricas, pois a baixa pressão do canal de plasma apenas fundiria o material e esse se refundiria e se ressolidificaria na superfície da peça.

2.1.6 Materiais para eletrodos ferramenta

Os eletrodos ferramenta mais empregados na usinagem por EDM são o cobre eletrolítico e a grafita. E a grafita é ainda mais empregada na confecção dos eletrodos ferramenta por se desgastar menos, possibilitar uma boa usinagem e pode ser facilmente adquirida no mercado para o processo de EDM em geometrias e tamanhos diversos (FULLER, 1989) e (BENEDICT, 1987).

No entanto, o emprego da grafita como eletrodo ferramenta no processo de usinagem por EDM poderá gerar um aumento das partículas de impurezas e, eventualmente, causar irregularidades na superfície usinada (LIMA e CORRÊA, 2006).

O cobre eletrolítico também é tão utilizado na confecção dos eletrodos ferramenta do processo EDM quanto a grafita, pois possui boa condutibilidade elétrica, o custo não é oneroso e apresenta, no processo, pequeno DVR (FULLER, 1989).

As principais características que o material para eletrodo ferramenta deve possuir são a boa condutividade elétrica e o alto ponto de fusão. Porém, devem possuir também boa usinabilidade, a fim de que possam ser fabricados pelos processos convencionais de usinagem e baixo custo de aquisição e de produção (MCGEOUGH, 1988).

O custo de produção dos eletrodos ferramenta, normalmente, é a parte mais dispendiosa do processo de usinagem por eletroerosão (FULLER, 1989).

Porém, todo material que conduza eletricidade pode ser empregado para esse fim. Com isso em mente, Mendonça *et al.* (2006) conduziram um estudo para avaliar a viabilidade de se empregar eletrodos ferramenta de latão e bronze em substituição aos eletrodos convencionais e chegaram à conclusão de que existe uma razoável viabilidade técnica e econômica face à boa usinabilidade e porque proporcionaram um bom acabamento superficial da superfície erodida. No entanto, o desempenho foi inferior aos obtidos com o eletrodo de cobre eletrolítico no que tange à TRM e às baixas rugosidades superficiais.

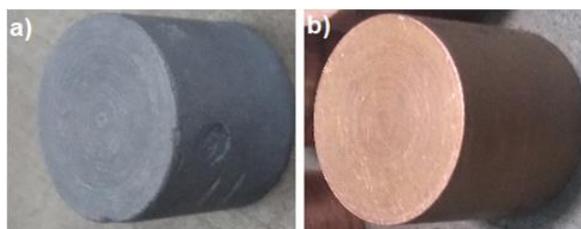
Benedict (1987) relata que os parâmetros intrinsecamente ligados aos eletrodos ferramenta e aos eletrodos peça são o ponto de fusão, a microestrutura, as formas geométricas e a rugosidade superficial.

Tradicionalmente, as faces dos eletrodos ferramenta são planas. No entanto, alguns estudos demonstraram que a geometria da face dos eletrodos interfere no acabamento superficial da área usinada por EDM sem, contudo, produzir efeitos significativos na TRM e na TD (JACOMINE *et al.*, 2009).

Silva *et al.* (2016) concluíram que o desempenho do eletrodo de Grafita na usinagem por EDM de uma liga de titânio, empregando um fluido dielétrico composto de água deionizada e ureia farmacológica, foi superior ao do eletrodo de cobre eletrolítico obtendo uma camada nitretada em torno de 75µm e uma dureza cerca de 90% maior do que a do substrato.

Murta *et al.* (2017) demonstraram que o DVR é maior, quando se emprega o eletrodo de grafita na usinagem EDM do que o obtido com o emprego do eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico. A Figura 10 ilustra tipos de eletrodos ferramenta: a) grafita e b) cobre.

Figura 10 - Tipos de eletrodos.



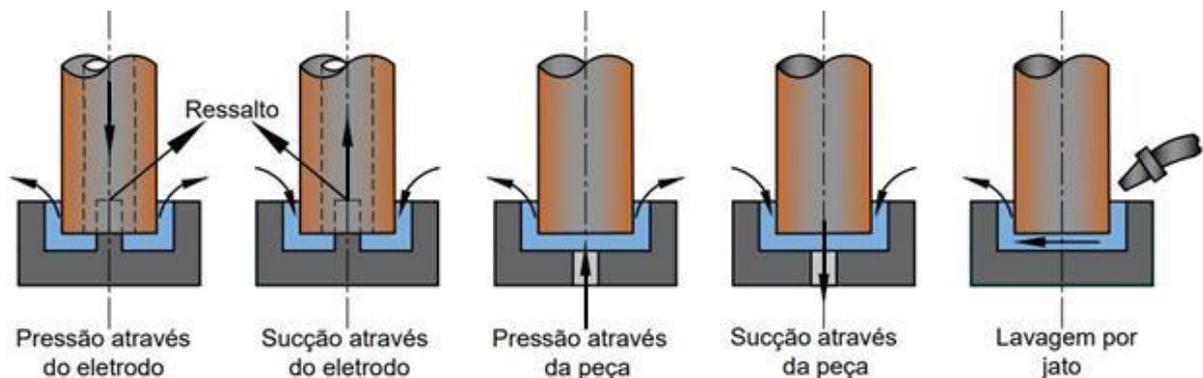
Fonte: O autor, 2020.

2.1.7 Limpeza da fenda de trabalho (*gap*)

Durante a usinagem por descargas elétricas deve-se evitar o acúmulo de partículas em algumas regiões da fenda de trabalho. Os detritos acumulados causam decréscimo da resistência elétrica que, por sua vez, poderão gerar instabilidade do canal de plasma devido às anomalias produzidas nas descargas elétricas. Logo, executar a correta limpeza da fenda de trabalho é de vital importância para manter a excelência no processo EDM. Para evitar esse problema, Wong *et al.* (1995) afirmam que deve-se analisar e empregar, para cada situação, o melhor método para circulação do líquido dielétrico e limpeza correta do *gap*. Assim, os eletrodos ferramenta terão maior vida útil, o acabamento superficial apresentará rugosidades menores, obter-se-á maior TRM e menor DVR.

Os principais métodos de limpeza da fenda de trabalho são: pressão através do eletrodo; sucção através do eletrodo; pressão através da peça; sucção através da peça; lavagem por jato. Esses métodos são ilustrados na Figura 11 para melhor compreensão.

Figura 11 - Métodos de limpeza da fenda de trabalho do processo EDM.



Fonte: Benedict, 1987.

2.2 Usinagem por descargas elétricas com pós abrasivos

A inovação tecnológica de misturar pós abrasivos aos fluidos dielétricos, a fim de obter uma maior TRM e, conseqüentemente, um melhor desempenho na usinagem por EDM, iniciou-se da década de 1980 (RAJU *et al.*, 2017).

Jeswani (1981) foi o pioneiro a aplicar um abrasivo ao fluido dielétrico e estudar os efeitos na usinagem. O pó adicionado ao fluido dielétrico composto por querosene

foi a grafita. Ao fim do processo, ele constatou um aumento de 60% na TRM. Nesse estudo, foi empregado o cobre eletrolítico como eletrodo ferramenta e para usinar uma liga ferrosa de baixo teor de carbono. Para os pesquisadores Singh e Bhardwaj (2011), Jeswani deu origem ao processo EDM misto em pó o qual passou a ser denominado por PMEDM – *Powder Mixed Electrical Discharge Machine*.

Pesquisadores dispenderam tempo e energia utilizando a adição de pós abrasivos ao fluido dielétrico para desenvolver parâmetros para verificar o percentual da melhora na eficiência do processo de usinagem por PMEDM. Além dos pós de grafita, alumínio e silício outros tais como pós de carbeto silício (SiC), de tungstênio, de manganês, de cromo e de nano tubo de carbono também já foram mixados ao fluido dielétrico.

Fernandes *et al.* (1999) estudaram a aplicação do abrasivo carbeto de silício (SiC) no fluido dielétrico, ainda o querosene e demonstraram que a TRM teve um acréscimo de aproximadamente 120%, quando comparado ao mesmo processo com fluido dielétrico sem abrasivo na usinagem do aço ABNT M2. No entanto, a rugosidade superficial com aplicação do SiC ao querosene não sofreu alterações substanciais mantendo-se na casa dos 7 a 8µm mesmos valores médios obtidos após a usinagem por EDM tendo o querosene puro como fluido dielétrico.

Peças e Henriques (2003) empregaram o pó de silício, tendo o óleo como fluido dielétrico na usinagem por PMEDM, com uma concentração de 2g.L⁻¹; os resultados obtidos demonstraram uma positiva influência desse na diminuição da rugosidade superficial ao fim do processo. Também se constatou que o acabamento superficial está intimamente ligado à área da seção transversal de contato do eletrodo ferramenta, ou seja, para áreas menores as rugosidades superficiais tendem a ter uma amplitude menor e vice-versa. Afirmaram também que, para uma boa eficiência da TRM do material, é necessário selecionar adequadamente o pó abrasivo a ser mixado no fluido dielétrico, pois, embora o PMEDM facilite a obtenção de superfícies bem acabadas, a qualidade da superfície usinada está intrinsecamente ligada à escolha do pó (PEÇAS e HENRIQUES, 2003).

Rodrigues *et al.* (2008) ao empregarem o processo de usinagem PMEDM com inclusão do SiC ao fluido dielétrico, constataram que houve uma redução das micro trincas na superfície da camada refundida.

Chow e Lin (2008) ao usinarem uma liga de Ti pelo processo PMEDM, observaram que a inserção do pó abrasivo SiC na água deionizada aumentou a

condutividade elétrica do fluido dielétrico e, conseqüentemente, aumentou a abertura (*gap*) entre os eletrodos, facilitou a expulsão dos detritos do *gap* e promoveu um aumento da TRM, além de produzir um processo mais favorável para o meio ambiente por não gerar gases tóxicos.

Kumar, *et al.* (2009) afirmaram que as partículas do pó, suspensas no fluido dielétrico, melhoram a usinagem porque a eficiência das descargas elétricas aumenta e estabiliza a abertura do canal de plasma. À medida que se obtém uma estabilidade maior, os resultados da TRM e da rugosidade superficial são mais positivos.

Outra constatação importante apontada por Silva *et al.* (2011) foi que, com a usinagem pelo processo PMEDM do aço ABNT M2, a energia de descarga ficou mais bem dispersada, o que produziu uma superfície com menor rugosidade superficial.

Silva *et al.* (2011) afirmam que, embora o tamanho da partícula abrasiva tenha alto poder de influência sobre a TRM e a TD da ferramenta, no que tange ao valor do DVR, isso não apresenta alterações expressivas.

Assarzadeh e Ghoreishi (2013) analisaram alguns parâmetros, tais como a redução da TD, o aumento da TRM e o acabamento superficial e comprovaram que houve um melhor desempenho do processo de PMEDM.

Ekmeckci *et al.* (2015) afirmaram que uma maior concentração do pó SiC na água deionizada, para compor o fluido dielétrico, aumentaria a eficiência da transferibilidade dos materiais do fluido dielétrico para a superfície do eletrodo peça.

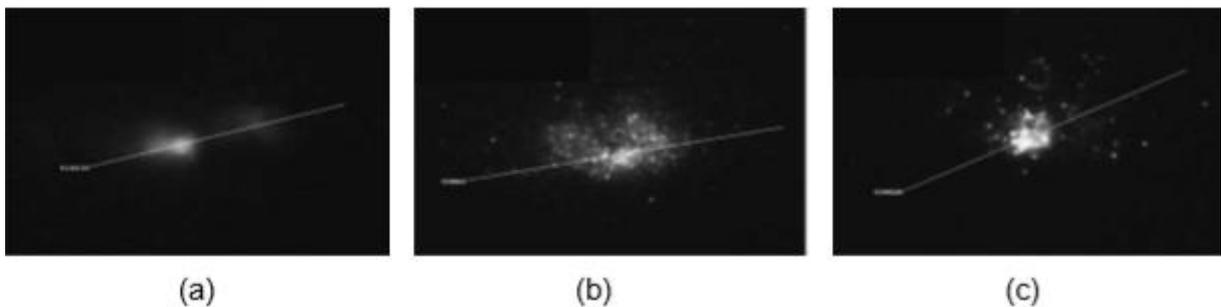
Molinetti *et al.* (2015) empregaram o processo PMEDM para usinar o aço ferramenta AISI H13, tendo um fluido dielétrico à base de hidrocarbonetos mixado com pó de Si e constataram que a rugosidade média superficial (*Ra*) ficou 5 vezes menor em relação à rugosidade superficial, empregando apenas o processo de EDM convencional.

Freitas Filho *et al.* (2016) afirmam que a TRM do processo de usinagem por EDM é baixa e, por isso, o referido processo é lento em relação aos processos de usinagem convencionais tais como o torneamento e o fresamento.

Em estudos recentes, para avaliar o acabamento superficial e a taxa de remoção de material no aço EM-19 os pós de nano tubos de carbono apresentaram o desempenho mais favorável para o acabamento superficial e TRM das amostras enquanto que, com o pó de alumínio, melhorou-se a vida útil do eletrodo ferramenta de latão (MONDAL *et al.*, 2018).

Isso corrobora o que foi citado por Lima e Corrêa (2006) ao concluírem que as características da camada refundida, principalmente a espessura, são influenciadas pelo regime de usinagem, ou seja, pelos parâmetros operacionais do fluido dielétrico. Klocke *et al.* (2004) estudaram os efeitos produzidos nas descargas elétricas pela inserção de pós abrasivos de alumínio e de silício no fluido dielétrico. Perceberam que, quando mixaram os pós abrasivos de silício, houve um aumento da intensidade da descarga elétrica liberando um aporte maior de energia e produziu alterações no canal de plasma. Com a adição de pós abrasivos de alumínio distribuiu-se a energia da descarga elétrica em uma extensão maior da superfície do eletrodo peça devido à expansão do canal de plasma. Então, concluíram que o tipo de pó abrasivo mixado ao fluido dielétrico interfere no canal de plasma e, conseqüentemente, na TRM. Através das imagens registradas da descarga elétrica por Klocke *et al.* (2004) utilizando uma câmera especial de alta velocidade, mostradas na Figura 12, percebe-se as diferenças visuais nos canais de plasma entre as usinagens EDM e PMEDM.

Figura 12 - Imagens da descarga elétrica obtidas com câmera fotográfica de alta velocidade da descarga elétrica com óleo mineral: a) sem adição de pó (EDM); b) com pó de alumínio (PMEDM); c) com pó de silício (PMEDM).



Fonte: Klocke, *et al.*, 2004.

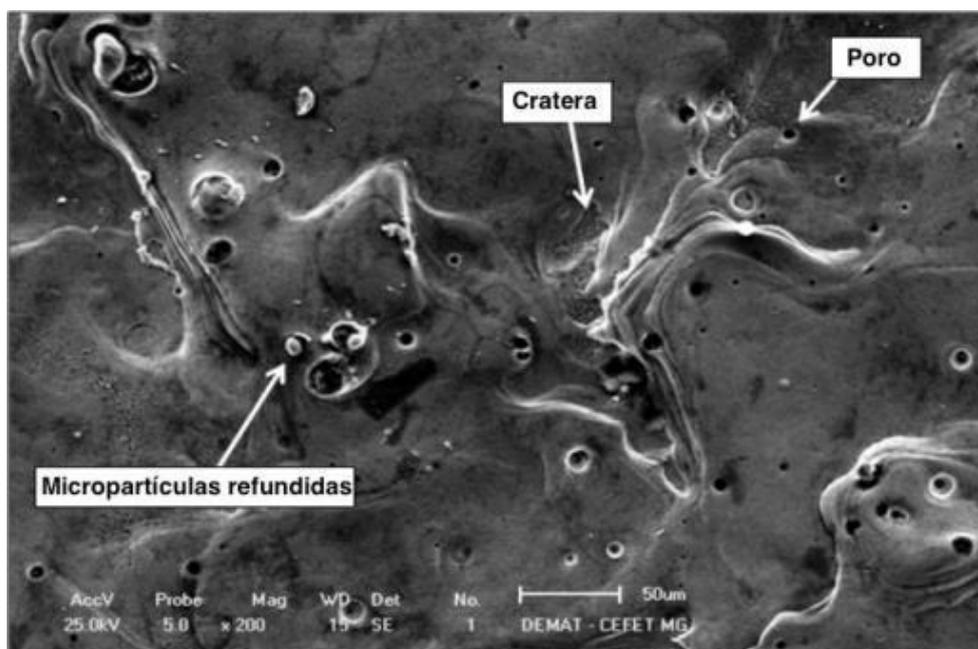
2.2.1 Integridade das superfícies

Crateras e microfissuras na camada refundida da peça são características próprias do processo de usinagem por eletroerosão com ou sem a adição de pós abrasivos ao fluido dielétrico. Se após a usinagem houver muitas fissuras e crateras, é um forte indicativo de que o acabamento superficial foi afetado e deixou a desejar na qualidade.

Quanto maior a intensidade das descargas elétricas, maiores são as probabilidades de formar crateras na superfície da camada refundida. McGeough

(1988) cita que o tipo de fluido dielétrico influencia na formação das crateras. Para Fuller (1989), quanto maior a TRM, tanto maior será a presença de crateras na superfície. A Figura 13 ilustra a morfologia da superfície da camada refundida de uma amostra de aço AISI 4140 a qual foi usinada pelo processo EDM, ou seja, sem pós abrasivos. A imagem mostra inúmeras crateras e poros e micropartículas refundidas.

Figura 10 - Imagem da camada refundida de uma amostra de aço AISI 4140 usinada por EDM.



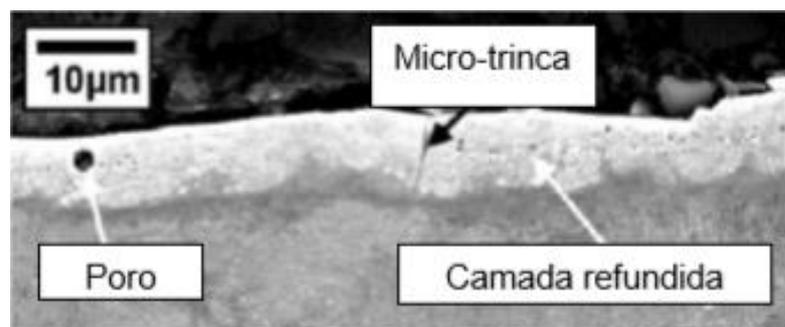
Fonte: Raslan, 2015.

Por ser um processo térmico de temperaturas elevadíssimas, as usinagens por EDM criam zonas afetadas pelo calor (ZAC's) na região da usinagem que dão origem a camadas refundidas de extrema dureza. Esse processo de usinagem também produz tensões térmicas que, quando excedem o limite de resistência do material usinado, dão origem às pequenas fissuras nas superfícies das camadas refundidas (RODRIGUES *et al.*, 2008).

Devido ao aumento das taxas de transferência de material em suspensão no fluido dielétrico, em função do aumento da corrente de pulso, quando se aplicam pós abrasivos no processo de usinagem PMEDM, observa-se uma maior densidade de fissuras e poros nas camadas refundidas (EKMECKCI *et al.*, 2015). A Figura 14 mostra uma microtrinca e poros ao longo da espessura da camada refundida em imagem obtida por microscopia óptica.

A camada refundida, também denominada zona refundida (ZR) ou camada ressolidificada ou camada branca, é um composto que possui elevada dureza e, por isso, é muito frágil e quebradiça. Isso ocorre devido ao rápido resfriamento das partículas de metal líquido que, ao se depositem na superfície, apresentam características de material vítreo ou cerâmico (não cristalino e não metálico) que dificulta muito a soldagem. A camada branca é formada pelos compostos ϵ -Fe₂₋₃ e γ' -Fe₄N. Por isso, muitas vezes, recorre-se a processamentos posteriores, tal como a retificação, para remoção da camada branca. Outro fator que motiva a retirada da camada branca é que as microtrincas, crateras e poros presentes diminuem a resistência à fadiga do material. Portanto, o ideal é diminuir ao máximo a espessura da camada branca, mantendo-a uniforme e, se possível, com o caráter metálico (ALVES, 2001).

Figura 11 - Seção transversal de uma camada refundida oriunda de EDM.



Fonte: Fuller, 1989.

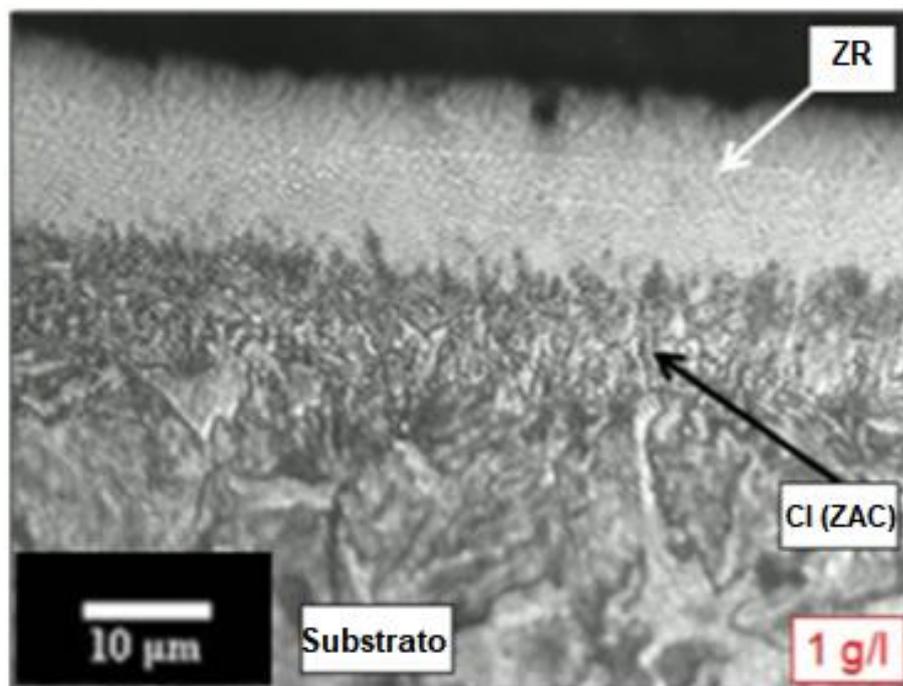
Logo abaixo da camada refundida, surge a zona afetada pelo calor (ZAC) que no processo NDE é denominada camada intermediária (CI). As faixas de temperaturas nessa região da peça estão abaixo do ponto de fusão, mas são suficientes para gerar uma estrutura martensítica, em caso de aços ligas ou de aços comuns em que o teor de carbono seja igual ou superior a 0,4%, aumentando a dureza em função disso (PANDEY e SINGH, 2010). A Figura 15 ilustra micrografia da seção transversal de uma amostra de aço AISI 4140 usinada com água deionizada e ureia.

Nas superfícies da peça usinada por EDM, é possível perceber, em alguns casos, material ressolidificado em formas de micro esferas. Isso se dá devido aos vapores do fluido dielétrico gerados na fenda de trabalho que retardam o resfriamento do metal líquido erodido da superfície da peça (KHANRA, et al., 2007).

Durante o processo, micropartículas se ressolidificam na superfície da peça e tendem a diminuir a TRM. A geometria e o tamanho dessas micropartículas variam em função das correntes elétricas (NORASETTHEKUL *et al.*, 1999).

Os estudos de Lima e Corrêa (2006) indicaram que minúsculas irregularidades na superfície usinada, tais como poros e cavidades, podem ser oriundas de partículas de impurezas suspensas no fluido dielétrico que se interpõem na fenda entre os eletrodos. Portanto, é necessário que o grau de impureza seja minimizado, empregando algum dos métodos de limpeza da fenda de trabalho do processo EDM.

Figura 15 - Camada Refundida e Camada Intermediária de amostra do aço AISI 4140 usinado por EDM.



Fonte: Santos *et al.*, 2016.

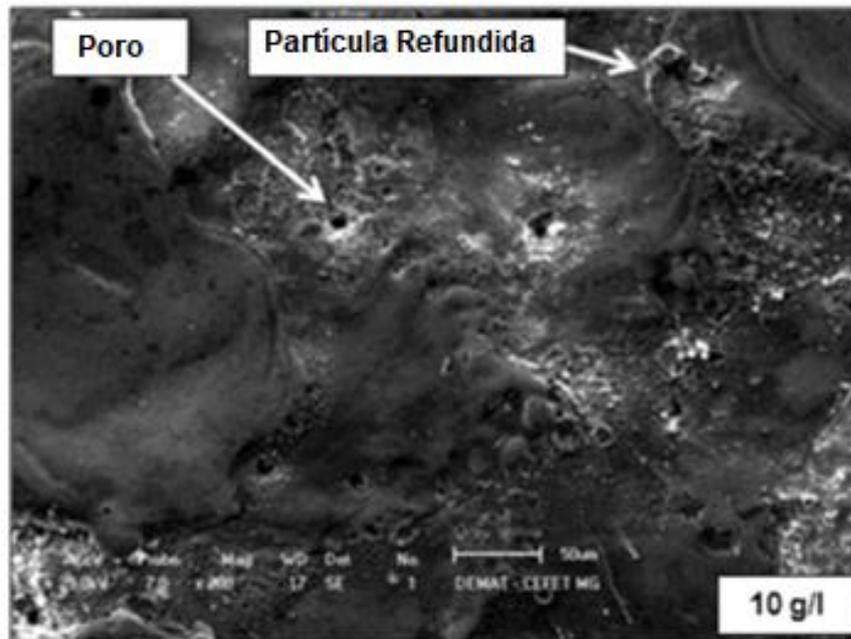
CI (ZAC) → Camada Intermediária ou Zona Afetada pelo Calor

ZR → Camada Ressolidificada ou Zona Refundida

Substrato → Metal Base

A Figura 16, obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV), ilustra micropartículas aderidas à superfície da peça que se formaram na cavidade usinada por EDM de um aço AISI 4140.

Figura 12 – Imagem de MEV da superfície de amostra de aço AISI 4140 usinada com fluido dielétrico formado por solução aquosa de água deionizada mais ureia.



Fonte: Santos *et al.*, 2016.

2.3 Tratamentos térmicos

Os tratamentos térmicos são procedimentos que envolvem o aquecimento e o resfriamento em condições controladas de temperatura, tempo de encharque, atmosfera e velocidade de aquecimento e de resfriamento para que, em maior ou em menor grau, seja possível modificar as propriedades mecânicas dos metais, principalmente os aços, conferindo-lhes atributos peculiares. Chiaverini (2012) cita que através dos tratamentos térmicos é possível aumentar ou diminuir a dureza, homogeneizar as estruturas, melhorar a tenacidade e a ductilidade, melhorar a usinabilidade, minimizar as tensões internas, melhorar a resistência ao desgaste, melhorar a resistência à corrosão, melhorar a resistência à fadiga etc. Os tratamentos térmicos se dividem, basicamente, em tratamentos termofísicos e em tratamentos termoquímicos. Os tratamentos termofísicos são: recozimento, normalização, têmpera, têmperas superficiais, revenido, martêmpera e austêmpera. Os tratamentos termoquímicos são: Cementação; Nitretação, Cianetação, carbonitretação e Boretção.

2.3.1 Tratamentos Termoquímicos

A função precípua dos tratamentos termoquímicos é obter, através de reações químicas entre o aço e alguns elementos químicos, o endurecimento superficial. Esses elementos químicos podem ser fornecidos por meios sólidos, líquidos e gasosos (CHIAVERINI, 2012).

Dentre os tratamentos termoquímicos este estudo ater-se-á apenas ao processo de nitretação, a fim de dar o correto embasamento para os estudos experimentais desenvolvidos.

A) Nitretação

A nitretação é tratamento termoquímico aplicado aos metais, principalmente nos aços, no alumínio e em metais refratários, que introduz nitrogênio por difusão intersticial ou por lacunas na rede cristalina da massa metálica (SANTOS, 2013).

As etapas básicas do processo de nitretação que são explanadas de forma simples e didática por Alves (2001), consistem na submissão do objeto a ser nitretado em um ambiente nitrogenoso em temperaturas de 500 a 590 °C para obter nitrogênio atômico, seguida da adsorção dos átomos na superfície do componente e posterior difusão do nitrogênio para dentro da massa metálica e formação dos nitretos através das reações químicas.

Knerr *et al.* (2004) afirmam que esse processo tem por finalidade a formação de nitretos para aumentar a dureza superficial da peça ou componente e, conseqüentemente, conferir-lhe maior resistência ao desgaste por deslizamento, ao atrito, à corrosão, à fadiga culminando com uma maior vida útil. Portanto, não há a necessidade de resfriar bruscamente, visto que a finalidade não é a formação de uma estrutura martensítica.

Santos (2013) explica que o processo de nitretação das ligas ferrosas ocorre no campo da estabilidade da ferrita, ou seja, como as temperaturas de trabalho são inferiores à de recristalização, as únicas transformações de fase a que ocorrem estão, única e exclusivamente, relacionadas à *“precipitação de nitretos ou carbonitretos, quando presente também o carbono na liga ou no meio nitretante”*.

Para Chiaverini (2012), antes de nitretar um componente, é necessário uma preparação com processamentos anteriores. Normalmente, o aço é normalizado ou

recozido para homogeneizar a estrutura; depois ele é beneficiado com a temperatura de revenimento variando entre 590 a 700°C de acordo com a dureza e tenacidade desejadas para o núcleo e para que a estrutura fique sorbítica ou esferoidita; na sequência, usina-se o componente para as dimensões necessárias mantendo as rugosidades superficiais, as tolerâncias dimensionais e as tolerâncias geométricas exigidas no projeto; por último, executa-se o processo de nitretação desejado. Se necessário for, pode-se submeter o componente a um processo final como, por exemplo, a retificação para corrigir as dimensões.

Chiaverini (2012) explica que, embora as temperaturas do tratamento não sejam tão altas quanto às da têmpera, recozimento e normalização são suficientes para que as peças sofram uma pequena variação dimensional após o processo de nitretação, mas que não é um fator difícil de ser previsto e controlado. Portanto, é muito importante que projetistas e engenheiros considerem essa variação no desenvolvimento de novos produtos, quando não haverá processamento posterior de retificação, a fim de que, durante a montagem, os componentes possam se ajustar. Se a usinagem não levar em consideração a variação nas dimensões, o componente deverá ser retificado, a fim de atingir a precisão dimensional, as tolerâncias especificadas e a rugosidade superficial desejada.

I- Tratamento termoquímico de nitretação a plasma

A nitretação iônica, também denominada nitretação a plasma, foi um método desenvolvido na década de 1930 por Berghaus que teve seu pleno desenvolvimento tecnológico a partir da década de 1980, quando a eletrônica e a era da informática embarcaram de vez nos equipamentos automatizando-os através dos controles numéricos e computadorizados (SCHMITZ, 2014).

Esse método de nitretação também visa à elevação da dureza da superfície, mas, diferente dos outros métodos convencionais, emprega a tecnologia de descarga luminescente para que o nitrogênio difunda na massa metálica. Uma atmosfera de baixa pressão, normalmente composta de gases N_2 e H_2 , é ionizada devido a uma diferença de potencial elétrica gerada entre o cátodo (componente) e o anodo (carcaça do reator) para formação do plasma (RAMOS, 2003).

A geometria e dimensões cátodo (peça), os tipos de gases da câmara e a distância compreendida entre o anodo (eletrodo) e o catodo influenciam na diferença de potencial empregada no processo (WOLFART, 1996 apud SKONIESKI, 2008).

Santos (2013) explica que, na realidade, um grande campo elétrico estabelecido gera uma descarga elétrica que produz um verdadeiro bombardeio na superfície da peça, polarizada, negativamente, de íons de nitrogênio livres no espaço da atmosfera gasosa.

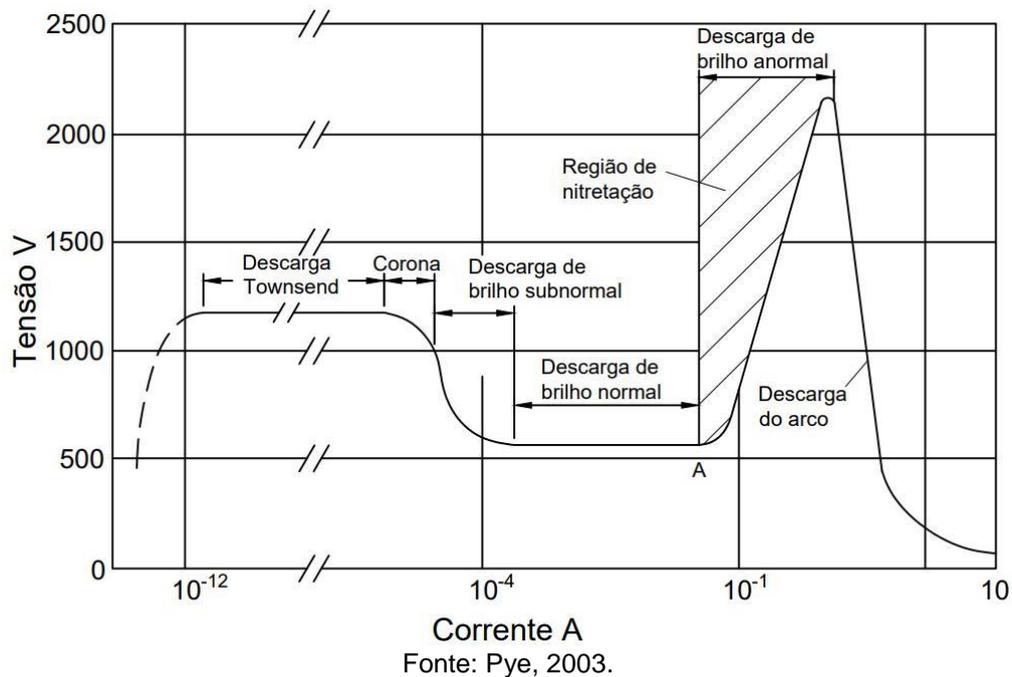
Schmitz (2014) elenca os motivos pelos quais esse processo ganhou notoriedade no mercado industrial:

“Devido sua versatilidade no controle microestrutural da superfície nitretada, baixo custo de operação e adequação a legislação ambiental, o processo de Nitretação a Plasma deve possibilitar que o tratamento termoquímico de nitretação venha a manter uma posição de destaque dentre os tratamentos superficiais modernos.” (SCHMITZ, 2014).

Descrevendo de forma um pouco mais detalhada, no processo de nitretação a plasma, os elétrons livres recebem energia gerada pelo campo elétrico entre os eletrodos e aceleram em direção ao anodo e, pela mesma forma, os íons positivos aceleram em direção ao cátodo, ou seja, em direção à peça. Ocorrem, então, colisões em cascata entre os íons positivos e a superfície da peça. Quando não colidem diretamente com a peça, colidem-se antes com os átomos neutros e moléculas do gás, quando ocorre transferência de energia para esses e formam distintos e novos espécimes tais como átomos e moléculas ionizadas e excitadas, átomos neutros e radicais livres. Cada íon que colide no cátodo arranca elétrons que se colidem com outros íons fazendo que seja um processo contínuo. Para que haja maior excitação e, conseqüentemente, maior ionização, é importante que as colisões sejam, o máximo possível, do tipo inelásticas (SKONIESKI, 2008).

A tensão ou diferença de potencial possui um comportamento em função da variação da corrente elétrica e este mecanismo é ilustrado na Figura 17. Analisando o diagrama, a região de Townsend e Corona, caracterizadas no intervalo de 1×10^{-4} a 1×10^{-12} A, é de pouco ou nenhum interesse para a nitretação a plasma exatamente por causa das baixíssimas correntes elétricas (PYE, 2003).

Figura 17 - Tensão em função da corrente de uma descarga elétrica.



A região de brilho normal ou região da luminescência normal apresenta um aumento da corrente elétrica sem variação da tensão e, embora caracterize certa estabilidade, não há como efetuar a nitretação a plasma devido à baixa densidade de corrente. A região favorável para a nitretação a plasma é denominada de região de brilho anormal ou região de luminescência anormal, caracterizada pelos aumentos simultâneos da corrente elétrica e da tensão. Percebe-se maior densidade da corrente elétrica, fator preponderante para caracterizar o meio nitretante e onde a descarga reveste todo o cátodo (PYE, 2003).

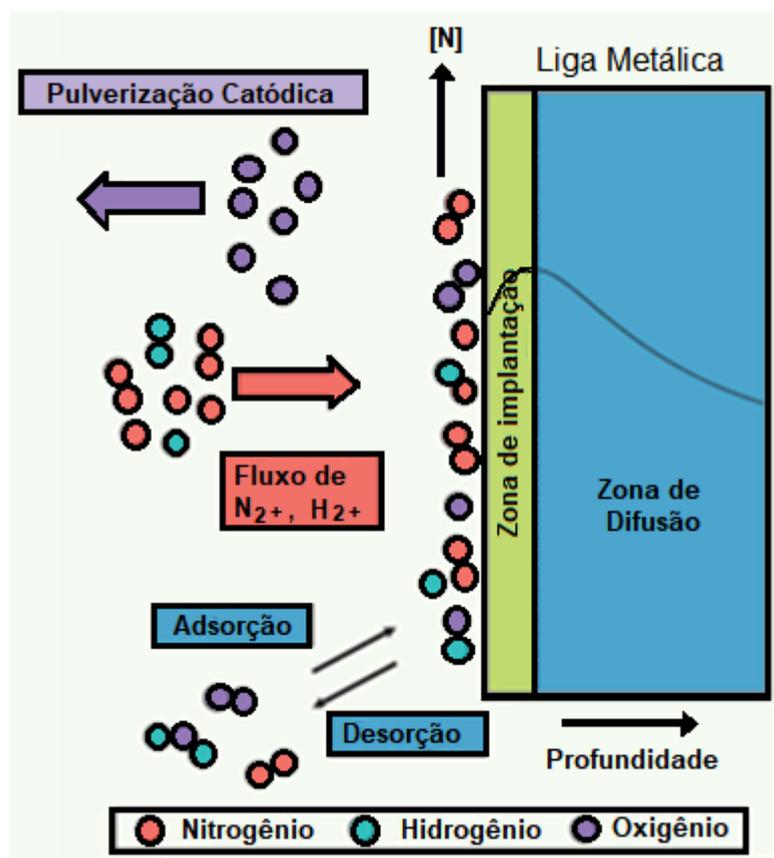
O processo de colisões dá origem a aquecimentos localizados e a defeitos pontuais e, portanto, há um aumento da temperatura da peça que facilita a adsorção de espécies ativadas com nitrogênio pelo substrato. Ramos (2003) relata que esse processo cria reações sobre a superfície que dão origem ao nitrogênio atômico que, em função do aumento da temperatura, penetra no substrato pelo fenômeno da difusão, com uma parte formando precipitados com os componentes do aço e a outra permanecendo em solução sólida, apenas ocorrendo a implantação iônica. Antes da nitretação propriamente dita, ocorre a primeira fase do processo que é limpeza da superfície da peça denominada "Pulverização Catódica" ou "*Sputtering*". Nessa etapa, os gases utilizados são o hélio e o argônio, para a estabilização do plasma e redução e ejeção dos óxidos presentes na superfície. Após o tempo necessário para a

execução da limpeza, ocorre a nitretação propriamente dita, utilizando os gases hélio e nitrogênio sob uma pressão um pouco mais alta, salientando que, quanto maior o percentual de hélio menor será a espessura camada branca. (SCHMITZ, 2014). A Figura 18 esquematiza o funcionamento do processo de nitretação a plasma.

Naturalmente, o estado de excitação não é permanente, pois todo elétron tende a retornar ao seu estado de equilíbrio e esse decaimento dos elétrons a níveis mais baixos de energia resultam na emissão fótons (luz), motivo pelo qual ocorre a luminescência no plasma (SCHMITZ, 2014).

Simplificando, Pye (2003) descreve que ocorrem várias interações na superfície do cátodo durante o bombardeamento de íons. Dentre elas destacam-se a formação de compostos, a pulverização catódica, aquecimento localizado, criação de defeitos, reações químicas, modificação das propriedades, colisões em cascata e, obviamente, mudanças na topografia.

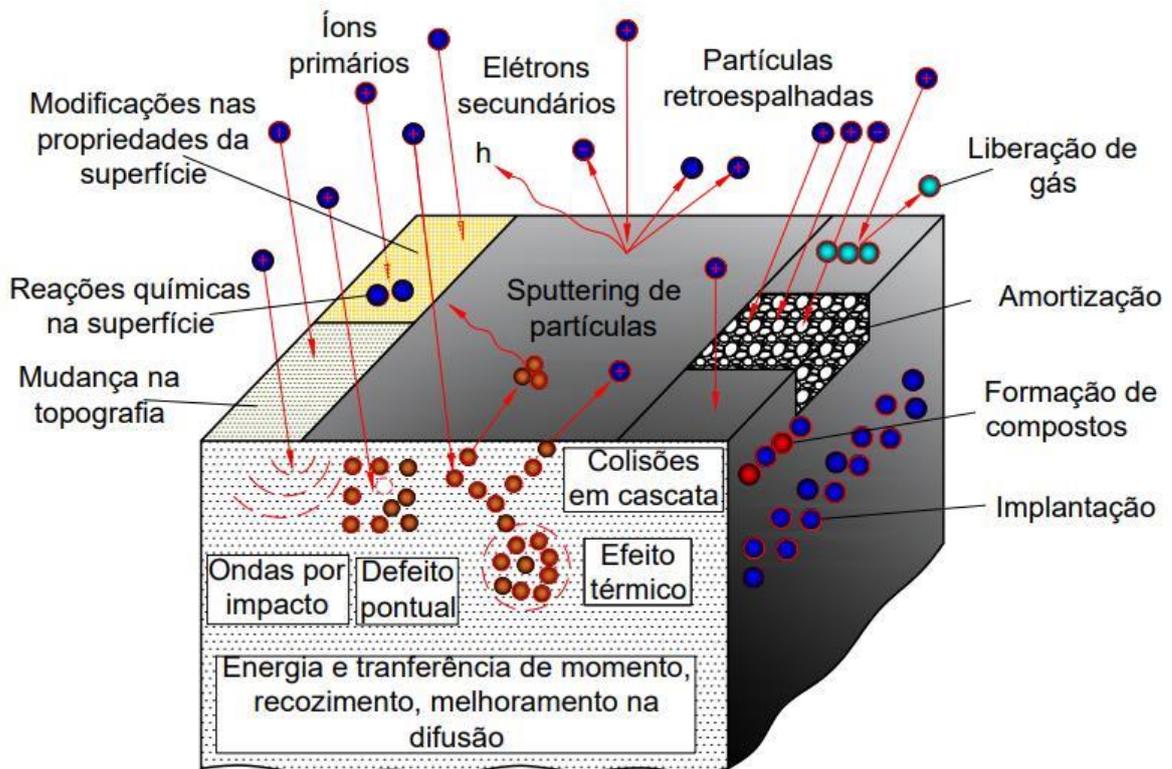
Figura 13 - Representação esquemática do processo de nitretação a plasma.



Fonte: Echeverigaray *et al.*, 2006.

As interações que podem ocorrer na superfície do cátodo (peça) decorrentes do bombardeio iônico são ilustradas na Figura 19. Muitas são os motivos que caracterizam o processo de nitretação a plasma como sendo o mais eficiente do que os processos de nitretação líquida e nitretação a gás. Dentre eles pode-se destacar que o uso de gases inertes torna o processo sem riscos para saúde do operador e amigo do meio ambiente por não gerar poluição; dispensa aquecimento auxiliar, pois o próprio plasma gera o calor suficiente para aquecer a peça e permitir a difusão do nitrogênio na massa metálica; os tempos de operação e as temperaturas empregadas são menores; é um processo de fácil automação, de maior controle e de maior flexibilidade na operação; ocorre pequena variação dimensional; praticamente elimina a formação de poros na camada branca e há possibilidade de interferência na camada branca formada (ϵ e/ou γ').

Figura 19 - Possíveis interações que ocorrem no processo de nitretação a plasma.



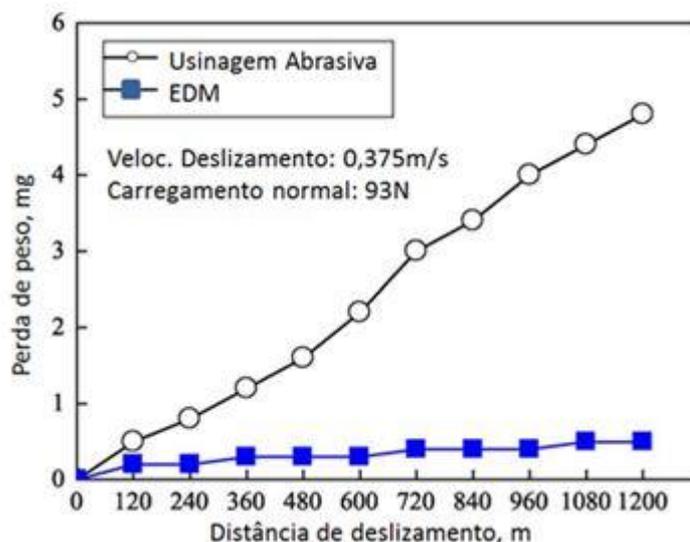
Fonte: Schmitz, 2014, (Adaptada, 2020).

II- Tratamento termoquímico de Nitretação por descargas elétricas – NDE

Empregando uma máquina de usinagem por eletroerosão, os pesquisadores Yan, Tsai e Huang (2005) avaliaram a possibilidade produzir nitretos na superfície de uma peça de material titânio e os resultados dos experimentos mostraram que houve migração do nitrogênio, que se encontrava na ureia, para a massa metálica formando um composto muito duro: o nitreto de titânio (TiN). Concluíram, então, ser possível nitretar através de descargas elétricas, processo esse que ficou conhecido por NDE – *Nitriding Discharge Electric* – e que ocasionou melhorias à resistência do desgaste no material nitretado. A técnica empregada consistiu em utilizar, como fonte de nitrogênio, a ureia ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) misturada em água destilada para formação do fluido dielétrico (SANTOS, 2013).

Yan *et al.* (2005) observaram nos resultados experimentais que a resistência ao desgaste da superfície usinada por processos de abrasão é menor do que a superfície obtida por NDE usando a solução aquosa de uréia. Os pesquisadores concluíram que as melhorias à resistência ao atrito e ao desgaste foram motivadas pela formação do nitreto de titânio (TiN), composto de relativa dureza, a partir da migração do nitrogênio presente no fluido dielétrico para a superfície da amostra. A Figura 20 mostra a distância de deslizamento em relação à perda de peso cumulativa em um teste de desgaste de pino sobre disco.

Figura 20 - Perda de peso por ensaio de desgaste pino sobre disco em amostras de usinagem abrasiva e por EDM.



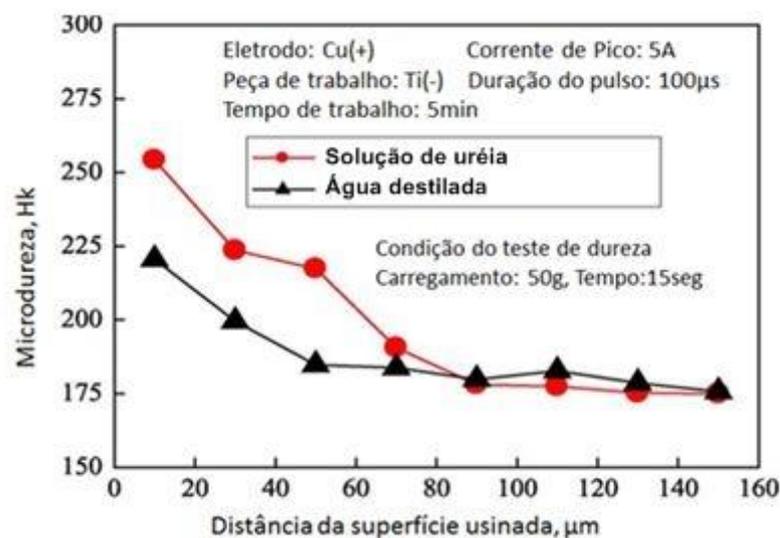
Fonte: Yan *et al.*, 2005.

Yan *et al.* (2005) concluíram que esse efeito foi provocado pelo composto cerâmico TiN formado na superfície da peça devido à elevada temperatura do processo e à alta velocidade de resolidificação, o que mudou a estrutura no material e impediu que houvesse a difusão atômica.

Embora muitos pesquisadores tenham estudado esse processo, pode-se afirmar que a técnica se encontra em fase embrionária e requer muito estudo e pesquisa para se desenvolver plenamente. Camargo *et al.* (2009) explicam que a técnica é fundamentada no enriquecimento da superfície de material com nitretos através de descargas elétricas e que, dos pontos de vistas econômico e tecnológico, pode vir a ser promissora, pois, normalmente, pelas técnicas convencionais de nitretação, as peças passam por processos posteriores objetivando melhorar a dureza e a rugosidade superficial, quando o projeto assim o exige. Yan *et al.* (2005) afirmam que esses processamentos posteriores tendem a onerar a produção devido ao tempo de execução e à adição do custo dos processamentos posteriores.

Yan *et al.* (2005) também traçaram um perfil de dureza para comparar o processo de EDM com dois tipos de fluidos dielétricos: um composto apenas por água destilada e outro composto por uma solução aquosa de ureia. A Figura 21 mostra a variação de microdureza na seção transversal da superfície usinada com os diferentes dielétricos.

Figura 21 - Perfis das microdurezas das amostras usinadas com dielétricos distintos.



Fonte: Yan, *et al.*, 2005.

Pelos perfis de microdureza percebe-se que, em ambos os testes, houve aumento significativo da microdureza. No entanto, os valores mais dilatados foram obtidos com o emprego do fluido dielétrico composto por solução aquosa com ureia.

Uma pesquisa, desenvolvida por Santos (2013), mostrou ser eficaz a implantação de nitrogênio através do processo de NDE para nitretação e consequente endurecimento das superfícies das cavidades usinadas por EDM em um aço AISI 4140.

Raslan (2015) observou que o processo NDE produziu um expressivo ganho da resistência mecânica na camada nitretada do aço AISI 4140 deixando-o muito mais resistente ao desgaste por deslizamento.

O trabalho desenvolvido por Santos *et al.* (2015) verificou que a variação da corrente elétrica interfere no processo NDE, os pesquisadores concluíram que com um maior valor de corrente obter-se-á um canal de plasma mais intenso e, conseqüentemente, uma quantidade maior de nitrogênio da solução aquosa é desprendida facultando uma maior difusão e gerando uma maior espessura da camada nitretada. Outra conclusão importante apontada no estudo foi que o aumento da concentração de ureia no fluido dielétrico causa uma perda da eficiência por gerar uma maior condutividade elétrica e, por isso, dificulta a abertura do canal de plasma gerando um decréscimo na implantação iônica.

Um dos estudos de nitretação por NDE mostrou ser possível obter camadas nitretadas sobre na superfície de amostras de aço AISI 4140 utilizando-se diferentes concentrações de ureia diluídas em água deionizada. Os resultados obtidos por Santos *et al.* (2016) apontaram para um aumento considerável da dureza da camada intermediária e da zona refundida em relação ao material normalizado.

Santos *et al.* (2016) observaram que a difusão do nitrogênio na superfície das amostras, gerando uma camada endurecida rica em nitretos, gradualmente vai diminuindo a profundidade.

Com eletrodos ferramenta de cobre eletrolítico e de grafita obteve-se formação de nitretos nas superfícies das amostras gerando camadas endurecidas com espessuras médias de 20 μ m e de durezas muito similares. Com os difratogramas percebeu-se que tanto o cobre quanto o carbono são transferidos por difusão para a superfície das amostras. Porém, a partir da nitretação por descargas elétricas com o uso do eletrodo de grafita, formaram-se carbonetos de ferro e nitretos do tipo γ' não

observados na usinagem com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico (SANTOS *et al.*, 2016).

Nicésio *et al.* (2016) procuraram desvendar a interferência do tipo de ureia misturada ao fluido dielétrico aquoso no processo NDE. Para tal, empregaram na pesquisa a ureia fertilizante, a ureia farmacológica e a de padrão analítico. Concluíram que a pureza da ureia interfere de forma significativa na espessura da camada nitretada e na dureza dessas. O resultado foi que a ureia mais pura (Padrão Analítico) produziu camadas mais espessas e com maior dureza.

Lima *et al.* (2018), ao aplicar o processo de NDE em amostras de aço AISI 4340, constataram que as maiores espessuras das camadas nitretadas, cerca de 60µm, e as maiores TRM's foram obtidas na usinagem com os eletrodos de grafita. Em contrapartida, empregando um eletrodo-ferramenta de cobre, a dureza das camadas nitretadas foram as maiores, chegando a 75% em relação ao material base normalizado.

Em estudo recente executado por Santos *et al.*, (2019) na liga de titânio Ti₆Al₄V se obteve uma espessura média de 104µm da camada nitretada ao empregar pó abrasivo do composto cerâmico carbeto de silício (SiC) no fluido dielétrico. Além disso, houve uma redução de 31% da rugosidade superficial das amostras quando se empregou pó abrasivo no fluido dielétrico em comparação ao mesmo processo sem adição de pó abrasivo. Nesse estudo, constatou-se um aumento de 52% da dureza superficial das amostras em relação ao material base e concluíram que o emprego do SiC no processo NDE na liga Ti-6Al-4V trouxe resultados satisfatórios e apontam para uma viabilidade econômica e comercial do processo.

2.4 Grafita

Considerada dentre os não metais como o melhor condutor elétrico e térmico, a grafita se encontra na natureza em rochas metamórficas, em rochas sedimentares, em rochas ígneas e até em meteoritos de ferro níquel.

Além de bom condutor elétrico e térmico, a grafita é um material quimicamente inerte e possui outras grandes características que a tornam um produto viável econômica e industrialmente. Dentre essas características, pode-se citar a maciez, a flexibilidade, a baixa dureza, a extrema capacidade refratária.

A grafita é largamente empregada na produção de tijolos resistentes às altas temperaturas pelas indústrias de refratários destinados para revestir os fornos de produção de aços, cerâmicas, cimentos etc. A grafita também é aplicada na produção de escovas de polimento, eletrodos, reatores, baterias, cadinhos, lubrificantes, tintas, lápis e até em munições (SAMPAIO, *et al.*, 2008).

Tabela 1 elenca as principais propriedades físicas da grafita.

Tabela 1 - Propriedades da Grafita.

Propriedades Físicas	Grafita
Resistividade Elétrica ($\mu\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$)	0,12
Condutividade Elétrica Comparado com Prata (%)	0,11
Condutividade Térmica ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	160
Ponto de Sublimação e Fusão ($^{\circ}\text{C}$)	3500
Calor Específico ($\text{cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)	0,17 – 0,20
Massa Específica a 20°C (g/mm^3)	0,00167
Coefficiente de Expansão Térmica ($\times 10^{-6} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)	7,8

Fonte: CHE HARON, *et al.*, 2008 (Adaptado, 2020).

2.5 Aço AISI 4140

O aço AISI 4140 possui características muito especiais que tornam a sua aplicação em larga escala nos mais diversos ramos industriais para fabricação de componentes orgânicos tais como, eixos, mangas de eixos, engrenagens, bielas e componentes de diversas máquinas e equipamentos com exigências de suportar as altas solicitações mecânicas. Com acabamento de fornecimento, podendo ser laminado ou trefilado, apresenta usinabilidade razoável, ótima tenacidade, ótima resistência mecânica, ótima temperabilidade, mas soldabilidade ruim. A Tabela 2 demonstra a faixa da composição química (% em peso), as propriedades mecânicas e físicas desse aço de acordo com os catálogos de fabricantes e literatura técnica atual.

O aço AISI 4140 pode ser nitretado pelos processos a gás, por banho e a plasma, que são os processos convencionais de nitretação, quando a dureza superficial puder ser um pouco menor em relação à obtida pelos aços Nitralloy.

Tabela 2 - Composição química e propriedades Mecânicas e Físicas do Aço AISI 4140.

Composição e Propriedades	AISI 4140
Carbono (C) %	0,38 – 0,43
Manganês (Mn) %	0,75 – 1,00
Fósforo Máx (P) %	0,35
Enxofre Máx (S) %	0,40
Silício (Si) %	0,15 – 0,35
Cromo (Cr) %	0,80 – 1,10
Molibdênio (Mo) %	0,15 – 0,25
Limite de Resistência σ_r (MPa)	1020
Limite de Escoamento σ_e (MPa)	655
Alongamento ε (%)	17,7
Estricção S (%)	47
Módulo de Rigidez Longitudinal E (GPa)	200
Dureza Brinell (HB)	222
Massa Específica a 20°C (g.mm ⁻³)	0,00785
Resistividade Elétrica ($\mu\Omega.cm^{-1}$)	0,12
Condutividade Elétrica Comparado com Prata (%)	0,11
Condutividade Térmica (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	160
Ponto de Sublimação e Fusão (°C)	3500
Calor Específico (cal.g ⁻¹ .°C ⁻¹)	0,17 – 0,20
Coeficiente de Expansão Térmica ($\times 10^{-6} .°C^{-1}$)	12,2

Fonte: ASM, 1998 & Fonte: CHE HARON, *et al.*, 2008 & GERDAU, 2003 (Adaptado, 2020).

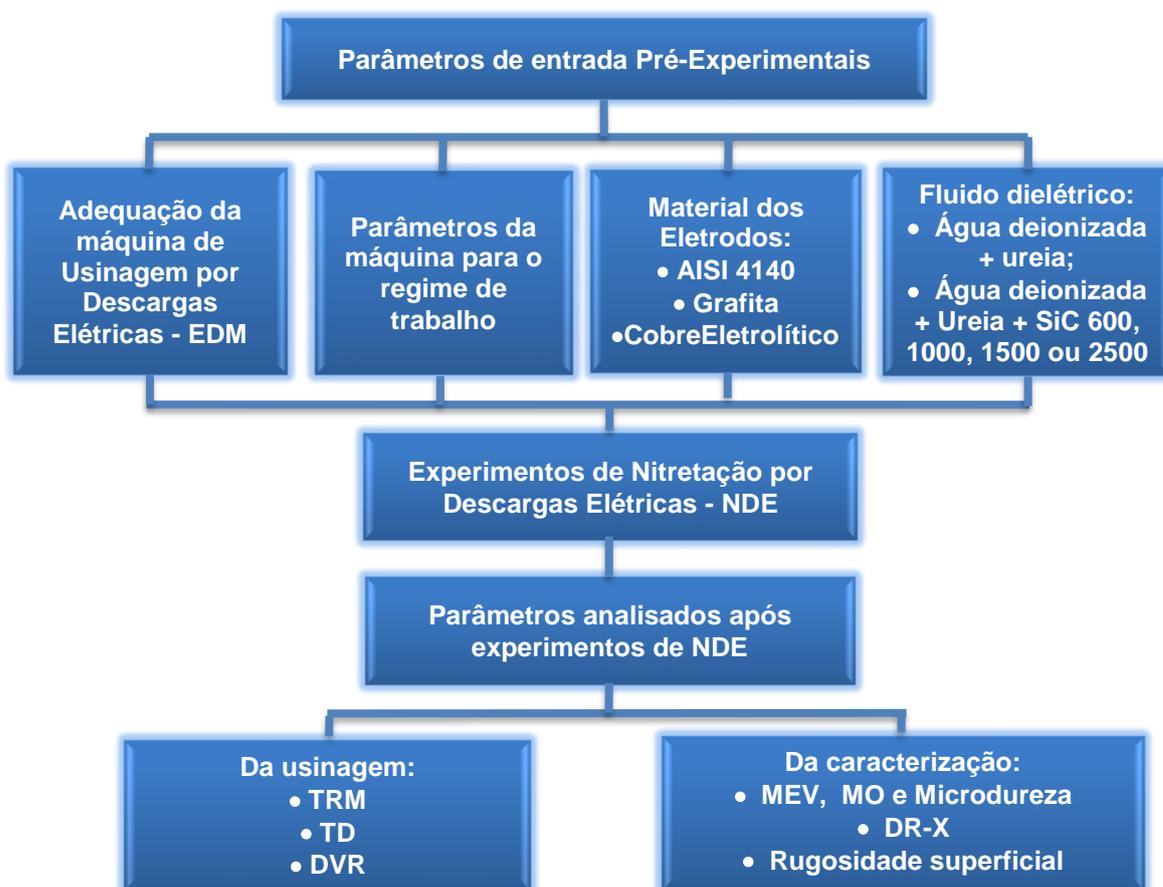
O AISI 4140 ou SAE 4140, também classificado como ABNT 4140, é um aço liga cromo-molibdênio (CrMo) em que 0,4% é o seu teor médio de carbono (C). É um aço de baixa liga, pois tanto o cromo quanto o molibdênio possuem teores inferiores a 5%. Em função dos elementos de liga, as suas propriedades mecânicas, tais como limite de escoamento e o limite de resistência à tração são superiores aos aços carbono comuns com teor de carbono igual ou inferior a 0,45%.

O AISI 4140 é um aço cromo-molibdênio de baixa liga desenvolvido para atender aos mercados das indústrias automotivas e aeroespaciais e, embora as pesquisas de nitretá-lo por NDE sejam recentes, há diversos artigos e periódicos a respeito desse estudo, o que fornece uma base para o tema proposto.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

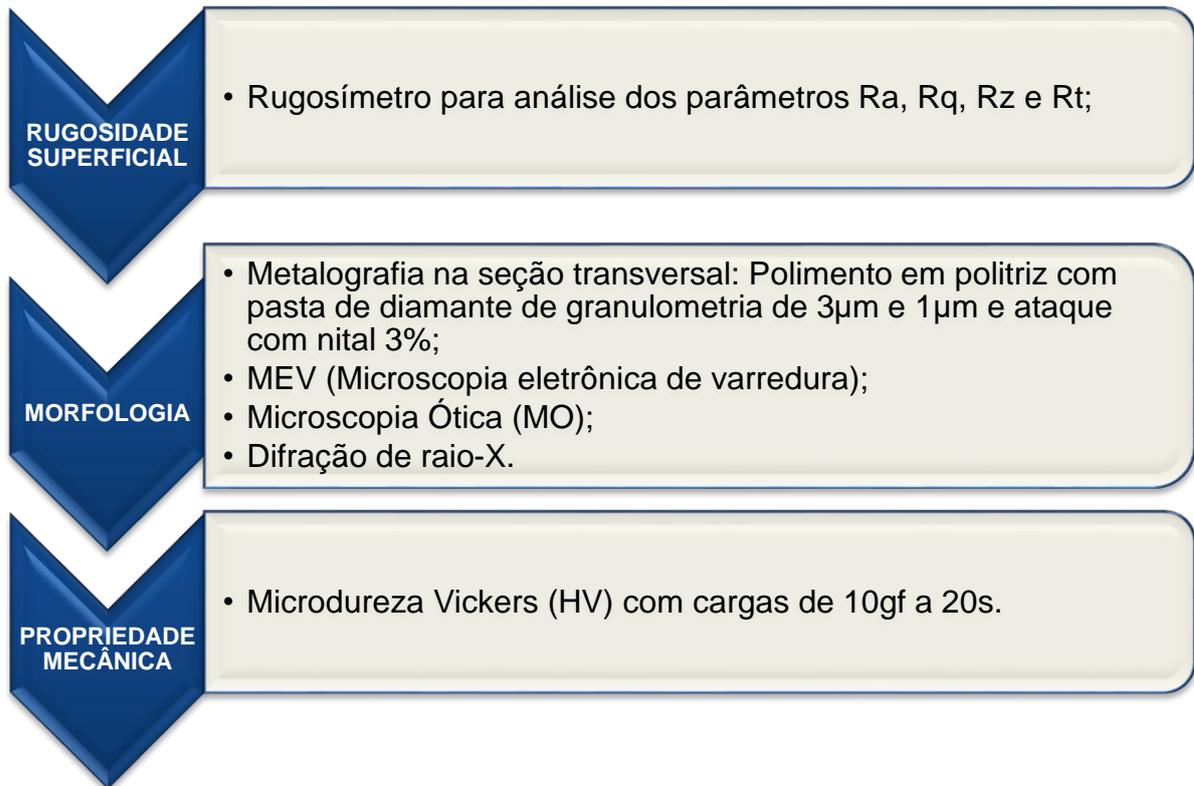
A parte experimental foi desenvolvida nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET – MG) e da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC – MG). Produziram-se amostras de material AISI 4140 para nitretá-las pelo processo EDM utilizando fluido dielétrico composto por água deionizada e ureia farmacológica e, acrescentando a esse fluido, pós abrasivos de SiC nas granulometrias de 600, 1000, 1500 e 2500 mesh. Posteriormente, foram caracterizadas empregando-se os ensaios de microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios-x, microdureza Vickers, medição da rugosidade. As etapas do procedimento experimental desenvolvido nesta pesquisa, a sequência da caracterização das amostras, bem como, os equipamentos utilizados, estão resumidos nas Figuras 22, 23 e 24.

Figura 22 – Etapas do procedimento experimental



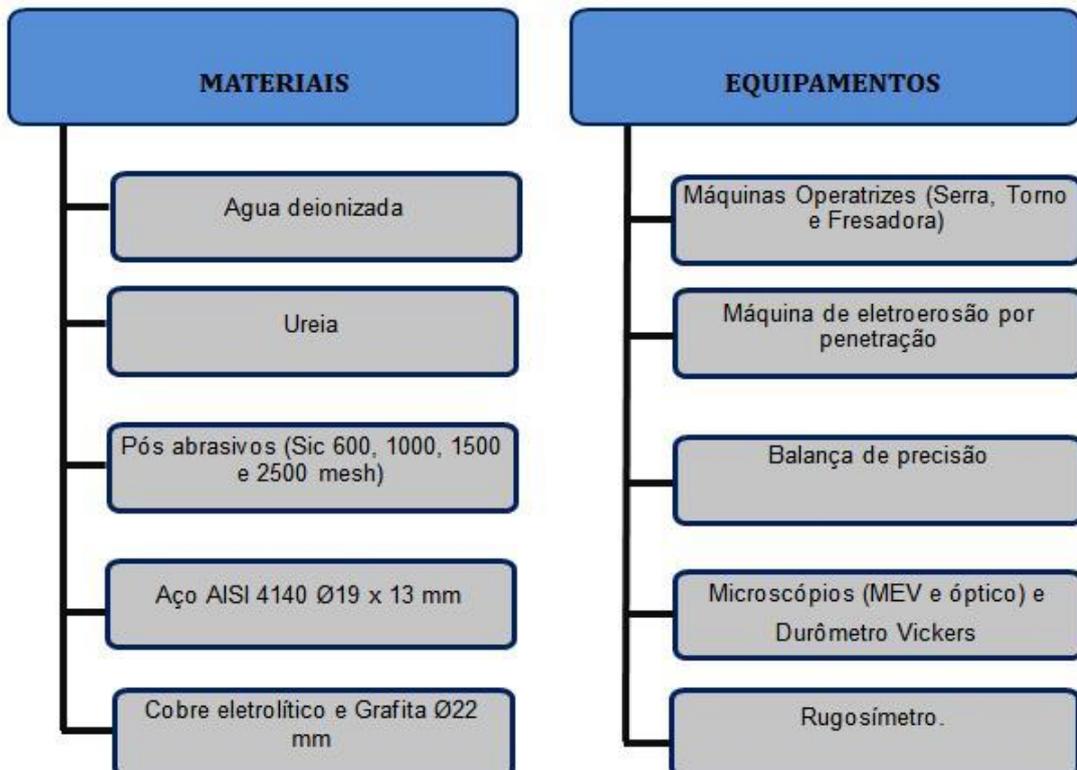
Fonte: O autor, 2020.

Figura 23 - Sequência da caracterização das amostras.



Fonte: O autor, 2020.

Figura 24 - Descrição dos Materiais e equipamentos do processo de EDM.



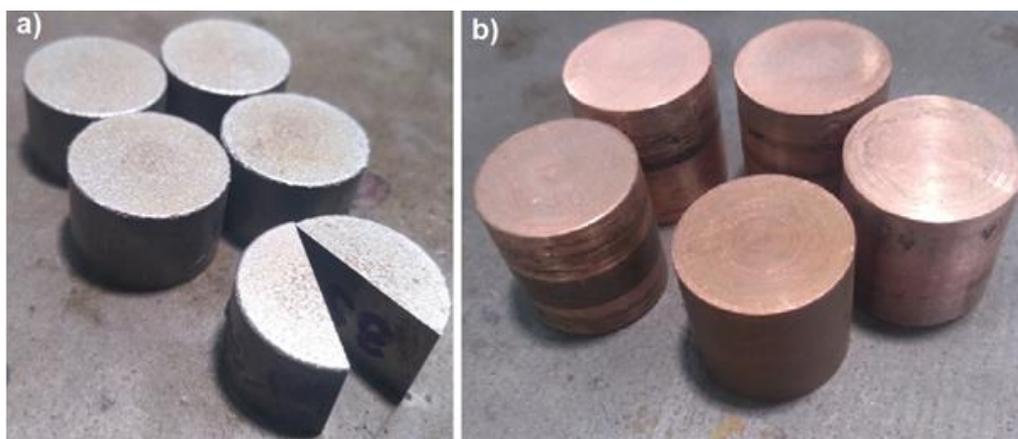
Fonte: O autor, 2020.

3.1 Eletrodos

O material empregado na confecção de 50 amostras de eletrodos peça foi uma barra trefilada de aço AISI 4140 com diâmetro de 19,05h9mm. As amostras foram separadas igualmente em 10 grupos. Uma amostra de cada grupo foi bipartida para possibilitar caracterização das camadas nitretadas após o processo de NDE. As amostras dos grupos ímpares foram usinadas com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico e as dos grupos pares foram usinadas com eletrodo ferramenta de grafita. Todas ficaram com dimensões finais de 19,05h9mm de diâmetro e $13\pm 0,2$ mm de comprimento.

Para a confecção dos eletrodos ferramenta dos grupos ímpares, utilizaram-se barras de cobre eletrolítico com diâmetro de $22\pm 0,5$ mm e, para os grupos pares, barras de grafita também com diâmetro de $22\pm 0,5$ mm. Os eletrodos foram usinados com o auxílio das seguintes máquinas convencionais: serra de fita, torno mecânico e fresadora. A Figura 25 ilustra eletrodos peça e ferramenta de cobre eletrolítico empregados no processo de NDE.

Figura 25 - Amostras processadas por NDE: a) Eletrodo peça AISI 4140; b) Eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico.



Fonte: O autor, 2020.

3.2 Fluido dielétrico

Água potável disponibilizada para o abastecimento público foi utilizada na preparação dos fluidos dielétricos. Para deionizar a água, foi utilizado um deionizador

a base de resina. Na primeira etapa, para usinagem e nitretação das amostras dos grupos 1 e 2, a solução do fluido dielétrico foi composta com 25 litros de água deionizada misturada com 1000g de ureia farmacológica, fonte de nitrogênio para a obtenção dos nitretos, sem a adição de pó abrasivo, perfazendo uma concentração de 40g.L^{-1} . Nas quatro etapas seguintes da execução dos testes, para usinagem e nitretação das amostras dos grupos 3 ao 10, foram adicionados 1000g em pó do abrasivo carbeto de silício (SiC) com granulometrias de 600, 1000, 1500 e 2500 mesh à solução aquosa, respectivamente, produzindo uma nova concentração de 10g.L^{-1} . Usinou-se 5 amostras em cada grupo totalizando 10 por etapa e 50 ao final de todo o processo. As condutividades em cada etapa da composição do fluido dielétrico foram mensuradas com um condutivímetro portátil, que opera com incertezas de $\pm 2\%$, com leituras na faixa de 0 a $1999\mu\text{s.cm}^{-1}$. A condutividade da água antes da deionização era de $158\mu\text{s.cm}^{-1}$, aproximadamente. Após a deionização, passou a ser de $0\mu\text{s.cm}^{-1}$. A Figura 26 mostra o condutivímetro indicando que a água empregada foi deionizada, ou seja, condutividade $0\mu\text{s.cm}^{-1}$.

Figura 26- Condutivímetro confirmando a deionização da água.



Fonte: O autor, 2020.

A Tabela 3 apresenta a divisão dos corpos de prova no experimento.

Tabela 3 - Divisão das amostras em função do dielétrico e do eletrodo ferramenta.

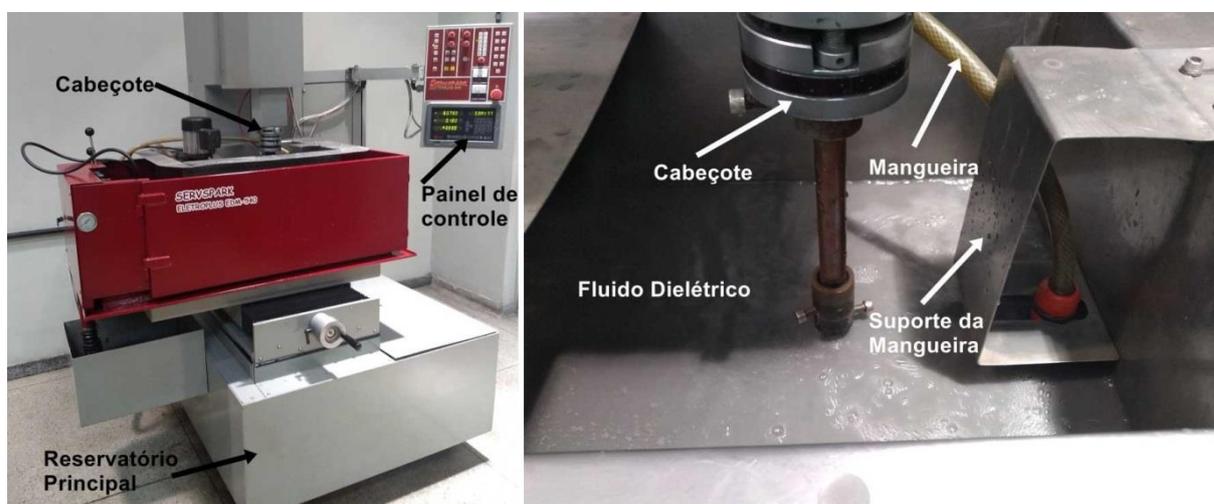
Etapas	Amostras	Eletrodo	Qtde.	Fluído dielétrico
1 ^a	Grupo 1	Cobre	5	Água deionizada e ureia
	Grupo 2	Grafita	5	Água deionizada e ureia
2 ^a	Grupo 3	Cobre	5	Água deionizada + ureia + SiC 600
	Grupo 4	Grafita	5	Água deionizada + ureia + SiC 600
3 ^a	Grupo 5	Cobre	5	Água deionizada + ureia + SiC 1000
	Grupo 6	Grafita	5	Água deionizada + ureia + SiC 1000
4 ^a	Grupo 7	Cobre	5	Água deionizada + ureia + SiC 1500
	Grupo 8	Grafita	5	Água deionizada + ureia + SiC 1500
5 ^a	Grupo 9	Cobre	5	Água deionizada + ureia + SiC 2500
	Grupo 10	Grafita	5	Água deionizada + ureia + SiC 2500

Fonte: O autor, 2020.

3.3 Máquina para usinagem por descargas elétricas

Executou-se o processo de EDM em uma máquina de eletroerosão por penetração, devidamente adaptada para o processo de NDE. A Figura 27-a ilustra o equipamento, modelo Eletroplus – 540/SERVSPARK. A Figura 27-b ilustra a adaptação executada para que o jato do fluido dielétrico não incidisse diretamente na região das descargas elétricas.

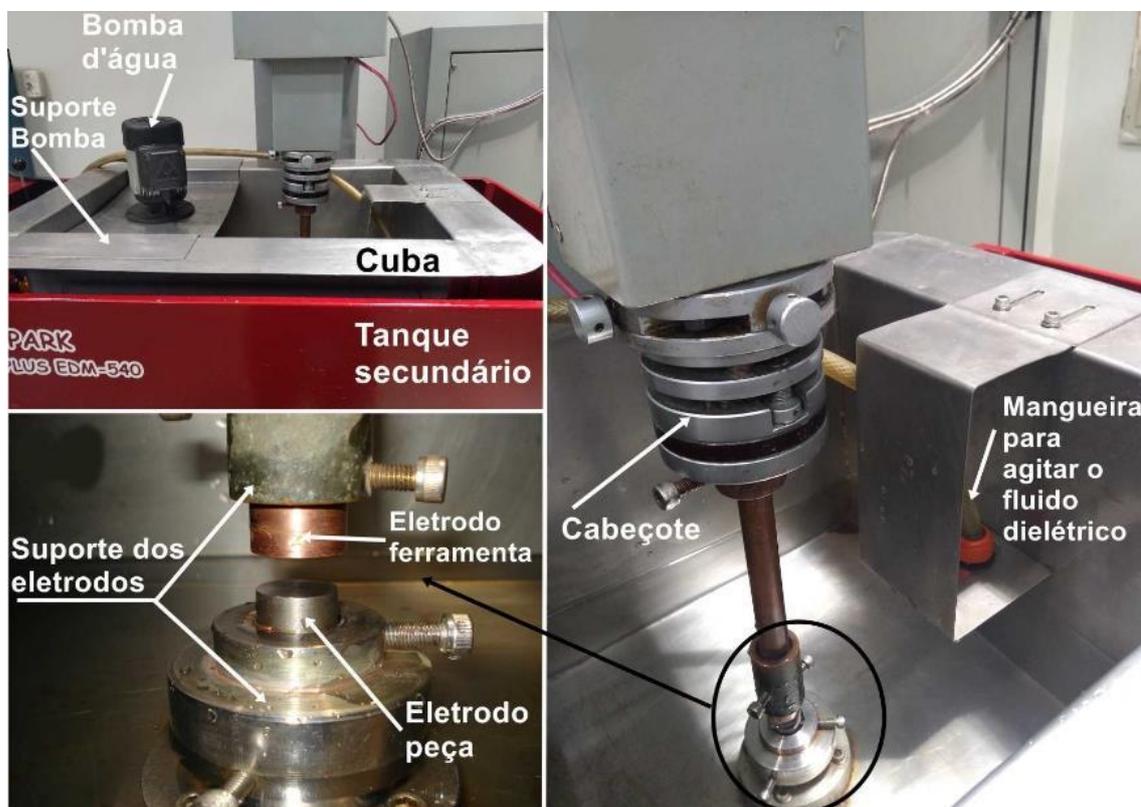
Figura 14 - a) Máquina de eletroerosão utilizada no processo NDE b) Detalhes das adaptações realizadas no equipamento.



Fonte: O autor, 2020.

Para a execução do processo de NDE no equipamento, modelo Eletroplus – 540/SERVSPARK foi necessário adaptar uma cuba auxiliar em aço inoxidável AISI 304, para funcionar como reservatório livre, com capacidade volumétrica de 105 litros para a deposição do fluido dielétrico, a fim de se evitar o contato direto com os componentes originais. Para promover a correta circulação do fluido dielétrico durante toda a operação e evitar que o pó abrasivo ficasse decantado no fundo da cuba, foi instalada uma bomba hidráulica com vazão de $51\text{L}\cdot\text{m}^{-1}$ e pressão de 2mca fixada em um suporte conforme ilustrado na Figura 28-a. Também foi adaptado um suporte lateral para a correta fixação do duto por onde circula o fluido dielétrico, conforme mostrado na Figura 28-b. Consoante observação das Figuras 28-b e Figura 28-c, na parte interna da base da cuba, foi fixado um suporte para fixação dos corpos de prova que funcionam como eletrodo peça e, no cabeçote da máquina, adaptou-se um suporte para fixação do eletrodo ferramenta. A modificação no suporte da mangueira teve como objetivo impedir que o jato do fluido dielétrico incidisse diretamente na fenda de trabalho. Segundo o fabricante (SERVSPARK, 2010), cada posição do seletor do tempo de intervalo ou de pausa do pulso (T_{off}) equivale a 10% do tempo de pulso (T_{on}). Como foi especificado para o processo $T_{\text{on}} = 100\mu\text{s}$ o seletor do tempo de pausa foi ajustado para a posição 1.5, significa que o tempo de pausa $T_{\text{off}} = 15\mu\text{s}$. De acordo com o catálogo do fabricante, as fendas máxima e mínima de trabalho são verificadas em função das posições especificadas para o tempo de pulso, para a diferença de potencial entre os eletrodos e pela quantidade de transistores a serem ligados. Como foram especificados $100\mu\text{s}$, 50V e a posição D2 (1 transistor ou 1 TS) para o tempo de pulso, para a diferença de potencial e quantidade de transistores, respectivamente, fazendo a devida verificação através do catálogo determinaram-se as fendas máxima e mínima de trabalho. A Tabela 4 elenca os parâmetros ajustados no painel da máquina de EDM.

Figura 28 - Adaptações máquina EDM – a) Cuba Auxiliar, Suporte da bomba e Bomba d'água; b) Adaptações para fixação da mangueira; c) Adaptações para os eletrodos.



Fonte: O autor, 2020.

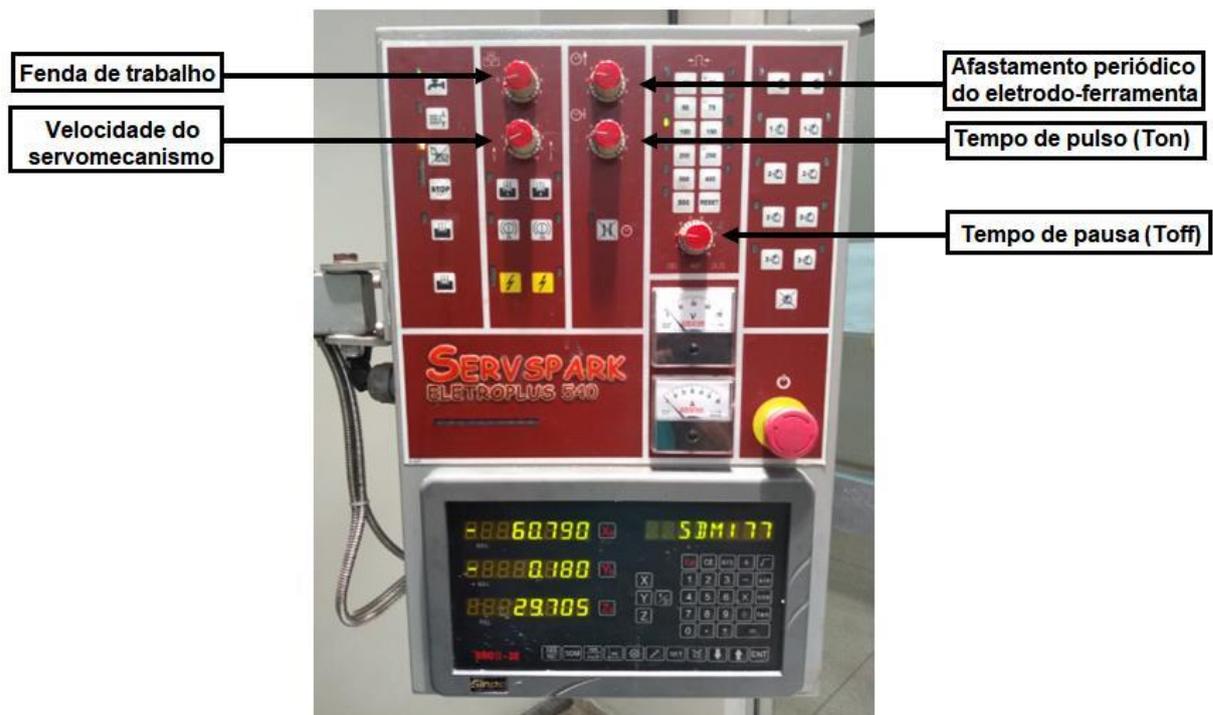
A Figura 29 ilustra o painel de controle da máquina de EDM com as indicações dos parâmetros definidos para execução dos testes. Para este estudo, especificou-se um tempo 10min de execução para realização de usinagem de cada amostra.

Tabela 4 - Parâmetros operacionais selecionados na máquina para NDE.

Parâmetro	Especificação
Polaridade do eletrodo ferramenta	Positiva
Corrente	40A
Tensão de trabalho	50V
Tempo de pulso (Ton)	100 μ s
Tempo de pausa (Toff)	15 μ s
Fenda de trabalho mín ($gap_{\text{mín}}$)	45 μ m
Fenda de trabalho máx ($gap_{\text{máx}}$)	84 μ m

Fonte: O autor, 2020.

Figura 15 - Painel de controle da máquina EDM.



Fonte: O autor, 2020.

3.4 Ensaio de Metalografia

Para a análise metalográfica, uma amostra de cada grupo das etapas foi seccionada ao meio no sentido longitudinal e fresada posteriormente para montagem e ajuste dentro do suporte de fixação dos eletrodos peça, totalizando 10 amostras bipartidas, sendo cinco para as usinagens com eletrodos de cobre eletrolítico e cinco para as usinagens com eletrodos de grafita. As amostras da 3ª a 10ª etapas foram nitretadas pelo processo NDE, e simultaneamente, usinadas pelo processo PMEDM empregando-se uma granulometria distinta do pó abrasivo SiC. Nas amostras dos grupos da 1ª etapa, empregou-se o processo NDE e foram usinadas, simultaneamente, pelo processo EDM, ou seja, não se utilizou pó abrasivo. O objetivo de seccionar as amostras foi permitir uma análise detalhada das camadas nitretadas (refundida e intermediária) mensurar suas durezas e suas espessuras na seção transversal. As amostras, usinadas com cada tipo de eletrodo ferramenta, foram devidamente embutidas e espelhadas nas seções transversais para a execução dos ensaios metalográficos através da microscopia óptica.

Logo após os processos de usinagem, as amostras bipartidas foram separadas e preparadas para a execução do ensaio metalográfico perfazendo um total de 20 amostras. Na sequência, foram enviadas para as etapas de embutimento e polimento. Na etapa do embutimento empregou-se resina epóxi termo endurecedora de boa aderência e baixa concentração, contendo minerais em sua composição. A finalidade de se aplicar resina com essas características é de manter as faces planas durante o polimento e, assim, evitar o desprendimento da camada refundida e manter as bordas intactas. Na sequência, procedeu-se a etapa do polimento. Este foi executado através de lixamento manual utilizando lixas de carbetto de silício com granulometrias de 180, 220, 360, 400, 500, 600, 1200, 1500, 2000 e 2200 mesh. Para finalizar, as amostras foram submetidas a polimento com pasta diamantada de 3 e 1 μ m em politrizes para obtenção de superfícies espelhadas.

Para revelação metalográfica utilizou-se nital a 3%, composto de 97ml de álcool etílico e 3ml de ácido nítrico concentrado, recomendado para ataques microscópicos de ação profunda para tornar visíveis constituintes especiais da estrutura em aços e ferros (carbonetos, eutético fosforoso) não ligados e de baixa liga e, em casos isolados, também como reativos para microscopia de alta liga, além de macroscopia para camadas submetidas a tratamentos termoquímicos e, respectivamente, profundidade de endurecimento. Seguindo o mesmo procedimento de Santos *et al.* (2019) para a execução da microscopia ótica, empregou-se um microscópio ótico Fortel. Integrado a esse microscópio há um sistema de captura de imagens Kontrol, modelo M713. Esse instrumento possibilita mensurar as espessuras das camadas refundidas e intermediárias das amostras por meio da função de medição linear de software como o Axio Vision Le64.

3.5 Ensaio de Dureza Vickers

Após a usinagem pelos processos de EDM e PMEDM e preparação pela técnica metalográfica, as amostras foram submetidas ao ensaio de microdureza Vickers. Nas faces espelhadas executaram-se as indentações para mensurar a microdureza das camadas ZR, ZAC e do substrato. Executou-se 5 indentações com espaçamento mínimo de 20 μ m entre elas para composição da média e do desvio padrão. O tempo de carregamento foi de 20s e a carga aplicada foi de 98,06mN (10gf). Utilizou-se um microdurômetro Shimadzu, modelo HMV-2TE, com capacidade de

carga de 10 a 100gf em que, incorporado nele, há um microscópio óptico com software Easy Test HMV-AD e, utilizando uma câmera digital integrada, captaram-se as imagens para as análises. Durante os ensaios de microdureza Vickers (HV), observou-se os critérios estabelecidos pela norma ASTM E92:2017.

3.6 Difração de raios-X

Para caracterização dos nitretos formados na superfície das amostras após a NDE, executou-se o ensaio de difração de raios-X convencional empregando um difratômetro modelo Shimadzu XRD – 7000 X-Ray. Antes da realização dos ensaios, fez-se uma limpeza ultrassônica em uma amostra de cada grupo de estudo. Uma amostra de cada grupo descrito na tabela 3 foi submetida à difração de Raios-X. Logo, 5 amostras foram usinadas com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico e 5 com eletrodo ferramenta de grafita, sendo uma para cada tipo de fluido dielétrico. A Tabela 5 elenca os parâmetros operacionais utilizados no ensaio.

Tabela 5 - Parâmetros adotados no ensaio de DRX.

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

Fonte: O autor, 2020.

3.7 Rugosidade Superficial

Para avaliar as rugosidades superficiais das amostras após o processo PMEDM, utilizou-se um rugosímetro portátil, modelo Rugosurf 20, marca Tesa. Os critérios da norma NBR ISO 4287:2002 foram rigorosamente seguidos para se mensurar as rugosidades superficiais. As amostras foram fixadas numa base na qual o rugosímetro foi apoiado, a fim de evitar qualquer interferência humana no processo.

O rugosímetro, a base de fixação das amostras e de apoio do rugosímetro e o processo de medição estão ilustrados na Figura 30 (a), (b) e (c), respectivamente.

O comprimento de amostragem (cut-off) escolhido foi de 2,5mm e cada amostra foi avaliada três vezes em direções aleatórias. Como foram usinadas 5 amostras de cada grupo, gerou-se 15 valores para cada estudo separadamente e, ao todo, 75 medições para as amostras usinadas com eletrodos ferramenta de cobre eletrolítico e 75 medições para as usinadas com eletrodos ferramenta de grafita, obtendo-se a composição média e desvio padrão, garantindo, assim, maior confiabilidade da análise. Registraram-se as leituras dos parâmetros da Rugosidade Média Aritmética (Ra), Rugosidade Média (Rz), Desvio Médio Quadrático (Rq) e Rugosidade Total (Rt).

Figura 30 - Medição da rugosidade superficial - a) Rugosímetro; b) Base de fixação das amostras e apoio do rugosímetro; c) Processo de medição.



Fonte: O autor, 2020.

3.8 Microscopia eletrônica de varredura – MEV

Para a caracterização por microscopia eletrônica de varredura (MEV), empregou-se dez amostras, sendo duas para o fluido dielétrico composto apenas de água deionizada e ureia farmacológica e oito para cada um dos fluidos dielétricos que, além de água deionizada com ureia, continham pós abrasivos SiC de 600, 1000, 1500 e 2500 mesh, respectivamente e para cada tipo de eletrodo ferramenta.

3.9 Verificação do desempenho da usinagem

No processo de EDM o desempenho da usinagem é mensurado por meio de três parâmetros principais: a) TMR – Taxa de remoção do material; b) TD – Taxa de

desgaste do eletrodo; c) 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 6 apresenta o peso específico desses materiais.

Tabela 6 - Massa específica dos materiais.

Material	Massa específica ρ (g.mm⁻³)
AISI 4140	0,00785
Cobre eletrolítico	0,00892
Grafita	0,00167

Fonte: O autor, 2020.

Durante a realização dos ensaios, com o emprego de uma balança eletrônica de precisão, modelo Mark M 4102 – classe II mensuraram-se as massas das amostras antes e após a cada série de usinagem por descargas elétricas, para todos os tipos de fluidos dielétricos e tempos, para determinação da variação de massa.

Com as variações das massas determinadas foi possível calcular a taxa de remoção do material do eletrodo peça, ou seja, determinar a TRM de cada ciclo de usinagem que é, na realidade, o volume removido das amostras durante o tempo pré-determinado em minutos.

Da mesma forma, foi possível calcular a taxa de desgaste dos eletrodos ferramenta para cada ciclo de usinagem, ou seja, determinar a TD que, de forma análoga, é o volume removido dos eletrodos durante o tempo de usinagem.

O último parâmetro é obtido pela razão entre a TD e a TRM e é dado de forma percentual. Esse parâmetro é denominado desgaste volumétrico relativo ou, simplesmente, DVR e relaciona o volume perdido do eletrodo ferramenta pelo volume retirado do eletrodo peça.

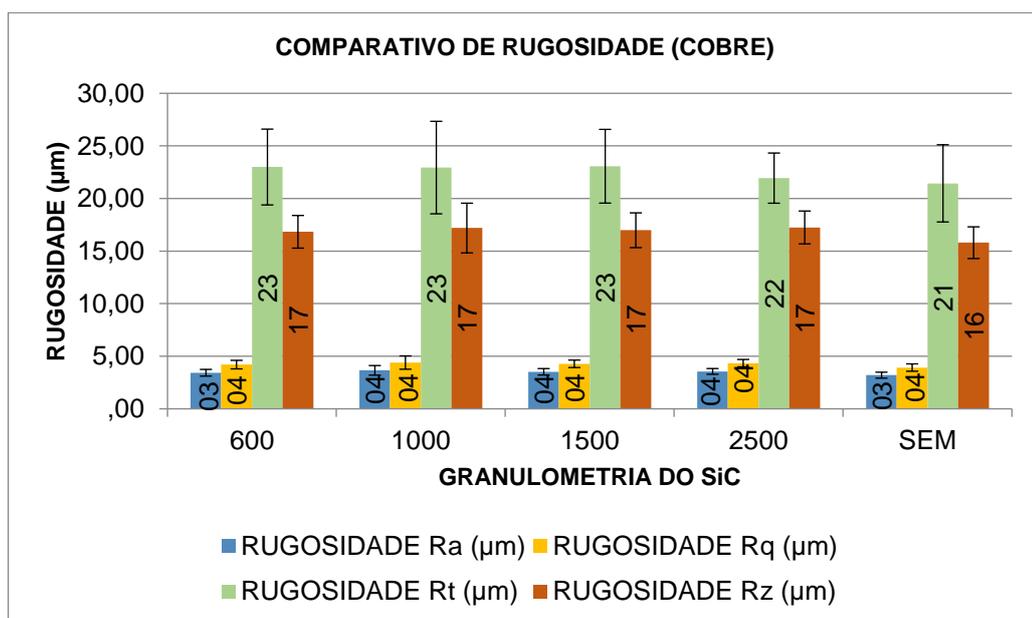
4 RESULTADOS

4.1 Rugosidade das amostras nitretadas e usinadas com eletrodo de cobre

Na Figura 31, observa-se uma comparação das rugosidades superficiais obtidas nos diferentes parâmetros para cada tipo de fluido empregado para as amostras usinadas com cobre eletrolítico. Nota-se que, levando-se em consideração o desvio padrão, os valores para todos os parâmetros de rugosidades analisados ficaram dentro do mesmo intervalo de confiança não demonstrando diferenças significativas quando se utilizou ou não pó abrasivo SiC misturado ao fluido dielétrico na usinagem EDM do aço AISI 4140.

O parâmetro R_t apontou uma maior rugosidade por considerar a variação máxima em todo o cut-off. Houve um aumento, pouco expressivo, nas amplitudes das rugosidades superficiais nas usinagens com pó abrasivo dos parâmetros R_a , R_t , R_z e R_q . Os percentuais de aumento da rugosidade R_a em função da granulometria do SiC estão demonstrados na Tabela 7, e o aumento mínimo foi de 6,3% com a adição do pó abrasivo SiC com granulometria de 600 mesh e o aumento máximo foi de 15,6% com a adição do pó abrasivo SiC de 1000 mesh.

Figura 31 - Média das rugosidades das amostras usinadas com e sem adição de pó abrasivo ao fluido dielétrico empregando eletrodo ferramenta cobre eletrolítico.



Fonte: O autor, 2020.

Tabela 7 - Avaliação da rugosidade superficial Ra das amostras usinadas com e sem pó adicionado ao fluido dielétrico com eletrodo de cobre eletrolítico.

PARÂMETRO DE RUGOSIDADE Ra (μm)				
Tipo de fluido dielétrico	Granulometrias do SiC - (PMEDM)			
	600	1000	1500	2500
Com pó abrasivo	3,4 \pm 0,3	3,7 \pm 0,5	3,5 \pm 0,3	3,6 \pm 0,3
Sem abrasivo	3,2 \pm 0,3			
Variação percentual da rugosidade	6,3%	15,6%	9,4%	12,5%

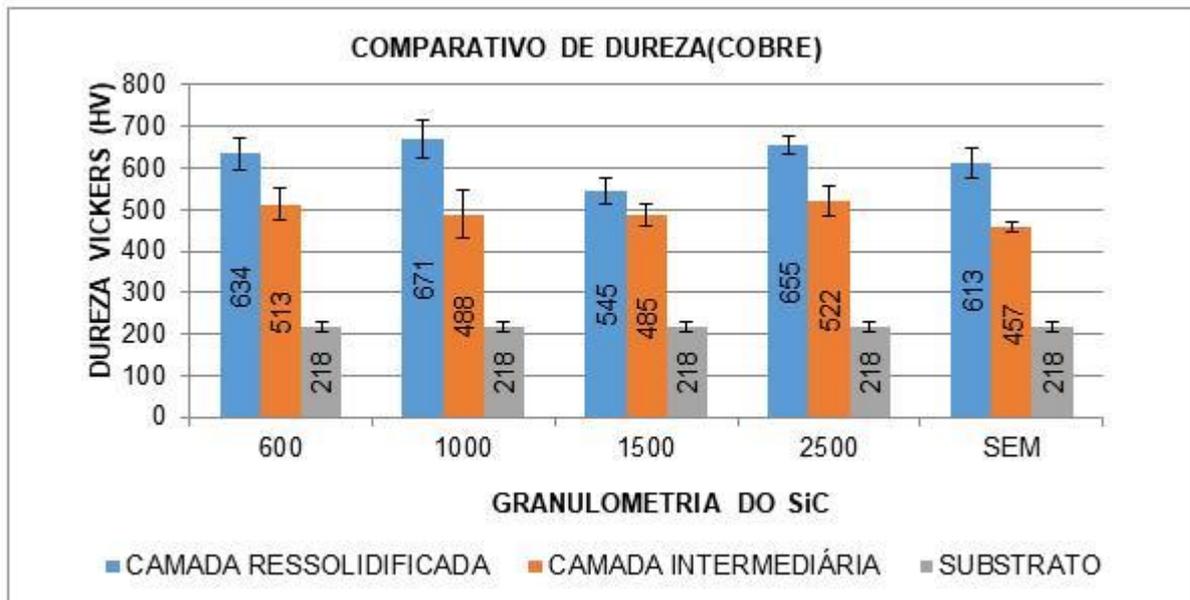
Fonte: O autor, 2020.

Segundo Marashi *et al.* (2016), recentes estudos demonstraram que a adição de pós abrasivos ao fluido dielétrico favorece a produção de peças com boa qualidade superficial. No entanto, com os resultados obtidos, observa-se que não houve redução da rugosidade superficial no processo PMEDM em comparação ao processo EDM utilizando-se água deionizada como fluido dielétrico. Na verdade, quando se empregou pó abrasivo SiC misturado ao fluido dielétrico, houve um ligeiro aumento da rugosidade superficial. A menor rugosidade encontrada foi 3,2 \pm 0,3 μm , quando se empregou o processo EDM; e a maior foi 3,7 \pm 0,5 μm , quando se empregou o processo PMEDM com SiC 1000 mesh. No entanto, percebe-se uma leve tendência de diminuição da rugosidade, à medida que a granulometria do abrasivo diminui.

4.2 Dureza das amostras nitretadas e usinadas com eletrodo de cobre

A Figura 32 apresenta os resultados da média da microdureza Vickers de cada camada em função do processo EDM (sem pó abrasivo) e do processo PMEDM com pó abrasivo SiC, misturado ao fluido dielétrico, com suas respectivas granulometrias empregadas nas amostras usinadas com eletrodo-ferramenta de cobre eletrolítico.

Figura 32 - Média das durezas das camadas após processos EDM e PMEDM.



Fonte: O autor, 2020.

Observa-se na Figura 32 que, nas camadas intermediárias, a dureza média de 522HV foi a maior obtida pelo processo PMEDM, quando se utilizou a granulometria de 2500 mesh do pó abrasivo SiC. Ao analisar as camadas ressolidificadas, observa-se que a dureza média de 671HV foi a maior obtida pelo processo PMEDM, quando se utilizou a granulometria de 1000 mesh do pó abrasivo SiC. Os resultados também evidenciam que, independentemente da granulometria do pó abrasivo SiC empregada no processo PMEDM, todas as durezas, tanto das camadas ressolidificadas quanto das camadas intermediárias, foram maiores do que as geradas pelo processo EDM, ou seja, sem o emprego do pó abrasivo SiC. Numa análise mais pormenorizada, percebe-se que não houve muita discrepância entre os resultados obtidos no processo PMEDM com a granulometria de 600 e 2500 mesh.

A Tabela 8 apresenta os resultados das médias e dos desvios padrões da microdureza Vickers da camada nitretada obtidas, quando se utilizou o processo EDM e o processo PMEDM com pó de SiC, ambos com fluido dielétrico de água deionizada mais ureia, comparando-os com os resultados do substrato do material base do aço AISI 4140.

Nos cinco casos verificou-se um relativo aumento da dureza média nas camadas intermediárias em relação a do substrato. Os resultados indicaram que, para a usinagem sem adição de SiC, a dureza teve um acréscimo médio de 110% e, para

as usinagens com adição de SiC ao fluido dielétrico, as durezas tiveram um acréscimo mínimo de 120%.

Tabela 8 - Valores de microdureza Vickers pelos processos EDM e PMEDM com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico.

	Material base AISI 4140	Camadas intermediárias nitretadas				
		EDM	PMEDM			
			Granulometria (mesh)			
		0	600	1000	1500	2500
Dureza Vickers (HV)	218±13	457±13	513±39	488±57	485±26	522±35
Acréscimo da dureza	-	110%	135%	124%	123%	139%

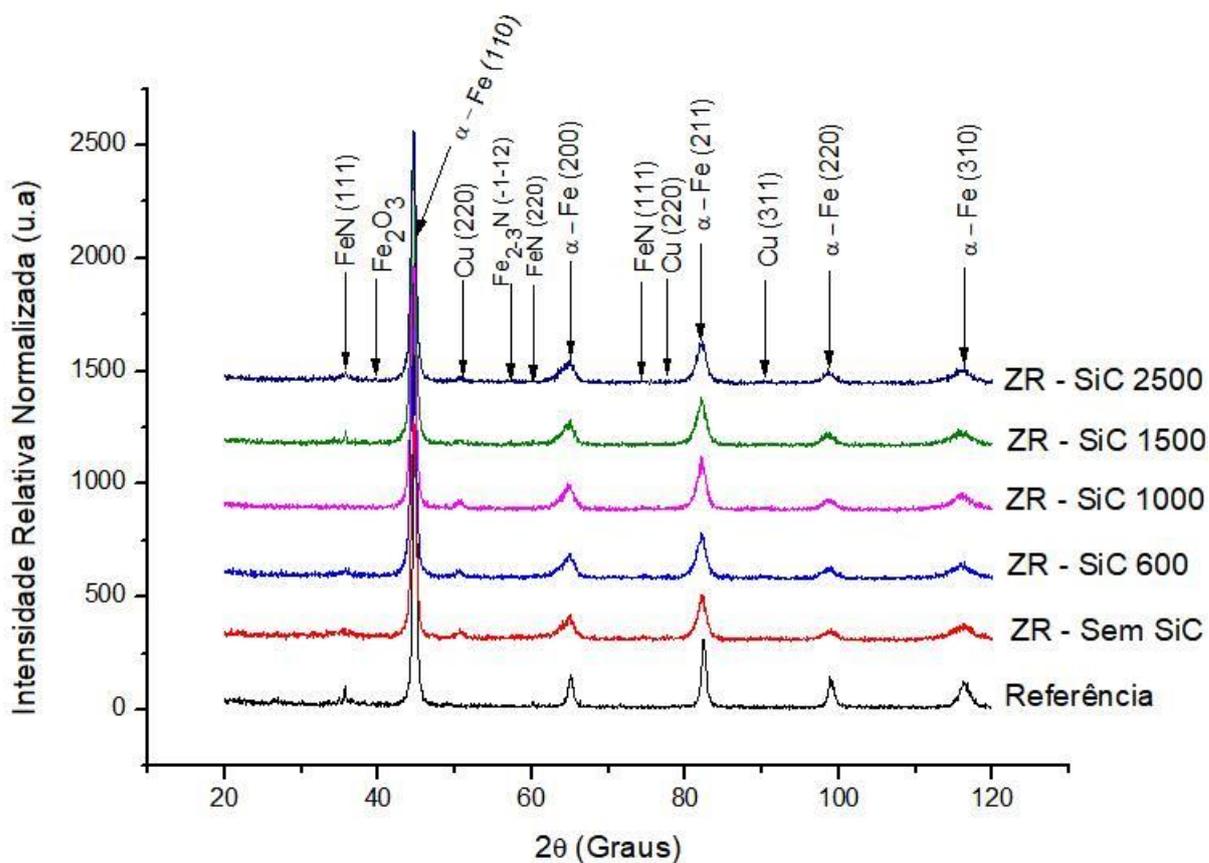
Fonte: O autor, 2020.

Ao mensurar as microdurezas das camadas nitretadas pelo processo NDE com método Vickers e compará-las com a microdureza do material normalizado, percebeu-se que as camadas refundidas e as camadas intermediárias das amostras apresentaram maiores microdurezas. Sahu *et al.* (2018) acreditam que esse considerável aumento na dureza é provocado, além da formação de nitretos, também pela formação de compostos intermetálicos oriundos das incorporações do pó abrasivo SiC na superfície do material usinado pelo processo PMEDM. Observando a Tabela 8, o maior valor microdureza apresentado, em relação ao substrato, de até 139%, quando se utilizou o processo PMEDM com adição de SiC 2500 mesh.

4.3 Difração de raios-X das amostras usinadas com eletrodo de cobre

A Figura 33 apresenta a sobreposição dos difratogramas, configuração θ - 2θ , executados nas camadas ressolidificadas após os processos de usinagem EDM e PMEDM das amostras do aço AISI 4140 para análise. Pela análise difratográfica foram identificados nitretos do tipo FeN, Fe₂N e Fe₃N. Provavelmente, devido ao baixo percentual de cromo e molibdênio, não se detectou a formação de nitretos desses elementos.

Figura 33 - Difratomogramas, configuração θ - 2θ do aço AISI 4140: Nitretados pelos processos EDM e PMEDM – Eletrodo de cobre.



Fonte: O autor, 2020.

Conforme mostrado no gráfico, todos os difratogramas apresentaram pico de Fe- α nos planos cristalográficos (110), (200), (211), (220) e (310). No entanto, percebe-se que a base dos picos dos difratogramas que representam as usinagens pelos processos EDM e PMEDM ficaram distorcidas e um pouco mais alargadas do que a base do difratograma da referência. Provavelmente, isso ocorreu devido à formação de nitretos pelo processo NDE.

Óxidos de cobre e de ferro também foram detectados. O oxigênio necessário para a formação desses compostos estava presente na água e na ureia e o cobre foi fornecido pelo eletrodo ferramenta. Os nitretos de ferros, os óxidos de ferro e de cobre, bem como os picos, são compatíveis aos encontrados por Santos (2013).

Através das análises do difratograma do ensaio de difração de raios-X, conforme gráfico da Figura 33, comprovou-se que ocorre a nitretação ao empregar o processo de descargas elétricas. A concentração 40g.L⁻¹ de ureia diluída em água

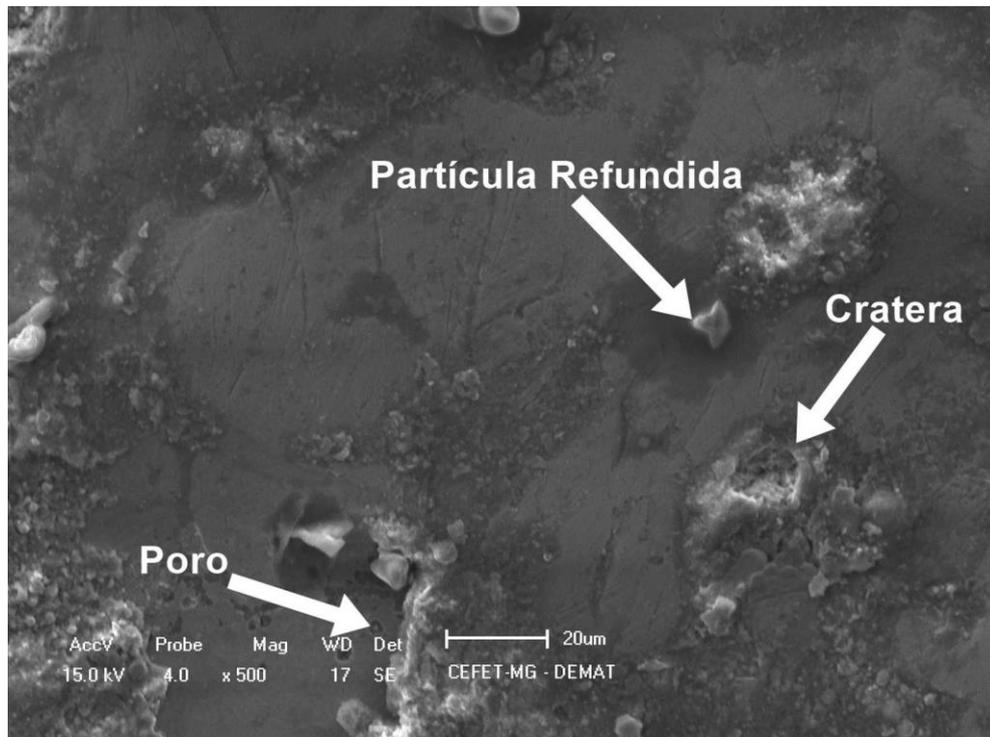
deionizada para formação do fluido dielétrico favoreceu a decomposição do nitrogênio e, conseqüentemente, a implantação nas superfícies das amostras do aço AISI 4140 com a formação de nitretos pelo processo NDE conforme observado por Santos (2013). A difração por raios-X também indicou a presença de átomos de cobre na camada refundida, provavelmente, oriunda do material do eletrodo ferramenta. O estudo de Kuriachen e Mathew (2014) também confirmou a transferência de partículas do eletrodo ferramenta para as superfícies das amostras. Isso se deu porque o eletrodo também absorve parte da energia gerada pelo canal de plasma, funde-se com o material usinado e deposita-se na camada refundida. Para Molinetti *et al.* (2015), isso evidencia que o processo EDM pode ser aplicado para modificar as propriedades mecânicas superficiais dos materiais.

4.4 Microscopia Eletrônica de varredura das amostras usinadas com cobre

As Figuras 34, 35, 36, 37 e 38 ilustram imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do topo das superfícies das amostras do aço AISI 4140 usinadas pelos processos EDM (sem adição de pó abrasivo) e PMEDM (com adição de pó abrasivo) utilizando o cobre eletrolítico como eletrodo ferramenta. Observam-se nas imagens que há formação de partículas refundidas, poros, algumas microtrincas e crateras, características próprias da morfologia de superfícies usinadas por descargas elétricas cujas temperaturas do processo chegam a quase 20.000 °C e potencializam a formação de tais irregularidades nas superfícies. A Figura 34 ilustra a superfície de uma amostra usinada pelo processo EDM (sem adição de SiC).

As Figuras 35, 36, 37 e 38 ilustram as superfícies das amostras usinadas pelo processo PMEDM com SiC 600, SiC 1000, SiC 1500 e SiC 2500 mesh, respectivamente. A Figura 35 mostra a superfície de uma amostra de aço AISI 4140 usinada e nitretada por descargas elétricas empregando um eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico pelo processo PMEDM com adição de SiC 600 mesh ao fluido dielétrico aquoso com ureia. Percebem-se muitas ranhuras sobre a superfície em função do abrasivo, poucas microtrincas, algumas partículas refundidas e crateras.

Figura 34 - Microscopia eletrônica de varredura - Usinagem EDM.



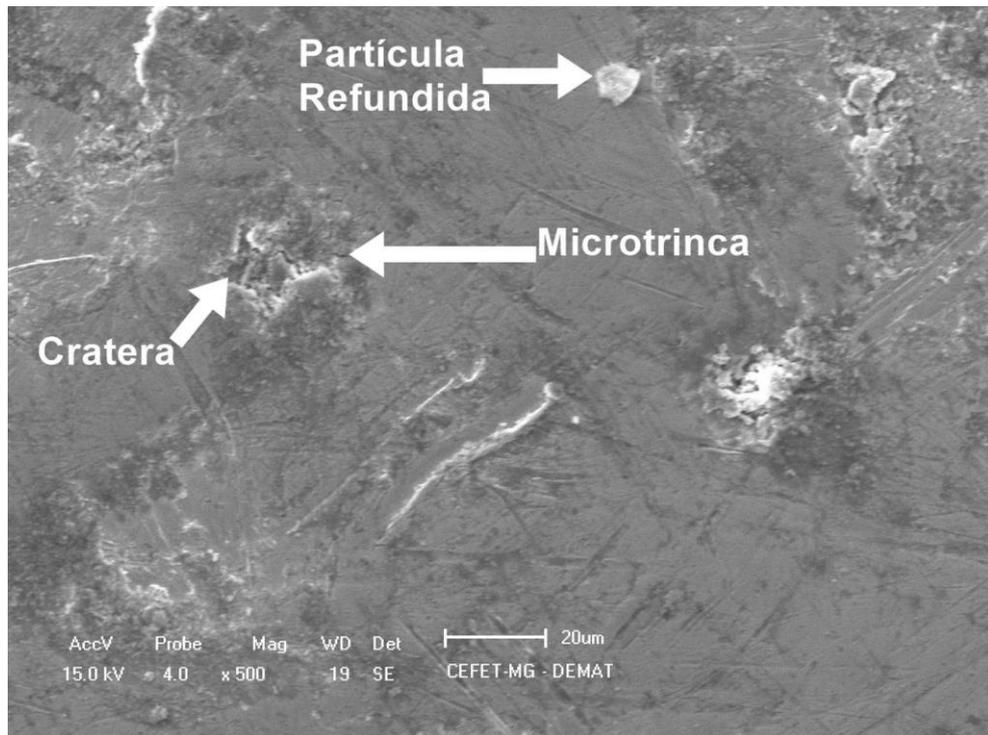
Fonte: O autor, 2020.

A Figura 36 mostra a superfície de uma amostra de aço AISI 4140 usinada e nitretada por descargas elétricas empregando um eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico pelo processo PMEDM com adição de SiC 1000 mesh ao fluido dielétrico aquoso com ureia. Percebem-se várias microtrincas, muitas crateras, partículas refundidas em forma globular sobre a superfície e poros.

A Figura 37 mostra a superfície de uma amostra de aço AISI 4140 usinada e nitretada por descargas elétricas empregando um eletrodo-ferramenta de cobre eletrolítico pelo processo PMEDM com adição de SiC 1500 mesh ao fluido dielétrico aquoso com ureia. Percebem-se várias micropartículas refundidas e alguns microporos.

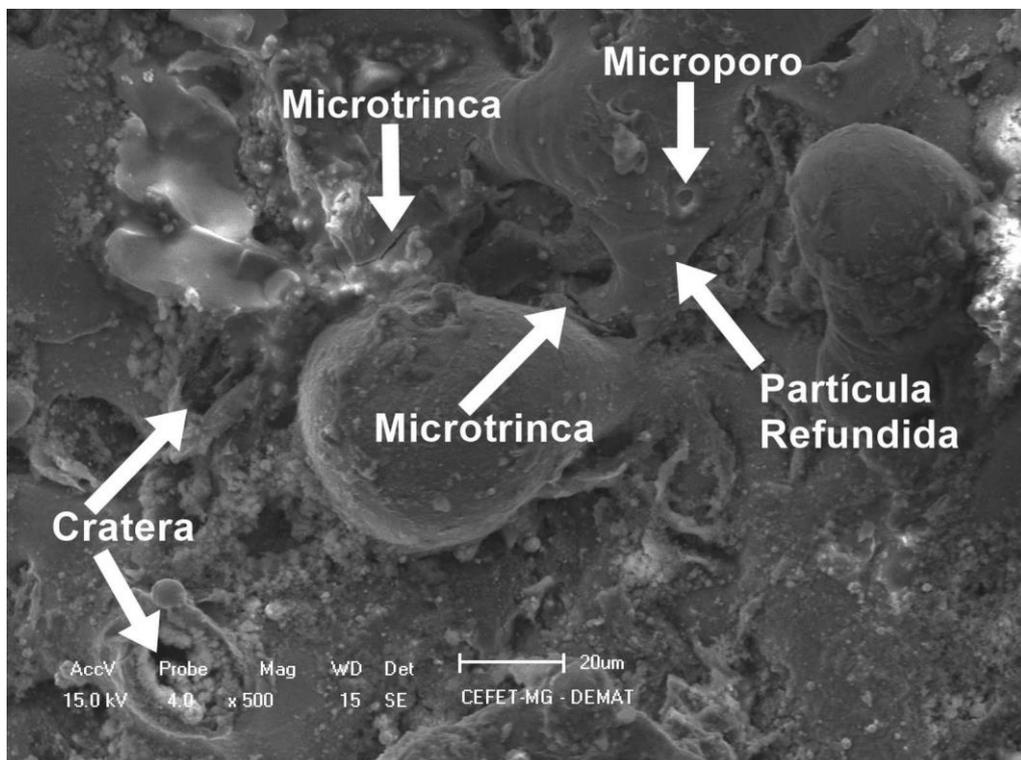
A Figura 38 mostra a superfície de uma amostra de aço AISI 4140 usinada e nitretada por descargas elétricas empregando um eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico pelo processo PMEDM com adição de SiC 2500 mesh ao fluido dielétrico aquoso com ureia. Observa-se que as amostras usinadas pelo processo PMEDM com adição de SiC com granulometria de 2500 mesh não apresentaram microtrincas e crateras mais suaves que as demais amostras analisadas. Além disso, apresentou partículas refundidas e microporos na superfície.

Figura 35 - Microscopia eletrônica de varredura – Usinagem PMEDM com SiC 600.



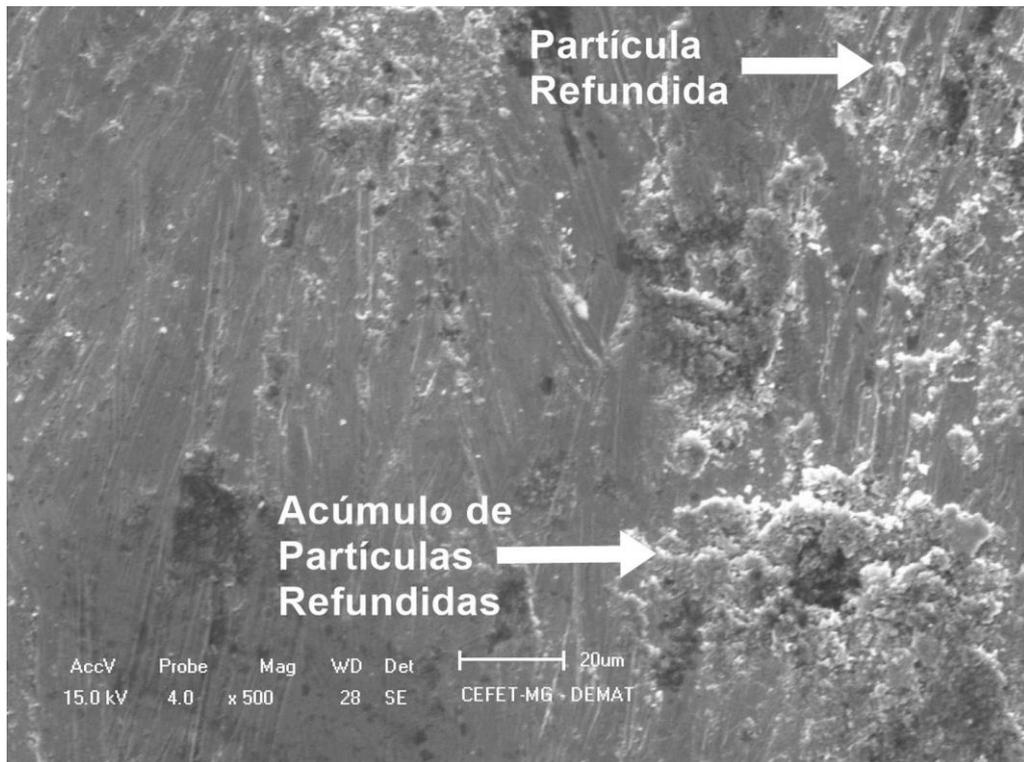
Fonte: O autor, 2020.

Figura 36 - Microscopia eletrônica de varredura – Usinagem PMEDM com SiC 1000.



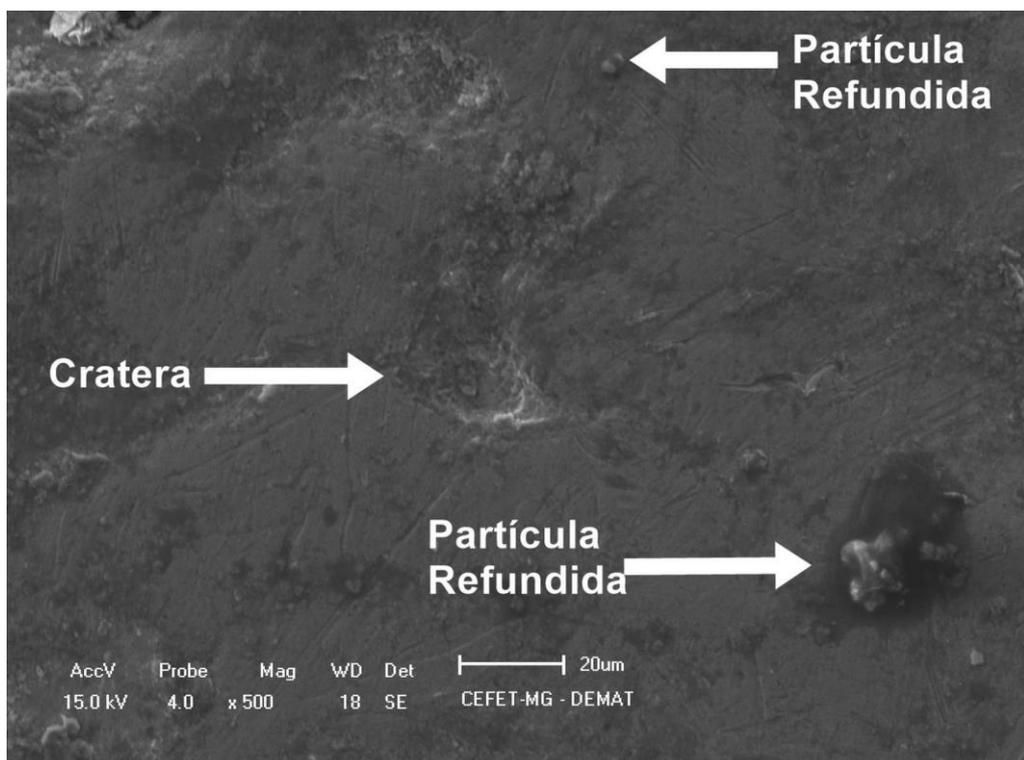
Fonte: O autor, 2020.

Figura 37 - Microscopia eletrônica de varredura – Usinagem PMEDM com SiC 1500.



Fonte: O autor, 2020.

Figura 38 - Microscopia eletrônica de varredura – Usinagem PMEDM com SiC 2500.



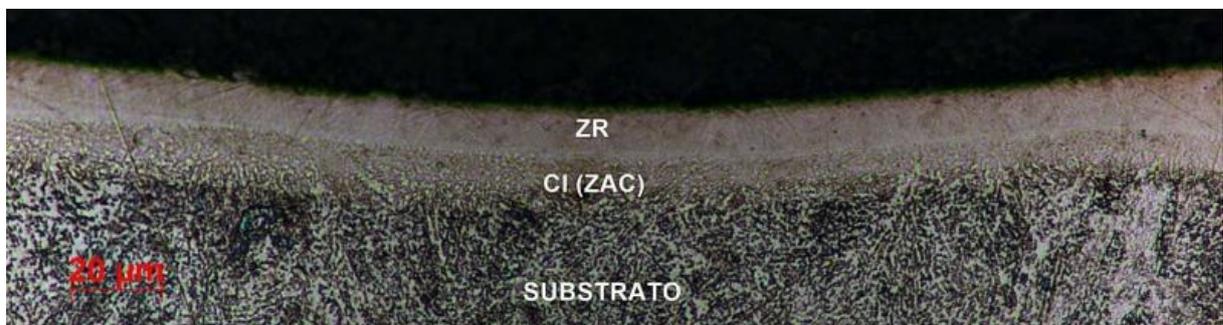
Fonte: O autor, 2020.

As imagens de MEV das amostras ilustradas pelas Figuras 35 e 38 mostraram morfologias bem similares. Todas as imagens com aumento de 500x. De uma forma geral, tanto o processo EDM quanto o processo PMEDM para nitretação do aço AISI 4140 quase não apresentaram microtrincas e poros nas camadas refundidas o que corrobora as observações de Molinetti *et al.* (2015).

4.5 Formações das camadas nitretadas das amostras usinadas com cobre

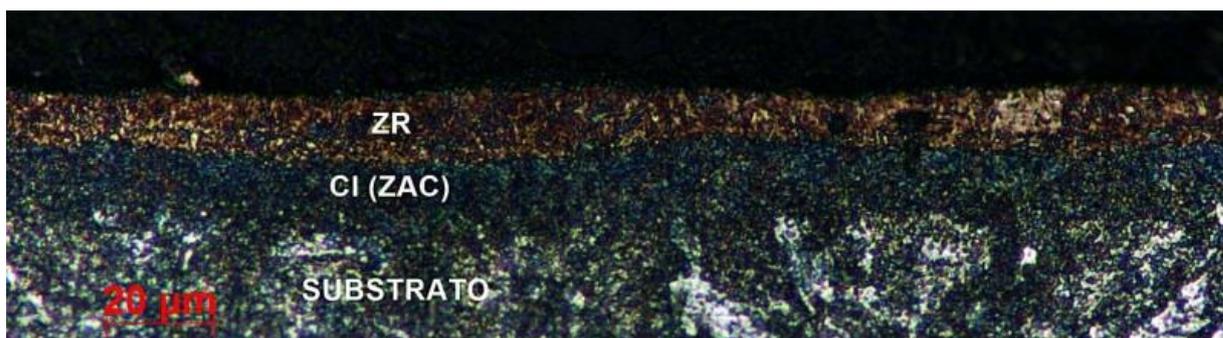
Através da microscopia ótica das amostras que foram seccionadas e preparadas para ensaios metalográficos, puderam-se obter os resultados das análises microestruturais. As citadas microestruturas são ilustradas nas Figuras 39, 40, 41, 42 e 43. A Figura 39 apresenta a microestrutura da amostra submetida ao processo NDE cujo fluido dielétrico não teve adição de pó de SiC. As figuras 43, 44, 45 e 46 tiveram pó de SiC de 600, 1000, 1500 e 2500 mesh, respectivamente, adicionados ao fluido dielétrico aquoso com ureia durante o processo de NDE.

Figura 39 - Microscopia ótica – ampliação de 50x da amostra de aço AISI 4140 – Processo NDE sem pó abrasivo no fluido dielétrico.



Fonte: O autor, 2020.

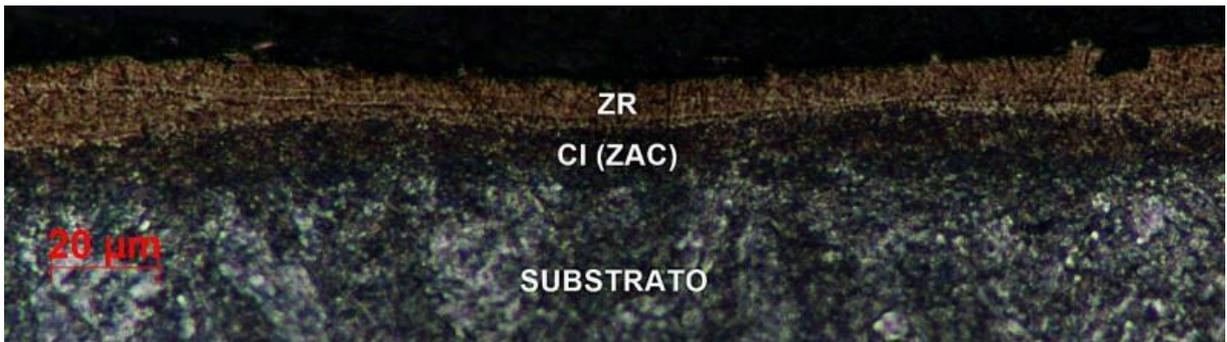
Figura 40 - Microscopia ótica – ampliação de 50x da amostra de aço AISI 4140 – Processo NDE com pó abrasivo SiC 600 mesh adicionado ao fluido dielétrico.



Fonte: O autor, 2020.

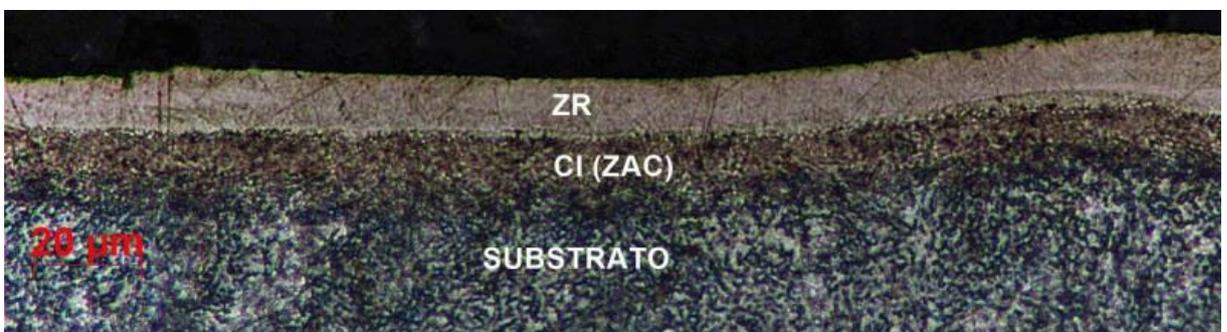
Em todas as amostras é possível observar três camadas distintas: a) a camada ressolidificada também denominada camada refundida ou camada branca (ZR); b) a camada intermediária (CI); c) a camada do substrato ou metal base (MB).

Figura 41 - Microscopia ótica – ampliação de 50x da amostra de aço AISI 4140 – Processo NDE com pó SiC 1000 mesh adicionado ao fluido dielétrico.



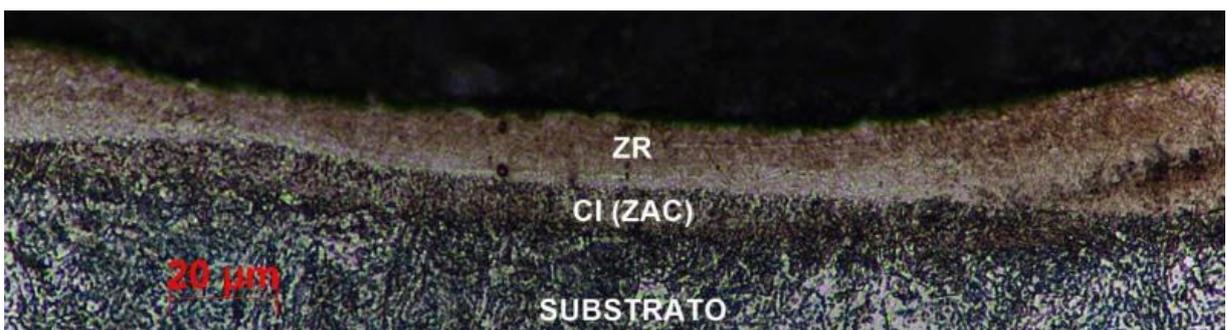
Fonte: O autor, 2020.

Figura 42 - Microscopia ótica – ampliação de 50x da amostra de aço AISI 4140 – Processo NDE com pó SiC 1500 mesh adicionado ao fluido dielétrico.



Fonte: O autor, 2020.

Figura 43 - Microscopia ótica – ampliação de 50x da amostra de aço AISI 4140 – Processo NDE com pó SiC 2500 mesh adicionado ao fluido dielétrico.



Fonte: O autor, 2020.

Percebe-se pelas imagens que as camadas nitretadas pelo processo NDE sem a adição do pó, quanto as que foram com a adição de SiC, apresentaram as características próprias do processo.

Pelas imagens 39, 40, 41, 42 e 43, geradas pelo processo de microscopia ótica, foi possível perceber a formação das camadas refundidas e das camadas intermediárias bem distintas entre si. Devido às altas temperaturas geradas pelas descargas elétricas, uma parte dos materiais removidos durante a usinagem é depositado na superfície da amostra, solidifica-se novamente e forma a camada refundida. A camada intermediária, formada entre o substrato e a camada refundida, também é denominada camada nitretada e é a parte do material afetada termicamente. Visualmente, nas imagens MO, é possível perceber que a coloração da camada intermediária difere das colorações do substrato quanto da camada refundida. Estudos anteriores atribuem isso à difusão do nitrogênio através do substrato oriundo da ureia para formar os nitretos (CAMARGO, 2006).

Os cálculos para determinação das espessuras médias e dos respectivos desvios padrões das camadas intermediárias foram executados através de quinze medições em diferentes pontos com o emprego do software Axio Vision Le64. Os resultados são mostrados na Tabela 9. Percebe-se que a maior espessura média, de $12,3 \pm 0,9 \mu\text{m}$, da camada intermediária, ocorreu com o processo NDE em que utilizou fluido dielétrico composto de água deionizada com pó de SiC de 600 mesh. Neste estudo, não se estimou a espessura das camadas ressolidificadas.

Tabela 9 - Espessuras das camadas nitretadas por NDE do aço AISI 4140 pelos processos EDM e PMEDM.

Tipo de processo	Processo EDM (usinagem sem pó abrasivo)		Processo PMEDM (usinagem com pó abrasivo)		
Granulometria (mesh)	0	600	1000	1500	2500
Espessuras das camadas (μm)	$8,8 \pm 1,2$	$12,3 \pm 0,9$	$11,5 \pm 2,1$	$9,9 \pm 1,2$	$10,3 \pm 1,3$

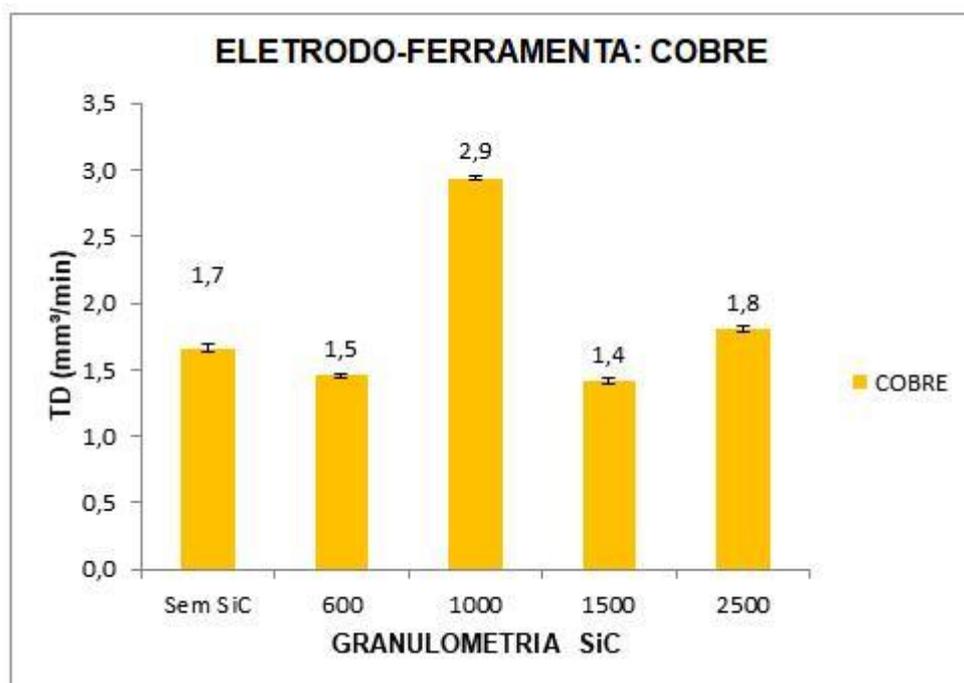
Fonte: O autor, 2020.

4.6 Desempenho nas usinagens com eletrodo de cobre (TD, TRM e DVR)

O desempenho da usinagem e nitretação pelos processos EDM e PMEDM foi avaliado através das análises dos parâmetros TD, TRM e DVR cujos valores estão apresentados nas Figuras 44, 45 e 46, respectivamente.

A Figura 44 apresenta uma análise detalhada das taxas de desgaste nos eletrodos ferramenta de cobre. Dentre as usinagens com pó abrasivo misturado ao fluido dielétrico, ou seja, onde se empregou o processo PMEDM, a que apresentou a maior taxa de desgaste no eletrodo-ferramenta de cobre eletrolítico foi com a aplicação do abrasivo SiC de granulometria 1000 mesh, com um valor médio de $2,9\text{mm}^3\cdot\text{min}^{-1}$. A menor taxa ocorreu com a adição do SiC 1500 mesh onde se obteve um desgaste médio de $1,4\text{mm}^3\cdot\text{min}^{-1}$. Na sua usinagem, apenas com o processo EDM, ou seja, sem aplicação de qualquer pó abrasivo, a taxa de desgaste verificada no eletrodo foi de $1,7\text{mm}^3\cdot\text{min}^{-1}$.

Figura 44 - Taxa de desgaste (TD) do eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico pelos processos EDM e PMEDM.



Fonte: O autor, 2020.

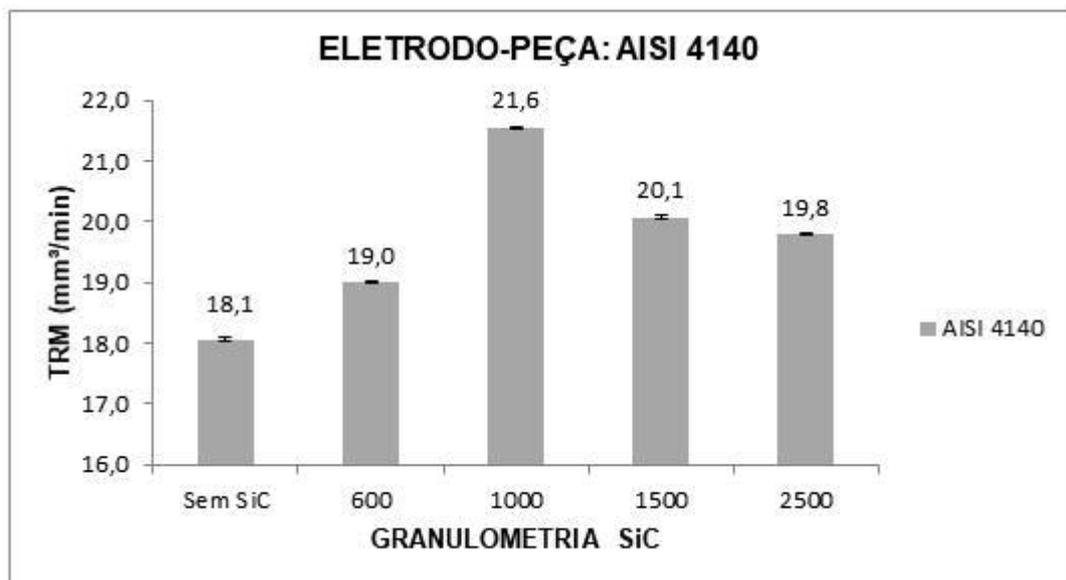
As taxas de remoção de material dos eletrodos-peças de aço AISI 4140 apresentaram valores similares entre si. A usinagem pelo processo PMEDM

apresentou a maior TRM que foi de $21,6\text{mm}^3\cdot\text{min}^{-1}$ com o emprego do pó abrasivo SiC 1000 mesh mixado ao fluido dielétrico. Já a usinagem pelo processo EDM apresentou uma TRM de $18,1\text{mm}^3\cdot\text{min}^{-1}$. A Figura 45 apresenta os valores das TRM's obtidos após as usinagens por eletroerosão.

O DVR é um parâmetro que, quanto menor o seu valor, melhor foi a execução da usinagem, pois significa que houve uma maior retirada de material com um menor desgaste do eletrodo ferramenta e, pela Figura 46, observa-se que o menor valor apontado foi de 7,0% pelo processo PMEDM, quando se adicionou pó abrasivo SiC de 1500 mesh ao fluido dielétrico. O pior valor obtido também foi pelo processo PMEDM, quando se adicionou SiC de 1000 mesh ao fluido dielétrico com 13,6%.

A Figura 45 evidencia que, com todas as granulometrias do abrasivo SiC estudadas no processo PMEDM, encontrou-se uma maior TRM em relação ao processo EDM. A maior TRM calculada, de $21,6\text{mm}^3\cdot\text{min}^{-1}$, foi com o emprego da granulometria 1000 mesh.

Figura 45 - Taxa de remoção (TRM) de material do eletrodo peça de aço AISI 4140 pelos processos EDM e PMEDM.

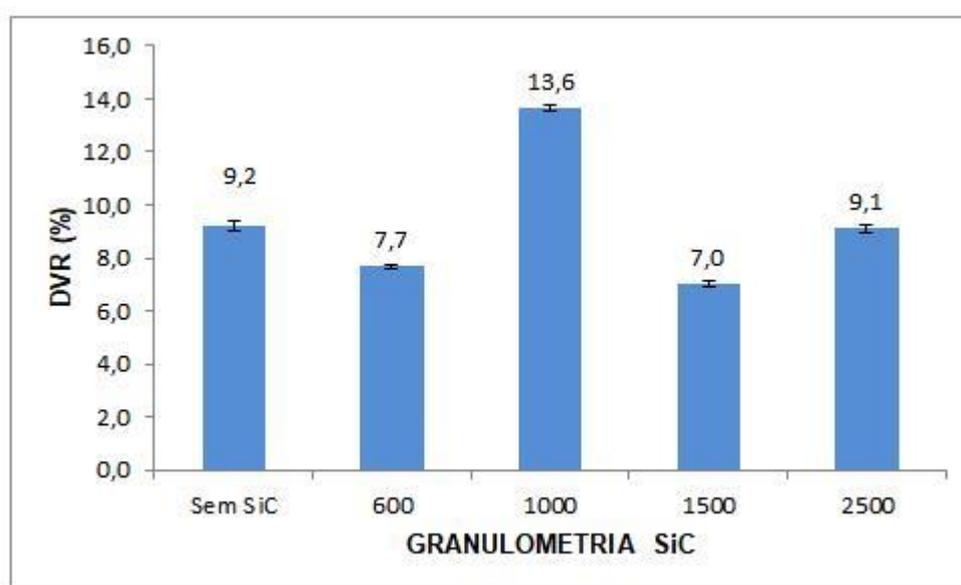


Fonte: O autor, 2020.

No entanto, a usinagem com SiC 1000 foi a que apresentou também a maior rugosidade superficial, a maior taxa de desgaste do eletrodo e a que gerou as maiores quantidades de microtrincas e poros na superfície, conforme imagem da Figura 36 registrada pelo ensaio de microscopia eletrônica de varredura. Os valores do DVR

variaram entre 7,0% a 13,6%. Neste quesito, o melhor desempenho da usinagem foi com a granulometria 1500 mesh que apresentou o menor valor percentual do DVR. Os resultados ratificam o que foi dito por Marashi *et al.* (2016), quando afirmaram que, para se obter um aumento da eficiência da usinagem pelo processo PMEDM, tais como aumento da TRM, diminuição da TD e baixo DVR, é necessário uma adequada escolha do pó abrasivo e da sua granulometria.

Figura 46 - Desgaste volumétrico relativo entre os eletrodos de cobre eletrolítico e a amostra de aço AISI 4140.



Fonte: O autor, 2020.

4.7 Rugosidade das amostras nitretadas e usinadas com eletrodo grafita

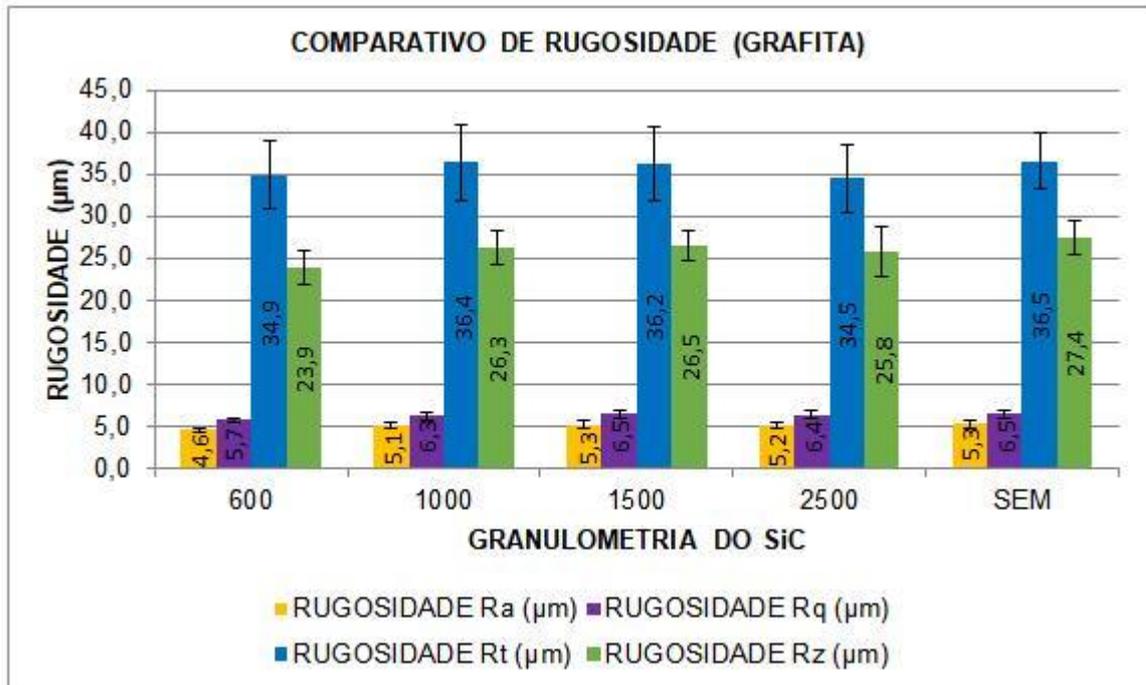
Através da Figura 47, foi possível comparar as rugosidades das superfícies das amostras nos parâmetros Ra, Rq, Rt e Rz obtidas após a usinagem e nitretação por descargas elétricas com eletrodo ferramenta grafita para cada tipo de fluido formado por solução aquosa com ureia. Observou-se que os menores valores médios para a maioria dos parâmetros de rugosidades analisados foram obtidos, quando se utilizou o pó abrasivo SiC 600 mesh misturado ao fluido dielétrico na usinagem EDM do aço AISI 4140. Com exceção do parâmetro Rt, quando se utilizou o pó abrasivo SiC 2500 mesh.

Com os resultados obtidos na PMEDM com SiC, ao empregar a grafita como eletrodo ferramenta, percebeu-se uma ligeira diminuição das rugosidades superficiais,

corroborando Marashi *et. al.* (2016) ao afirmarem que a introdução de abrasivos nos fluidos favorece a obtenção de produtos com menores amplitudes das rugosidades superficiais.

A menor rugosidade Ra média encontrada foi $4,6\pm 0,3\mu\text{m}$ quando se empregou o processo PMEDM com SiC de 600 mesh e os maiores valores médios foi $5,3\pm 0,5\mu\text{m}$, quando se empregou o processo EDM, ou seja, sem o emprego de abrasivos e PMEDM com SiC de 1500 mesh.

Figura 47 - Média das rugosidades das amostras usinadas com e sem adição de pó abrasivo ao fluido dielétrico empregando eletrodo ferramenta grafita.



Fonte: O autor, 2020.

Tabela 10 - Avaliação da rugosidade superficial Ra das amostras usinadas com e sem pó adicionado ao fluido dielétrico com eletrodo de Grafita.

Parâmetro de rugosidade Ra (μm)				
Tipo de fluido dielétrico	Granulometrias do SiC - (PMEDM)			
	600	1000	1500	2500
Com pó abrasivo	$4,6\pm 0,3$	$5,1\pm 0,4$	$5,3\pm 0,5$	$5,2\pm 0,4$
Sem abrasivo	$5,3\pm 0,5$	$5,3\pm 0,5$	$5,3\pm 0,5$	$5,3\pm 0,5$
Variação percentual da rugosidade	- 13%	- 4%	0 %	- 2%

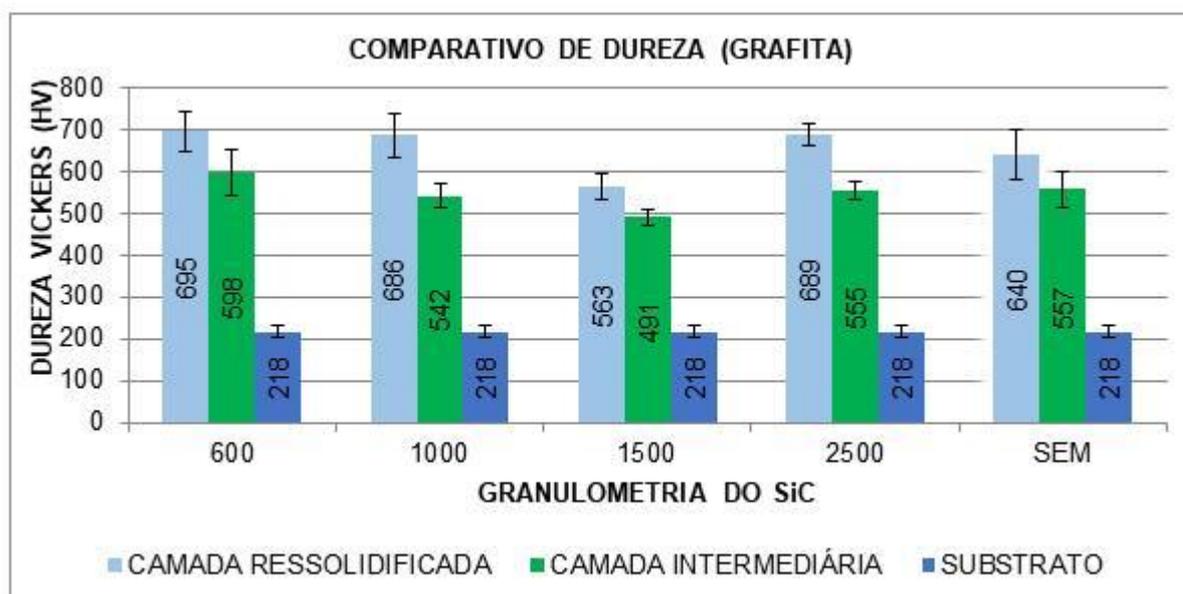
Fonte: O autor, 2020.

As variações nas amplitudes das rugosidades superficiais foram tão ínfimas que seria correto afirmar que não houve alterações significativas. A Tabela 10 aponta as variações percentuais da rugosidade Ra de acordo com a granulometria do abrasivo empregado. A máxima variação negativa foi de 13% com a adição do SiC de 600 mesh e a mínima variação negativa foi de 2% com a adição do SiC de 2500 mesh. Percebe-se que não houve variação com o emprego do SiC de 1500 mesh.

4.8 Dureza das amostras nitretadas e usinadas com eletrodo grafita

As maiores durezas médias encontradas na ZR e na CI foram obtidas pelo processo PMEDM, quando se utilizou a granulometria de 600 mesh do pó abrasivo SiC. Na Figura 48, percebe-se que, independentemente da granulometria do abrasivo SiC empregadas pelo processo PMEDM para nitretação das amostras, os resultados evidenciam que as durezas geradas nas camadas nitretadas são muito semelhantes às das amostras usinadas pelo processo EDM (sem pó).

Figura 48 - Média das durezas das camadas após processos EDM e PMEDM.



Fonte: O autor, 2020.

A Tabela 11 faz um comparativo entre os resultados das médias e desvios padrões da microdureza Vickers das camadas refundidas e intermediárias, obtidos pelos processos EDM e PMEDM, com o substrato do material AISI 4140. Tanto as

nitretações obtidas pelo processo EDM quanto as pelo PMEDM obtiveram um aumento substancial na dureza média das camadas intermediárias em relação a do substrato. O aumento mínimo observado foi de 125% obtido na NDE por PMEDM com adição de SiC de 1500 mesh ao fluido dielétrico.

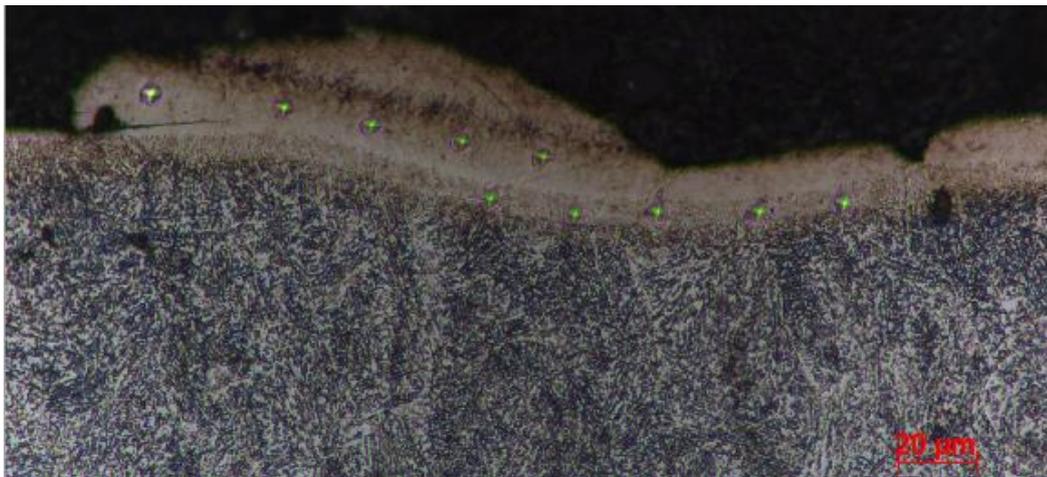
Tabela 11 - Valores de microdureza Vickers pelos processos EDM e PMEDM com eletrodo ferramenta de grafita.

	Material base AISI 4140	Camadas intermediárias nitretadas				
		PMEDM				EDM
		Granulometria (mesh)				
		600	1000	1500	2500	Sem SiC
Dureza Vickers (HV)	218±13	598±54	542±29	491±20	555±20	557±42
Acréscimo da dureza	-	174%	149%	125%	155%	156%

Fonte: O autor, 2020.

A Figura 49 mostra as indentações executadas durante o ensaio em uma das amostras usinadas e nitretadas por descargas elétricas com um eletrodo de grafita, porém sem o emprego do abrasivo carbetto de silício.

Figura 49 - Indentações numa amostra submetida ao processo NDE sem uso de abarativo SiC, usinada com eletrodo de grafita.

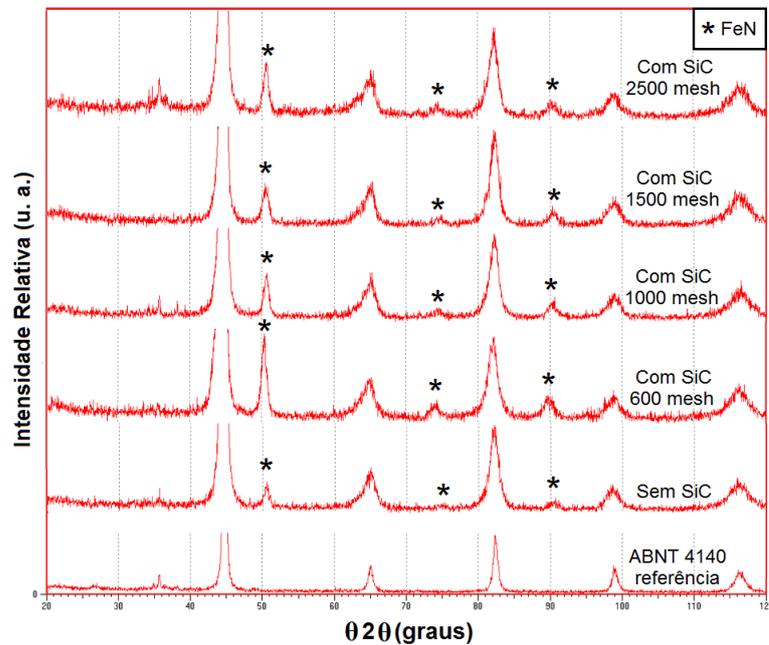


Fonte: O autor, 2020.

4.9 Difração de raios-X das amostras usinadas com eletrodo grafita

A Figura 50 ilustra os difratogramas de raios-X das amostras de aço AISI 4140, usinadas por eletrodo ferramenta de grafita, com carboneto de silício 600, 1000, 1500 e 2500 mesh adicionados ao fluido dielétrico, sem adição de SiC e ainda o do material de referência.

Figura 50 - Imagem dos difratogramas das superfícies usinadas com carboneto de silício adicionado ao fluido dielétrico, água deionizada mais ureia farmacológica, e sem adição de SiC.



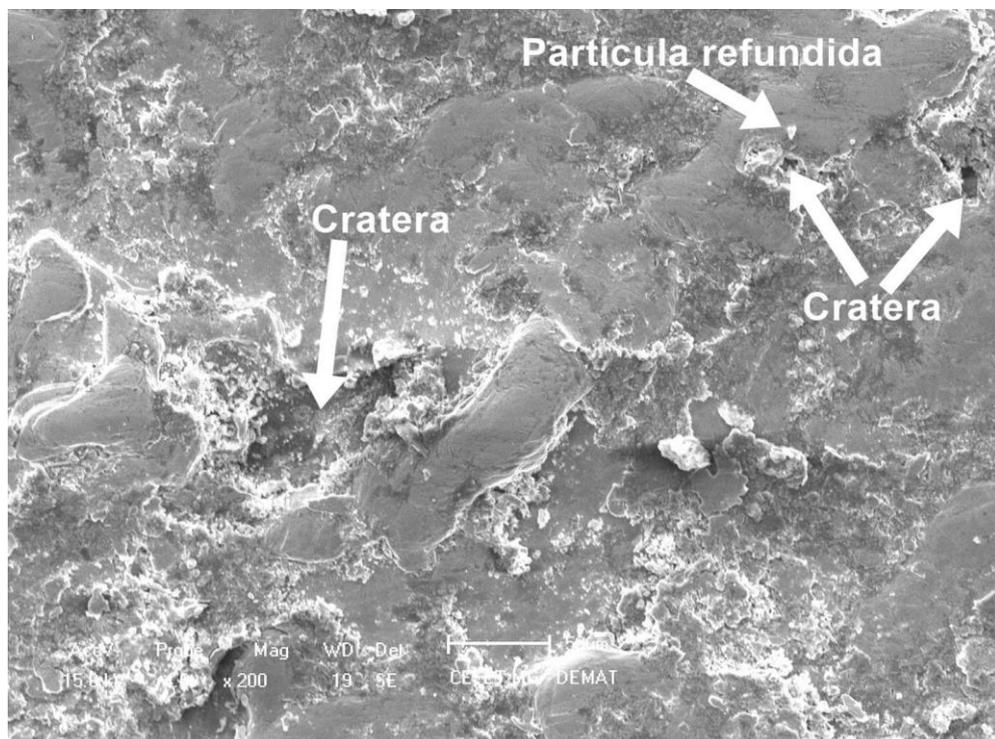
Fonte: O autor, 2020.

Notam-se os picos de nitretos de ferro FeN formados nas amostras usinadas com eletrodo de grafita em relação ao aço AISI 4140 de referência. Porém, os difratogramas não apresentam diferenças significativas entre as superfícies obtidas pelo processo de nitretação por descargas elétricas com adição de carboneto de silício nas granulometrias 600, 1000, 1500 e 2500 mesh, em relação à usinada sem abrasivo.

4.10 Microscopia Eletrônica de varredura das amostras usinadas com grafita

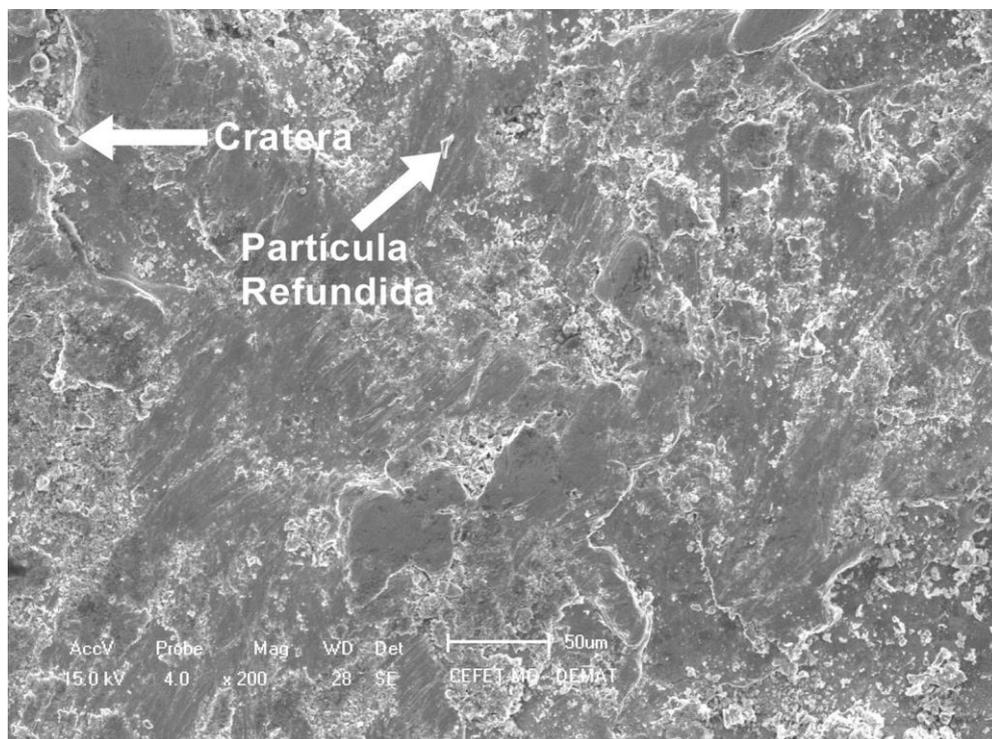
As figuras 51, 52, 53, 54 e 55 ilustram imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do topo das superfícies das amostras usinadas e nitretadas empregando eletrodo-ferramenta grafita. As amostras representadas nas Figuras 51, 52, 53 e 54 foram usinadas com a solução de água deionizada e ureia com pó de carboneto de silício 600, 1000, 1500 e 2500 mesh, respectivamente, adicionados ao fluido dielétrico. A imagem da Figura 55 refere-se à superfície de amostra nitretada sem pó de SiC. Nota-se, por meio das imagens de MEV, que as superfícies obtidas pelo processo de nitretação por descargas elétricas com adição de carboneto de silício nas granulometrias 600, 1000, 1500 e 2500 mesh não apresentam diferenças significativas das usinadas sem adição de SiC e ocorreu a deposição de micropartículas refundidas na superfície.

Figura 51 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura do topo da superfície usinada com carboneto de silício 600 mesh.



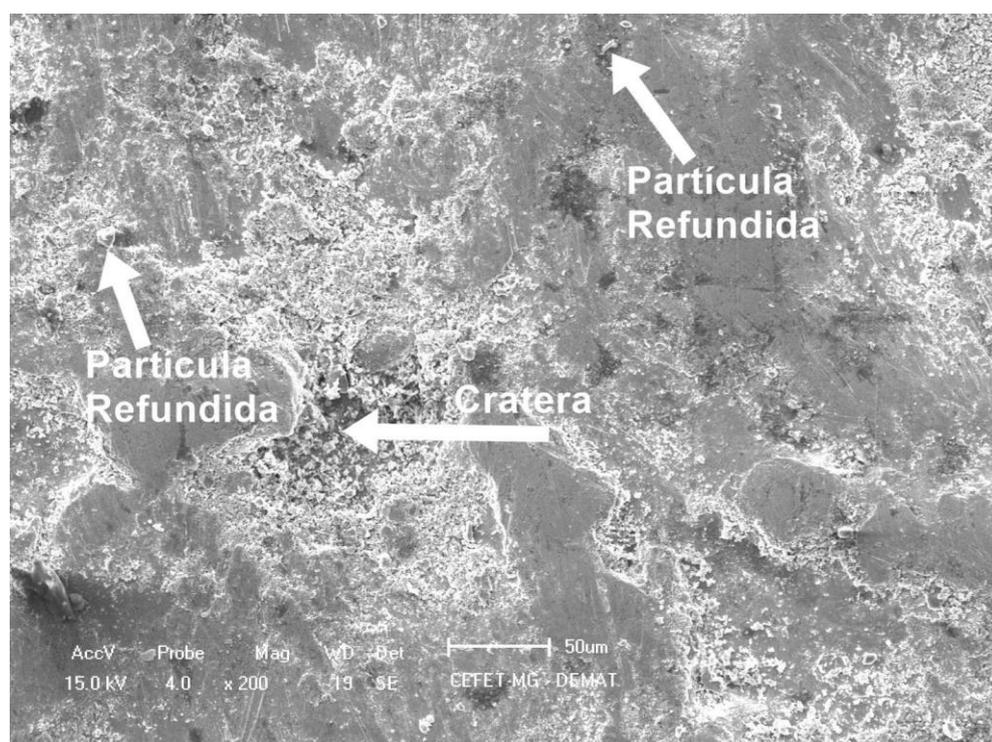
Fonte: O autor, 2020.

Figura 52 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura do topo da superfície usinada com carboneto de silício 1000 mesh.



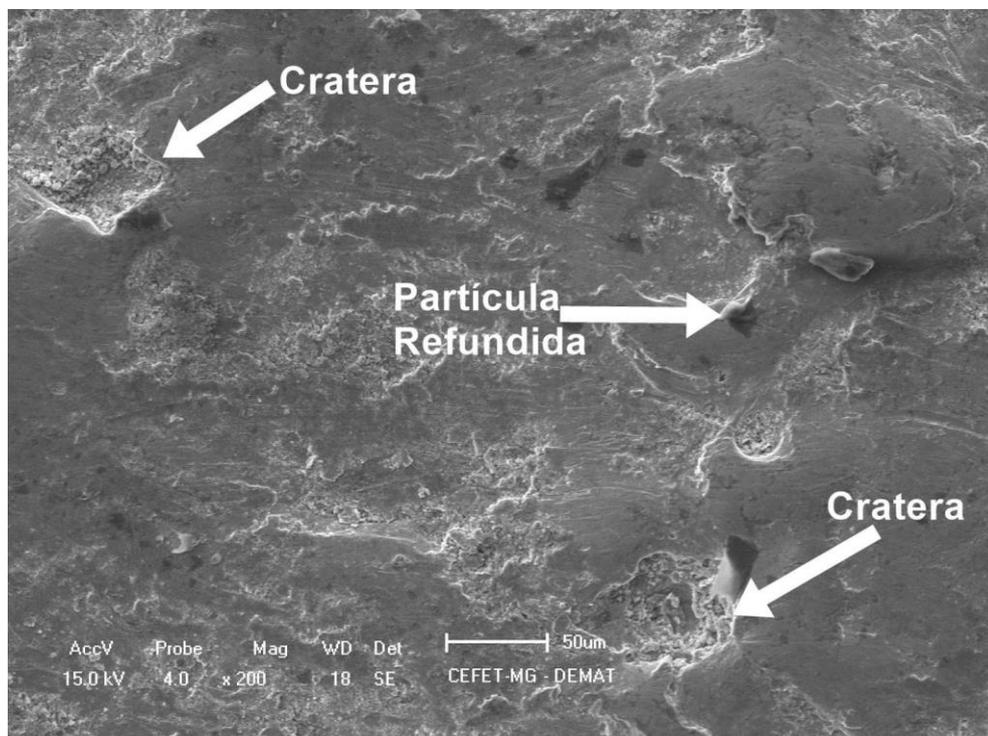
Fonte: O autor, 2020.

Figura 53 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura do topo da superfície usinada com carboneto de silício 1500 mesh.



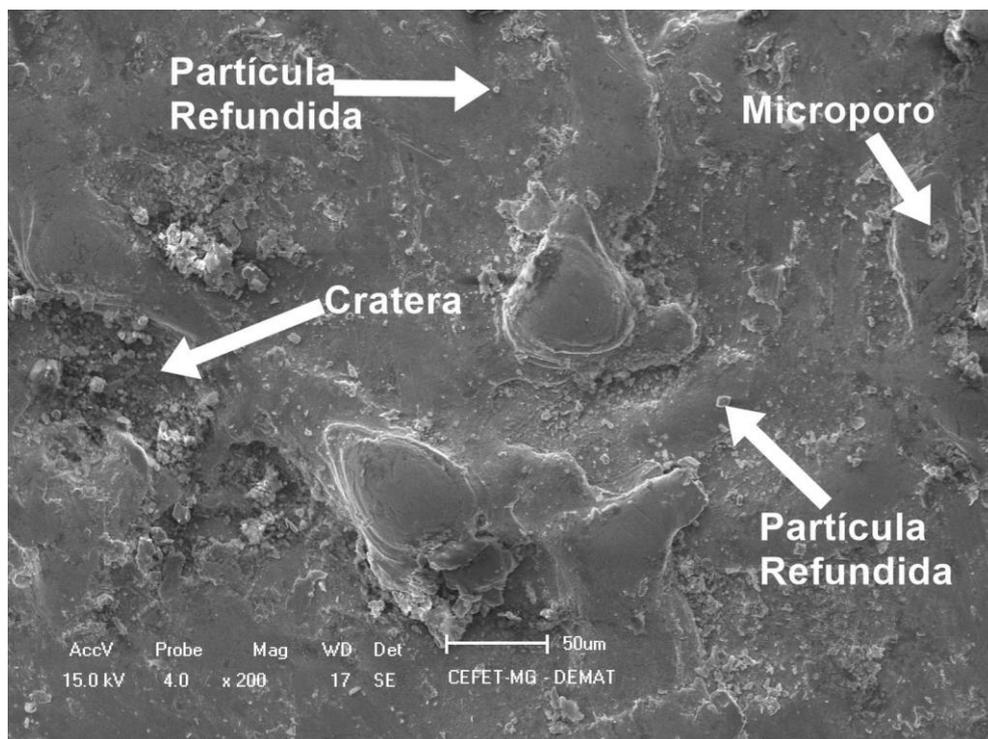
Fonte: O autor, 2020.

Figura 54 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura do topo da superfície usinada com carboneto de silício 2500 mesh.



Fonte: O autor, 2020.

Figura 55 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura do topo da superfície usinada sem carboneto de silício.

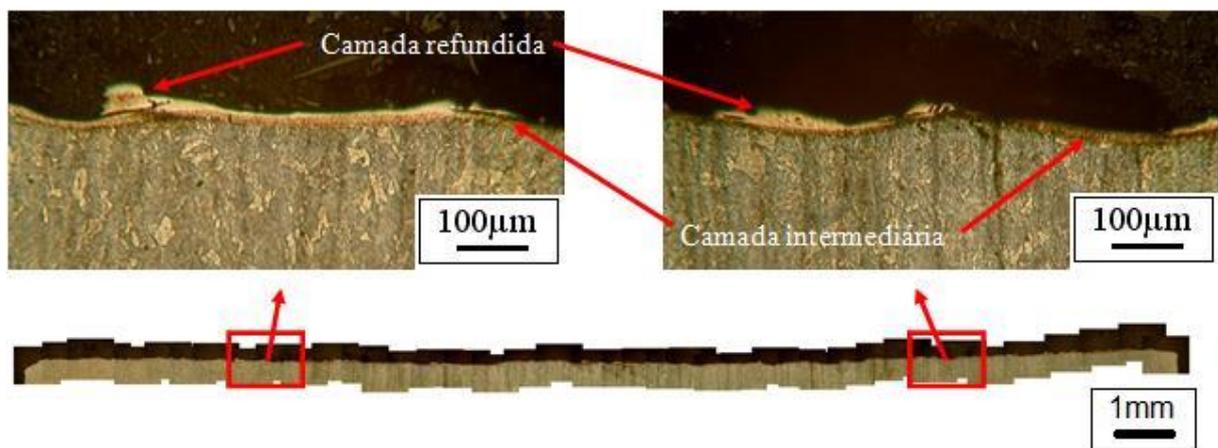


Fonte: O autor, 2020.

4.11 Formações das camadas nitretadas das amostras usinadas com grafita

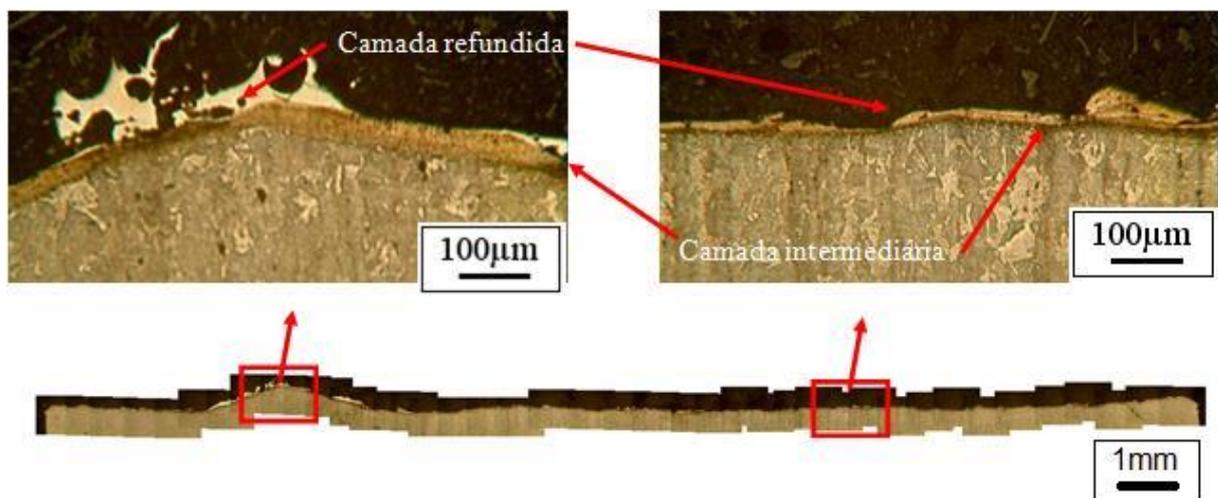
As Figuras 56 a 60 ilustram imagens de microscopia ótica da seção transversal das superfícies usinadas. Nas imagens, pode-se observar a formação das camadas refundida e intermediária. Os ataques metalográficos foram realizados com nital 3%. As Figuras 57 a 59 referem-se à usinagem com a solução de água deionizada e ureia com pó de carboneto de silício 600, 1000, 1500 e 2500 mesh, respectivamente, adicionados ao fluido dielétrico.

Figura 56 - Imagem de microscopia ótica da seção transversal da superfície usinada com carboneto de silício 600 mesh adicionado ao fluido dielétrico, água deionizada e ureia. Camadas refundida e intermediária em destaques.



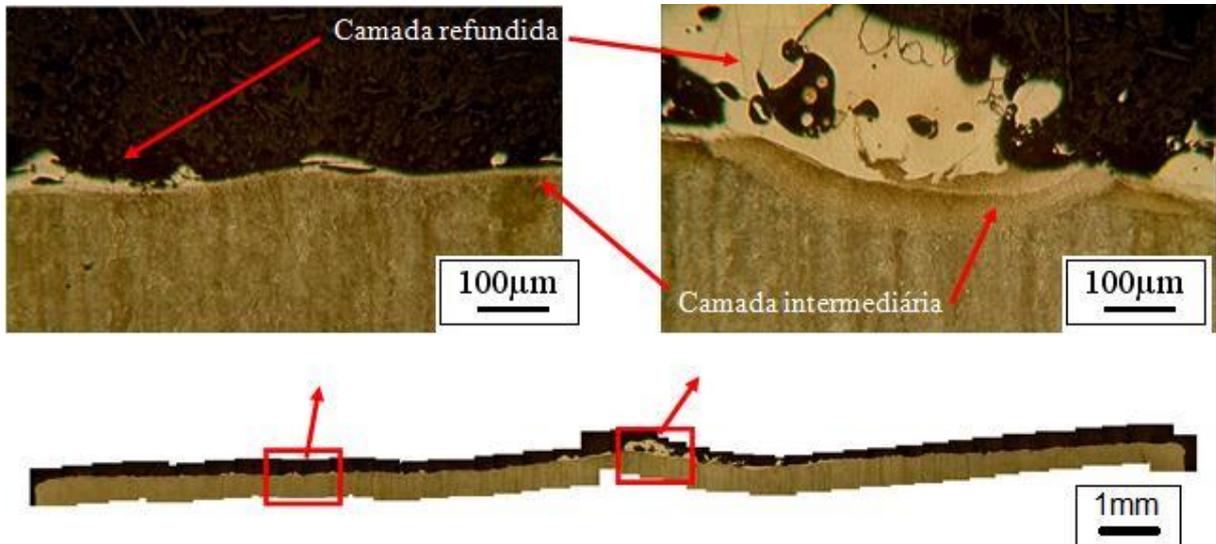
Fonte: O autor, 2020

Figura 57 - Imagem de microscopia ótica da seção transversal da superfície usinada com carboneto de silício 1000 mesh adicionado ao fluido dielétrico, água deionizada e ureia. Camadas refundida e intermediária.



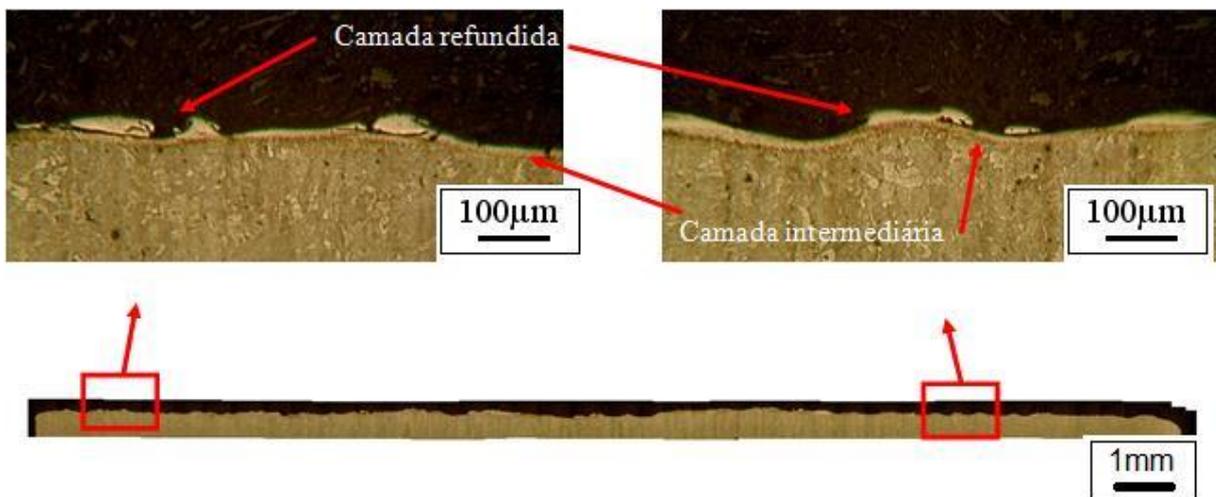
Fonte: O autor, 2020.

Figura 58 - Imagem de microscopia ótica da seção transversal da superfície usinada com carboneto de silício 1500 mesh adicionado ao fluido dielétrico, água deionizada e ureia. Camadas refundida e intermediária em destaques.



Fonte: O autor, 2020.

Figura 59 - Imagem de microscopia ótica da seção transversal da superfície usinada com carboneto de silício 2500 mesh adicionado ao fluido dielétrico, água deionizada e ureia. Camadas refundida e intermediária em destaques.

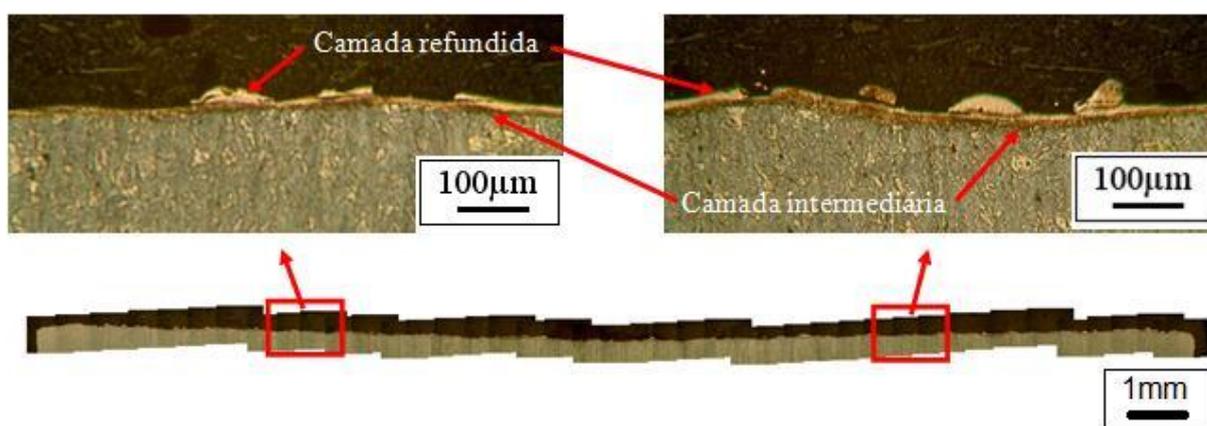


Fonte: O autor, 2020.

Um detalhe em destaque pode ser observado nas Figuras 57 e 58, onde ocorreu um aumento significativo na espessura das camadas refundida e intermediária em um determinado trecho que chegou a atingir espessura de 75µm, aproximadamente. Valores muito superiores aos alcançados por Raslan (2015) e Santos *et al.* (2016) ao aplicarem o processo de nitretação por descargas elétricas no

aço AISI 4140, sem adição de pó ao fluido dielétrico. De acordo com Furutani *et al.* (2001), o movimento das partículas de pó se deve ao comportamento relacionado com as características delas mesmas. Esse movimento pode estar relacionado à sedimentação das partículas. A Figura 60 refere-se à nitretação sem pó de SiC. Observa-se que as camadas intermediárias produzidas pelas usinagens, com e sem adição de carboneto de silício, têm espessuras relativamente uniforme, distribuídas ao longo da superfície usinada. Apenas em alguns trechos, a espessura sofre redução na medida. Já a camada refundida não repete essa observação, pois ela, em muitos trechos, não é evidenciada.

Figura 60 - Imagem de microscopia ótica da seção transversal da superfície usinada com fluido dielétrico de solução aquosa constituído de água deionizada e ureia farmacológica. Camadas refundida e intermediária em destaques.



Fonte: O autor, 2020.

A Tabela 12 apresenta os resultados da medição da espessura das camadas refundida e intermediária, da seção transversal da superfície, referentes à usinagem com água deionizada mais ureia sem e com adição de carboneto de silício ao fluido dielétrico.

Tabela 12 - Espessuras das camadas nitretadas por NDE do aço AISI 4140 pelos processos EDM e PMEDM com eletrodo ferramenta de grafita.

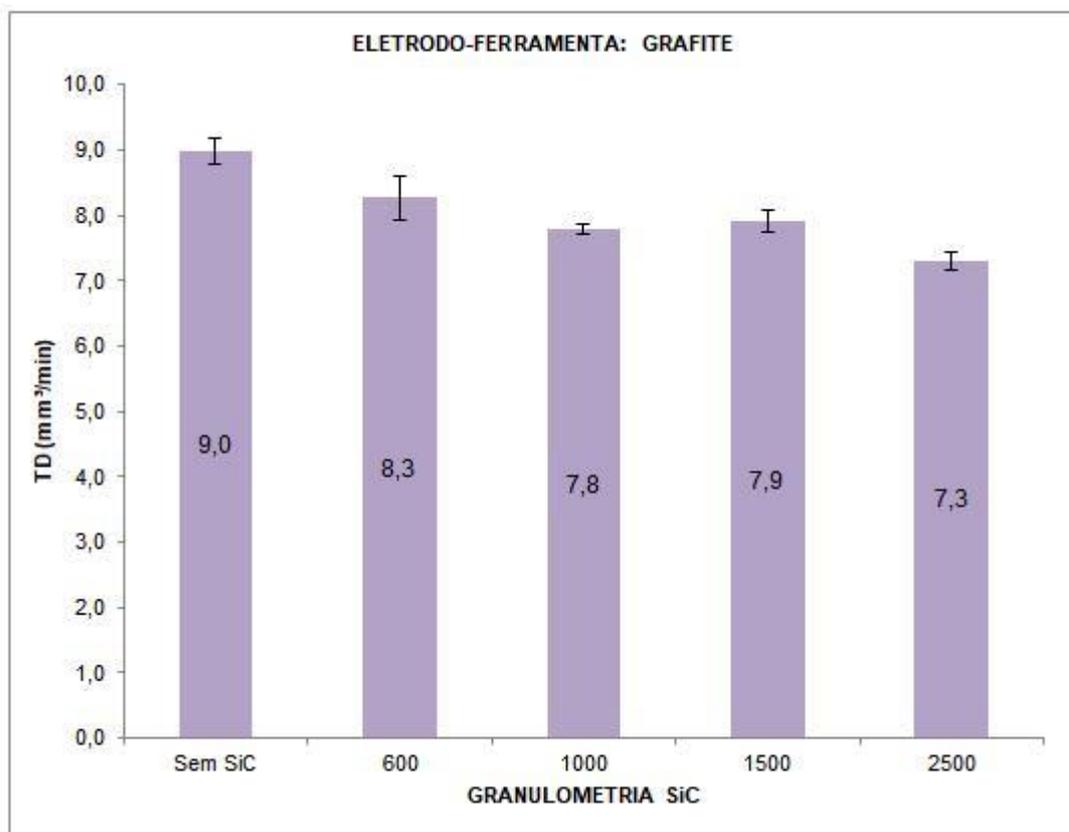
Tipo de processo	Processo EDM (usinagem sem pó abrasivo)	Processo PMEDM (usinagem c/ pó abrasivo)			
		600	1000	1500	2500
Granulometria (mesh)	0	600	1000	1500	2500
Espessuras das camadas (µm)	8,3±1,0	10,1±1,8	12,3±2,4	19,1±4,3	13,7±2,2

Fonte: O autor, 2020.

4.12 Desempenho nas usinagens com eletrodo grafita (TD, TRM e DVR)

A Figura 61 apresenta o resultado de TD referentes ao desempenho da adição do carboneto de silício 600, 1000, 1500 e 2500 mesh ao fluido dielétrico comparado a usinagem com água deionizada e ureia sem pó de SiC.

Figura 61 - Taxa de desgaste do eletrodo ferramenta grafita pelos processos EDM e PMEDM.



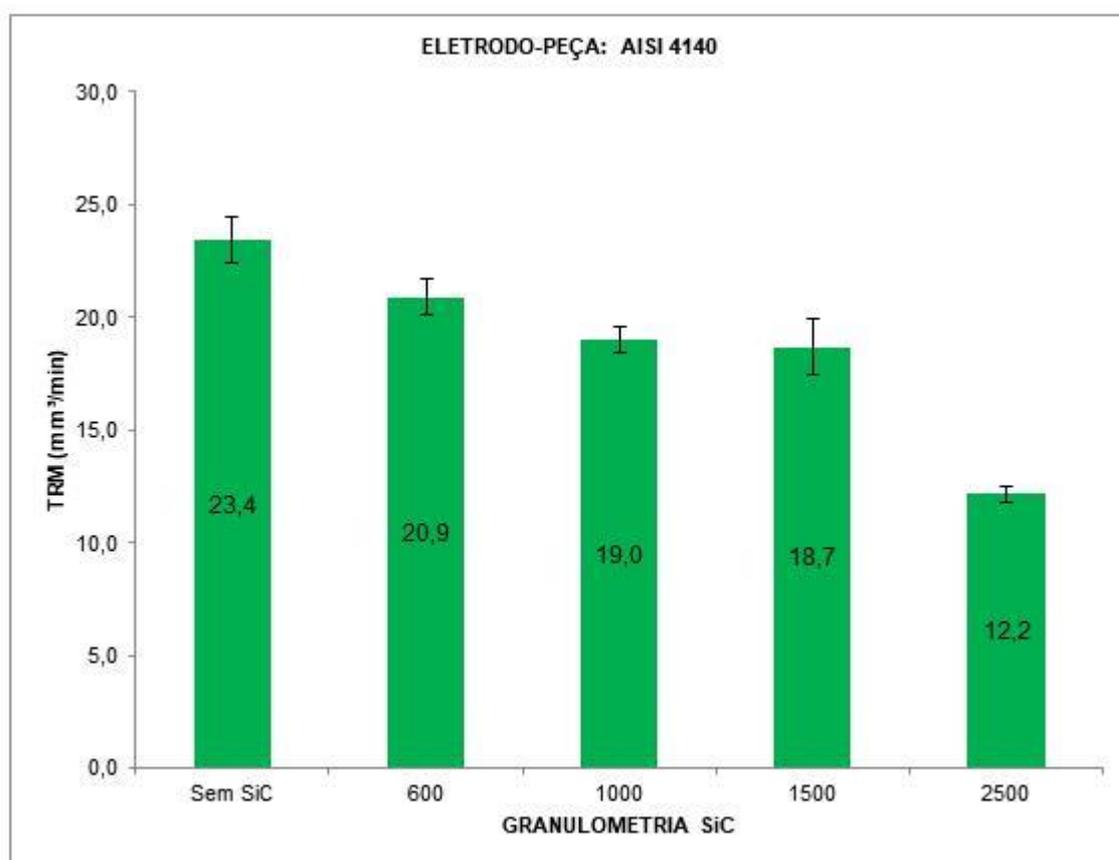
Fonte: O autor, 2020.

A Figura 62 apresenta o resultado de TRM referentes ao desempenho da adição do carboneto de silício 600, 1000, 1500 e 2500 mesh ao fluido dielétrico comparado a usinagem com água deionizada e ureia sem pó de SiC.

A Figura 64 apresenta o resultado de DVR referentes ao desempenho da adição do carboneto de silício 600, 1000, 1500 e 2500 mesh ao fluido dielétrico comparado a usinagem com água deionizada e ureia sem pó de SiC. Nota-se que a adição de carboneto de silício reduziu os valores da TRM, principalmente com SiC 2500 mesh. Provavelmente, as partículas de pó semiconductor influenciaram a

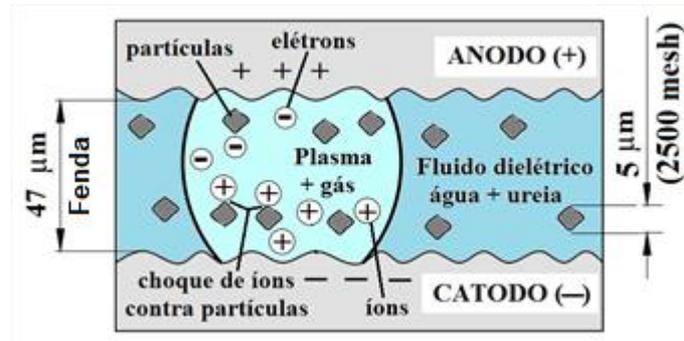
formação do canal de plasma. Segundo Zhang *et al.* (2012) os transportadores (elétrons e íons) são acelerados e movem-se em direção ao anodo e ao catodo, porém, durante o deslocamento, ao colidem com as partículas, eles perdem energia. Como a polaridade usada nesta pesquisa foi positiva, nesse caso os transportadores são os íons que se deslocam em direção ao catodo e atingem a superfície da peça com menor intensidade. O SiC de 2500 mesh promoveu menor TRM, aproximadamente metade da usinagem sem adição de partículas de pó. Possivelmente, o menor tamanho da partícula facilitou a entrada delas no *gap* durante a formação do canal de plasma. A Figura 63 elucida o processo. Percebe-se que os valores TD acompanharam o comportamento da TRM. A diferença é que no caso da TD os elétrons se chocaram em direção ao anodo e atingiram a superfície do eletrodo ferramenta de grafita.

Figura 62 - Taxa de remoção de material do eletrodo peça de aço AISI 4140 pelos processos EDM e PMEDM.



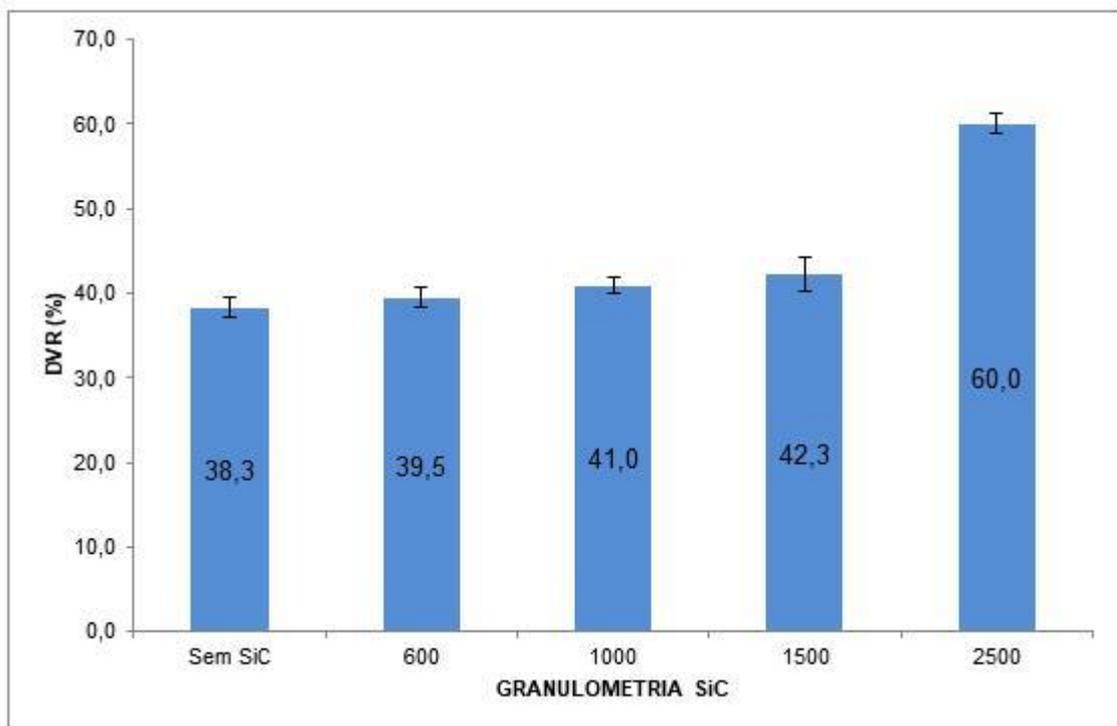
Fonte: O autor, 2020.

Figura 63 - Desenho esquemático da influência de partículas no processo de formação do canal de plana devido ao choque dos íons e elétrons com o SiC 2500 mesh.



Fonte: STEVENS, 1998 e SILVA, 2012 (Adaptada, 2020).

Figura 64 - Desgaste volumétrico relativo entre os eletrodos de grafita e a amostra de aço AISI 4140.



Fonte: O autor, 2020.

Como o desgaste do eletrodo ferramenta foi maior que as outras condições, logo, o DVR da usinagem com carboneto de silício de 2500 mesh produziu maior valor em relação às outras.

Este trabalho estudou de forma qualitativa alguns aspectos tecnológicos da introdução de distintas granulometrias do abrasivo carbeto de silício (SiC) ao fluido dielétrico composto de água e ureia farmacológica na usinagem por descargas elétricas (EDM) do aço AISI 4140 empregando o cobre eletrolítico e a grafita como eletrodo ferramenta. Embora alguns estudos recentes de Santos *et al.* (2016) que utilizaram ureia agrícola tenham demonstrado que, quanto menor a concentração de ureia no fluido dielétrico, menores seriam os valores da condutividade elétrica devido ao aumento da rigidez elétrica e, conseqüentemente, maiores seriam os valores da TRM, o presente trabalho empregou ureia farmacológica na concentração de 40g.L⁻¹ no fluido dielétrico. A ureia farmacológica, mesmo em concentrações acima de 10g.L⁻¹ produziu baixa condutividade elétrica e favoreceu, assim, uma correta formação do canal de plasma.

Segundo Ekmekci *et al.* (2015), os parâmetros operacionais da máquina exercem uma forte influência nas transferências dos materiais componentes do fluido dielétrico para a superfície do eletrodo peça, ou seja, não se trata de um processo aleatório. Como parâmetros operacionais do processo PMEDM, altas correntes de pulso aliadas aos pequenos pulsos são preferíveis. Com altas correntes obter-se-á uma maior energia do pulso e uma maior pressão negativa gerada durante a extinção do canal de descarga que produzirão segmentos fundidos mais espessos e ricos de depósitos de partículas em suspensão no fluido dielétrico. Os pequenos pulsos levam a diâmetros menores do canal de descarga com conseqüente minoração dos deslocamentos das partículas suspensas para as cavidades fundidas, quando o canal de descarga é extinto (EKMEKCI *et al.*, 2015). Por isso, os parâmetros de usinagem adotados nesta pesquisa para tensão e corrente elétrica foram 50V e 40A, respectivamente, e tempo de pulso de 100µs e tempo de pausa de 15µs.

Houve a formação das camadas intermediária e refundidas na amostra nitretadas com carboneto de silício adicionado ao fluido dielétrico, semelhante à usinada sem SiC. Foi observado que, em alguns trechos da seção transversal da superfície usinada, a camada intermediária atingiu espessura da ordem de 75µm quando se usinou com eletrodo-ferramenta grafita.

A aplicação de uma metodologia correta para caracterização das amostras possibilitou uma análise concisa; muitas dúvidas e questionamentos acerca do acabamento superficial e aplicação do aço AISI 4140, usinado e nitretado através de

descargas elétricas, como material de desgaste, bem como suas vantagens e limitações foram respondidas.

Após análise pormenorizada dos resultados obtidos neste estudo, evidenciou ser interessante e viável, do ponto de vista tecnológico, a execução do processo NDE concomitante ao processo PMEDM, com emprego do pó abrasivo carbeto de silício mixado numa solução de água deionizada e ureia para o enriquecimento superficial por nitretos do material da peça, na liga ferrosa AISI 4140, isso poderá atender satisfatoriamente, num futuro próximo, às exigências do mercado industrial.

Porém, faz-se necessário o contínuo estudo da usinagem e nitretação por descargas elétricas nos aços, a fim de fomentar a formação de novas teorias e desenvolvimento da Engenharia de Materiais.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

A partir dos resultados e discussões apresentados neste trabalho, podem ser tiradas as seguintes conclusões:

Acreditou-se que com esse processo seria possível obter um acabamento superficial com menores valores reais médios das amplitudes superficiais do que a usinagem e nitretação sem a adição de (EDM), fato não confirmado com os resultados dos experimentos empregando o cobre eletrolítico como eletrodo. Analisando o parâmetro Ra, não houve melhoras nas amplitudes das rugosidades superficiais das amostras quando se utilizou o processo PMEDM com SiC misturado ao fluido dielétrico em relação ao processo EDM utilizando o cobre eletrolítico como eletrodo-ferramenta. Houve um o aumento mínimo da rugosidade variando de 6,3 a 15,6%. Diferentemente, quando se empregou a grafita como eletrodo ferramenta, houve uma leve redução nas amplitudes das rugosidades superficiais, quando se utilizou o processo PMEDM com SiC misturado ao fluido dielétrico em relação ao processo EDM. No entanto, as variações não apresentaram alterações significativas. A máxima variação negativa foi de 13% com a adição do SiC de 600 mesh.

Os resultados encontrados nas amostras usinadas com o cobre eletrolítico e com a grafita, com e sem adição de carboneto de silício ao fluido dielétrico, demonstraram que o processo NDE promoveu a implantação do nitrogênio através do processo de difusão formando nitretos de ferro. O principal nitreto observado foi FeN. Isso gerou ganho de dureza nas camadas intermediária e refundida em todas as amostras nitretadas. Nas amostras usinadas com cobre eletrolítico, as durezas superficiais das camadas refundidas e intermediárias aumentaram, substancialmente, em relação à dureza do substrato, em torno de 125% e, nas usinadas com grafita, em torno de 174%;

A análise morfológica das superfícies das amostras nitretadas com uso do processo PMEDM e EDM demonstrou que ocorreu a deposição de micropartículas refundidas na superfície de todas as superfícies e formando camadas ressolidificadas, praticamente isentas de microtrincas, tanto para a usinagem com cobre eletrolítico

quanto para a com grafita, ou seja, não foram identificadas diferenças significativas na morfologia;

Embora os valores da TRM tenham sido pouco influenciados pela adição de carbeto de silício na usinagem com cobre eletrolítico, houve um pequeno acréscimo da TRM em todas as análises com adição de SiC ao fluido dielétrico (PMEDM), principalmente quando se adicionou SiC 1000 mesh. Já nas análises das usinagens com adição de SiC ao fluido dielétrico empregando eletrodo ferramenta grafita, todos os valores da TRM foram inferiores aos da usinagem sem adição de SiC (EDM), principalmente quando se adicionou SiC 2500 mesh que apresentou um valor de TRM 52% menor. Logo, o processo PMEDM com eletrodo-ferramenta de grafita não melhora a TRM.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar o mesmo estudo, porém com novos pós abrasivos, tais como o óxido de alumínio, o grafite, carbeto de tungstênio, de manganês, de cromo e de nano tubo de carbono e comparar o desempenho desses com o SiC;
- Variar os parâmetros tensão (V) e corrente elétrica (A) e investigar os efeitos desses sobre a rugosidade superficial, a TRM, a TD e o DVR, bem como a dureza e a morfologia superficial das camadas nitretadas;
- Efetuar novo estudo empregando o mesmo procedimento desta pesquisa e realizar análise tribológica empregando o ensaio de pino sobre disco para avaliar a resistência ao desgaste;
- Efetuar novo estudo empregando o mesmo procedimento desta pesquisa de forma quantitativa inserindo as análises de incerteza.

6 REFERÊNCIAS

- 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.
- ALVES, C. Jr. **Nitretação a plasma: Fundamentos e Aplicações**. Natal: EDUFRN, 2001. 108p.
- AMERICAN SOCIETY FOR MATERIALS. **ASM handbook: heat treating**. ASM International. v.4. Ohio, 1998.
- ARANTES, L. J. **Avaliação de fluidos dielétricos no processo de usinagem por descargas elétricas**. Dissertação de M.Sc., UFU/Mestrado em Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, Brasil, 2001.
- ASSARZADEH, S.; GHOREISHI, M. **A dual response surface-desirability approach to process modeling and optimization of Al₂O₃ powder-mixed electrical discharge machining (PMEDM) parameters**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. v. 64, pp. 1459-1477. Feb. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 87:2000 Aço carbono e ligados para construção mecânica – designação e composição química**. Rio de Janeiro, 2000.
- 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.
- American Society for Testing and Materials - **ASTM E92:2017: Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials**. EUA, 2017.
- 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.
- CALLISTER JR, Willian D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7^a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. 595p.
- CAMARGO, B.C., ARANTES, L.J., RASLAN, A.A., **Estudo da viabilidade da nitretação de liga de titânio através do processo de usinagem por descargas elétricas**. In: POSMEC – 16^o Simpósio de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, n. PM16-0102, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, 11-13 dez. 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 – V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Abr. Belo Horizonte, 2009.

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

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

CHEN, G. M.; JAGGI, N. K.; Butt J. B.; Yeh E. B.; Schawrtz L. H. **Mössbauer and Magnetic Studies of Epsilon-Fe₂X₃,** The Journal of Physical Chemistry, 87:5326–5332, 1983.

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. 51-599p.

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

CLAUSER, M. J. **Comment on High Resolution Mössbauer Spectrum of Fe₄N,** Solid State Communications, v. 8, p. 781–782, 1970.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns.** 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008. p. 177 a 328.

CRUZ, C. **Há inúmeras maneiras não-tradicionais de usinar materiais: conheça algumas.** Máquinas e Metais, São Paulo, v. 27, n. 324, pp. 80-85, 1993.

DAVIS, J. R. **Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics.** ASM – American Society for Metals, 2003. p.364.

DIBITONTO, D. D.; EUBANK, P. T.; PATEL, M. R.; BARRUFET, M. A. **Theoretical models of the electrical discharge machining process: a simple cathode erosion mode.** Journal of Applied Physics. v.66, n.9.p.4095-4103, nov. 1989.

ECHEVERRIGARAY, F. G.; BAUMVOL, I. J. R.; FIGUEROA, C. A. **Influência do Tratamento Superficial de Ball Milling na Nitretação a Plasma a baixa temperatura de Ligas Ferrosas.** In: ENCONTRO DE JOVENS PESQUISADORES DA UCS, 17, 2006, Caxias do Sul, Rio Grande do Sul.

EKMEKCI, B.; ULUSÖZ, F., EKMEKCI, N. *et al.* **Suspended SiC particle deposition on plastic mold steel surfaces in powdermixed electrical discharge Machining.** Journal of Engineering Manufacture, v. 229, p. 475-486, 2015.

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

ERDEN, A.; KAFTANOGLU, B. **Thermo-mathematical Modeling and Optimization of Energy Pulse Forms in Electric Discharge Machining (EDM)**. Int. J. Math. Tool Des. Res. v. 21, n. 1, p. 11-22, 1981.

EUBANK, P. T. *et al.* **Theoretical models of the electrical discharge machining process 3: the variable mass, cylindrical plasma mode**. Journal of Applied Physics, USA, v. 73, n 11, p. 7900-7909, jun. 1993.

FERNANDES, L. A. **Efeito da adição de pó de Carboneto de silício nos fluidos dielétricos sobre o desempenho da usinagem por descargas elétricas do aço-rápido ABNT M2**. Dissertação de M.Sc., UFU/Mestrado em Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, Brasil, 1999.

FREITAS FILHO, A.; SILVA, E. R.; SILVA, S. P. *et al.* **Avaliação da pressão do jato de água abrasivo no processo de usinagem híbrida AJEDM com eletrodos ferramenta de cobre e grafita**. In: IX CONEM – Congresso Nacional de engenharia Mecânica, pp. 21-25, Fortaleza, ago. 2016.

FULLER, J. E. **Electrical Discharge Machining**. Metals Handbook – Machining, v. 16, 9 ed. Terre Haute: Joseph R. Davis, 1989.

FURUTANI, K; SANETO, A; TAKEZAWA, H; MOHRI, N; MIYAKE, H. **Accretion of titanium carbide by electrical discharge machining with powder suspended in working fluid**. Precision Engineering, 25, 138-144, 2001.

GARCIA, A. *et al.* **Ensaio dos Materiais**. 2ª ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos. 378 p. 2012.

GERDAU. **Aços Finos Piratini – Manual de aços**. v.1, 2003.

GRACHEV, S. Y. **Manipulation and Control of the Growth of Magnetic Iron Nitride Films** [Online Resource]. PhD dissertation, Groningen University, 2003.

GUITRAU, E. B. **The Electrical Discharge Machining Handbook**. Cincinnati, USA: Hanser Gardner Publications, 1997. 306P.

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

JACOMINE, L.; DUARTE, M. A. V.; RASLAN, A. A. **Avaliação e otimização de parâmetros de usinagem por descargas elétricas via superfície de resposta**. In: COBEF – 5º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 14-17 abr. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 2009.

JESWANI, M. L. **Effect of the addition of graphite powder to kerosene used as the dielectric fluid in electrical discharge machining**. *Wear – International Journal on*

the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear. v. 70, pp. 133 – 139. Mai. 1981.

KACSICH, T.; NIEDERDRENK, M.; SCHAAF, P.; LIEB K. P.; GEYER U.; Shulte O. **Characterization of Magnetron-Sputtered Chromium and Iron Nitride Films**, Surface and Coating Technology, 93: 32–36, 1997.

KHANRA, A. K.; PATHAK, L. C.; GODKHINDI, M. M. **Microanalysis of Debris Formed During Electrical Discharge Machining (EDM)**. J. Mater. Sci., v. 42, p. 872-877, 2007.

KLOCKE, F. *et al.* **The effects of powder suspended dielectrics on the thermal influenced zone by electrodischarge Machining with small Discharge energies**. Materials Processing Technology, Elsevier, 2004.

KNERR, C. H.; ROSE, T. C.; FILKOWSKI, J. H. Gas nitriding – In: **ASM Handbook Vol 4. Heat Treating**. USA ASM International. 6^a ed, 2004. p. 387-409

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

KÖNIG, W.; KLOCKE, F.; LENZEN, R. **The Electrical Machining Process: What Demands Will They Face in the Future**. International Journal of Electrical Machining. V. 1 n. 1 p. 3-7. 1996.

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

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*. v. 30, n. 8, pp. 983-990. May. 2014.

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

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

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

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

MCGEOUGH, J. A. **Advanced Methods of Machining**, London, Chapman and Hall, 1988.

MEDEIROS et al. **Análise da dureza vickers da superfície de dentes artificiais em Resina poliéster**. Revista de Odontologia. Univ. Cid. São Paulo. 27-37. 2014.

MENDONÇA, G. M.; SCHLOTEFELDT, A. A.; SENGER, V. **Estudo de desgaste, taxa de remoção e rugosidade superficial em eletrodos de latão, bronze e cobre na eletroerosão por penetração**. In: 4º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes. Joinville, Santa Catarina, Brasil, 21-24 mai. 2006.

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

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

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

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

NORASETTHEKULL, S.; EUBANK, P. T.; BRADLEY, W. L.; BOZKURT, B.; STUKER, B. **Use of Zirconium Diboride-copper as an Electrode in Plasma Applications**. Journal of Materials Science, v. 34, p. 1261-1270, 1999.

NOZIK, A. J.; WOOD JR.; J. C.; HAACKE-G. **High Resolution Mössbauer Spectrum of Fe⁴N**. Solid State Communications, 7: 1677–1679, 1969.

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.

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

PINEDO, C. E. **Nitretação por Plasma**. Ed. Núcleo de Pesquisas tecnológicas da Universidade de Mogi das Cruzes, 1995, Mogi das Cruzes, SP, **Anais do I Seminário Internacional de Engenharia de Superfície**, p. 13-26.

PYE, David. **Practical NITRIDING and Ferritic Nitrocarburizing**. ASM – American Society for Metals, 2003.

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

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

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

RISSANEN, L. **Manufacturing and Irradiation of Thin Transition Metal Nitride Films**. PhD dissertation, Georg-August-Universität Göttingen, Mathematisch naturwissenschaftliche Fakultäten, 1999.

RODRIGUES, J. R. P.; CRUZ, C.; FRANCO, S. D. *et al.* **Avaliação da geração de microtrincas do aço rápido ABNT M2 no processo EDM com adição de SiC**. Acta Scientiarum Technology, Fortaleza, v. 30, n. 2, p. 176-179, 2008.

SAHU, S. K., JADAM, T., DATTA, 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, v. 40, n. 330, pp. 1- 19. Jun. 2018.

SAMPAIO, J. A. *et al.* **Grafita**. Rochas e Minerais Industriais – CETEM, v. 1, pp. 527-549. 2ª ed. 2008.

SANTOS, C. E.; SANTOS, R. F.; SILVA, E. R.; RASLAN, A. A. *et al.* **Nitretação por descargas elétricas (NDE) de cavidade do aço AISI 4140**. In: COBEF – 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, n. 2015-0392, Salvador, Bahia, Brasil, 18-22 mai. 2015.

SANTOS, C. E.; SILVA, E. R.; SANTOS, R. F. **Avaliação da corrente elétrica no processo de nitretação por EDM no aço AISI H13**. In: COBEF – 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, n. 2015-0392, Salvador, Bahia, Brasil, 18-22 mai. 2015.

SANTOS, R. F. **Influência do material da peça e do tratamento térmico na eletroerosão dos aços AISI H13 e AISI D6**, Dissertação de M.Sc., PUCMinas/Mestrado em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2007.

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.; RASLAN, A. A. *et al.* **Influence of urea content blended with deionized water in the process of nitriding using electrical**

discharge Machining on AISI 4140 steel. International Journal Advanced Manufacture Tecnology, v. 89, pp. 1251-1257, jul. 2016.

SANTOS, R. F.; SILVA, E. R.; SALES, W. F. *et al.* **Influence of the electrode material on the nitriding of medium carbon steel using sink electrical discharge machining.** International Journal Advanced Manufacture Tecnology, v. 90, pp. 2001-2007, out. 2016.

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

SERVSPARK ELETROPLUS – EDM-540. **Manual de operação.** 2010.

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

SHIMADZU XRD – 7000 X-RAY DIFFRACTOMETER, **Manual de operação e instalação.** 2011

SILVA, E. R. **Comparação do desempenho do fluido dielétrico vegetal com mineral sintético e querosene na eletroerosão do aço AISI H13.** 110f. Dissertação de M.Sc., PUCMinas/Mestrado em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2007.

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

SILVA, E. R., SANTOS, R. F., RASLAN, A. A. **Usinagem e nitretação do aço AISI 4140 pelos processos NDE e AJEDM.** In: COBEF – 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, n. 2015-0392, Salvador, Bahia, Brasil, 18-22 mai. 2015.

SILVA, E. R., SANTOS, R. F., TELES, V. C. *et al.* **Influência da granulometria do abrasivo SiC no processo híbrido AJEDM.** In: COBEF – 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil, 11-15 abr. 2011.

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

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

SKONIESKI, Adão Felipe Oliveira. **Influência da mistura gasosa nos processos de nitretação e nitrocarbonetação a plasma do aço AISI 4140.** 2008. 95f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

SOUZA, Sérgio Augusto. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: fundamentos teóricos e práticos**. 5ª Ed. Editora Edgard Blüncher Ltda, São Paulo, 1982. P. 06 a 15, 103 a 127.

STEVENS, L. **Improvement of Surface Quality in Die Sinking**. Doctoral Thesis. 1998. 181p. Department of Mechanical Engineering, Katholieke Universiteit, Leuven, Belgium.

TIGRINHO, Luiz Maurício Valente. **Análise da fratura de chapas do aço avançado de alta resistência DP600 quando submetido a diferentes estados de tensões**. 2011. 128 f. Tese de D. Sc., Universidade Federal do Paraná/Doutorado em Engenharia Mecânica, Curitiba, PR, Brasil, 2011.

WONG, Y. S.; LIM, L. C.; LEE, L. C. **Effects of Flushing on Electrical-Discharge Machining Surface**. Journal of Material Processing Technology. Singapore. Elsevier. v. 48, p. 299-305, 1995.

YAN, B. H., TSAI, H. C., HUANG, F. Y. **The effect in EDM of a dielectric of a urea solution in water on modifying the surface of titanium**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.45, pp. 194-200, 2005.

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