

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

Laura de Sousa Ramos Fernandes

NITRETAÇÃO POR DESCARGAS ELÉTRICAS DA LIGA DE ALUMÍNIO-SILÍCIO

Belo Horizonte
Fevereiro de 2020

Laura de Sousa Ramos Fernandes

Nitreção por descargas elétricas da liga de alumínio-silício

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 Mestra em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva

Belo Horizonte
Fevereiro de 2020

Fernandes, Laura de Sousa Ramos.
F363n Nitretação por descargas elétricas da liga alumínio-silício / Laura
de Sousa Ramos Fernandes. – 2020.
102 f. : il.

Orientador: Ernane Rodrigues da Silva

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2020.
Bibliografia.

1. Usinagem por eletroerosão. 2. Nitretação iônica. 3. Ligas de
alumínio. 4. Microdureza. I. Silva, Ernane Rodrigues da. II. Título.

CDD: 671.35



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

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
“NITRETAÇÃO POR DESCARGAS ELÉTRICAS DA LIGA
DE ALUMÍNIO-SÍLÍCIO”

Autora: Laura de Sousa Ramos Fernandes

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. Hermes de Souza Costa
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Rogério Felício dos Santos
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Belo Horizonte, 21 de Fevereiro de 2020.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que está no comando de tudo

Aos meus pais Jorge Luiz e Neuzélia, por serem a base sólida de minha vida

Aos meus irmãos Clarisse, Jorge Augusto, Livia e Luiz Henrique, pela alegria de saber que, mesmo longe, eles estão ao meu lado

Aos sobrinhos Otávio Fernandes, Francisco Velozo e Lucas Velozo, pela imensa alegria de suas existências

À queridíssima tia Neuzete Barros, por ser uma segunda mãe amorosa em minha vida

Às primas, Ana Cecília Barros e Ana Cristina Barros, por serem minhas primas-irmãs por todo este período vivido em Belo Horizonte (e mesmo antes...)

Aos amigos Andressa Cabral, Jéssica D. da Silva, Keila C. Vilela, Mariane Dias, Rayane Leão e Thiago Apolinário de Jesus, pelo prazer de sua amizade, apoio, compreensão e palavras de incentivo

Aos amigos Bárbara D. Pena, Cássia B. Gomes e Eduardo Dias por tornarem melhores as horas passadas no laboratório de metalografia

Ao prof. Ernane Rodrigues da Silva, pela oportunidade de realização deste trabalho e pela boa vontade, disponibilidade e eficiência ao orientar e tirar dúvidas sobre este projeto

Ao prof. Rogério Felício dos Santos, pelas dicas preciosas sobre a execução deste trabalho e pela gentileza em aceitar participar da banca examinadora

Ao prof. Hermes de Souza Costa, pela bondade em aceitar contribuir com seus conhecimentos acadêmicos/científicos no exame deste trabalho de qualificação

Aos professores Victor S. E. Lima, Carlos Eduardo dos Santos, Elaine C. S. Corrêa e Paulo R. P. Paiva, pela ajuda na realização de atividades relacionadas a este trabalho

Aos bons professores do CEFET-MG, pela gentileza ao compartilharem seus conhecimentos e experiências profissionais e pela inspiração à realização do bom trabalho profissional

Aos estagiários e ao técnico Jorge W. Barbosa do Laboratório de Caracterização de Materiais do DEMAT/CEFET-MG, pela realização dos ensaios de caracterização das amostras testadas

Aos mecânicos Carlos A. O. Cosme e Geraldo M. Oliveira, pelo auxílio na preparação das amostras

Aos funcionários e trabalhadores terceirizados do CEFET-MG, principalmente do DEMAT, por tornarem possível a realização deste trabalho

Ao CEFET-MG, pela concessão de bolsa de mestrado

A todas as pessoas e aos profissionais que não tiveram seus nomes mencionados, mas que não foram menos cruciais para a concepção deste trabalho.

RESUMO

A liga alumínio-silício hipoeutética, utilizada em cabeçote de motor de combustão interna, foi submetida à usinagem por descargas elétricas em solução dielétrica de água deionizada e ureia, com o objetivo de ter sua dureza externa aumentada via enriquecimento superficial com nitrogênio proveniente do soluto orgânico. Foram realizadas usinagens por descargas elétricas com correntes de 5, 11 e 15A, com eletrodos ferramenta de polaridade positiva e negativa, e de 40A, com eletrodo ferramenta de polaridade positiva. As amostras foram caracterizadas por meio de ensaios de microdureza Vickers, difração de raios x, microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura. A dureza média das superfícies tratadas superou em mais de 422% a dureza média do metal base. Por meio da análise da difração de raios x verificou-se a mudança de perfil entre os difratogramas da liga alumínio-silício sem tratamento, usinada em solução aquosa de ureia e usinada em água deionizada somente. Apenas as amostras usinadas com corrente de 5A não apresentaram grandes mudanças nos seus difratogramas, em relação à liga metálica não tratada. Nos difratogramas das peças usinadas em solução aquosa de ureia, foram observados picos sugestivos de fases de nitreto de alumínio e oxinitretos de alumínio. Pelas micrografias, verificou-se a obtenção de duas regiões distintas na camada refundida: uma fina e dura e outra mais espessa e porosa, exceto em usinagem com corrente elétrica de 5A. A partir dos resultados obtidos, conclui-se que a nitretação por descargas elétricas é viável com correntes elétricas que variam entre 11 e 40A, com eletrodo ferramenta de polaridade positiva ou negativa, sendo um processo rápido e eficaz para aumentar a dureza superficial da liga alumínio-silício hipoeutética.

Palavras-chave: Usinagem por descargas elétricas; Nitretação por descargas elétricas; Alumínio-silício; Microdureza.

ABSTRACT

The hypoeutectic aluminum-silicon alloy, used in an internal combustion engine head, was subjected to machining by electric discharges in a dielectric solution of deionized water and urea, with the objective of increasing its external hardness via surface enrichment with nitrogen from the organic solute. Electrical discharge machining with 5, 11 and 15A currents was performed with positive and negative polarity tools and 40A with positive polarity tooling. The samples were characterized by Vickers microhardness, x-ray diffraction, optical microscopy and scanning electron microscopy tests. The average hardness of the treated surfaces was more than 422% higher than the average hardness of the base metal. Through x-ray diffraction analysis, the profile change was verified between the untreated aluminum-silicon alloy diffractograms, machined in aqueous urea solution and machined in deionized water only. Only samples machined with 5A current showed no major changes in their diffractograms compared to untreated alloy. In the diffractograms of the parts machined in aqueous urea solution, peaks suggestive of phases of aluminum nitride and aluminum oxynitrides were observed. The micrographs showed two distinct regions in the re-melted layer: one thin and hard and the other thicker and more porous, except when machining with 5A electrical current. From the results obtained, it is concluded that nitriding by electrical discharges is feasible with electrical currents ranging between 11 and 40A, with positive or negative polarity tool electrode, being a fast and effective process to increase the surface hardness of the hypoeutectic aluminum - silicon alloy.

Key words: EDM; Nitriding by electrical discharges; Aluminum-silicon; Microhardness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Difratoograma do alumínio nitretado por plasma de ressonância cicloelettrônica.....	22
Figura 2 – Difratoograma do alumínio 1050 submetido à nitretação a plasma.....	23
Figura 3 – Diagrama de fases Al-N	24
Figura 4 – Difratoogramas do alumínio 1050 nitretado em diferentes proporções de N ₂ /Ar.....	24
Figura 5 – Tipos de processos de EDM: por penetração (S-EDM), a fio (W-EDM) e de fresagem (M-EDM).....	27
Figura 6 – EDM por penetração	28
Figura 7 – Dificuldade de modelagem do processo EDM	29
Figura 8 – a) Fase de ignição; b) evolução da tensão e da corrente elétrica com o tempo	31
Figura 9 – a) Formação de elétrons secundários; b) evolução da tensão e da corrente elétrica com o tempo	31
Figura 10 – a) Formação do canal de plasma; b) evolução da tensão e da corrente com o tempo.....	32
Figura 11 – a) Ruptura do canal de plasma; b) evolução da tensão e da corrente com o tempo	34
Figura 12 – Tempo de erosão, afastamento periódico e retração do eletrodo ferramenta.....	35
Figura 13 – Perfil de tensões residuais em aço usinado por EDM, com corrente de pico de 16A, em diferentes tempos de pulso	38
Figura 14 – Principais parâmetros elétricos e sua evolução durante a descarga.....	40
Figura 15 – Espessura média da camada refundida em função da corrente elétrica e da densidade de corrente.....	43
Figura 16 – Características do acabamento em função da frequência da EDM	44
Figura 17 – Modelo para o canal de plasma do processo NDE do aço AISI 4140 com eletrodo de cobre eletrolítico	52
Figura 18 – Desenhos dos eletrodos e suas respectivas dimensões.....	56
Figura 19 – Equipamento Eletroplus EDM-540 da Servspark	58

Figura 20 – Cuba auxiliar de material inoxidável adaptada em equipamento de EDM	59
Figura 21 – Representação de imagem mostrando bomba auxiliar, cuba auxiliar, servo mecanismo e painel de controle em equipamento EDM	59
Figura 22 – Fotografia mostrando a montagem dos eletrodos peça e ferramenta para usinagem por descargas elétricas.....	61
Figura 23 – Imagem mostrando a execução da EDM	61
Figura 24 – Diagrama correlacionando amostras e variáveis do planejamento experimental da primeira etapa	62
Figura 25 – Diagrama correlacionando amostras e variáveis do planejamento experimental da segunda etapa	63
Figura 26 – Fotografia das peças de alumínio-silício usinadas com eletrodo de cobre eletrolítico, corrente elétrica de 40A, em solução aquosa de ureia	66
Figura 27 – Imagem de MEV de vista frontal da camada modificada pela usinagem por descargas elétricas	67
Figura 28 – Imagem de MEV de vista frontal da camada modificada pela usinagem por descargas elétricas	68
Figura 29 – Imagem de MEV de seção transversal da camada modificada da amostra UreiaPos40A	70
Figura 30 – Imagem de MEV de seção transversal da camada modificada da amostra GrUreiaPos40A	70
Figura 31 – Micrografias obtidas por MO da seção transversal da camada modificada da amostra UreiaPos40A	71
Figura 32 – Micrografias obtidas por MO da seção transversal da camada modificada da amostra GrUreiaPos40A	72
Figura 33 – Micrografias obtidas por MO com indicação das zonas refundidas externas (ZRE) e internas (ZRI) das camadas modificadas.....	72
Figura 34 – Gráfico de valores médios das espessuras da ZRE e da ZRI de amostras usinadas em solução aquosa de ureia	73
Figura 35 - Difratogramas do metal base e de amostras usinadas com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico.....	75
Figura 36 - Difratogramas do metal base e de amostras usinadas com eletrodo ferramenta de grafita	75

Figura 37 – Microdureza média do metal base (liga Al-Si) e das superfícies usinadas em solução aquosa de ureia com eletrodos de grafita e de cobre eletrolítico	76
Figura 38 – Diagrama contendo imagens de amostras usinadas com diferentes parâmetros e seus respectivos tempos de usinagem	79
Figura 39 – Imagem de MEV da vista de topo da amostra UreiaPos5A	80
Figura 40 - Imagem de MEV da vista de topo da amostra UreiaPos5A	80
Figura 41 - Micrografias obtidas por MO de amostras usinadas em solução aquosa de ureia	83
Figura 42 – Imagem de MEV da camada modificada da amostra UreiaPos5A.....	84
Figura 43 – Gráfico das espessuras médias da ZRE e da ZRI das camadas modificadas das amostras usinadas em solução aquosa de ureia.....	86
Figura 44 – Difrátogramas do metal base e das amostras usinadas com eletrodo ferramenta de polaridade positiva	87
Figura 45 – Difrátogramas do metal base e das amostras usinadas com corrente elétrica de 5A e eletrodo ferramenta de polaridade positiva	88
Figura 46 - Difrátogramas do metal base e das amostras usinadas com corrente elétrica de 11A e eletrodo ferramenta de polaridade positiva.....	89
Figura 47 - Difrátogramas do metal base e das amostras usinadas com corrente elétrica de 15A e eletrodo ferramenta de polaridade positiva.....	89
Figura 48 - Difrátogramas do metal base e das amostras usinadas com eletrodo ferramenta de polaridade negativa.....	90
Figura 49 - Difrátogramas do metal base e das amostras usinadas com corrente elétrica de 5A e eletrodo ferramenta de polaridade negativa	91
Figura 50 - Difrátogramas do metal base e das amostras usinadas com corrente elétrica de 11A e eletrodo ferramenta de polaridade negativa	92
Figura 51 - Difrátogramas do metal base e das amostras usinadas com corrente elétrica de 15A e eletrodo ferramenta de polaridade negativa	92
Figura 52 – Micrografia da amostra UreiaNeg15A contendo indentações do ensaio de microdureza Vickers.....	93
Figura 53 – Médias dos valores de dureza medidos no metal base, nas ZREs e ZRIs das amostras tratadas na segunda etapa do processo experimental e da amostra UreiaPos40A	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades do AlN	19
Tabela 2 – Condições do teste de desgaste a seco da liga de alumínio submetida à nitretação a plasma acomodada em precipitado	20
Tabela 3 – Resultados do teste de desgaste a seco da liga de alumínio submetida à nitretação a plasma acomodada em precipitado	21
Tabela 4 – Composição química média da liga Al-Si hipoeutética	55
Tabela 5 – Parâmetros da usinagem por descargas em liga Al-Si.....	60
Tabela 6 – Parâmetros da análise por difração de raios X.....	65
Tabela 7 – Condutividade elétrica da solução aquosa de ureia antes e depois da EDM das amostras.....	81

LISTA DE SÍMBOLOS

$(\text{NH}_2)_2\text{CO}$:	ureia
$^\circ\text{C}$:	graus Celsius
2θ :	ângulo de difração 2-theta
$\text{A}\cdot\text{mm}^{-2}$:	Ampère por milímetro quadrado
a_A :	raio do canal de plasma próximo ao anodo
a_C :	raio do canal de plasma próximo ao catodo
Al :	alumínio
Al_2Cu :	composto de alumínio e cobre
Al_2O_3 :	alumina
Al-Cu-Mg :	alumínio-cobre-magnésio
AlN :	nitreto de alumínio
Al-Si :	alumínio-silício
gL^{-1} :	gramas por litro
gf :	gramaforça
GPa :	Gigapascal
h :	horas
H_2 :	gás hidrogênio
$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$:	Joule por quilograma-Kelvin
K :	Kelvin
kg :	quilograma
kV :	quilovolts
$k\beta$:	linha espectral beta
L :	litro
$\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$:	litros por minuto
$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$:	metros por segundo
mA :	miliampères
mca :	metros de coluna de água
Mgm^{-3} :	megagrama por metro cúbico
mm :	milímetros
N :	Newton
N_2 :	gás nitrogênio

N_2/Ar :	gás nitrogênio/argônio
NH_3 :	amônia
NH_4OH :	hidróxido de amônio
nm:	nanometros
q_A :	fluxo de calor na superfície do anodo
q_C :	fluxo de calor na superfície do catodo
r_A :	raio na cavidade fundida no anodo
r_C :	raio da cavidade fundida no catodo
Ra:	rugosidade média
s:	segundos
SiC:	carbeto de silício
t:	tempo de usinagem
Ti-6Al-4V:	titânio-alumínio-vanádio
TiC:	carbeto de titânio
$Wm^{-1}K^{-1}$:	Watt por metro-Kelvin
Ωm :	Ohm-metro
μm :	micrometros
μs :	microsegundos
μScm^{-1} :	microsiemens por centímetro

LISTA DE SIGLAS

AISI:	<i>American Iron and Steel Institute</i> (Instituto Americano do Ferro e Aço)
DLC:	Diamond Like Carbon
EDC:	<i>Electrical Discharge Coating</i> (revestimento por descargas elétricas)
EDM:	<i>Electrical Discharge Machining</i> (usinagem por descargas elétricas)
HV:	<i>Hardness Vickers</i> (Dureza Vickers)
ICDD:	<i>International Centre for Diffraction Data</i> (Centro Internacional de Dados de Difração)
M-EDM:	<i>Milling EDM</i> (usinagem de fresagem por descargas elétricas)
MEV:	Microscopia Eletrônica de Varredura
MO:	Microscopia Ótica
NDE:	Nitretação por Descargas Elétricas
S-EDM:	<i>Sinking EDM</i> (usinagem por descargas elétricas por penetração)
W-EDM:	<i>Wire EDM</i> (usinagem por descargas elétricas a fio)
ZR:	Zona Refundida
ZRE:	Zona Refundida Externa
ZRI:	Zona Refundida Interna
ZTA:	Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	NITRETAÇÃO DO ALUMÍNIO.....	18
3.2	PROCESSO DE USINAGEM POR DESCARGAS ELÉTRICAS.....	25
3.2.1	Aplicações da usinagem por descargas elétricas	25
3.2.2	Características gerais da usinagem por descargas elétricas.....	26
3.2.3	Variáveis da EDM.....	39
3.2.3.1	<u>Polaridade dos eletrodos</u>.....	40
3.2.3.2	<u>Corrente elétrica e tempo de pulso</u>.....	41
3.2.3.3	<u>Tensão elétrica</u>	44
3.2.3.4	<u>Eletrodos</u>	45
3.2.3.5	<u>Fluido dielétrico</u>.....	46
3.3	NITRETAÇÃO POR DESCARGAS ELÉTRICAS	49
4	METODOLOGIA.....	55
4.1	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	55
4.2	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	60
4.2.1	Primeira etapa do processo experimental.....	62
4.2.2	Segunda etapa do processo experimental	63
4.3	METALOGRAFIA	64
4.4	DIFRAÇÃO DE RAIOS X.....	64
4.5	MICRODUREZA.....	65
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO – PRIMEIRA ETAPA.....	66
5.1	CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DOS FLUIDOS DE EDM.....	69
5.2	METALOGRAFIA	69
5.3	DIFRAÇÃO DE RAIOS X.....	74
5.4	MICRODUREZA VICKERS.....	76
6	CONCLUSÕES PARCIAIS	77
7	RESULTADOS E DISCUSSÃO – SEGUNDA ETAPA	78

7.1	CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DOS FLUIDOS DE EDM	81
7.2	METALOGRAFIA	81
7.3	DIFRAÇÃO DE RAIOS X.....	86
7.4	MICRODUREZA VICKERS.....	93
8	CONCLUSÕES	95
9	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	97
	REFERÊNCIAS.....	98

1 INTRODUÇÃO

O alumínio é um material amplamente utilizado nas indústrias aeroespaciais e automotivas devido principalmente às seguintes propriedades: elevada resistência específica, grande resistência à corrosão em diversos meios e boa conformabilidade. No entanto, em sistemas tribológicos mais severos, normalmente são necessários tratamentos superficiais para aumentar a dureza do material, elevando sua resistência ao desgaste abrasivo e, em alguns casos, ao desgaste adesivo.

Neste trabalho, a liga alumínio-silício hipoeutética foi submetida à usinagem por descargas elétricas em solução aquosa de ureia a fim de avaliar o seu efeito no aumento de dureza via enriquecimento superficial com nitrogênio proveniente do soluto orgânico. O enriquecimento superficial com nitrogênio pelo processo de usinagem por descargas elétricas foi verificado por outros pesquisadores, recebendo a denominação de nitretação por descargas elétricas (NDE).

A usinagem por descargas elétricas (EDM - *Electrical Discharge Machining*) é uma técnica consolidada para o processamento de materiais e peças cujos aspectos geométricos não permitem a retirada de material por técnicas convencionais. A experiência de trabalho com diferentes materiais e com diferentes insumos levou à observação de resultados inesperados, como alterações na composição química da superfície. Embasados nesses fatos, os pesquisadores têm buscado a apropriação da técnica de EDM para novas finalidades. A descoberta de elementos químicos provenientes do fluido dielétrico e do eletrodo ferramenta adicionados nas superfícies usinadas, por exemplo, deu ensejo aos estudos recentes sobre o uso da EDM para enriquecimento superficial e deposição de material. Desta forma, surgiu a NDE.

A NDE do alumínio é promissora no sentido de unir dois processos em um: usinagem e nitretação, com possibilidade de redução do custo de produção dos componentes que necessitam deste enriquecimento superficial, a exemplo de Santos (2013) que foi bem sucedido ao nitretar o aço AISI 4140 com descargas elétricas, processo menos custoso do que outros processos de nitretação do aço citados pelo autor.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a viabilidade técnica da nitretação de liga alumínio-silício hipoeutética por meio do processo de usinagem por descargas elétricas em meio rico em nitrogênio, utilizando diferentes valores de corrente elétrica e diferentes polaridades nos eletrodos ferramenta.

São objetivos específicos deste projeto:

- Realizar testes de usinagem por descargas elétricas em amostras de liga alumínio-silício, com diferentes valores de corrente elétrica e diferentes polaridades do eletrodo ferramenta.
- Realizar análise metalográfica das amostras antes e após a EDM.
- Medir as espessuras das camadas modificadas das amostras.
- Efetuar análise de difração de raios x nas superfícies antes e após a EDM.
- Submeter as amostras ao ensaio de microdureza Vickers, nas diferentes regiões da seção transversal das camadas modificadas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com vistas ao embasamento teórico e adequado proceder experimental, foram colhidas na literatura informações sobre a nitretação do alumínio e de suas ligas, a usinagem por descargas elétricas e, em uma abordagem mais atual, a nitretação por descargas elétricas.

3.1 NITRETAÇÃO DO ALUMÍNIO

Considerado o segundo elemento metálico mais abundante da Terra, o alumínio conquista nichos de aplicação desde a consolidação das técnicas de beneficiamento da bauxita para a obtenção de sua forma metálica. No processo de eletrificação, esse metal de elevada condutividade elétrica e baixa massa específica foi amplamente utilizado em redes aéreas de cabos para transmissão de energia a longas distâncias. Adicionalmente, propriedades como elevadas resistência específica e resistência à corrosão; excelente usinabilidade e conformabilidade; boas condutividades elétrica e térmica; características paramagnéticas e não pirofóricas; reciclabilidade e atoxicidade são responsáveis pela adoção deste material em diferentes indústrias, desde utensílios gerais e eletrodomésticos, componentes mecânicos e eletrônicos, trocadores de calor, até corpos estruturais submetidos a alta pressão, e reservatórios de alimentos, bebidas e fármacos. Além das propriedades atraentes do alumínio, este metal apresenta ainda grande versatilidade, visto que a elaboração de diferentes ligas permite alteração significativa de algumas propriedades, conforme a aplicação desejada (ASM INTERNATIONAL; DAVIS; ASM INTERNATIONAL, 2000).

Por sua alta resistência específica, o alumínio destaca-se em aplicações que visam a economia energética, por exemplo, no âmbito de transportes e na indústria aeroespacial. As propriedades mecânicas deste material, em geral, atendem bem a estes setores, contudo a resistência ao desgaste abrasivo precisa ser melhorada com tratamentos superficiais para o uso em situações de atrito mais intenso. Em seu estudo, Zalnezhad et al. (2013) aumentaram a dureza de 170HV até 360HV e a vida de fadiga de *fretting* de baixo ciclo da liga Al7075-T6 em 44% por meio da anodização.

Os autores ressaltam, porém, que nem todas as ligas reagem bem à obtenção de camada anodizada dura. Neste contexto, surge o papel da nitretação como importante ferramenta para promover melhoria da resistência ao desgaste em diversos tribossistemas e, desta forma, ampliar o conjunto de aplicações das ligas de alumínio onde a baixa densidade é requisito indispensável. Dentre as principais características do nitreto de alumínio (AlN), Gredelj et al. (2002) citam: elevada condutividade térmica ($320\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), alta resistividade elétrica, boa resistência à corrosão, altas dureza (1400HV) e resistência ao desgaste abrasivo. Na Tabela 1 estão representadas outras propriedades típicas do AlN.

Tabela 1 – Propriedades do AlN

Item	Propriedades
Densidade teórica	3,26Mgm ⁻³
Dureza	1400HV
Módulo de Young	330GPa
Condutividade térmica	175Wm ⁻¹ K ⁻¹
Coefficiente de expansão térmica	4,5 x 10 ⁻⁶ K ⁻¹
Resistividade elétrica	>10 ¹³ Ωm
Calor específico	740J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
Temperatura de início de oxidação	1073K
Ponto de fusão	2763K

Fonte: Adaptado de Vissutipitukul e Aizawa (2005)

É possível identificar uma diferença grande de propriedades entre o alumínio metálico e o nitreto de alumínio. Na literatura, diversos autores enfatizam que, em relação às ligas metálicas de alumínio, o AlN possui: dureza cerca de dez vezes mais elevada, resistência a temperaturas bem maiores e maior resistividade elétrica. A resistência à corrosão do AlN também é um argumento favorável à nitretação das ligas de alumínio, pois sabe-se que grande parte dessas ligas têm menor resistência à corrosão do que o metal puro.

Diferentes pesquisadores relataram dificuldades na nitretação do alumínio, por exemplo, elevado gasto energético nos processos, recristalização indesejável e necessidade de limpeza para remoção de óxidos pouco permeáveis à difusão de nitrogênio (STOCK et al., 1997), obtenção de camadas nitretadas irregulares e com microfissuras (BUCHWALDER et al., 2013; GREDELJ, 2002; STOCK et al., 1997).

Telbizova et al. (2000) atingiram uma espessura de camada nitretada de 400nm por implantação no alumínio de íons de nitrogênio de baixa energia. Os pesquisadores citados anteriormente, assim como Möller et al. (2001) e Fitz e Möller (2002), acreditam que o transporte difusional durante a nitretação iônica do alumínio pode ser dominado pela difusão de Al para a superfície, e não de N para o interior da peça.

Os elementos de liga exercem influência sobre a maior ou menor facilidade de crescimento da camada nitretada. Reinhold, Naumann e Spies (1998) apud Buchwalder et al. (2013) mencionam o magnésio como elemento facilitador da nitretação das ligas de alumínio e o silício como um dificultador. Quanto a este último elemento não há consenso entre os pesquisadores, pois Buchwalder et al. (2013) alcançaram sucesso na nitretação de ligas de alumínio com alto teor de silício. Partindo da influência dos elementos de liga, Vissutipitukul e Aizawa (2005) apostaram na nitretação a plasma acomodada em precipitado para uma maior taxa de crescimento da camada nitretada. Neste processo, foi utilizada a liga Al-Cu-Mg contendo precipitados de Al_2Cu que atuam como sítio de nucleação e crescimento de AlN, reduzindo significativamente o tempo de nitretação. Os autores obtiveram, desta forma, uma camada nitretada dura (entre 1000 e 1200HV, em contraposição aos menos de 100HV do substrato), composta de nitretos de alumínio de estrutura hexagonal, com cores variando entre cinza escuro e preto, e mais resistente ao desgaste. A resistência ao desgaste por deslizamento foi determinada por meio de teste pino-sobre-disco sem lubrificação, conforme os parâmetros da Tabela 2 (VISSUTIPITUKUL; AIZAWA, 2005).

Tabela 2 – Condições do teste de desgaste a seco da liga de alumínio submetida à nitretação a plasma acomodada em precipitado

Condições do teste de desgaste a seco	
Abrasivo (disco)	Al_2O_3
Materiais testados (pino)	Al-Si (A356)
	Al-Cu-Mg
	Al-Cu-Mg nitretado
	A356 anodizado
Velocidade de deslizamento	$0,25m.s^{-1}$
Carga aplicada	40N
Lubrificante	Nenhum

Fonte: Adaptado de Vissutipitukul e Aizawa (2005)

Os resultados do teste de desgaste estão representados na Tabela 3, onde o volume desgastado foi medido para uma distância de deslizamento de 600m.

Tabela 3 – Resultados do teste de desgaste a seco da liga de alumínio submetida à nitretação a plasma acomodada em precipitado

Material	Coef. de Fricção	Vol. desgastado (m ³)	Tipo de desgaste
Al-Si (A356)	0,31	1,74 x 10 ⁻⁹	Abrasivo+ adesivo
Al-Cu-Mg	0,37	5,14 x 10 ⁻⁹	Abrasivo+ adesivo
A356 anodizado	0,56	0,65 x 10 ⁻⁹	Abrasivo+ adesivo
Al-Cu-Mg nitretado	0,13	0,37 x 10 ⁻⁹	Abrasivo

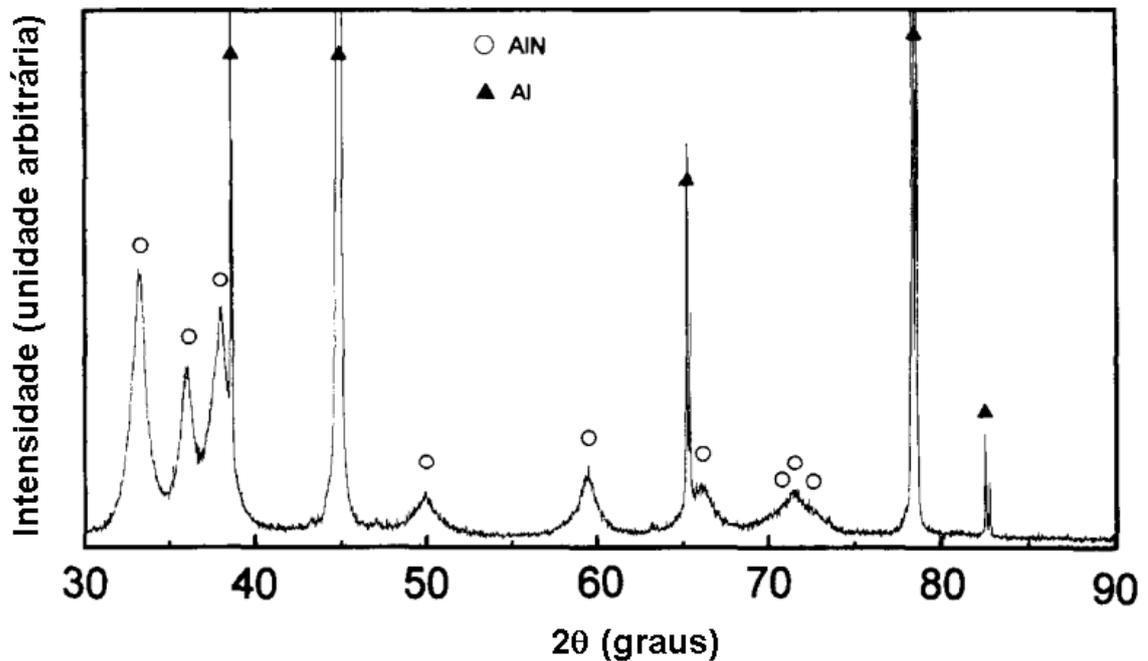
Fonte: Adaptado de Vissutipitukul e Aizawa (2005)

O desgaste a seco foi menos severo na liga submetida à nitretação pois, devido ao menor coeficiente de fricção, a temperatura das superfícies em atrito foi menor do que a temperatura de início da oxidação. Nesta faixa de temperatura, cerca de 330K, não foi observado desgaste adesivo, nem desgaste agravado por oxidação (VISSUTIPITUKUL; AIZAWA, 2005).

Majzooobi e Jaleh (2007) obtiveram êxito em aumentar a vida de fadiga de *fretting* da liga Al7075-T6 (em até 185% em baixas tensões e até quase 60% em altas tensões) por meio de revestimento duplex com nitretação controlada e pulverização de Ti. A nitretação iônica pura, no entanto, reduziu a vida de fadiga de *fretting* em relação ao material não tratado, possivelmente devido à presença de concentradores de tensão na camada nitretada.

Ebisawa e Saikudo (1996) aumentaram a dureza superficial da peça de alumínio (de 30HV para 1400HV) por meio da nitretação a plasma de ressonância cicloeletônica em 900s. A camada nitretada obtida por estes pesquisadores foi de 15µm e apresentou condutividade elétrica, devido à estrutura colunar do AlN envolto por alumínio metálico. O difratograma que comprova a presença de AlN na peça trabalhada por Ebisawa e Saikudo (1996) está representado na Figura 1. Segundo os autores, o perfil de difração de raios x está de acordo com o padrão estrutural de wurtzita AlN sobreposta ao alumínio.

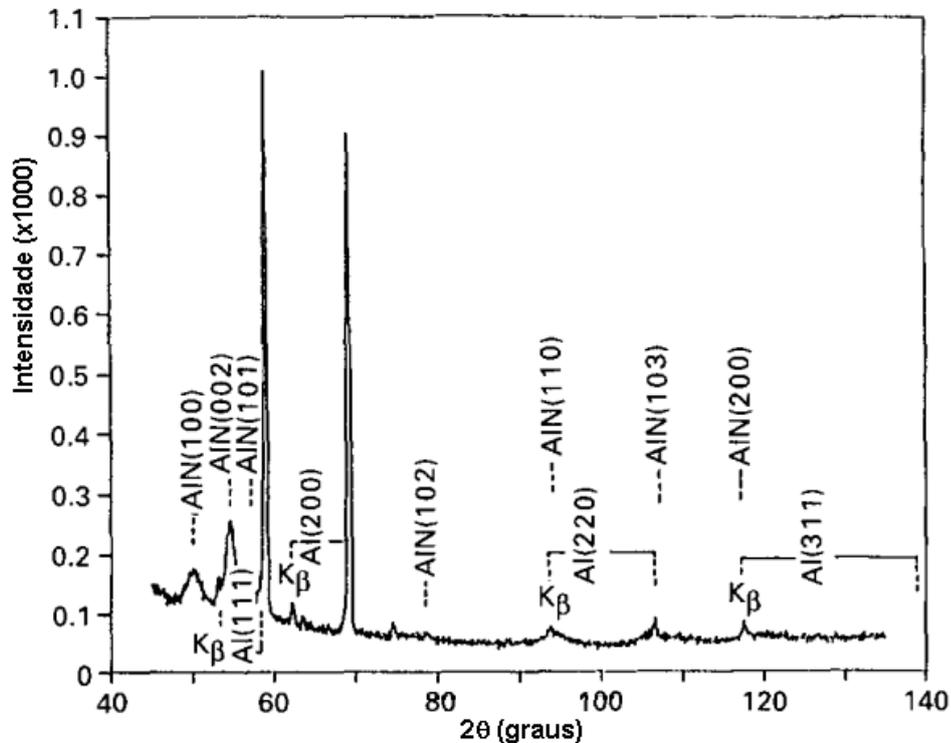
Figura 1 – Difratograma do alumínio nitretado por plasma de ressonância cicloelettrônica



Fonte: (EBISAWA; SAIKUDO, 1996)

Chen et al. (1994) realizaram a nitretação a plasma de três ligas de alumínio (1050, 6063 e 7070) e conseguiram obter camada nitretada preta-brilhante inferior a $3\mu\text{m}$ que promoveu significativo ganho em resistência ao desgaste. Para o alumínio 1050, também houve considerável aumento na resistência à corrosão em solução de HCl 1M. Assim como no trabalho de Ebisawa e Saikudo (1996), no difratograma obtido por Chen et al. (1994), mostrado na Figura 2, foi detectada a estrutura da wurtzita, porém, também foram consideradas no último as radiações $k\beta$.

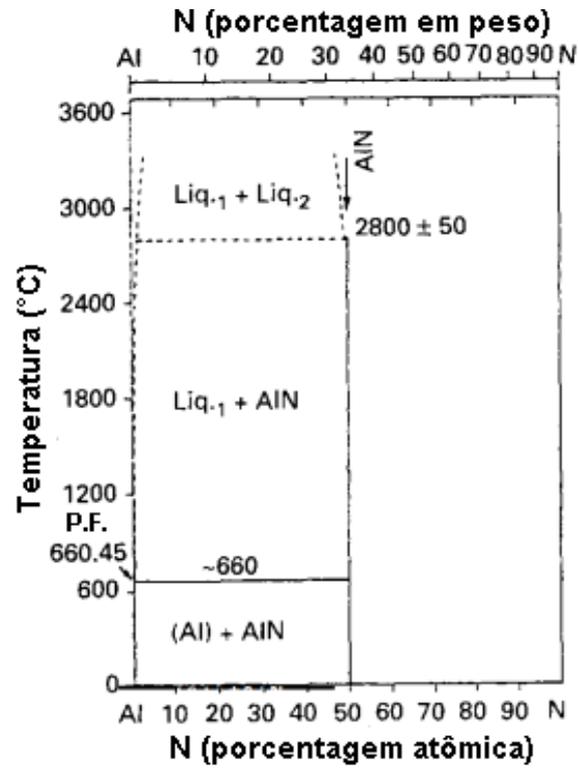
Figura 2 – Difratoograma do alumínio 1050 submetido à nitretação a plasma



Fonte: (CHEN; STOCK; MAYR, 1994)

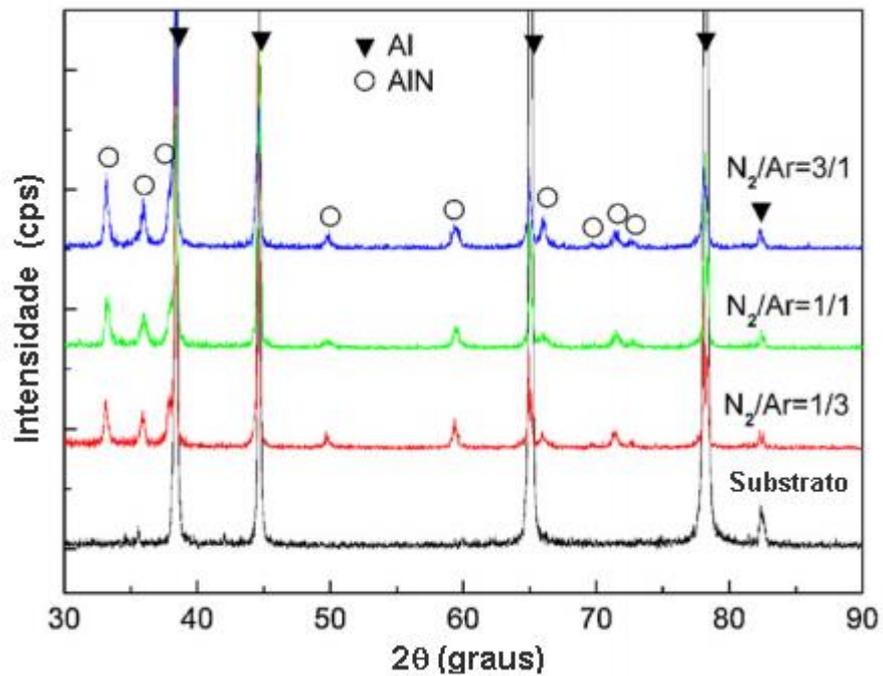
De acordo com Chen et al. (1994) a identificação de uma única estrutura (wurtzita) de AlN é coerente com o diagrama de fases Al-N, mostrado na Figura 3, que apresenta apenas um tipo de nitreto de alumínio estável. De forma semelhante, Österle et al. (1998) obtiveram camada nitretada de aproximadamente 100nm de espessura de grãos de AlN hexagonal (wurtzita) coalescidos e cerca de 50nm de AlN hexagonal disperso em Al por implantação iônica. No trabalho de Zheng et al. (2012), a mesma estrutura foi obtida, conforme observado na Figura 4, em uma camada nitretada de 200 a 400 μ m de espessura e 690HV de microdureza, no processo de nitretação do alumínio 1050 utilizando arco de gás nitrogênio misturado com argônio. A existência de uma fase cúbica metaestável de nitreto de alumínio é relatada por Meletis e Yan (1991) apud Chen et al. (1994) e por Serventi et al. (1996) apud Österle et al. (1998), contudo esta fase não pode ser observada nos trabalhos de Chen et al. (1994), Österle et al. (1998) e Zheng et al. (2012).

Figura 3 – Diagrama de fases Al-N



Fonte: (CHEN; STOCK; MAYR, 1994)

Figura 4 – Difratogramas do alumínio 1050 nitretado em diferentes proporções de N_2/Ar



Fonte: (ZHENG, 2012)

3.2 PROCESSO DE USINAGEM POR DESCARGAS ELÉTRICAS

A compreensão geral do processo de usinagem por descargas elétricas (EDM – *Electrical Discharge Machining*) é importante para o estudo da nitretação por descargas elétricas (NDE), visto que a NDE teve sua origem a partir da observação dos fenômenos que ocorrem na EDM.

3.2.1 Aplicações da usinagem por descargas elétricas

A EDM domina certo nicho do processamento de materiais devido à sua capacidade de atender a determinados requisitos cuja viabilidade não se verifica da mesma forma por outras técnicas de usinagem. Os exemplos que se seguem fornecem a ideia deste tipo de demanda.

A EDM tem ampla implementação industrial, sendo largamente utilizada em materiais duros e que necessitam assumir formas complexas com alta precisão geométrica e dimensional. Por exemplo, na área de ferramentaria são produzidos por este processo moldes de injeção e de fundição, matrizes para estampagem, forjamento e extrusão, e fieiras para trefilação (ARANTES et al., 2003; FREDRIKSSON; HOGMARK, 1995; PEÇAS; HENRIQUES, 2003; RAMASAWMY; BLUNT, 2004).

O uso de compósitos de matriz metálica com reforços cerâmicos, a despeito das melhorias significativas que trazem ao produto final, tem sido ainda limitado devido ao alto custo de usinagem desses materiais, visto que as partículas de reforço geram excessivo desgaste abrasivo das ferramentas de corte. Para este tipo de material, a EDM destaca-se como processo de usinagem bastante promissor (FERAY GULERYUZ et al., 2013; KUMAR; MOHIT, 2013; PATIL; BRAHMANKAR, 2010).

Sua agilidade para o processamento de materiais compósitos, faz ainda com que a EDM seja amplamente utilizada nas indústrias aeroespaciais (TARIQ JILANI; PANDEY, 1983), nas quais há predominância de exploração deste tipo de material.

O processo de EDM é uma das melhores alternativas para a usinagem de materiais resistentes à corrosão e ao alto desgaste (HASÇALÝK; ÇAYDAŞ, 2004). Patel et al. (1989) exemplificam esta aplicação ao mencionarem o uso da EDM a fio para o corte de materiais cerâmicos.

A usinagem de furos finos e em materiais finos e frágeis é outra grande aplicação da técnica EDM (JESWANI, 1981). Na modalidade EDM a fio, realiza-se a micro-usinagem de bicos de injeção de combustíveis, furos de feiras para fibras sintéticas, dispositivos eletrônicos e óticos, peças micromecânicas e microferramentas (KUNIEDA et al., 2005).

Leão e Pashby (2004) salientam que também é possível a utilização da EDM para texturização e obtenção de ligas de superfície. Além da indústria aeroespacial, os autores citam a aplicação da técnica em indústrias de próteses biomédicas.

Kunieda et al. (2005) e Kumar et al. (2009) apontam para a possibilidade de aplicações menos óbvias, como tratamentos de superfície e processo aditivo. Minami et al. (1998) apud Kunieda et al. (2005) exemplificam uma aplicação não convencional da EDM a fio com o uso desta técnica para a coloração de ligas de titânio.

A usinagem por descargas elétricas também é aplicada a materiais macios, sendo muito comum no tratamento de ligas de alumínio em regime de fadiga de alto ciclo na indústria aeronáutica, em moldes para injeção de polímeros e em componentes eletrônicos (AROOJ et al., 2014; JAHAN et al., 2014). Em peças mais delicadas, a técnica é conveniente por dispensar o uso de alta força de fixação durante o processo, visto que a usinagem não se realiza via aplicação de esforço mecânico (ASM, 1996 apud AROOJ et al., 2014).

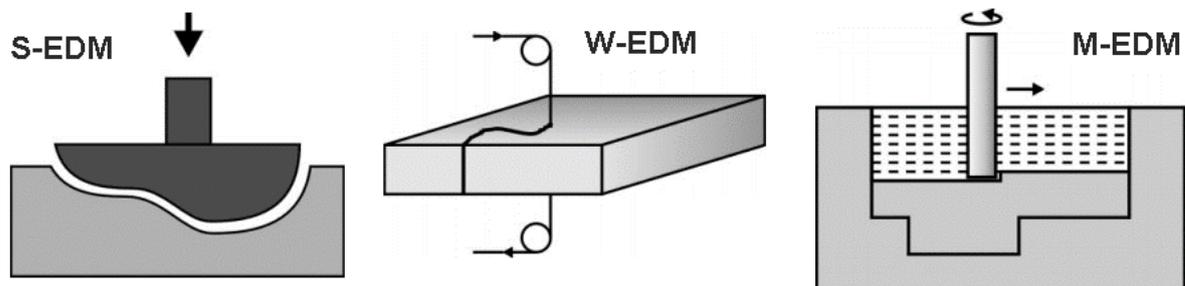
3.2.2 Características gerais da usinagem por descargas elétricas

Em contraposição às técnicas de usinagem convencionais, na usinagem por descargas elétricas, a remoção de material não se dá pela formação de cavaco via aplicação de esforço mecânico, mas sim por fusão e vaporização/sublimação do material exposto às descargas elétricas.

As descargas elétricas ocorrem entre a peça a ser usinada, denominada peça (ou eletrodo) de trabalho, e o eletrodo ferramenta, na presença de fluido dielétrico (MCGEOUGH, 1988). O processo de EDM possui variantes, representadas na Figura 5, das quais destacam-se: a EDM a fio (W-EDM – *Wire EDM*), a EDM de fresagem (M-EDM – *Milling EDM*) e a EDM por penetração (S-EDM – *Sinking EDM*) (BLEYS et al., 2006); dentre as diferentes variedades, opta-se pela abordagem da S-EDM neste texto, a qual a partir deste ponto será tratada simplesmente por EDM.

Tendo em vista que, apesar das divergências existentes entre os diferentes processos, o princípio de funcionamento é o mesmo, apresenta-se a seguir um conjunto de informações relevantes para a compreensão da EDM e da influência de seus principais parâmetros nas características finais da peça de trabalho e no rendimento do processo.

Figura 5 – Tipos de processos de EDM: por penetração (S-EDM), a fio (W-EDM) e de fresagem (M-EDM)



Fonte: (BLEYS et al., 2006, p. 15–16)

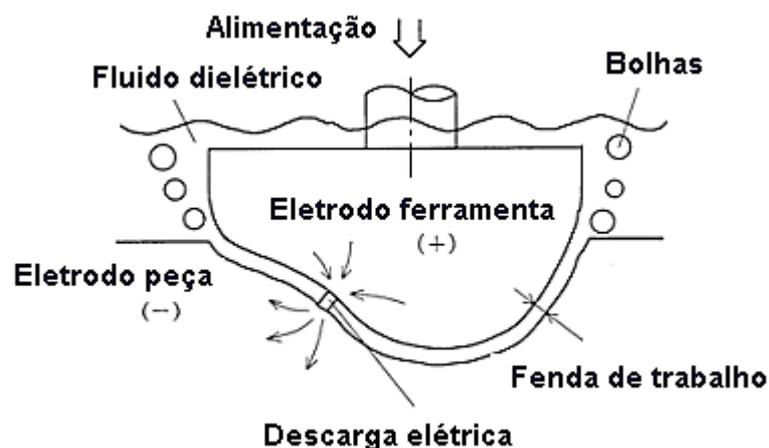
A EDM é realizada em equipamento apropriado dotado de mecanismo de fixação para dois eletrodos (o eletrodo peça e o eletrodo ferramenta), os quais durante todo o processo de usinagem são mantidos afastados um do outro por meio do controle exercido pelo servo mecanismo da máquina, cujo objetivo é promover a aproximação adequada dos dois eletrodos, manter esta distância apropriada (denominada fenda de trabalho ou *gap*, que via de regra encontra-se na faixa de 0,01 a 0,5 mm (MCGEOUGH, 1988)), e afastar a ferramenta após cada sequência de descargas elétricas (FULLER, 1989).

A princípio, a técnica de EDM era aplicável apenas a materiais condutores de eletricidade; estudos mais recentes, no entanto, buscam aplicabilidade em materiais maus condutores (DESCOEUDRES et al., 2005; PEÇAS; HENRIQUES, 2003) via adição de camada condutora na superfície dos mesmos (KUNIEDA et al., 2005).

Partindo do princípio de que a superfície a ser usinada conduz eletricidade, descargas elétricas terão maior probabilidade de ocorrer nos pontos de menor distância entre as superfícies dos eletrodos, gerando aquecimento e remoção de material e consequente aumento de distância, que imediatamente é compensado pelo avanço da ferramenta provocado pelo sistema de servo mecanismo, o qual geralmente opera por comparação entre a diferença de potencial entre os eletrodos e uma tensão de referência (FULLER, 1989; KUMAR et al., 2009; KUNIEDA et al., 2005).

Na Figura 6 está representado o processo de EDM por penetração em que o eletrodo ferramenta é positivo.

Figura 6 – EDM por penetração



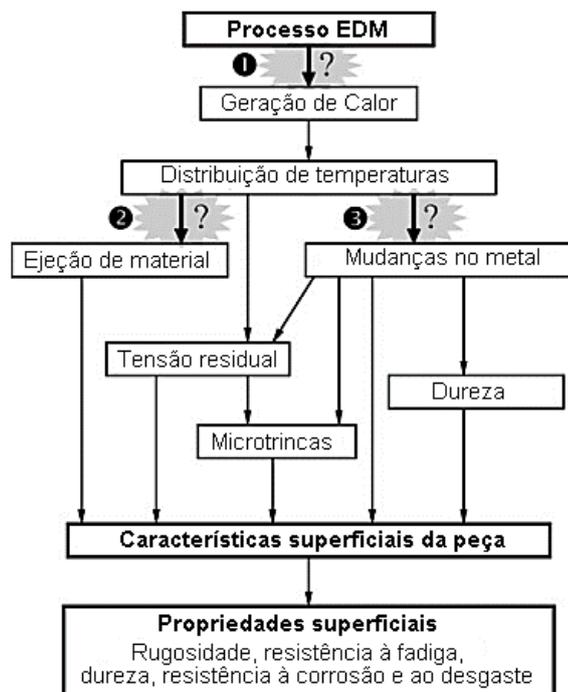
Fonte: (KUNIEDA et al., 2005), tradução livre

Na EDM, o material é submetido a elevadas temperaturas, geradas pelo fluxo elétrico. Leão e Pashby (2004) citam valores entre 9000 e 30000K, a depender do tipo de dielétrico utilizado.

Após o intervalo de tempo programado para uma sucessão de descargas, admite-se que ocorre brusca queda de pressão devido a extinção do canal de plasma. O fluido dielétrico, até então à margem desta coluna de material ionizado, passa a ocupar novamente o espaço entre a peça e a ferramenta, promovendo a retirada do material fundido e erodido pelos elétrons e íons bombardeados sobre a superfície dos eletrodos (EUBANK et al., 1993; MCGEOUGH, 1988). A erosão de material ocorre, inevitavelmente, nos dois eletrodos, embora a erosão em um deles seja muito mais rápida que no outro (ALBINSKI et al., 1996).

Muitos modelos foram propostos desde o trabalho pioneiro de usinagem por descargas elétricas, em 1943, realizado pelos cientistas russos B. R. e N. I. Lazarenko, citados por Kumar et al. (2009) e por Leão e Pashby (2004). Bleys (2006) menciona a dificuldade de criação de um modelo para a EDM, devido aos múltiplos fenômenos físicos envolvidos no processo, por exemplo, geração e transferência de calor, mecanismo de ejeção de material e mudanças microestruturais no metal base, Figura 7.

Figura 7 – Dificuldade de modelagem do processo EDM



Fonte: (BLEYS et al., 2006), tradução livre

Kunieda et al. (2005) deixam bem clara esta dificuldade no trecho a seguir:

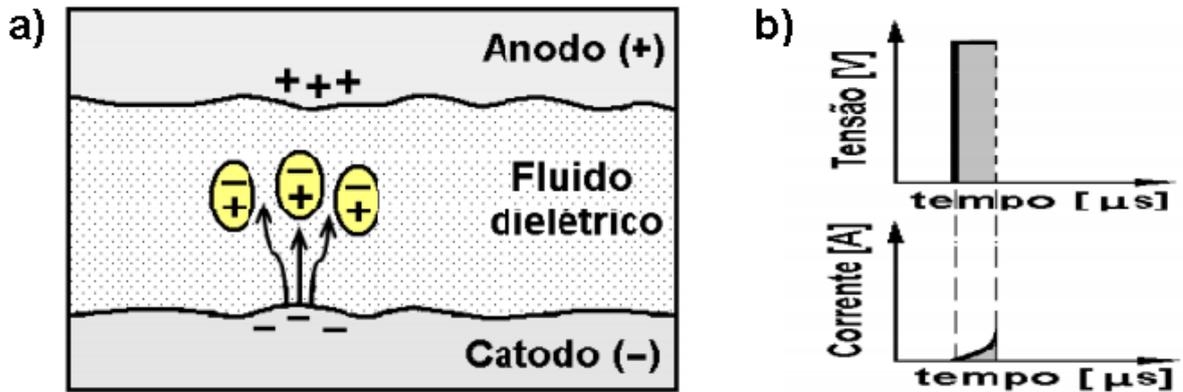
Processos EDM envolvem fenômenos transitórios que ocorrem em espaço estreito (ordem de micrometros) e em curto período de tempo (ordem de microssegundos). Esses fenômenos de EDM não estão em equilíbrio térmico, mas incluem transições entre sólido, líquido, gás e plasma, reações químicas, transferência de massa e deslocamento de limites. Portanto, comparados a outros fenômenos de descarga, como a descarga incandescente em processos de gravação a seco e descarga de arco em processos de soldagem, a física envolvida nos processos de EDM é obviamente mais complicada, tornando a observação e a análise teórica extremamente difíceis.

Não obstante a dificuldade em estabelecer um modelo que abranja a interação entre os parâmetros de processo, muitos estudos foram realizados para a compreensão da EDM. Nestes estudos são feitas muitas simplificações dos fenômenos e a explicação do processo é geralmente realizada com base em uma única faísca (TARIQ JILANI; PANDEY, 1983).

Uma teoria bastante aceita para a explicação da EDM é a teoria termoelétrica (EKMEKCI et al., 2005), segundo a qual a fusão e a evaporação localizadas ocorrem pela ação do calor gerado pelas descargas elétricas, que, por sua vez, ocorrem entre quatro etapas sucessivas: fase de ignição; formação do canal de plasma; fusão e evaporação de pequena quantidade de material, e, por fim, ejeção do material líquido (KÖNIG; KLOCKE; LENZEN, 1996; SILVA, 2012).

Na fase de ignição, Figura 8 – a), um campo elétrico é criado pela aplicação de tensão elétrica entre os eletrodos. Irregularidades superficiais e a presença de impurezas no fluido dielétrico geram gradiente de tensão em cujo ponto máximo os elétrons primários são emitidos pelo catodo (SILVA, 2012). Nesta fase, a tensão elétrica permanece em seu valor máximo e a corrente elétrica começa a ser formada, Figura 8 – b).

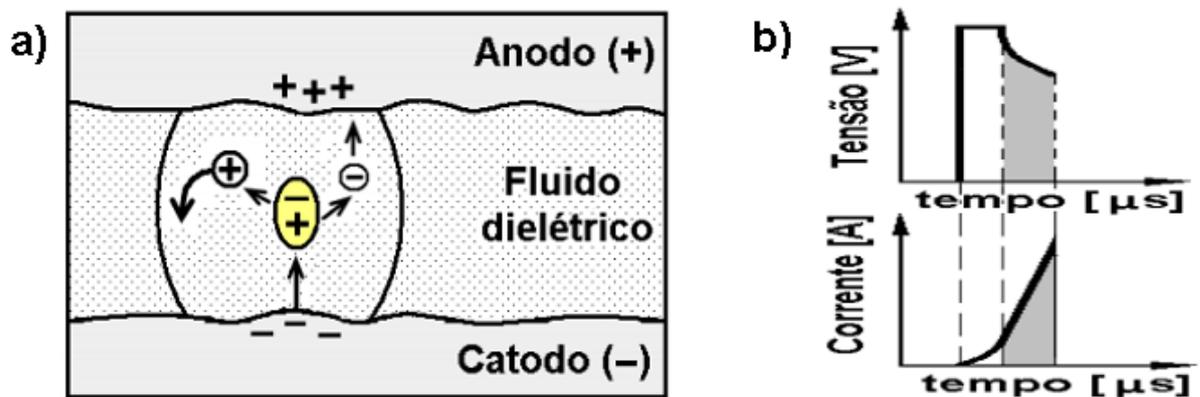
Figura 8 – a) Fase de ignição; b) evolução da tensão e da corrente elétrica com o tempo



Fonte: (STEVENS, 1998)

Os elétrons primários dirigem-se para o eletrodo positivo (anodo) e no caminho chocam-se com átomos do fluido dielétrico, ionizando-os e liberando elétrons secundários, Figura 9– a). Os íons positivos são atraídos pelo catodo e na colisão com este liberam mais elétrons secundários que, por sua vez, continuam a ionizar átomos neutros do dielétrico ao serem atraídos em direção ao anodo.

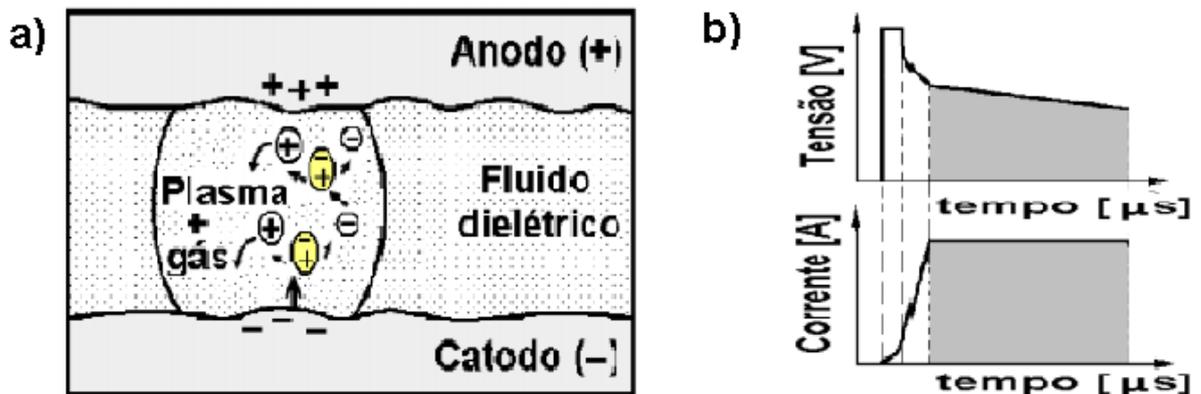
Figura 9 – a) Formação de elétrons secundários; b) evolução da tensão e da corrente elétrica com o tempo



Fonte: (STEVENS, 1998)

A constante ionização provoca o aquecimento do fluido e a queda da resistência elétrica do mesmo (ruptura dielétrica); como consequência ocorre o aumento da corrente elétrica, a queda de tensão, Figura 9 –b), e a formação de uma bolha de vapor, que culmina na criação do canal de plasma, Figura 10– a). Criado o canal de plasma, a corrente elétrica é mantida constante em seu valor máximo, ao mesmo tempo que a tensão elétrica diminui gradativamente, Figura 10 – b).

Figura 10 – a) Formação do canal de plasma; b) evolução da tensão e da corrente com o tempo



Fonte: (STEVENS, 1998)

Ao tempo existente entre o momento em que é estabelecida a diferença de potencial elétrico e o início da descarga dá-se o nome de tempo de atraso da ignição, o qual tende a ser menor para menores distâncias de trabalho e pode ser utilizado para o controle do movimento de avanço do eletrodo ferramenta durante a usinagem. Já o tempo pré-estabelecido em que o canal de plasma é mantido, é responsável, juntamente com o valor da corrente elétrica, pela quantidade de calor fornecido à peça na fase de fusão e evaporação, visto que a energia térmica responsável pela transformação de fases é oriunda da conversão da energia cinética dos elétrons e íons que colidem com os eletrodos durante as descargas elétricas (EKMEKCI et al., 2005).

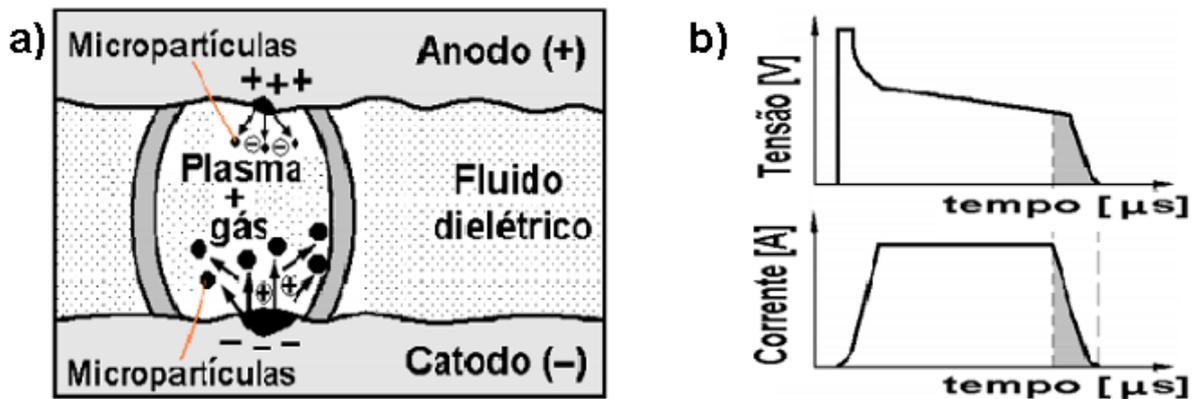
Não só para a fusão da peça o tempo de pulso é determinante: ele também é de suma importância no desgaste do eletrodo ferramenta, sobretudo quando o eletrodo ferramenta é de polaridade negativa, uma vez que, devido à maior inércia dos íons em relação aos elétrons, a colisão iônica no catodo com energia cinética suficiente para provocar fusão necessita de mais tempo para ocorrer (KUMAR et al., 2009). Em síntese, em tempos de descarga inferiores a $1\mu\text{s}$ a fusão da superfície provocada pela colisão de elétrons é muito mais expressiva do que a provocada pela colisão iônica. É necessário um tempo superior a $10\mu\text{s}$ para que os íons atinjam uma velocidade suficiente para aquecer e fundir o material (STEVENS, 1998). Williams (1952) apud Tariq Jilani e Pandey (1983) justifica, de forma equivalente, que até $1\mu\text{s}$ o principal mecanismo de erosão de material é a ação da força exercida pelo campo elétrico sobre a superfície. Kunieda et al. (2005) reforçam o fato observando que, mesmo com o uso de eletrodos peça e ferramenta feitos do mesmo material, a remoção de material é diferente em cada um deles e depende fortemente da duração da descarga.

No que concerne ao canal de plasma, a influência do tempo de pulso consiste no aumento do diâmetro (EKMEKCI et al., 2005; KUNIEDA et al., 2005; PATEL et al., 1989; TARIQ JILANI; PANDEY, 1983) junto ao anodo, ao passo que o diâmetro nas proximidades do catodo quase não sofre alterações com o transcurso das descargas elétricas (EUBANK et al., 1993). Eubank et al. (1993) explicam que o aumento do diâmetro do canal de plasma ao longo do tempo é devido a dois fatores: em primeiro lugar, a alta pressão interna no plasma empurra o fluido dielétrico, gerando a expansão do canal; adicionalmente, o fluido dielétrico é convertido em plasma na interface, uma vez que a radiação emitida pelo segundo vaporiza, dissocia e ioniza a matéria que compõe o primeiro, ou seja, nesta situação, o aumento no diâmetro é acompanhado por um aumento na massa de plasma. Kunieda et al. (2005) citam duas publicações (ECKMAN; WILLIAMS, 1960; IKEDA, 1972) as quais mencionam que a velocidade de expansão do canal de plasma é da ordem de dezenas de m.s^{-1} .

Cessado o tempo de descarga, a corrente é interrompida abruptamente, Figura 11 – b), provocando o colapso do canal de plasma, Figura 11– a), e conseqüente queda de pressão da ordem de 200bar, que poderá ser maior ou menor conforme o valor da corrente elétrica seja mais ou menos elevado, respectivamente.

Em seguida, as gotas de material fundido e o vapor formado são ejetados da superfície do material, tanto pela queda de pressão, como pela ação de cavitação exercida pelo fluido dielétrico (STEVENS, 1998).

Figura 11 – a) Ruptura do canal de plasma; b) evolução da tensão e da corrente com o tempo



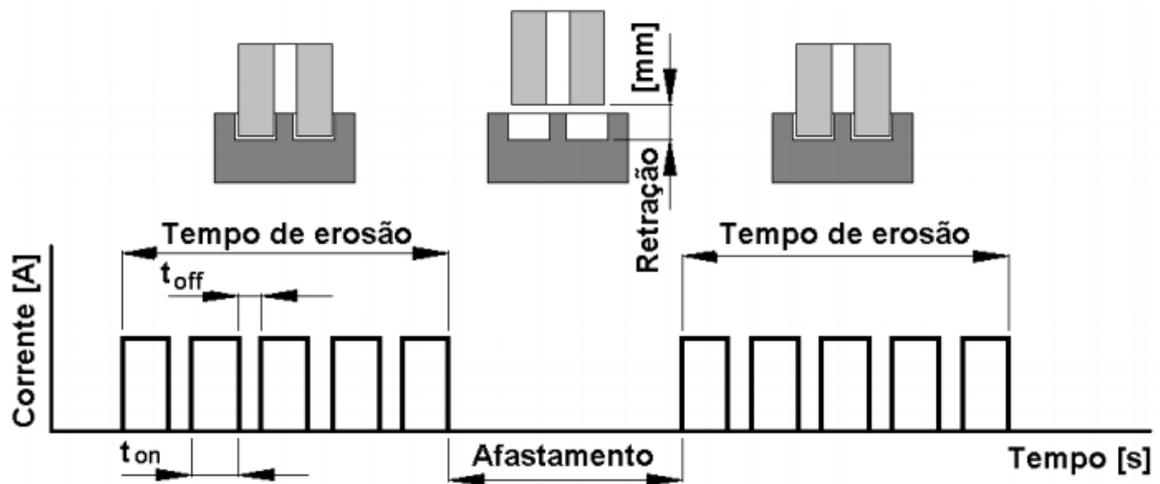
Fonte: (STEVENS, 1998)

Descoedres et al. (2005) descrevem que a expulsão de material ocorre após a solidificação do metal fundido em pequenas partículas. Em sequência, estas pequenas partículas são lavadas pelo fluido dielétrico responsável pela solidificação das mesmas e pela queda abrupta da temperatura dos eletrodos.

Ao final da descarga elétrica, também ocorre queda de temperatura no plasma, a qual resulta na recombinação de íons e elétrons e na recuperação do caráter dielétrico do fluido. Quando a deionização não é suficiente, as descargas ocorrem no mesmo lugar para cada novo pulso, ocasionando falta de uniformidade no processo erosivo (KUNIEDA et al., 2005).

A fim de tornar mais eficiente a remoção dos resíduos e evitar a formação de arco elétrico, o eletrodo ferramenta é afastado da superfície do eletrodo de trabalho por um tempo pré-determinado no qual não ocorrem descargas elétricas. A distância afastada após o ciclo de descargas elétricas (ou tempo de erosão) denomina-se retração (SILVA, 2012). Na Figura 12, estão representados o tempo de erosão, o afastamento periódico e a retração do eletrodo ferramenta durante a EDM.

Figura 12 – Tempo de erosão, afastamento periódico e retração do eletrodo ferramenta



Fonte: (SILVA, 2012)

Apesar da retração e de mecanismos auxiliares de retirada de material que possam ser utilizados na EDM, a pequena quantidade de material removido é uma das características da usinagem por descargas elétricas. Apenas cerca de 10 a 15% do material superaquecido é removido, em contraposição aos 85 a 90% que se resolidificam na superfície, formando a camada refundida (PATEL et al., 1989; RAMASAWMY; BLUNT, 2004). A elevada taxa de resfriamento imposta pelo fluido dielétrico à superfície aquecida do material leva à formação de uma camada refundida repleta de tensões residuais, as quais provocam o surgimento de microtrincas e poros (FULLER, 1989).

O processo de usinagem por descargas elétricas promove várias mudanças no metal base, formando diferentes camadas na superfície do material em direção ao seu interior. As espessuras destas camadas e as transformações de fases observadas nelas dependem da distribuição de temperaturas na peça de trabalho, ou seja, do calor fornecido pela descarga, das propriedades térmicas dos eletrodos e da ação de resfriamento exercida pelo fluido dielétrico (FREDRIKSSON; HOGMARK, 1995).

Diversos autores são unânimes ao citar a obtenção de uma face usinada caracterizada pela presença de pequenas crateras distribuídas ao longo da superfície e, às vezes, sobrepostas umas às outras.

É observada a obtenção de uma camada de reformulação, ressolidificação, recolocação, ou simplesmente, camada branca, na superfície usinada por descargas elétricas. Esta camada branca forma-se pela rápida solidificação do material fundido, devido à lavagem insuficiente da superfície pelo fluido dielétrico, durante o intervalo de pulso (AROOJ et al., 2014; KUMAR et al., 2009; KUNIEDA et al., 2005). Esta rápida solidificação causa gradientes térmicos severos responsáveis pelo surgimento de tensões residuais, microtrincas e falta de homogeneidade na superfície (AROOJ et al., 2014; BLEYS et al., 2006; EKMEKCI et al., 2005; FREDRIKSSON; HOGMARK, 1995; HASÇALÝK; ÇAYDAŞ, 2004; RAMASAWMY; BLUNT, 2004; YAN; CHUNG TSAI; YUAN HUANG, 2005). Segundo Bleys et al. (2006) e Chen, Yan e Huang (1999), as microtrincas da camada branca tendem a ser perpendiculares à superfície e, dificilmente, continuam nas camadas subsequentes.

Além do material ressolidificado, a incorporação de gases ao metal fundido na fase final da descarga elétrica contribui para a formação de defeitos superficiais (EKMEKCI et al., 2005; FREDRIKSSON; HOGMARK, 1995).

Em função de sua fragilidade, porosidade e grande quantidade de defeitos, a camada branca produz efeitos negativos na vida útil dos componentes usinados por EDM (AROOJ et al., 2014; BLEYS et al., 2006; YAN; CHUNG TSAI; YUAN HUANG, 2005). Também admite-se que a EDM produz superfícies mais rugosas do que os processos convencionais de usinagem (AROOJ et al., 2014; RAMASAWMY; BLUNT, 2004).

Fredriksson e Hogmark (1995) afirmam que as alterações microestruturais da superfície usinada por descargas elétricas promovem a degradação de importantes propriedades do aço ferramenta, como tenacidade e resistência à fadiga. As propriedades da superfície são as responsáveis pelo pior desempenho da peça como um todo, sendo necessária a remoção da camada branca. Esta remoção, segundo os autores, é de difícil execução e onera a produção; muitas vezes é realizada por polimento manual, ou simplesmente ignorada. Além da remoção da camada branca via polimento, Bleys et al. (2006) mencionam como outros processos alternativos ao melhoramento da superfície após a EDM o jateamento de areia fina, o tratamento da superfície com laser e a aplicação de revestimentos.

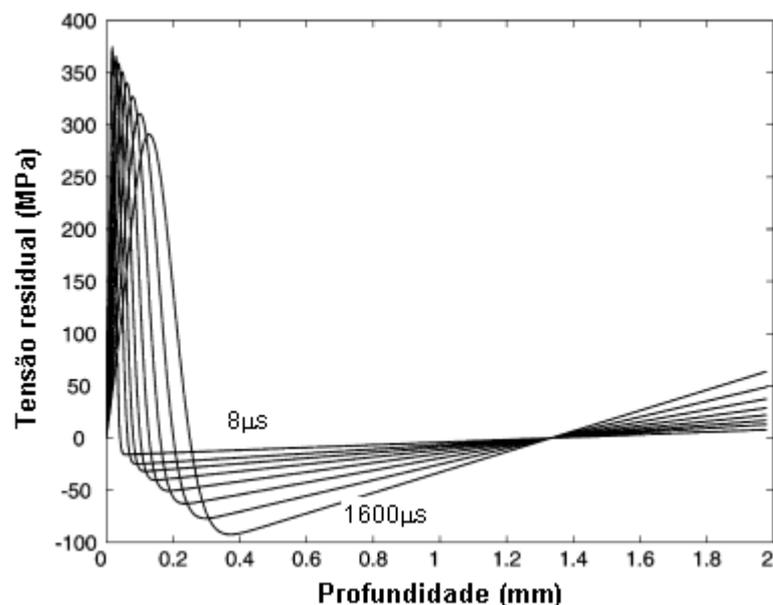
Peças e Henriques (2003) lembram que a aplicação da EDM é restrita em relação ao acabamento superficial, não atendendo bem a projetos de superfícies polidas ou espelhadas. Os autores apontam como alternativa para a solução deste problema a mudança de parâmetros de processo através da adição de pós em suspensão no fluido dielétrico. Os pós são constituídos de materiais semicondutores e devem estar finamente dispersos no fluido. Sua presença reduz a rigidez dielétrica e permite uma maior folga de trabalho e uma menor densidade de potência de descarga, isto é, o canal de plasma se torna mais amplo, as condições de descarga ficam mais homogêneas, a pressão do plasma diminui e a força de impacto sobre a superfície também. Nestas condições, crateras rasas e sobrepostas são formadas e o material escoia na direção radial, permitindo a obtenção de uma superfície menos rugosa e com aspecto espelhado. Na EDM sem adição de pós ao dielétrico, para a condição de acabamento são necessárias fendas estreitas. Isto cria um efeito capacitivo entre os eletrodos, que aumenta com o diâmetro destes, e provoca a ocorrência de correntes de pico mais elevadas do que aquelas especificadas no gerador. As crateras formadas são, portanto, mais profundas e irregulares, visto que o metal líquido transborda e forma um centro profundo com bordas altas (PEÇAS; HENRIQUES, 2003). Efeito semelhante ocorre quando o intervalo de pulso não é suficiente para que ocorra a deionização do fluido (KUMAR et al., 2009).

Imediatamente abaixo da camada refundida, forma-se a zona termicamente afetada (ZTA), região na qual o calor fornecido ao eletrodo não foi suficiente para promover a fusão e a evaporação de material, mas o foi para causar alterações microestruturais (BLEYS et al., 2006; EKMEKCI et al., 2005; FREDRIKSSON; HOGMARK, 1995; KUMAR et al., 2009; SILVA, 2012). Nesta camada, podem ser observados efeitos de revenido (FREDRIKSSON; HOGMARK, 1995) e de recozimento (HASÇALÝK; ÇAYDAŞ, 2004; JAHAN et al., 2014). Neste último caso, os autores encontraram valores de dureza da ZTA menores que no metal base.

Sobre a superfície usinada outros fenômenos são perceptíveis: a adesão de micropartículas (NORASETTHEKUL et al., 1999) e a solidificação de gotas no formato esférico (KHANRA; PATHAK; GODKHINDI, 2007); estas últimas possivelmente explicáveis pela incorporação de vapores e formação de fluxo turbulento de fluido dielétrico na fenda de trabalho.

Em complemento aos efeitos deletérios da EDM, pode-se acrescentar a ocorrência de tensões residuais nas peças usinadas, devido aos acentuados gradientes de temperatura e às transformações metalúrgicas. Ekmekci et al. (2005) realizaram um estudo sobre o perfil de profundidade de tensões residuais e de dureza de aços submetidos à EDM com polaridade positiva e água deionizada como fluido dielétrico. Os autores concluíram que o padrão de tensão residual não muda em relação aos parâmetros de usinagem, devendo, provavelmente, estar relacionados às propriedades térmicas do material e do fluido dielétrico. O padrão observado pelos pesquisadores foi um aumento rápido da tensão residual em relação à profundidade da peça até um valor máximo (em torno do valor de tensão limite de escoamento do material) dentro da zona termicamente afetada, com posterior queda abrupta para valores relativamente baixos de tensão de compressão no metal base, Figura 13. Os estudiosos observaram ainda que a intensidade das tensões não mudou significativamente com a energia da faísca, ao contrário da profundidade na qual a tensão atingiu seu valor máximo, que demonstrou ser dependente da energia da centelha.

Figura 13 – Perfil de tensões residuais em aço usinado por EDM, com corrente de pico de 16A, em diferentes tempos de pulso



Fonte: (EKMEKCI et al., 2005)

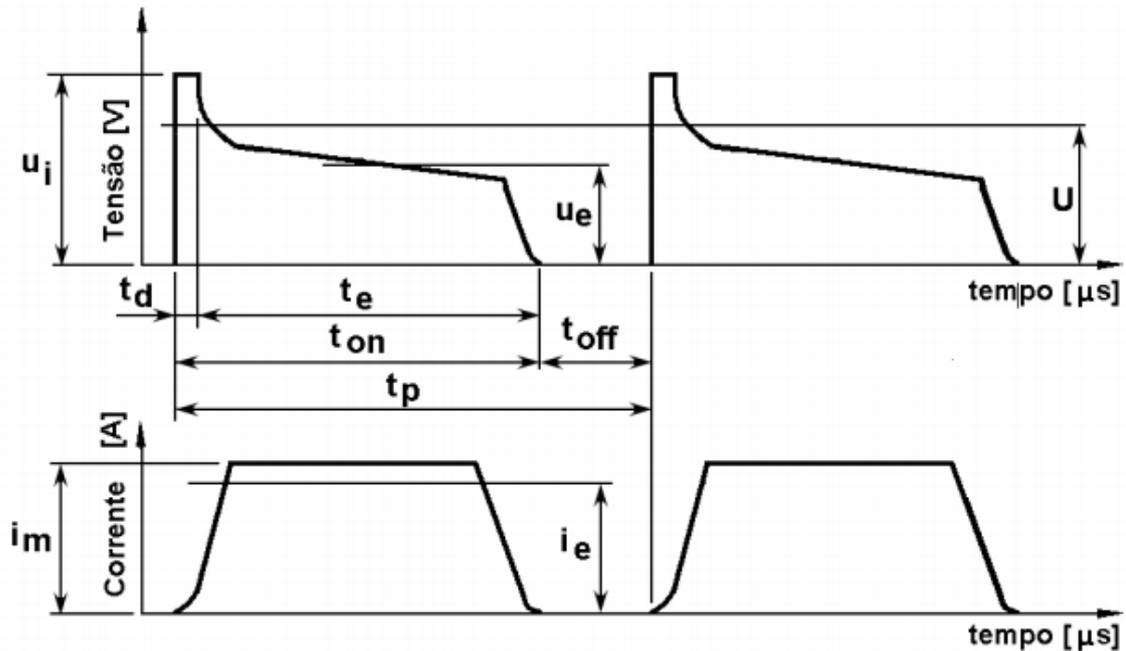
Crookall e Khor (1972) apud Ekmekci et al. (2005) alertam que, dependendo da estrutura cristalina do material, as tensões residuais podem causar deslizamento, torção e clivagem severa da estrutura. Ekmekci et al. (2005) acrescentam que as tensões residuais causam deformações e alteram a resistência ao escoamento, visto que atuam como um estado de pré-tensão.

3.2.3 Variáveis da EDM

A usinagem por descargas elétricas possui uma quantidade expressiva de fatores de influência, dos quais pode-se destacar: polaridade, geometria e material dos eletrodos, diferença de potencial e corrente elétrica, tempos de erosão, de pulso e de intervalo, características do fluido dielétrico, fenda de trabalho e métodos de limpeza da fenda de trabalho. Os principais parâmetros elétricos lembrados por Silva (2012) são citados a seguir e têm sua evolução no tempo representada na Figura 14:

- U = tensão do circuito aberto;
- u_i = tensão de descarga;
- u_e = tensão de trabalho média;
- i_e = corrente de descarga média;
- i_m = corrente de descarga máxima;
- t_d = tempo de atraso da ignição;
- t_e = tempo de duração da descarga;
- t_{on} = tempo de duração do pulso;
- t_{off} = tempo de intervalo do pulso e
- t_p = tempo de ciclo completo.

Figura 14 – Principais parâmetros elétricos e sua evolução durante a descarga



Fonte: (STEVENS, 1998)

A formação, a morfologia, a espessura e a rugosidade da camada refundida dependem fortemente dos parâmetros operacionais: corrente, tensão, tempo de pulso e intervalo de pulso (AROOJ et al., 2014; BLEYS et al., 2006).

3.2.3.1 Polaridade dos eletrodos

A polaridade dos eletrodos é um fator decisivo na qualidade da EDM (BLEYS et al., 2006). Sua escolha deve ser feita em conformidade com as espécies químicas presentes no meio dielétrico (provenientes do fluido, dos eletrodos e dos aditivos que porventura possam ser empregados) e com os ciclos de usinagem, a fim de propiciar obtenção dos padrões de acabamento e taxas de remoção de material (dos eletrodos ferramenta e peça) desejados (KUMAR et al., 2009). A natureza e a concentração das espécies químicas presentes no canal de plasma, o tempo de duração das descargas elétricas e a polaridade determinam, em conjunto, a quantidade de energia que é transferida para cada eletrodo.

3.2.3.2 Corrente elétrica e tempo de pulso

A intensidade da corrente elétrica, a duração do pulso e o tamanho da fenda de trabalho são responsáveis pela densidade de energia e largura do canal de plasma, as quais, por sua vez, determinam a quantidade de material retirado e o acabamento da peça (MCGEOUGH, 1988). Fuller (1996) apud Kumar et al. (2009) afirma que o diâmetro da cratera formada com a erosão de material é proporcional à corrente elétrica aplicada, ao passo que a profundidade é proporcional ao tempo de pulso.

Vários autores citados por Tariq Jilani e Pandey (1983) admitem que com pulsos inferiores a $1\mu\text{s}$ a erosão do material ocorre principalmente por ação da força exercida pelo campo elétrico, ao passo que em pulsos de longa duração a erosão ocorre essencialmente pelo fenômeno térmico. De Bruyn (1968) apud Tariq Jilani e Pandey (1983) complementa ainda que o desgaste do eletrodo ferramenta é maior durante os primeiros microssegundos do pulso, podendo ser reduzido, portanto, com a aplicação de uma corrente inicial mais baixa.

No modelo proposto por Eubank et al. (1993) o superaquecimento é o mecanismo dominante para a erosão de material na EDM.

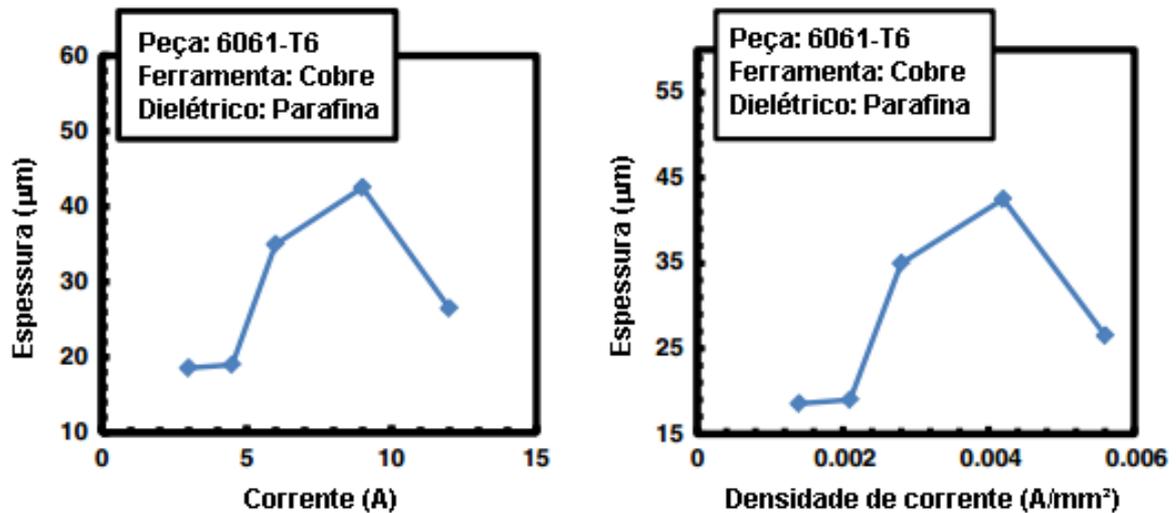
Feray Guleryuz et al. (2013) utilizaram o método de Taguchi para determinar a influência de cinco parâmetros de usinagem por descargas elétricas de um compósito Al/SiC (corrente elétrica, tipo de eletrodo, tempo de pulso, quantidade de reforço em peso de partículas e tensão elétrica) e constataram que o tempo de pulso e a corrente foram os parâmetros que mais exerceram influência sobre a rugosidade, 34% e 31,26%, respectivamente, sendo o tipo de eletrodo o parâmetro menos influente, 1,63%. O mesmo método estatístico foi utilizado por Chose et al. (2011) apud Jahan et al. (2014) para concluir que os parâmetros elétricos têm efeito mais significativo na taxa de remoção de material, na taxa de desgaste da ferramenta e na rugosidade do que os parâmetros de usinagem não elétricos. Outros autores citados por Arooj et al. (2014) também concluíram que as características mencionadas anteriormente são fortemente influenciadas pela corrente e pela duração do pulso.

Kumar et al. (2009) também reconhecem a supremacia da corrente elétrica e do tempo de pulso quando mencionam que a profundidade da camada refundida está relacionada à energia e à duração do pulso. Os autores supracitados salientam, porém, que o aumento excessivo do tempo de pulso leva a queda da taxa de remoção de material e a situação de não desgaste, em última instância, o eletrodo começa a ganhar massa com o acúmulo de material na superfície.

Yan, Tsai e Huang (2005) concluíram que a rugosidade, a taxa de remoção de material e a taxa de desgaste do eletrodo ferramenta aumentaram com a corrente e diminuíram com o aumento da duração do pulso na usinagem de titânio com solução de água destilada e ureia como fluido dielétrico. Os autores justificam este comportamento explicando que o aumento na duração do pulso gera queda na densidade de energia da descarga elétrica e expansão no canal de plasma.

Em estudo realizado por Arooj et al. (2014), a morfologia e a composição química superficial de liga de alumínio 6061 T6 submetida à EDM em parafina, sob diferentes densidades de corrente elétrica, foi analisada. Os pesquisadores procuraram relacionar o aspecto, as dimensões, a dispersão e a composição química dos glóbulos observados na superfície usinada aos diferentes valores de corrente adotados no processo. Para correntes elétricas mais elevadas, os glóbulos tornaram-se mais irregulares, maiores, mais espaçados e dispersos de forma menos homogênea. A formação de glóbulos de superfície escamosa foi atribuída à ressolidificação de metal e retenção de carbono oriundo da pirólise do dielétrico. Os glóbulos de superfície contínua e lisa, por sua vez, apresentaram composição química semelhante à da camada refundida em geral e foram justificados pela evaporação parcial de metal. Estes últimos, alertam os autores, são mais propensos a comprometer a integridade da superfície, devido ao ponto concentrador de tensões na raiz do material parcialmente evaporado. A fragilização da superfície pelo aumento da densidade de corrente elétrica também foi comprovada pela queda da espessura da camada refundida, após ultrapassado o valor de densidade de corrente de $0,0042\text{A}\cdot\text{mm}^{-2}$, devido à perda de material por propagação de trincas, Figura 15, (AROOJ et al., 2014).

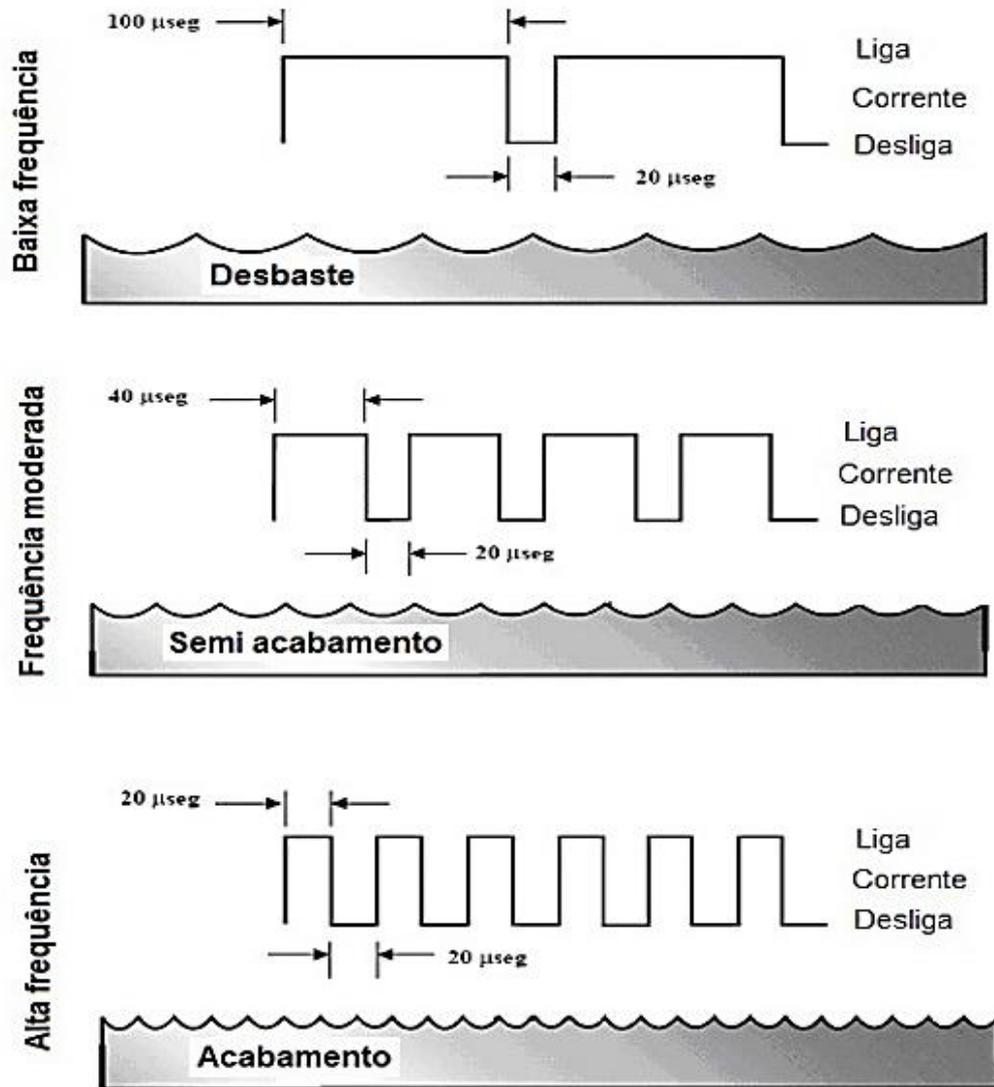
Figura 15 – Espessura média da camada refundida em função da corrente elétrica e da densidade de corrente



Fonte: (AROOJ et al., 2014)

Na Figura 16 está representada a relação geralmente observada entre a frequência da corrente elétrica e o tipo de acabamento resultante da usinagem. Como na Figura 16 o valor do tempo de intervalo do pulso (t_{off}) está fixo, a frequência da corrente relaciona-se ao tempo de duração do pulso (t_{on}). Além disso, não há menção ao tempo de erosão e ao tempo de afastamento da ferramenta, donde se presume que estes valores não variam entre os exemplos ilustrados. Observa-se que, nessas condições, o maior tempo de pulso (ou menor frequência) corresponde a maior tempo de exposição ao aquecimento provocado pelas descargas elétricas. Desta forma, crateras maiores são formadas, devido à maior quantidade de material fundido, caracterizando o processo como de desbaste. De maneira coerente, o aumento da frequência (ou diminuição do tempo de pulso) resulta em menores crateras e usinagem característica de acabamento. Importante ressaltar que esta relação direta entre frequência e características superficiais só é observada quando outros parâmetros de processo são mantidos, visto que a frequência é apenas um dos muitos fatores que influenciam a transferência de calor e retirada de material.

Figura 16 – Características do acabamento em função da frequência da EDM



Fonte: (GUITRAU, 1997)

3.2.3.3 Tensão elétrica

No tocante ao desgaste dos eletrodos, vários estudiosos atestam que quanto maior o valor da corrente de pico maior tende a ser este desgaste. Khan (2008) complementa que um maior valor de tensão elétrica no *gap* também contribui para o aumento do desgaste dos eletrodos. O mesmo autor ainda constata que o desgaste ao longo da seção transversal é maior que o desgaste ao longo do comprimento do eletrodo, devido à maior facilidade de propagação do calor na direção longitudinal.

Esta discrepância de quantidade de desgaste entre as diferentes direções torna-se mais acentuada à medida que a área da seção transversal do eletrodo diminui, fato que afeta a qualidade da usinagem, visto que ao contrário do desgaste longitudinal que pode ser compensado pelo avanço do eletrodo, o desgaste transversal provoca uma imprecisão na dimensão das cavidades usinadas (KHAN, 2008).

Além da menor dissipação de calor ao longo da seção transversal, pode-se inferir que a ocorrência de descargas elétricas nas laterais do eletrodo também contribui para o desgaste nesta direção. Benedict (1987) alerta que, para todas as configurações possíveis e todo tipo de material de eletrodo, sempre haverá sobrecorte (*overcut*) na peça, devido à ocorrência destas descargas geradas nas laterais do eletrodo.

3.2.3.4 Eletrodos

O material do eletrodo de trabalho, em geral, é parâmetro fixo de projeto. Já o eletrodo ferramenta deve ser selecionado obedecendo a critérios como baixo custo e fácil confecção. Em relação aos critérios técnicos, usualmente se escolhe como eletrodo ferramenta um material de alto ponto de fusão e elevadas condutividades elétrica e térmica, quando o objetivo é minimizar o desgaste deste eletrodo (MCGEOUGH, 1988). A exemplo disso, Khan (2008) relata maior desgaste do eletrodo de latão que do eletrodo de cobre para usinagem de aço, sob os mesmos parâmetros elétricos, devido aos maiores ponto de fusão e condutividade térmica do cobre. O mesmo autor ainda observa que os eletrodos ferramenta (cobre e latão) sofrem maior desgaste na usinagem do aço de baixo teor de carbono que na usinagem do alumínio, visto que maior quantidade de calor se dissipa no eletrodo de alumínio que no de aço devido à menor condutividade térmica do último.

3.2.3.5 Fluido dielétrico

Atenção adicional é requerida na escolha do fluido dielétrico, posto que muitas de suas características são determinantes na eficácia da EDM. Exemplos disso, apresentados por McGeough (1988), são listados a seguir:

- Rigidez dielétrica: controla a tensão máxima alcançada e a potência de abertura da descarga. Em geral, maior rigidez dielétrica implica em possibilidade de menor fenda de trabalho, com ganho em precisão da usinagem. Segundo Kunieda et al. (2005) e Kumar et al. (2009), a rigidez dielétrica também é responsável por impedir a eletrólise dos eletrodos durante a EDM.
- Habilidade de deionização: é essencial para garantir ausência de curto-circuito após o período de pulso. Quanto menor o tempo de deionização, menor o tempo de pausa e maior a produtividade da EDM.
- Viscosidade: influencia o escoamento do fluido dielétrico e o preenchimento das cavidades após as descargas elétricas. Menores viscosidades proporcionam maior poder de limpeza da fenda de trabalho e maior remoção de material das crateras de fusão. A limpeza da fenda de trabalho afeta não só a taxa de remoção de material, mas também a precisão, o acabamento da superfície e o desempenho do processo, uma vez que a concentração indesejável de resíduos de usinagem em regiões próximas aos eletrodos alteram a resistividade elétrica do meio, podendo ocasionar arcs elétricos instáveis e afetar a distribuição da incidência de descargas elétricas na superfície, tornando-a não uniforme.
- Calor específico: consiste na quantidade de calor absorvido necessária à elevação da temperatura do fluido. Quanto maior o calor específico, menor elevação de temperatura para a mesma quantidade de calor recebida, e menor o coeficiente de difusão entre átomos da peça e o fluido dielétrico.
- Condutividade térmica: interfere na capacidade de refrigeração dos eletrodos. Assim como o calor específico, exerce influência sobre microestrutura e formação de trincas superficiais. Quanto maior a condutividade térmica do fluido dielétrico, menor a deposição de partículas na superfície.

- Formação de resíduos prejudiciais ao operador e/ou ao meio ambiente: a crescente preocupação com eliminação, ou redução, dos impactos negativos causados pelos resíduos no meio ambiente ou na saúde do operador é fator de peso na seleção do fluido dielétrico. Jawahir et al. (2006) apud Kamguem et al. (2013) enfatizam que a sustentabilidade do processo de usinagem está diretamente atrelada aos fatores que afetam a poluição ambiental, por exemplo, emissões de fluidos de trabalho e de poeira metálica, quantidade de resíduos descartados sem tratamento, além da usinagem de material perigoso (combustível ou explosivo). Neste contexto, é desejável a substituição dos fluidos dielétricos usuais (hidrocarbonetos, óleos minerais, querosene) por materiais menos nocivos ao operador e ao meio ambiente (CHEN; YAN; HUANG, 1999; LEÃO; PASHBY, 2004).

Arantes et al. (2003) complementam que para uso do fluido dielétrico deve-se atentar para: a estabilidade à oxidação, os pontos de fulgor e de ebulição (possibilidade de evaporação seletiva e formação de frações voláteis), umidade, grau de contaminação por partículas erodidas e grau de degradação.

As partículas de detritos são prejudiciais ao processo EDM, pois, além de perturbarem as descargas elétricas, podem se depositar na superfície da peça, fragilizando-a. Desta forma, são utilizadas estratégias de limpeza da região, como alterações nos padrões de lavagem e filtragem do fluido dielétrico. Tsukahara et al. (2004) apud Kunieda et al. (2005) encontraram uma solução menos óbvia para este problema: a adição de um ácido graxo contendo ácido carboxílico ao fluido dielétrico. Esta solução, foi proposta com base na observação de que quando um óleo dielétrico oxidado é usado ele reage com elementos metálicos dos detritos e forma compostos organometálicos, tornando o processo mais estável.

A pressão e a forma como o fluido é direcionado à peça também exerce influência sobre a EDM. Um aumento na pressão do fluido dielétrico resultou em pequena redução da rugosidade de um aço AISI D5 usinado por EDM a fio (HASÇALÝK; ÇAYDAŞ, 2004). Com um mesmo fluido dielétrico, foi atingida taxa de remoção 20% maior em material usinado com jato de fluido lateral em relação ao mesmo material apenas submerso no dielétrico (LEÃO; PASHBY, 2004).

Dentre as funções principais do fluido dielétrico na EDM, pode-se destacar o efeito mecânico exercido sobre o canal de plasma, com a consequente concentração da energia dentro de um canal estreito e aumento do poder erosivo (JESWANI, 1981; KUMAR et al., 2009; LEÃO; PASHBY, 2004). Masuzawa et al. (1983) apud Leão e Pashby (2004) concluíram que soluções contendo compostos orgânicos com maiores pesos moleculares proporcionaram obtenção de maiores taxas de remoção de material. Desta forma, dielétricos líquidos tendem a ser mais eficientes na remoção de material que fluidos dielétricos gasosos, no entanto, a condição de maior eficiência do fluido gasoso pode ser atendida com a otimização dos parâmetros de usinagem. Kunieda e Yoshida (1997) apud Leão e Pashby (2004) conseguiram esta façanha utilizando fluxo de alta velocidade de gás oxigênio e eletrodo tubular negativo com parede de espessura inferior a 3mm, em movimento rotacional. A usinagem nessas condições teve, segundo os pesquisadores, melhor desempenho que a usinagem com óleo (LEÃO; PASHBY, 2004). Kunieda et al. (2005) ressaltam ainda que este tipo de EDM a seco é um processo ambientalmente limpo, visto que não há geração de gases perigosos, nem de resíduos líquidos. Além disso, não há risco de incêndios, pois o dielétrico não é inflamável.

Chen, Yan e Huang (1999) estudaram a influência do tipo de dielétrico na EDM da liga Ti-6Al-4V. Os autores perceberam que a EDM gera mudança na dureza e na composição química da superfície dos eletrodos peça e ferramenta. Foram utilizados dois líquidos dielétricos: querosene e água destilada. Com uso do querosene, foi observada menor taxa de remoção de material, visto que o carbono presente neste fluido se deposita na superfície do eletrodo ferramenta, dificultando a ocorrência das descargas elétricas, e reage com a superfície da peça, formando TiC, que tem ponto de fusão mais elevado. O querosene promove força impulsiva de descarga mais instável, no entanto, a camada refundida é mais espessa e possui menos fissuras que com o uso de água destilada. Durante a EDM, a água destilada é decomposta em hidrogênio e oxigênio. Este oxigênio reage com o eletrodo formando óxido metálico, que por sua vez tem ponto de fusão mais baixo que o carboneto formado com o uso do querosene, proporcionando força impulsiva de descarga muito mais estável e, por consequência, maior taxa de remoção de material, embora com superfície mais defeituosa.

Os autores ressaltam que cada dielétrico apresentou um mecanismo de remoção de material: no querosene, a remoção ocorreu por fusão e vaporização, ao passo que na água destilada estes dois mecanismos foram acompanhados pela propagação de trincas.

Autores citados por Leão e Pashby (2004) complementam ainda que na água as temperaturas de centelha chegam a atingir 20850K, enquanto que para o óleo de hidrocarboneto esta temperatura atinge 17175K. Descoedres et al. (2005) acreditam que o mecanismo de ruptura dielétrica na água é diferente do mecanismo de quebra no óleo, visto que a água sofre eletrólise e libera bolhas de gás. A água também promove descarburização de aços, uma vez que o carbono presente nas ligas reage com o oxigênio e o hidrogênio provenientes deste líquido (LEÃO; PASHBY, 2004).

Vários estudiosos citados por Fredriksson e Hogmark (1995) constataram igualmente que elementos provenientes do dielétrico podem se ligar ao metal fundido durante a EDM.

Kunieda et al. (2005) ressaltam que o reconhecimento de que a EDM também é processo químico (e não apenas térmico) gera novas possibilidades de exploração da técnica, a partir de ideias criativas e de novas descobertas. Lauwers et al. (2004, 2005) apud Kunieda et al. (2005) identificaram a decomposição e a oxidação como sendo outros mecanismos de remoção de material (além da fusão e da evaporação) na W-EDM utilizada no corte de materiais cerâmicos em água deionizada.

3.3 NITRETAÇÃO POR DESCARGAS ELÉTRICAS

Em se tratando dos processos de usinagem, um aspecto importante a ser considerado é a integridade superficial. Haşçalýk e Çaydaş (2004) citam como duas características de fundamental importância na determinação da integridade superficial a textura e a metalurgia da superfície. A EDM é processo que altera ambas. Neste contexto, Yan, Tsai e Huang (2005) investigaram as influências da usinagem por descargas elétricas de peças de titânio puro imersas em um fluido dielétrico composto por uma solução de ureia em água destilada (10g/L) nas características superficiais do metal.

Os resultados experimentais obtidos pelos autores revelaram que o nitrogênio decomposto da ureia em solução reagiu com o titânio do eletrodo de trabalho, formando uma camada dura de TiN que resultou em menores rugosidade (Ra) e coeficiente de atrito e na inibição dos desgastes abrasivo e adesivo. Os valores de microdureza do material usinado com solução de água destilada e ureia foram superiores aos valores exibidos pelo material usinado apenas com água. Hasçalýk e Çaydaş (2004) concluíram com este estudo que a modificação da superfície de metais de titânio puro por EDM é muito simples e não requer equipamentos especiais.

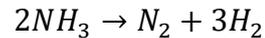
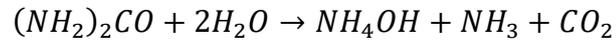
Assim como o estudo supracitado, muitos outros estudos foram realizados por diversos pesquisadores a fim de controlar as modificações superficiais inerentes ao processo de EDM de forma a obter características e propriedades superficiais desejadas em determinadas aplicações. Neste contexto, surge também a tentativa de alguns estudiosos de promover a nitretação de peças metálicas por meio da EDM. À realização dos processos simultâneos de nitretação e usinagem por descargas elétricas, dá-se o nome nitretação por descargas elétricas (NDE).

Kunieda et al. (2005) afirmam que o revestimento de metais com uma camada mais dura, mais espessa e mais fortemente ligada à superfície pode ser obtido em menor tempo com a EDM, em comparação aos processos de deposição física e química de vapor.

Santos (2013) realizou a NDE de um aço AISI 4140, com o uso de uma solução de água deionizada e ureia, de concentração igual a 10g/L, como fluido dielétrico, e eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico com polaridade negativa, fixado a uma máquina de EDM por penetração. Foi identificada a presença de nitrogênio em profundidades de 20 a 25 μ m a partir da superfície exposta às descargas elétricas. Com base neste trabalho, o pesquisador desenvolveu um modelo do processo NDE, descrito a seguir.

A fase de ignição, já citada na seção 3.2, é caracterizada pela ocorrência de colisões entre espécies químicas. Os elétrons emitidos pelo catodo e acelerados pelo campo elétrico em direção ao anodo colidem com moléculas do fluido dielétrico, provocando a ionização por impacto. Os íons positivos então gerados movem-se em direção ao catodo. As colisões promovem a ruptura do líquido dielétrico e dão origem a espécies gasosas (NH₃ e CO₂).

A partir desse estágio, é formado o canal de plasma e continuado o processo de decomposição química dos constituintes presentes na mistura, segundo as reações (SANTOS, 2013):



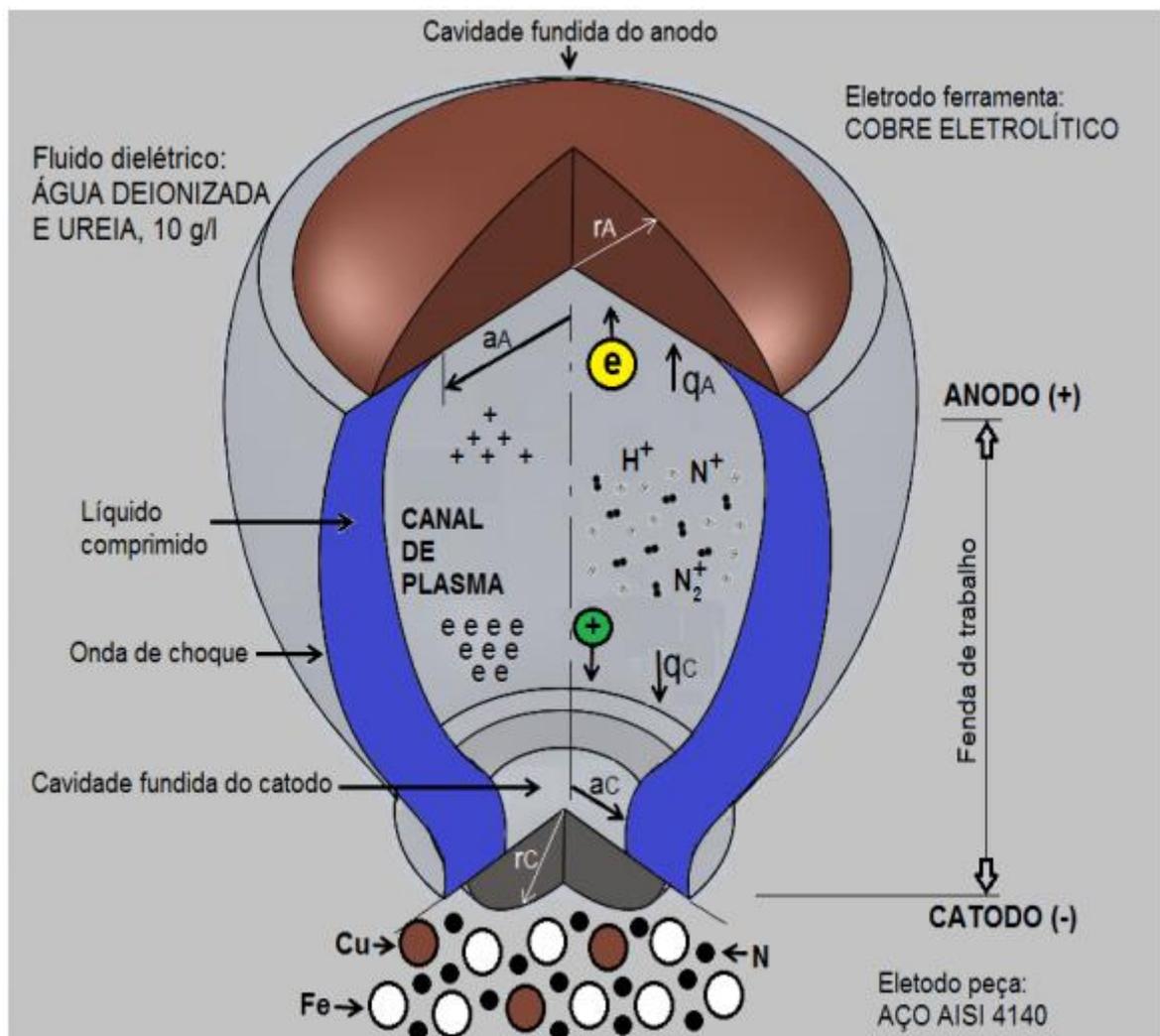
O N_2 e o H_2 sofrem ionização, dando origem às espécies: N_2^+ , N^+ e H_2^+ . O eletrodo ferramenta (de cobre eletrolítico), pela ação dos elétrons que colidem em sua superfície, também atua como uma fonte de íons positivos. Os íons de sinal positivo, presentes no canal de plasma, são então acelerados em direção ao eletrodo de trabalho e, devido à alta energia cinética que adquirem, implantam-se na superfície do anodo. Santos (2013) observa que este modelo de transferência iônica é, em parte, similar ao da nitretação a plasma convencional, ressaltando uma diferença básica entre ambos. Tanto na nitretação a plasma convencional, quanto na NDE, admite-se que a colisão das espécies ionizadas provoca um espalhamento do Fe do eletrodo, seguido da formação de nitretos de ferro na superfície deste eletrodo, gerando uma zona de ligação ou camada de compostos. A divergência entre os dois modelos consiste na existência de uma zona de difusão, aceita na nitretação a plasma convencional e rejeitada por Santos (2013) na NDE. O pesquisador do método de nitretação não convencional, constatou em seus experimentos que o cobre consegue atingir a mesma profundidade que o nitrogênio em sua inserção na matriz de aço AISI 4140. À difusão do cobre, obstam seu elevado tamanho de raio iônico e o tempo demasiadamente curto ($10^{-6}s$) para a ocorrência de processo difusional. Neste caso, reforça-se a hipótese do enriquecimento superficial via implantação iônica.

Na Figura 17 está representado o modelo proposto por Santos (2013) para a explicação do fenômeno de enriquecimento superficial com nitrogênio e cobre, por meio das descargas elétricas. Assim como na EDM, na NDE assume-se que o raio (a_c) do canal de plasma na região próxima ao catodo permanece constante, com sua magnitude regulada pela emissão de elétrons por este eletrodo; o raio (a_A), pelo contrário, aumenta gradativamente com o tempo de duração das descargas e é bem maior do que a_c . A quantidade de material fundido em cada eletrodo depende fortemente, do tempo de descargas, visto que a expansão do diâmetro do canal de plasma altera a densidade energética atuante nas cavidades.

Santos (2013, p. 54) explica melhor este fenômeno no trecho a seguir:

A cada incremento no tempo de descarga, a irradiação de energia do plasma provoca a vaporização, a dissociação e a ionização de um pequeno volume do fluido dielétrico que o circunda. Isso causa um aumento da massa e do diâmetro do plasma e da bolha de gases, bem como a queda da pressão e da temperatura atuantes sobre as cavidades fundidas. Como consequência dessa expansão, a cavidade fundida no anodo começa a se solidificar. Isso se deve à diminuição do fluxo de energia que a atinge. Já a cavidade do catodo tende a se tornar mais profunda.

Figura 17 – Modelo para o canal de plasma do processo NDE do aço AISI 4140 com eletrodo de cobre eletrolítico



Fonte: SANTOS, 2013

Na Figura 17 ainda estão representadas as espécies iônicas presentes no canal de plasma, o fluxo de calor nas superfícies do catodo (q_C) e do anodo (q_A), e os raios das cavidades fundidas no catodo (r_C) e no anodo (r_A).

O cobre presente no eletrodo de trabalho de aço AISI 4140 é proveniente do eletrodo ferramenta utilizado. Descoeudres et al. (2005) realizaram uma investigação do plasma criado na EDM de um aço ferramenta com eletrodo de cobre, por meio da espectroscopia de emissão óptica espacialmente resolvida, e constataram a existência de uma assimetria na contaminação do plasma. Nas regiões próximas ao eletrodo ferramenta, a linha de Cu foi mais intensa; nas proximidades da peça de aço, as linhas de Cr foram mais intensas do que as de Cu, o que comprova que cada eletrodo contamina o plasma na região mais próxima de si (DESCOEUDRES et al., 2005).

Partindo do conhecimento da liberação de espécies químicas dos eletrodos para o plasma, Goto et al. (1998) apud Kunieda et al. (2005) e Mohri et al. (2003) utilizaram eletrodos ferramenta compactados a verde ou parcialmente sinterizados, de forma a acelerar a taxa de desgaste dos mesmos e promover um enriquecimento do plasma com as espécies químicas desejáveis mais rapidamente. De forma análoga, Yan, Tsai e Huang (2005) e Kumar et al. (2009) citam outros pesquisadores que produziram eletrodos ferramenta pela metalurgia do pó, ou que adicionaram pós em suspensão ao fluido dielétrico, com o mesmo objetivo de provocar alterações de composição química na superfície das peças. Wang et al. (2002) sugeriram o uso de eletrodos produzidos por metalurgia do pó para a obtenção de revestimentos por descargas elétricas (EDC – *Electrical Discharge Coating*): eletrodos de titânio compactados a verde foram utilizados com fluido dielétrico de querosene para a obtenção de carbeto de titânio na superfície de aço carbono. De maneira semelhante, Furutani e Shimizu (2003) propuseram a deposição de um lubrificante sólido de dissulfeto de molibdênio, por EDM, em um componente a ser submetido a condições de trabalho de ultra alto vácuo, por meio da suspensão do pó do lubrificante no fluido dielétrico. Os pesquisadores constataram que essa deposição é possível pela EDM de metais com ponto de fusão inferior ao do dissulfeto de molibdênio. Bleys et al. (2006) complementam que o uso de eletrodos produzidos por metalurgia do pó pode, a despeito dos benefícios proporcionados à peça, dificultar a precisão da usinagem, devido ao alto desgaste da ferramenta. Mohri et al. (2003) alertam que, apesar do sucesso na obtenção de ligas de superfície por EDM, os processos de acréscimo dos

elementos químicos ainda não são bem compreendidos, necessitando de mais estudos para a descrição correta dos fenômenos.

Neste contexto de abertura de novas possibilidades de exploração da EDM e em meio à complexidade dos fenômenos envolvidos no processo, surge a oportunidade de investigação da aplicabilidade da NDE em diferentes ligas metálicas. Yan, Tsai e Huang (2005) e Santos (2013) demonstraram a viabilidade da NDE em titânio e aço, respectivamente. Morales (2019) tentou aplicar a NDE na liga duralumínio AA2011 nos estados encruado, solubilizado, recozido e envelhecido, logrando sucesso na nitretação da liga envelhecida. No presente trabalho, é apresentado um estudo sobre a tentativa de nitretação por descargas elétricas de liga alumínio-silício hipoeutética, a qual possui aplicabilidade industrial consolidada.

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada na tentativa de verificar a viabilidade técnica da nitretação da liga Al-Si hipoeutética por descargas elétricas é semelhante às metodologias utilizadas por outros autores para a NDE de ligas de aço (RASLAN; SILVA; SANTOS, [s.d.]; SANTOS, 2013; SILVA, 2016; LIMA, 2018), de titânio (YAN; CHUNG TSAI; YUAN HUANG, 2005; CAMARGO; COSTA; RASLAN, 2009; SANTOS, 2019), de ferro fundido nodular (ELIAS, 2019) e de alumínio AA2011 (MORALES, 2019). Como principal semelhança entre as metodologias, destaca-se o uso de ureia como fonte de nitrogênio em meio aquoso.

4.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Como eletrodo peça, foram usinadas em torno mecânico amostras de liga alumínio-silício obtidas a partir de cabeçote de motor de combustão interna, o mesmo utilizado por Martins (2016) em seu estudo sobre a usinagem deste material com brocas com e sem revestimento DLC (*Diamond Like Carbon*). A caracterização da composição química média em porcentagem por peso da liga alumínio-silício hipoeutética foi realizada pelo pesquisador supracitado e está representada na Tabela 4.

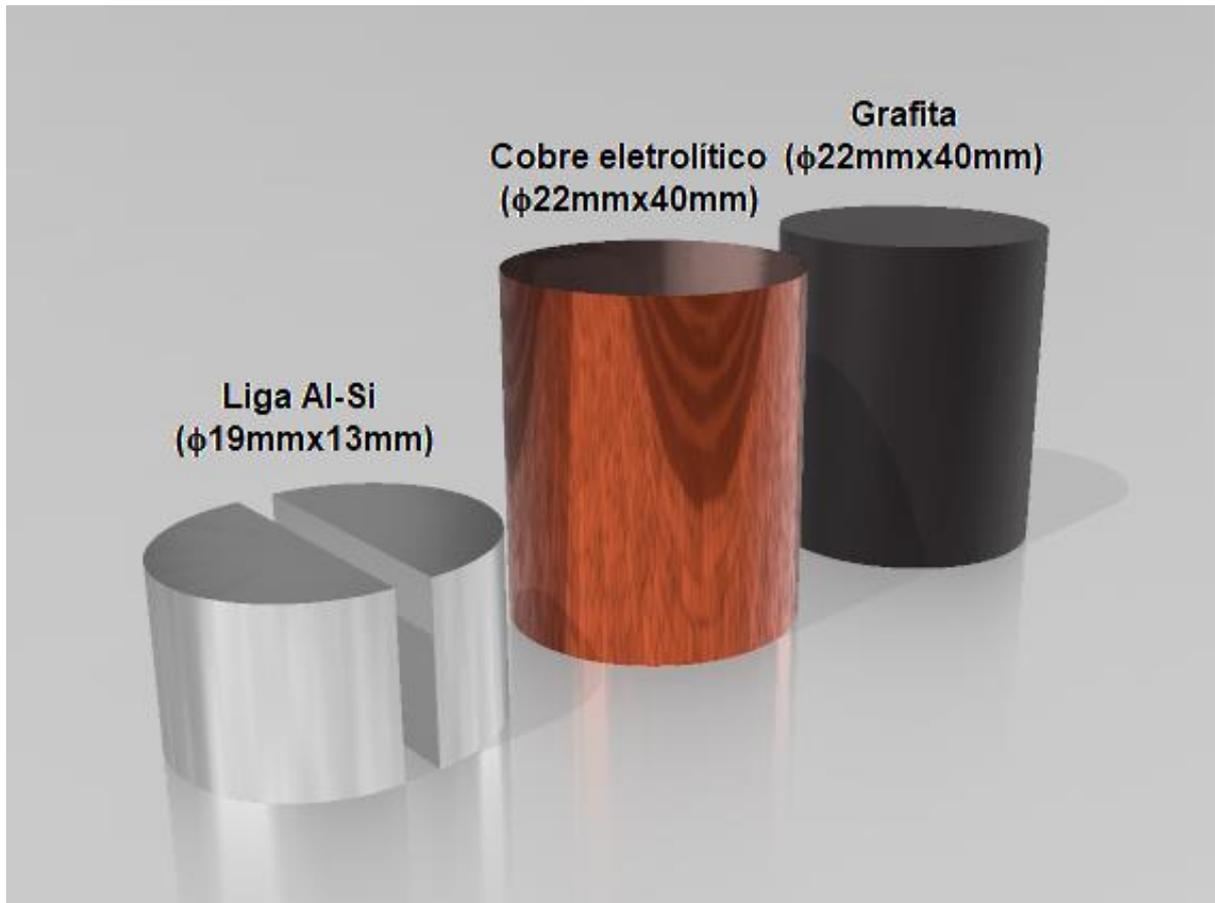
Tabela 4 – Composição química média da liga Al-Si hipoeutética

Elemento	Al	Si	Cu	Fe	Mg	Mn	Zn	Ni	Pb	Sn
Quantidade (%peso)	86,8	7,76	3,11	0,74	0,36	0,40	0,56	0,03	0,05	0,02

Fonte: (MARTINS, 2016)

Na condição de eletrodos ferramenta foram utilizadas peças cilíndricas de cobre eletrolítico e de grafita, conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18 – Desenhos dos eletrodos e suas respectivas dimensões



Fonte: Autora, 2019

Os eletrodos peça foram bipartidos ao longo do eixo, como ilustrado na Figura 18, de forma a facilitar posterior análise microscópica nessa direção.

Dois tipos de fluidos dielétricos foram utilizados na usinagem das amostras: água deionizada e solução aquosa de ureia, conforme explicado na seção 4.2. A água deionizada foi obtida pela passagem de água potável fornecida pela companhia de abastecimento local em deionizador portátil a base de resina, modelo da Acqua Delta com capacidade de 50L.h⁻¹. A solução aquosa de ureia, concentração 33,3g.L⁻¹, foi formulada via adição de ureia (CH₄N₂O) em água deionizada. Foram utilizados dois tipos de ureias: padrão analítico VETEC™, seção 4.2.1, e ureia farmacológica (manipulações tópicas), seção 4.2.2.

A condutividade elétrica dos fluidos de usinagem foi medida com condutivímetro portátil Digital Aid TDS&EC meter, com faixa de medição de 0-9990μS.cm⁻¹±2%.

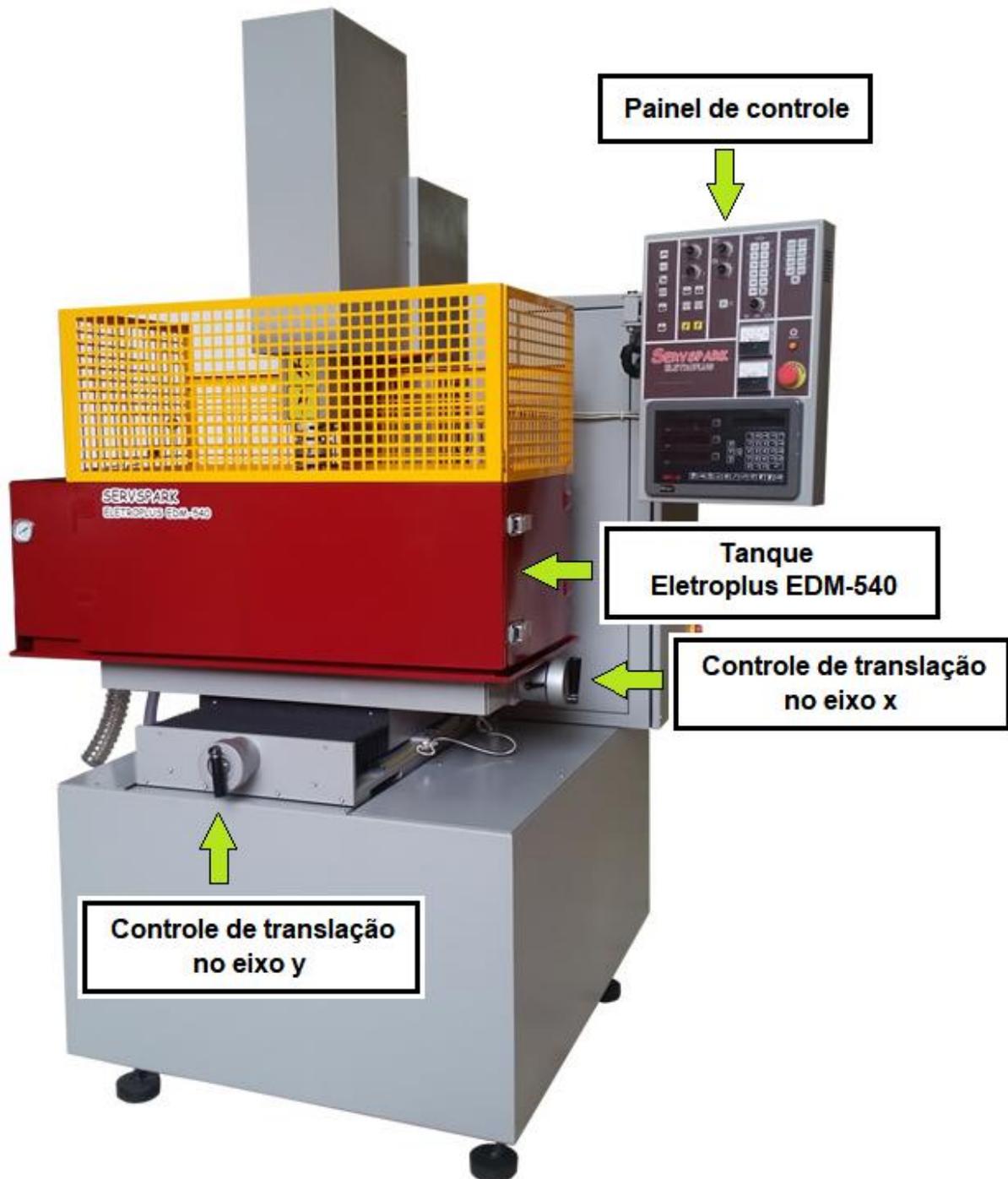
Para a NDE foi utilizado equipamento Servspark Eletroplus EDM-540, mostrado na Figura 19. A esse sistema foi adaptada cuba auxiliar feita de aço inoxidável AISI 304 com capacidade de 105L, como indicado na Figura 20, e bomba auxiliar Asten CD 30002 com vazão de $51\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ a 2mca, representada na Figura 21.

Os parâmetros de processo foram ajustados no painel de controle, indicado na Figura 19 e na Figura 21. O tanque eletroplus EDM-540, apresentado na Figura 19 e na Figura 20, é responsável pela contenção do fluido dielétrico utilizado na usinagem. Essa função foi substituída pela cuba auxiliar, mostrada na Figura 20 e na Figura 21, visto que a solução aquosa de ureia tem alto poder corrosivo sobre muitas ligas ferrosas, podendo danificar o tanque original do equipamento quando em contato com este. Visando a mesma proteção do equipamento eletroplus EDM-540, a bomba auxiliar, indicada na Figura 20 e na Figura 21, foi utilizada em substituição ao sistema de bombeamento de fluido integrado à máquina de usinagem.

O movimento do eletrodo ferramenta é controlado pelo servo mecanismo, mostrado na Figura 21, na direção vertical.

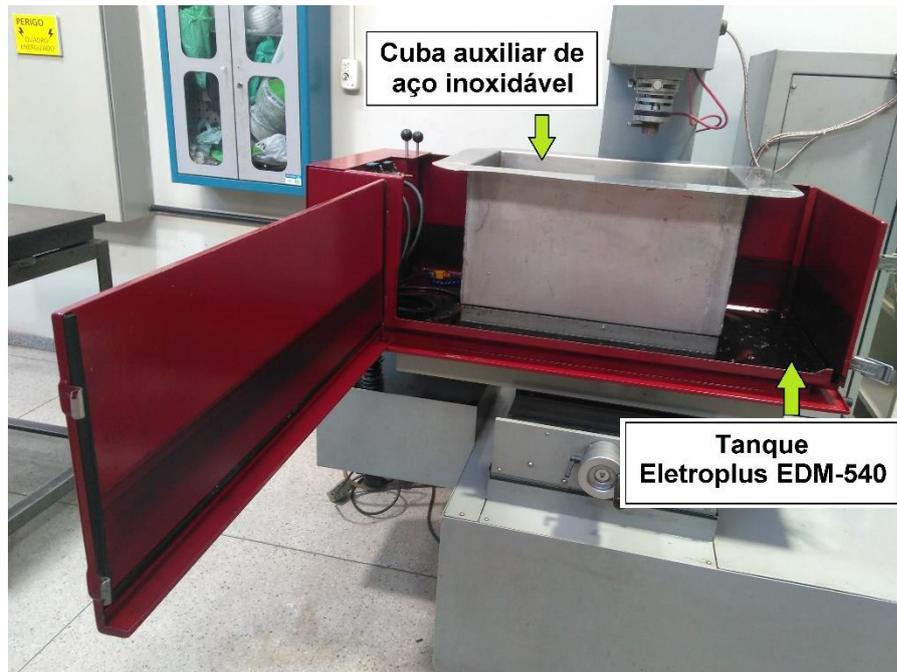
Para movimentos do eletrodo peça no plano horizontal (eixos x e y) são utilizados os controles apresentados na Figura 19.

Figura 19 – Equipamento Eletroplus EDM-540 da Servspark



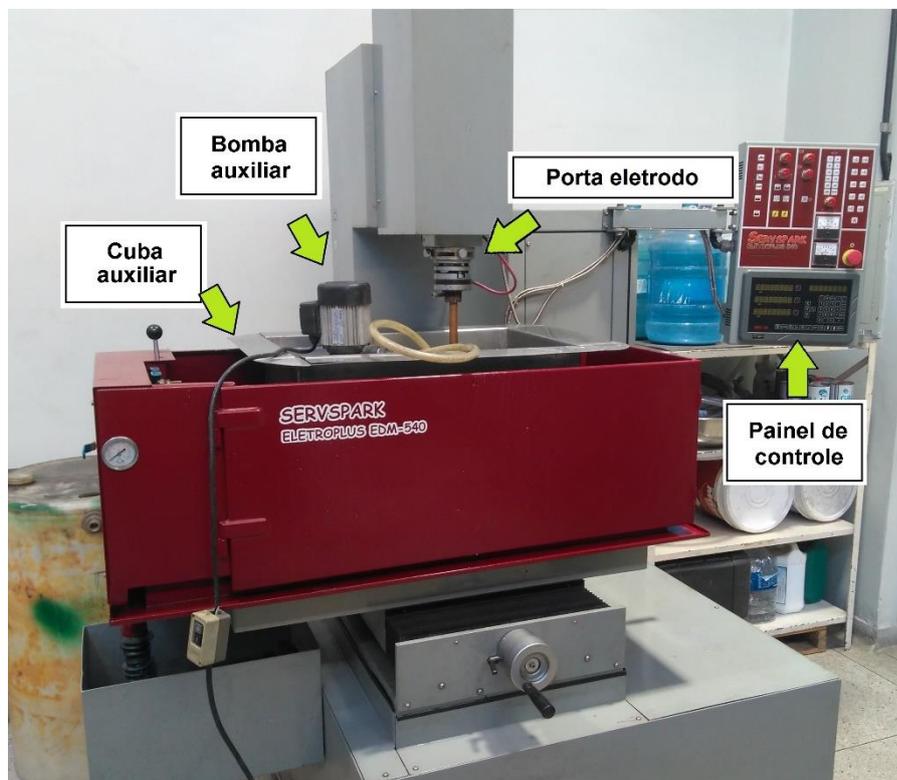
Fonte: Adaptado de Servspark (200DC)

Figura 20 – Cuba auxiliar de material inoxidável adaptada em equipamento de EDM



Fonte: Autora, 2019

Figura 21 – Representação de imagem mostrando bomba auxiliar, cuba auxiliar, servo mecanismo e painel de controle em equipamento EDM



Fonte: Autora, 2019

4.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A fim de verificar as alterações promovidas na camada superficial das peças quanto à presença do elemento nitrogênio no fluido dielétrico, foram realizados experimentos com EDM em solução aquosa de ureia e em água deionizada.

O processo experimental foi realizado em duas etapas que ocorreram em momentos distintos. Em primeiro lugar, seção 4.2.1, buscou-se verificar a possibilidade de ocorrência de formação de nitretos via EDM em solução aquosa de ureia. Para este intento, experimentou-se a referida usinagem com eletrodos de dois materiais diferentes: cobre eletrolítico e grafita. Em um segundo momento, seção 4.2.2, constatada a ocorrência da nitretação, foram realizados experimentos a fim de observar a viabilidade da NDE em correntes elétricas mais baixas e em outra configuração de polaridade dos eletrodos. Neste momento, optou-se pelo uso de cobre eletrolítico como eletrodo ferramenta.

Os parâmetros de processo adotados em ambas etapas estão representados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros da usinagem por descargas em liga Al-Si

Parâmetro	Valor
Tensão	40V
Tempo de pulso (T_{on})	100 μ s
Tempo de pausa (T_{off})	1,5*
Fenda (<i>gap</i>)	1*
Tempo de erosão	5*
Tempo de afastamento da ferramenta	2*
Velocidade do servo	3*
Duração da usinagem	Variável para cada amostra

*Parâmetros ajustados no painel de controle da máquina em conformidade com o manual de operação do equipamento (sem unidades indicadas)

Fonte: Autora, 2019

A montagem dos eletrodos e o processo de descargas elétricas estão representados na Figura 22 e na Figura 23, respectivamente.

Figura 22 – Fotografia mostrando a montagem dos eletrodos peça e ferramenta para usinagem por descargas elétricas



Fonte: Autora, 2019

Figura 23 – Imagem mostrando a execução da EDM

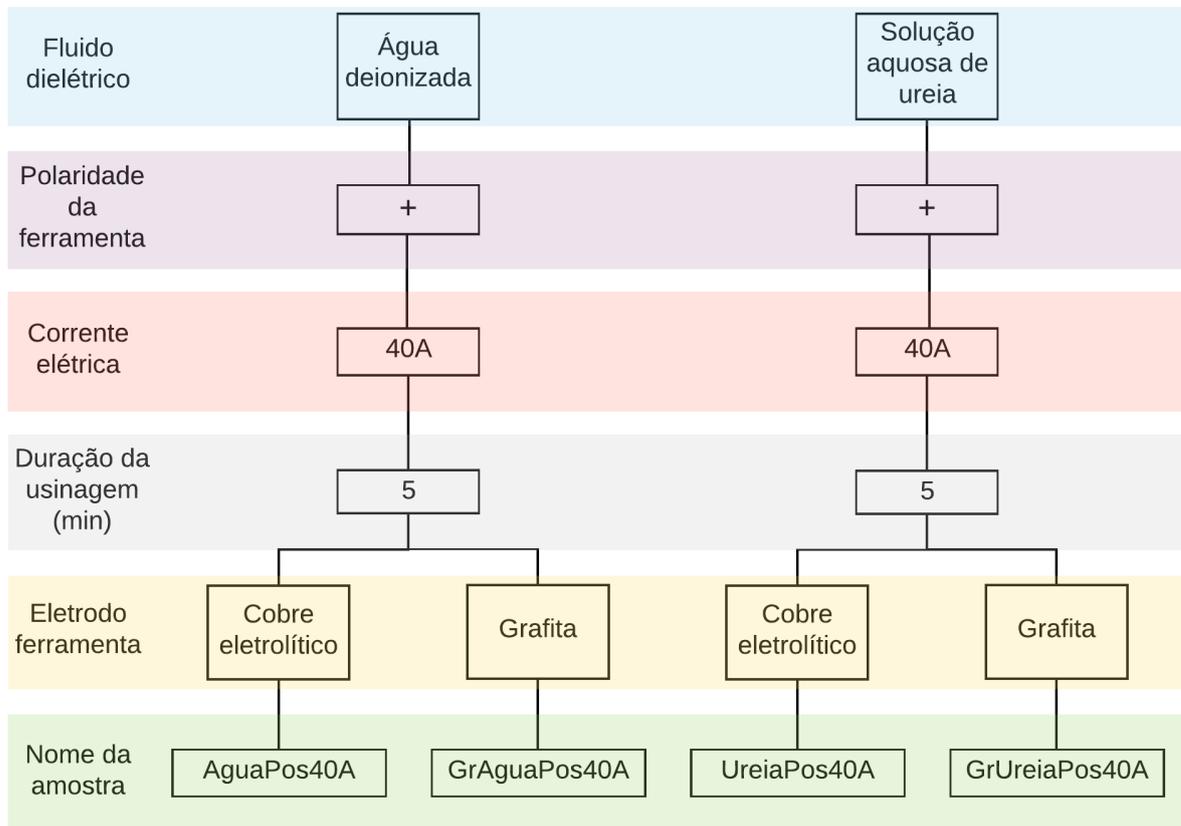


Fonte: Autora, 2019

4.2.1 Primeira etapa do processo experimental

A primeira etapa do processo experimental, visando verificar a viabilidade técnica da NDE, foi realizada com o maior valor de corrente elétrica aceito pelo equipamento EDM utilizado. Para tanto, foram feitos testes com dois eletrodos ferramenta distintos: de cobre eletrolítico e de grafita. Os parâmetros de processo estão representados na Tabela 5 e na Figura 24.

Figura 24 – Diagrama correlacionando amostras e variáveis do planejamento experimental da primeira etapa

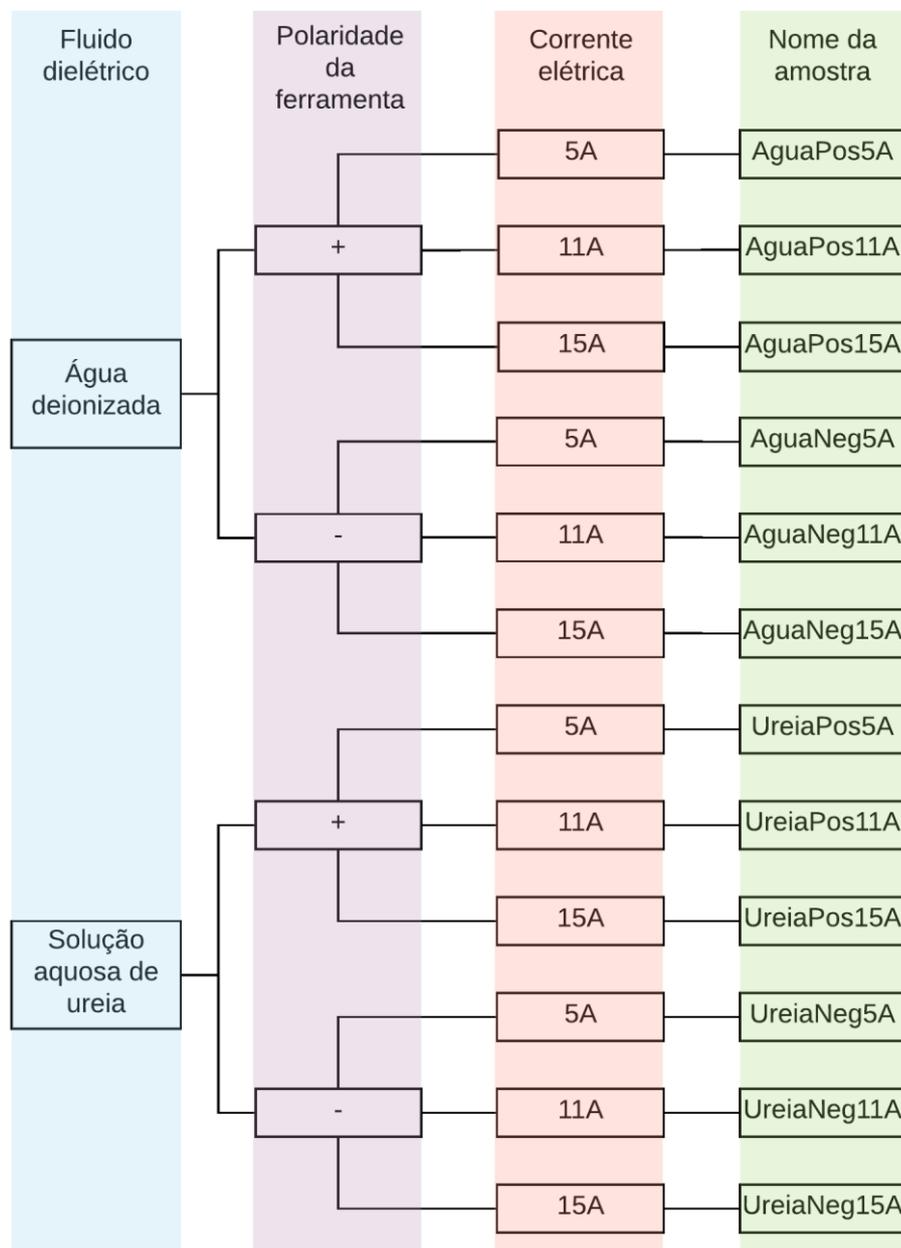


Fonte: Autora, 2019

4.2.2 Segunda etapa do processo experimental

Os objetivos dessa etapa consistem na verificação da viabilidade técnica da NDE em correntes elétricas inferiores a 40A e em polaridade negativa. Para este fim, foram usinadas amostras em 12 diferentes condições, conforme indicado na Figura 25. Os demais parâmetros de processo estão representados na Tabela 5.

Figura 25 – Diagrama correlacionando amostras e variáveis do planejamento experimental da segunda etapa



Os tempos de duração da usinagem foram decididos durante os experimentos, começando por tempo pré-determinado de 5min e dando-se prosseguimento à EDM nos casos em que o aspecto visual macroscópico não indicasse recobrimento de toda a superfície com camada modificada.

4.3 METALOGRAFIA

O preparo das superfícies de análise dos eletrodos peça bipartidos foi feito por meio de lixamento, polimento e ataque químico, para posterior análise microscópica e ensaio de microdureza.

A sequência de lixas de carbetto de silício de 120, 240, 320, 400, 600, 1000 e 3000mesh foi utilizada no preparo das superfícies. Em seguida, as amostras foram polidas com pasta de diamante de 3 e de 1 μ m e atacadas quimicamente com reagente Keller, composto, segundo Zipperian (2011), por 2,5mL de HNO₃, 1,5mL de HCl, 1,0mL de HF e 95mL de água deionizada. O ataque químico foi realizado por meio do contato da superfície metálica com algodão embebido em reagente Keller por 2s.

Foram obtidas micrografias das amostras por microscópio eletrônico de varredura Shimadzu SSX-550 e por microscópio ótico Fortel com sistema de aquisição de imagens Kontrol M713. A espessura das camadas foi medida com base nas micrografias de seção transversal da face usinada, por meio de ferramenta de medição linear do *software ImageJ*.

4.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A investigação da estrutura cristalina da superfície usinada foi realizada por difração de raios x, em equipamento Shimadzu XRD 7000X, com os parâmetros representados na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros da análise por difração de raios X

Radiação	CuK α
Tensão	40kV
Corrente	30mA
Modo de varredura	Tempo fixo, 1s
Faixa de varredura	25° a 90°
Passo de varredura	0,04° (primeira etapa) e 0,02° (segunda etapa)

Fonte: Autora, 2019

4.5 MICRODUREZA

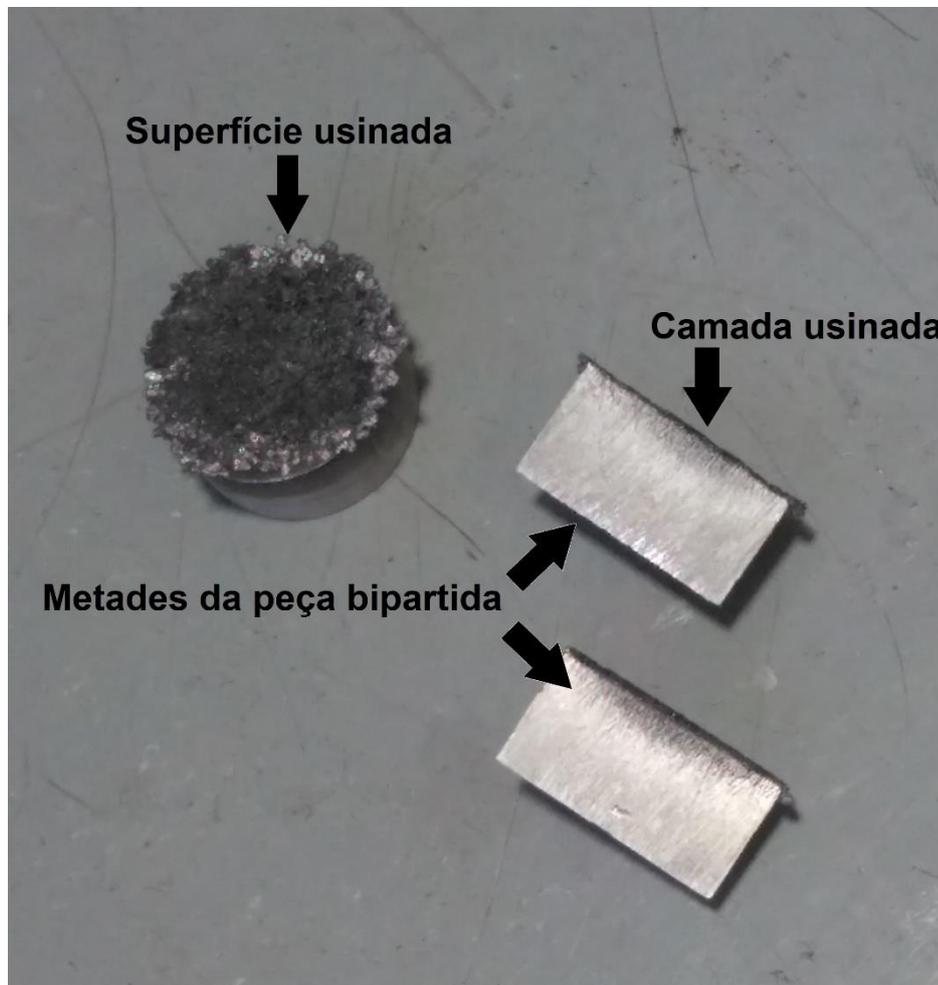
Na primeira etapa, mediu-se a microdureza da região porosa da camada via equipamento Shimadzu HMV 2T E, com microscópio óptico acoplado e *software* de análise de imagem Easy Test HMV-AD. Os parâmetros de teste adotados foram carga de 10gf e tempo de 20s.

Na segunda etapa e na medição da dureza da zona mais externa da camada modificada da amostra UreiaPos40A foi utilizado equipamento Shimadzu HMV 2T, sem *software* de análise de imagem. Nesses casos, a carga adotada foi 100gf e o tempo, 20s.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO – PRIMEIRA ETAPA

As peças de alumínio-silício submetidas à EDM, tanto em água deionizada como em solução aquosa de ureia, adquiriram aspecto visual rugoso e escurecido em relação ao metal base. Essa aparência característica da superfície usinada por descargas elétricas pode ser verificada na Figura 26

Figura 26 – Fotografia das peças de alumínio-silício usinadas com eletrodo de cobre eletrolítico, corrente elétrica de 40A, em solução aquosa de ureia

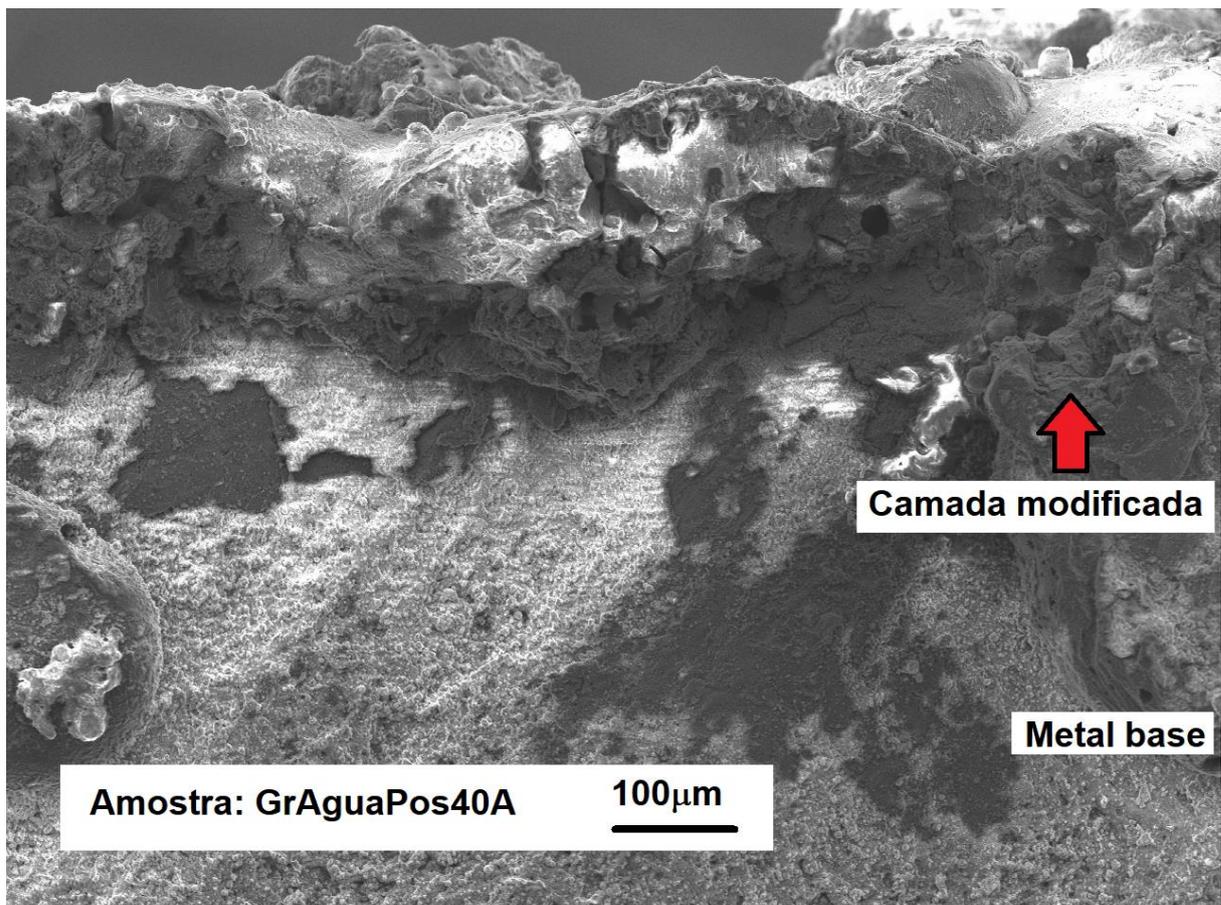


Fonte: Autora, 2019

Imagens de MEV obtidas da vista frontal das camadas modificadas também evidenciam o aspecto texturizado das mesmas.

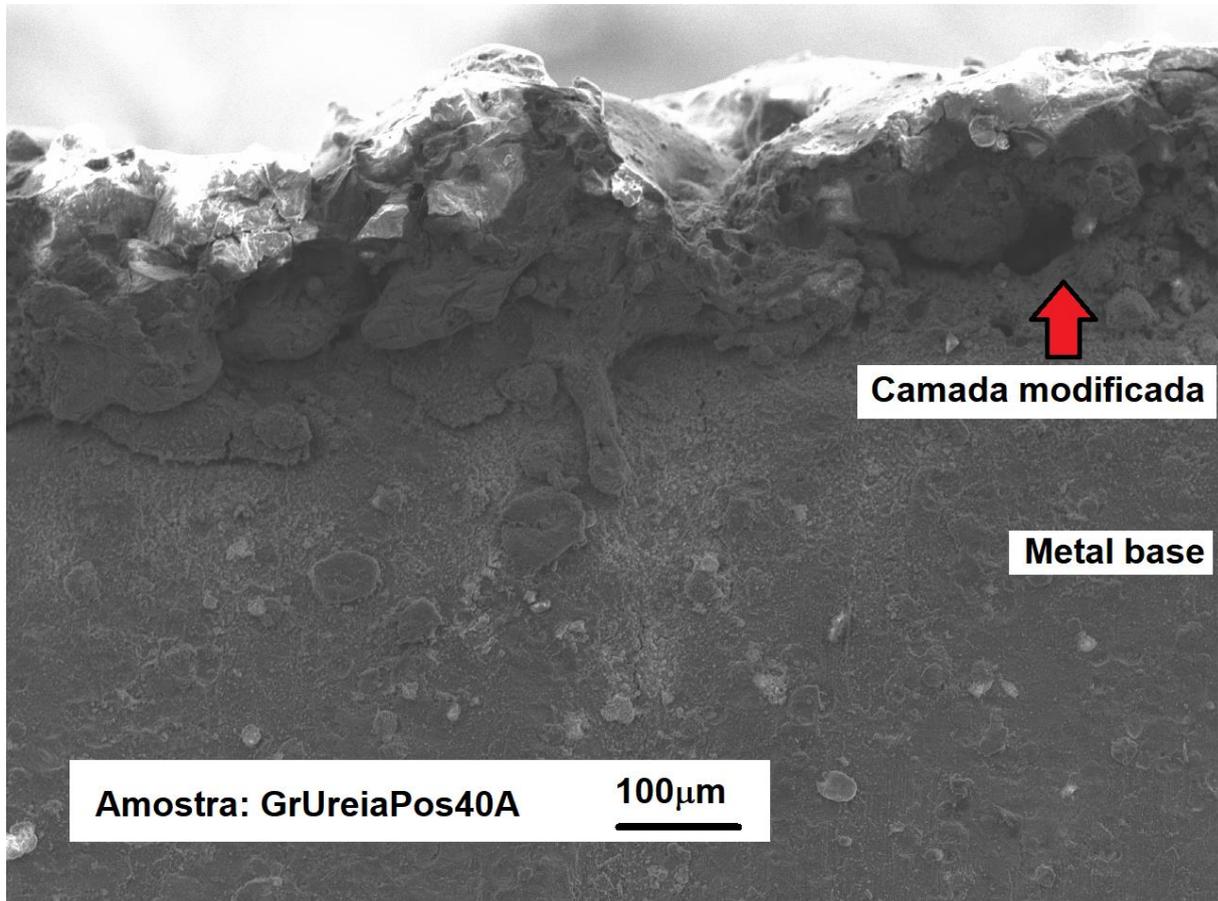
Na Figura 27 e na Figura 28, as vistas frontais possibilitam a nítida diferenciação entre metal base não polido e a camada modificada como formada. Nessas figuras, percebe-se que a camada modificada possui aspecto visual mais rugoso que a superfície de metal base.

Figura 27 – Imagem de MEV de vista frontal da camada modificada pela usinagem por descargas elétricas



Fonte: Autora, 2019

Figura 28 – Imagem de MEV de vista frontal da camada modificada pela usinagem por descargas elétricas



Fonte: Autora, 2019

5.1 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DOS FLUIDOS DE EDM

A condutividade elétrica da solução aquosa de ureia foi medida antes da usinagem das amostras e apresentou valor de $22\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1} \pm 2\%$ em temperatura de aproximadamente 23°C . Santos (2013) obteve sucesso na NDE de aço AISI 4140 em soluções aquosas de ureia cujas condutividades elétricas variaram de 79 a $1570\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, apesar de neste último valor o autor identificar a ocorrência de descargas elétricas instáveis. O pesquisador supracitado observou não ser possível a NDE do aço AISI 4140 a partir de valores de condutividade elétrica iguais ou superiores a $1678\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Considerando-se apenas a condutividade elétrica e com base nos resultados alcançados por Santos (2013), pode-se inferir que o valor de $22\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1} \pm 2\%$ atende ao requisito de fluido dielétrico para a obtenção de descargas estáveis.

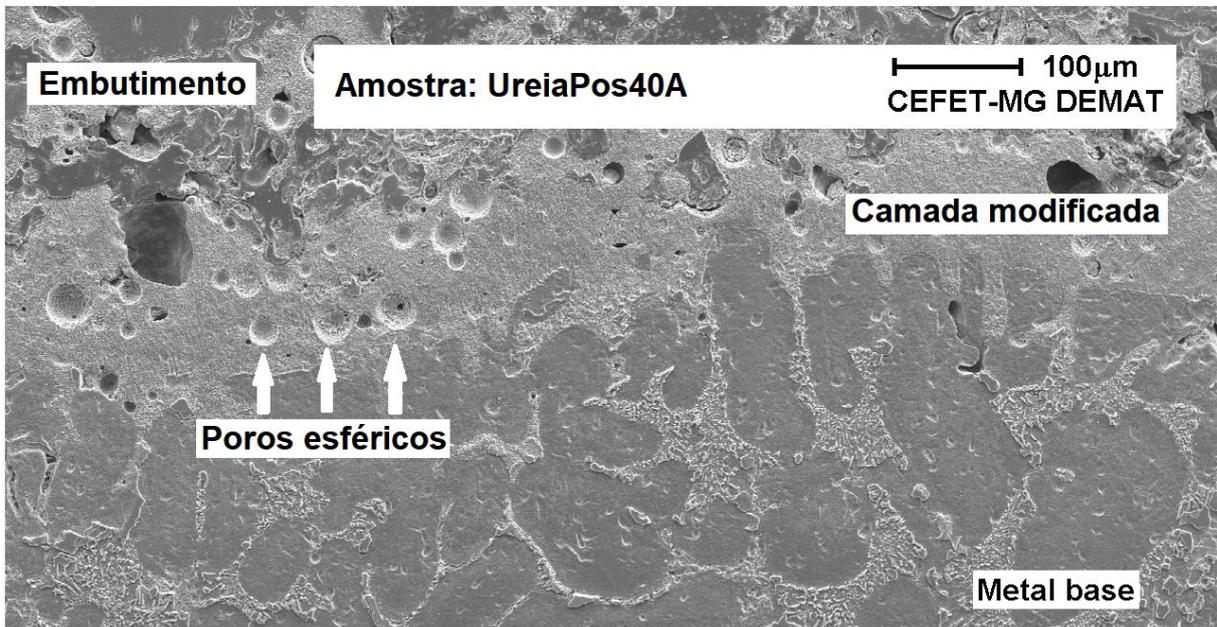
5.2 METALOGRAFIA

Na Figura 29 e na Figura 30 estão representadas as micrografias das seções transversais das camadas modificadas das amostras usinadas em solução aquosa de ureia.

Pelas micrografias representadas na Figura 29 e na Figura 30, é possível perceber a existência de poros esféricos e de vazios de geometria irregular nas camadas modificadas. Esses vazios estão presentes em maior quantidade nas micrografias da amostra usinada com eletrodo de grafita.

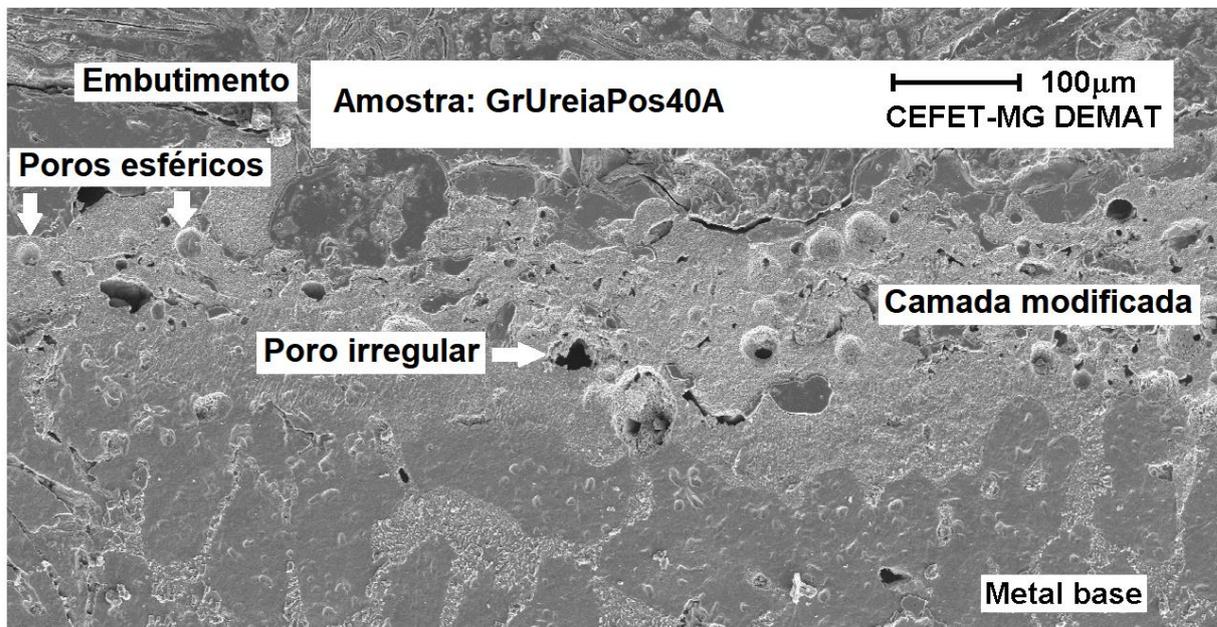
As características morfológicas observadas estão em conformidade com as características descritas por outros pesquisadores (AROOJ et al., 2014; BLEYS et al., 2006; EKMEKCI et al., 2005).

Figura 29 – Imagem de MEV de seção transversal da camada modificada da amostra UreiaPos40A



Fonte: Autora, 2019

Figura 30 – Imagem de MEV de seção transversal da camada modificada da amostra GrUreiaPos40A



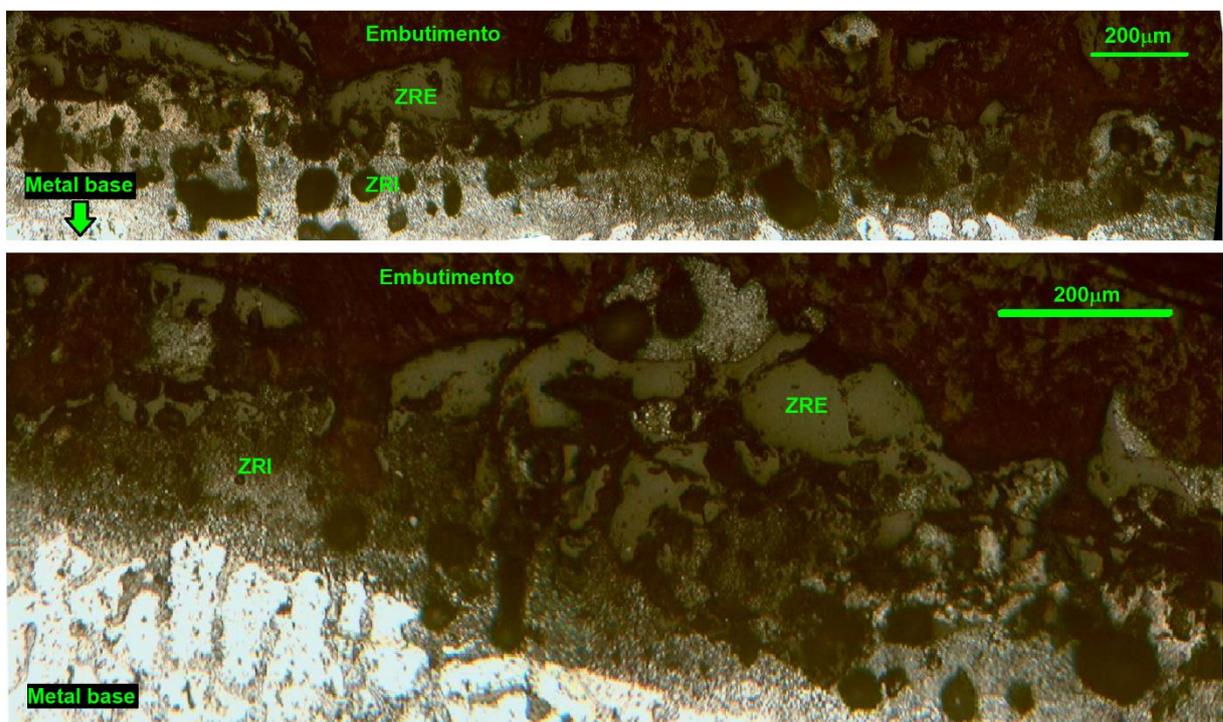
Fonte: Autora, 2019

Nas micrografias obtidas por microscopia ótica é possível diferenciar duas regiões de características distintas na zona refundida (ZR): uma porosa e espessa e outra mais fina e externa, conforme ilustrado na Figura 31 e na Figura 32. Essas diferentes zonas da camada refundida também foram identificadas por Morales (2019) na NDE do duralumínio AA2011 com ferramenta de polaridade negativa. Para facilitar a discriminação dessas duas regiões de uma mesma camada, no presente trabalho, a zona porosa será tratada por zona refundida interna (ZRI) e zona mais fina e externa será chamada zona refundida externa (ZRE).

Assim como observado por meio das imagens de MEV, na Figura 31 e na Figura 32 a ZR da peça usinada com eletrodo de cobre eletrolítico aparenta possuir menos defeitos que a ZR das peças usinadas com eletrodo de grafita.

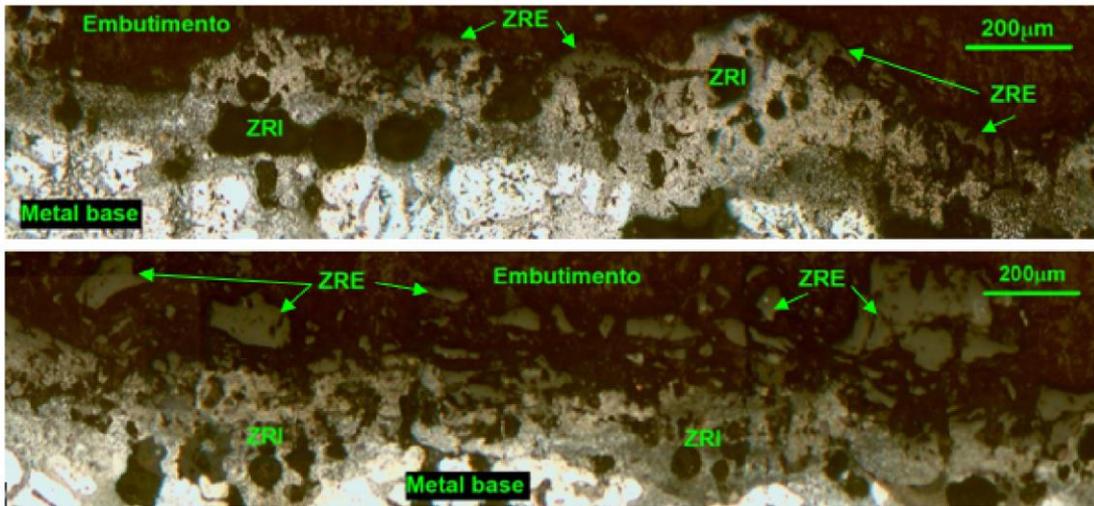
Por meio das micrografias da Figura 33 é possível perceber o caráter irregular das camadas modificadas de ambas amostras usinadas em solução aquosa de ureia.

Figura 31 – Micrografias obtidas por MO da seção transversal da camada modificada da amostra UreiaPos40A



Fonte: Autora, 2019

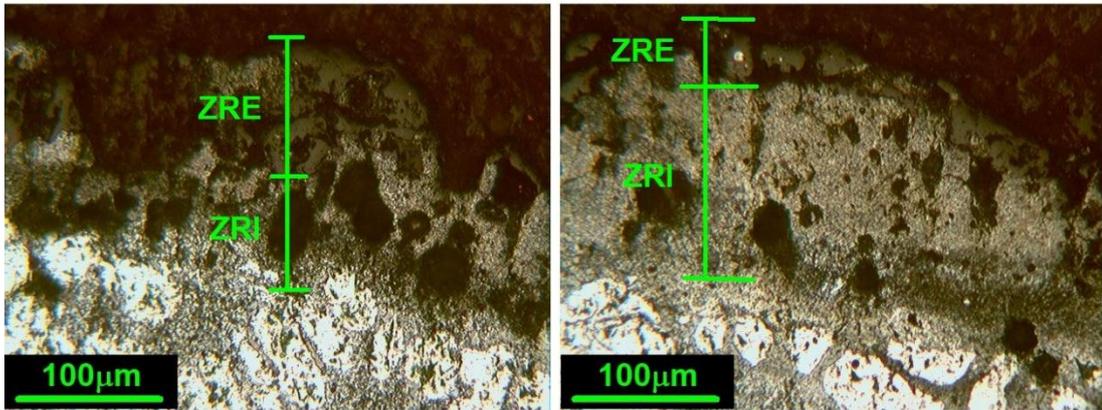
Figura 32 – Micrografias obtidas por MO da seção transversal da camada modificada da amostra GrUreiaPos40A



Fonte: Autora, 2019

Figura 33 – Micrografias obtidas por MO com indicação das zonas refundidas externas (ZRE) e internas (ZRI) das camadas modificadas

Amostra: GrUreiaPos40A



Amostra: UreiaPos40A

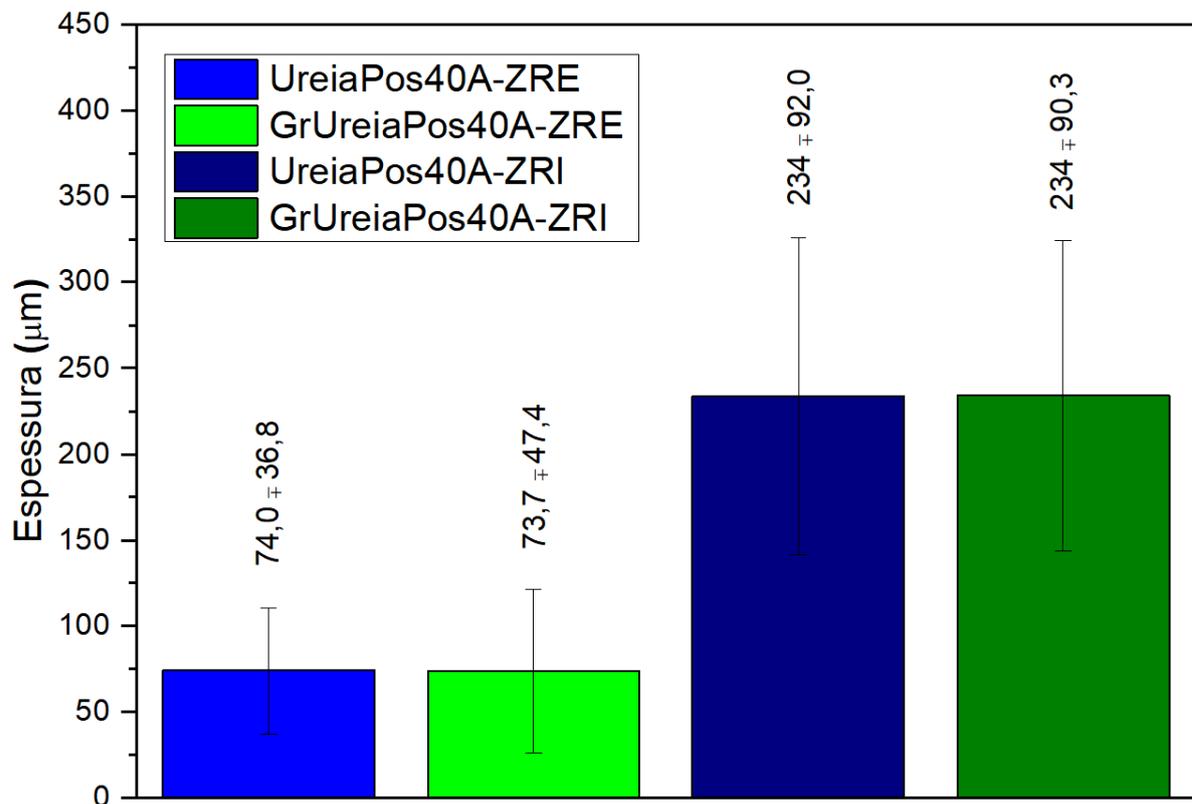


Fonte: Autora, 2019

As espessuras da ZRE e da ZRI das camadas modificadas foram medidas a partir das micrografias de MO, analisadas com auxílio do *software ImageJ*. Os valores médios calculados, com os respectivos desvios-padrão, estão representados na Figura 34.

Por meio da Figura 34, observa-se que as espessuras das camadas modificadas das amostras usinadas com eletrodo de cobre eletrolítico e com eletrodo de grafita não possuem diferença significativa entre si. Da mesma forma, é possível perceber que a ZRI é significativamente maior que a ZRE nas duas situações. Os desvios-padrão são elevados em ambas camadas, fato coerente com irregularidade das espessuras, observada via microscopia antes de realização das medições.

Figura 34 – Gráfico de valores médios das espessuras da ZRE e da ZRI de amostras usinadas em solução aquosa de ureia



Fonte: Autora, 2019

5.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

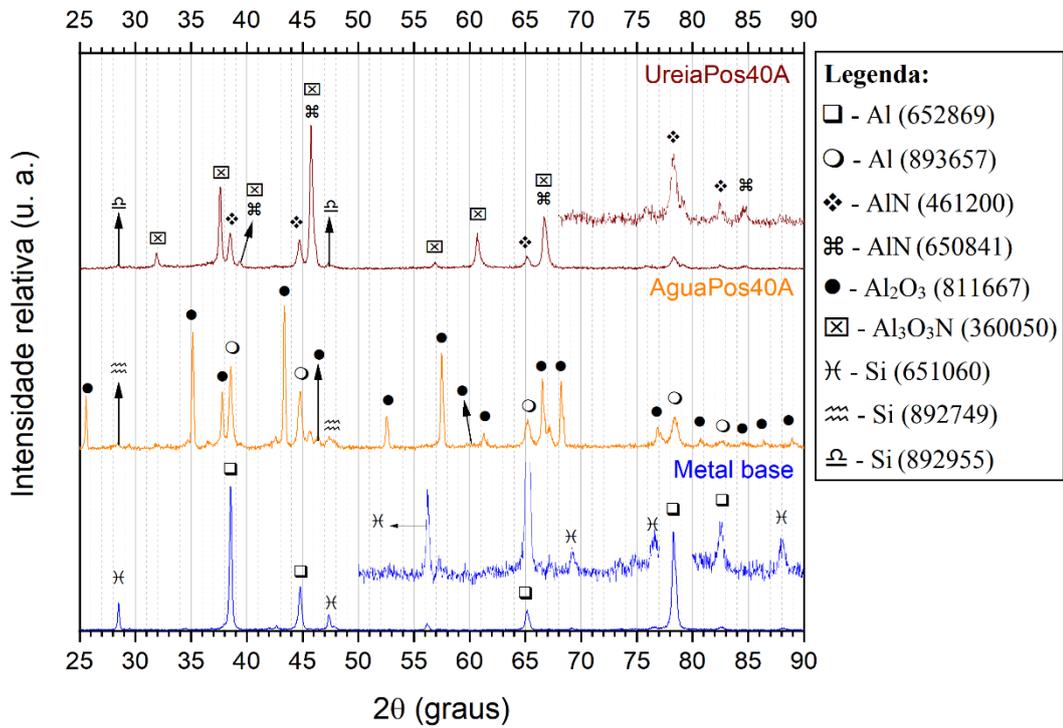
A análise por difração de raios x foi realizada no metal base (liga alumínio-silício hipoeutética) e nas superfícies usinadas, tanto em água deionizada quanto em solução aquosa de ureia.

As fases representadas na Figura 35 e na Figura 36 foram identificadas com base nas fichas do *International Centre for Diffraction Data* (ICDD). Os números de registro das fichas do ICDD consultadas para identificação das fases nos difratogramas foram apresentados entre parênteses ao lado das fórmulas químicas das respectivas fases.

Tanto na Figura 35, como na Figura 36, observou-se nítida diferença entre o difratograma do metal base e os difratogramas das amostras usinadas. Por tal diferença, infere-se que a usinagem por descargas elétricas provocou alterações microestruturais na superfície das amostras. A investigação das fases presentes nas superfícies usinadas, via difração de raios x, resultou na identificação de picos característicos de óxido de alumínio (Al_2O_3 (811667)), em amostras usinadas em água deionizada, e de picos característicos de nitreto (AlN (461200), AlN (650841)) e oxinitreto de alumínio ($\text{Al}_3\text{O}_3\text{N}$ ou $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{AlN}$ (360050)), em amostras usinadas em solução aquosa de ureia, além dos picos característicos das fases presentes na liga original.

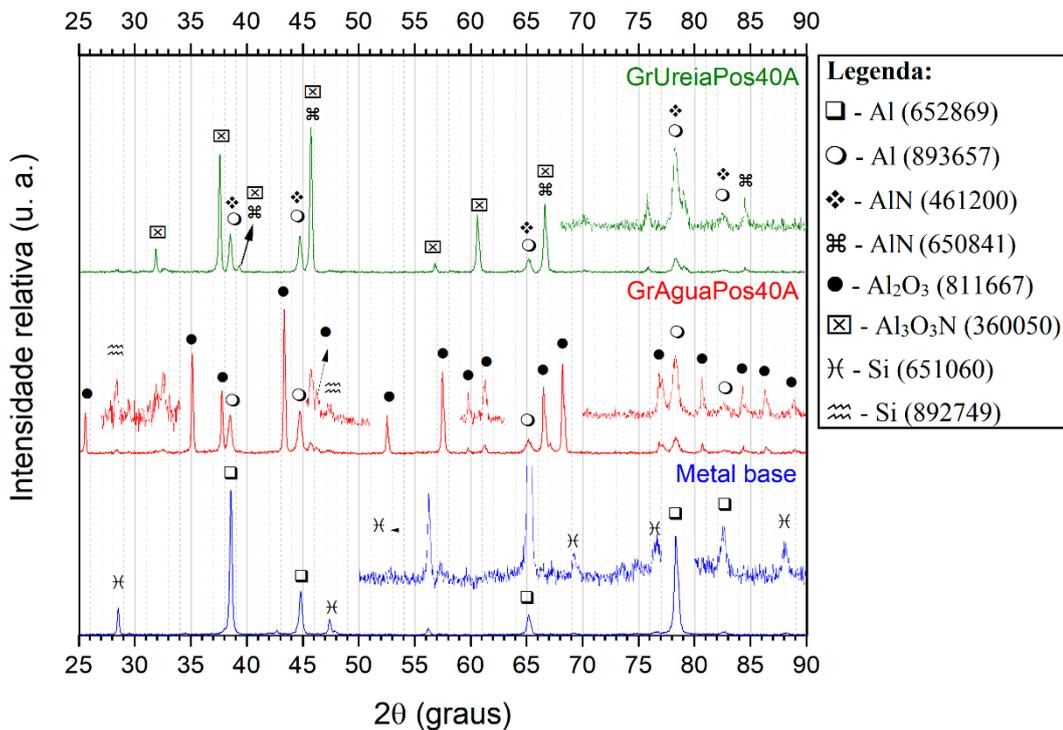
Na Figura 35 e na Figura 36 também foram identificadas diferenças entre os difratogramas de amostras usinadas em água deionizada e em solução aquosa de ureia. Muitos picos atribuídos à fase Al_2O_3 (811667) nos difratogramas de amostras usinadas em água deionizada não estão presentes nos difratogramas de amostras usinadas em solução aquosa de ureia, indicando que não ocorreram interferências construtivas de raios difratados nesses ângulos. Embora alguns picos de nitreto e oxinitreto estejam posicionados nos mesmos ângulos de picos característicos de alumínio e/ou óxido, as diferenças de intensidade e ausência de interferência construtiva em outras linhas de difração características dessas fases, permitem concluir que os picos identificados nos difratogramas de amostras usinadas em solução aquosa de ureia foram, de fato, oriundos de difração em nitretos e oxinitretos.

Figura 35 - Difratogramas do metal base e de amostras usinadas com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico



Fonte: Autora, 2019

Figura 36 - Difratogramas do metal base e de amostras usinadas com eletrodo ferramenta de grafita

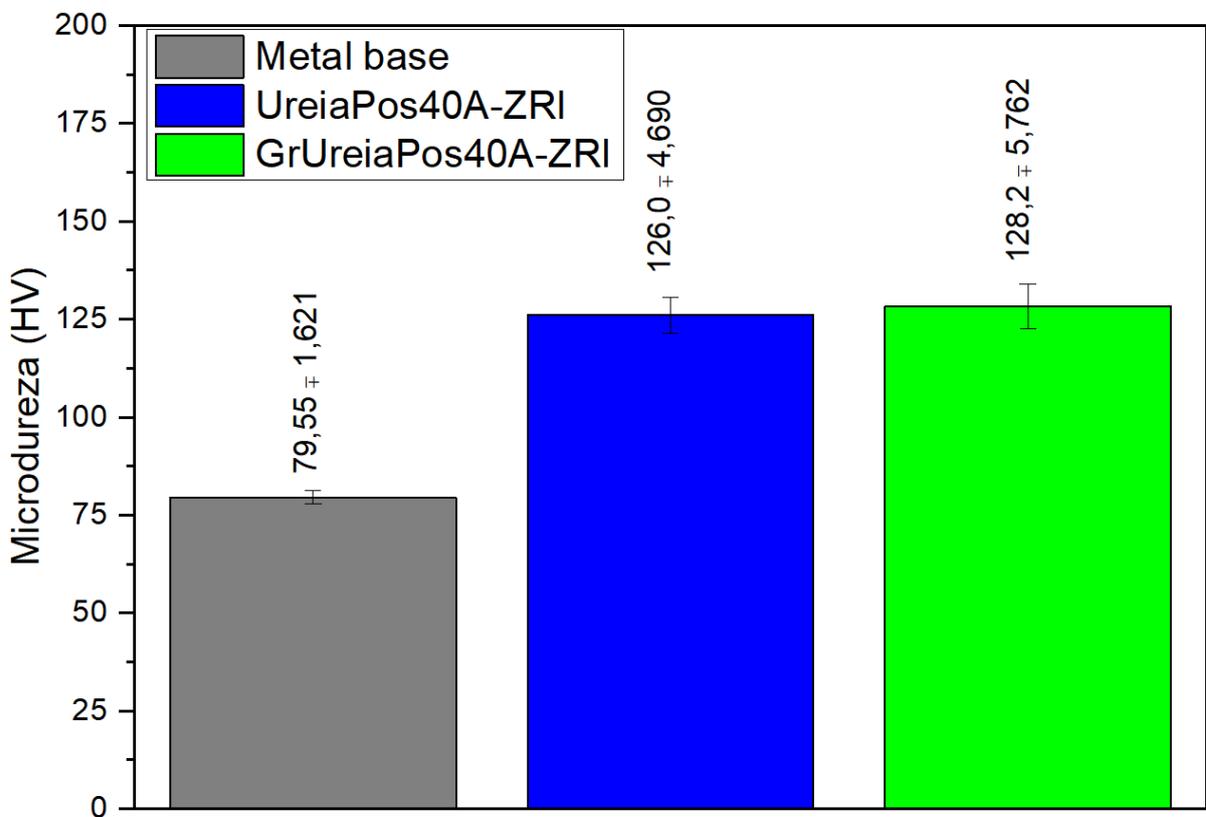


Fonte: Autora, 2019

5.4 MICRODUREZA VICKERS

O teste de microdureza foi realizado no metal base e nas superfícies usinadas com eletrodo de grafita e de cobre eletrolítico. Na Figura 37 estão representados os valores médios de dureza e os respectivos desvios-padrão.

Figura 37 – Microdureza média do metal base (liga Al-Si) e das superfícies usinadas em solução aquosa de ureia com eletrodos de grafita e de cobre eletrolítico



Fonte: Autora, 2019

A partir dos resultados contidos na Figura 37, observa-se significativo aumento, de cerca de 57%, de dureza das amostras usinadas em solução aquosa de ureia em relação ao metal base. Entre as amostras usinadas com diferentes eletrodos não foi identificada diferença significativa nessa propriedade.

6 CONCLUSÕES PARCIAIS

A partir dos testes realizados na primeira etapa do processo experimental foi possível elaborar as seguintes conclusões parciais:

- A morfologia da seção transversal da camada modificada caracterizou-se pela presença de poros esféricos e de vazios. Já a face usinada, foi composta por microcrateras distribuídas sobre toda a superfície, conferindo à peça aspecto visual e tátil de caráter rugoso.
- As camadas modificadas apresentaram espessura irregular.
- As espessuras das ZREs e ZRIs não diferiram significativamente entre as amostras usinadas com eletrodo de grafita e de cobre eletrolítico em solução aquosa de ureia. A espessura média da ZRE foi cerca de 31% da espessura média da ZRI nessas amostras.
- A análise das amostras por difração de raios x sustentou a hipótese de nitretação do alumínio-silício por descargas elétricas, visto que resultou na identificação de AlN cúbico e de oxinitreto de alumínio nas amostras submetidas à EDM em solução aquosa de ureia.
- Os valores de microdureza da ZRI das superfícies usinadas em solução aquosa de ureia não foram estatisticamente diferentes entre as peças usinadas com eletrodo de grafita e de cobre eletrolítico. No entanto, esta propriedade foi significativamente maior nas peças usinadas, em relação ao material não tratado.
- O aumento de dureza média das ZRIs das camadas modificadas em relação ao metal base foi calculado como cerca de 57%.
- O aumento de dureza e as mudanças de perfil entre os difratogramas das amostras: sem tratamento, usinadas em água deionizada e usinadas em solução aquosa de ureia, corroboraram com a hipótese da ocorrência do fenômeno de nitretação no último caso.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO – SEGUNDA ETAPA

Na Figura 38 foram apresentadas fotografias de superfícies submetidas à usinagem e os tempos de duração do processo. A usinagem por descargas elétricas resultou em superfícies de textura rugosa perceptível a olho nu. A usinagem com eletrodo ferramenta de polaridade positiva foi mais rápida que a usinagem de amostras com os mesmos valores de corrente elétrica e mesmo fluido dielétrico, porém com eletrodo ferramenta de polaridade negativa. Para as amostras usinadas com eletrodo ferramenta de polaridade negativa, a usinagem em solução aquosa de ureia foi mais lenta que a usinagem em água deionizada.

Observa-se na Figura 38 que as amostras usinadas em corrente de 5A e polaridade negativa não foram usinadas integralmente, estando parte da superfície com aspecto igual ao anterior à EDM. Essas amostras com usinagem incompleta não foram submetidas a maiores tempos de experimento, devido aos sinais de esforço excessivo apresentados pelo equipamento EDM durante a usinagem das mesmas. Tais sinais consistiram basicamente em vibrações bruscas da máquina, ocasionando, pelo zelo à integridade do equipamento, necessidade de interrupção dos testes.

Desta forma, as amostras AguaNeg5A e UreiaNeg5A não foram submetidas a análise metalográfica, medição de espessura de camada e ensaio de microdureza.

As amostras usinadas com corrente de 5A e polaridade positiva, conforme mostrado na Figura 38, adquiriam aspecto visual texturizado, mantendo cor prateada característica de alumínio polido. As demais superfícies usinadas apresentaram, além do aspecto texturizado, alteração de cor: umas escureceram de forma uniforme, outras escureceram de forma desigual ao longo da superfície, efeito bastante evidente nas amostras AguaNeg11A e UreiaPos11A.

As cores escuras obtidas nas amostras usinadas em solução aquosa de ureia condizem com a descrição do nitreto de alumínio não estequiométrico obtido pela nitretação a plasma de alumínio por Vissutipitukul e Aizawa (2005).

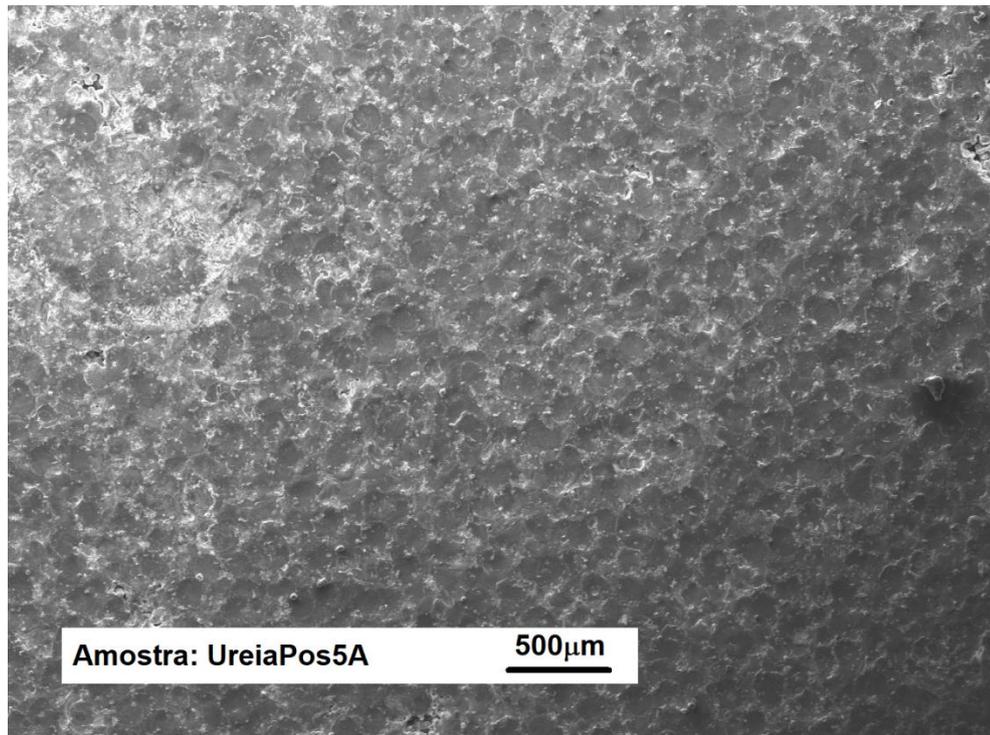
Figura 38 – Diagrama contendo imagens de amostras usinadas com diferentes parâmetros e seus respectivos tempos de usinagem

Corrente elétrica	Fluido dielétrico	Solução aquosa de ureia	Polaridade do eletrodo ferramenta
	Água deionizada		
5A	 ÁguaPos5A (8min)	 UreiaPos5A (8min)	Positiva
	 ÁguaNeg5A (10min)	 UreiaNeg5A (25min)	Negativa
11A	 ÁguaPos11A (11min)	 UreiaPos11A (8min)	Positiva
	 ÁguaNeg11A (15min)	 UreiaNeg11A (20min)	Negativa
15A	 ÁguaPos15A (5min)	 UreiaPos15A (5min)	Positiva
	 ÁguaNeg15A (13min)	 UreiaNeg15A (15min)	Negativa

Fonte: Autora, 2019

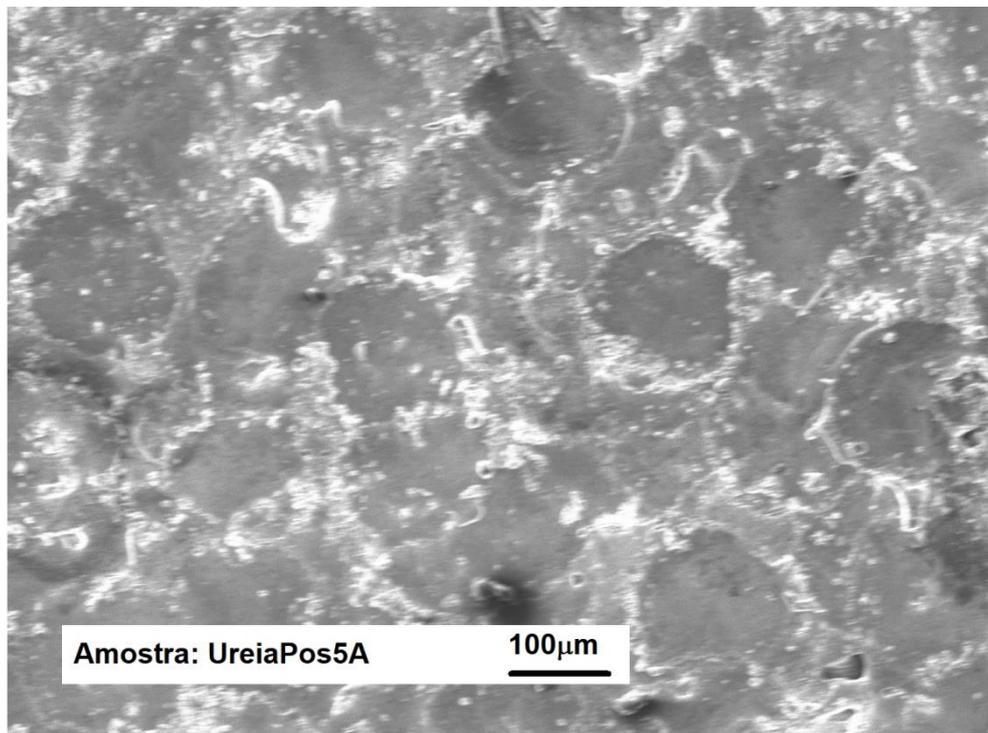
O aspecto rugoso visto a olho nu é também perceptível no nível microscópico, na Figura 39 e na Figura 40. Nessas imagens, verificou-se a existência de microcrateras formadas lado a lado e/ou sobrepostas umas às outras, nas superfícies expostas às descargas elétricas. Essa configuração superficial também foi descrita por Arooj et al. (2014) e Jahan et al. (2014).

Figura 39 – Imagem de MEV da vista de topo da amostra UreiaPos5A



Fonte: Autora, 2019

Figura 40 - Imagem de MEV da vista de topo da amostra UreiaPos5A



Fonte: Autora, 2019

7.1 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DOS FLUIDOS DE EDM

A condutividade elétrica da água deionizada manteve-se constante durante as sucessivas usinagens, apresentando valor de $2\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1} \pm 2\%$, em temperatura de aproximadamente 22°C .

A condutividade elétrica da solução aquosa de ureia, em temperatura próxima a 22°C , variou entre 33 e $39\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1} \pm 2\%$ no decorrer das usinagens, conforme representado na Tabela 7.

Tabela 7 – Condutividade elétrica da solução aquosa de ureia antes e depois da EDM das amostras

Amostra	Condutividade elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	
	Antes da EDM	Depois da EDM
UreiaNeg5A	34	35
UreiaNeg15A	35	33
UreiaNeg11A	33	37
UreiaPos5A	37	37
UreiaPos11A	37	37
UreiaPos15A	37	39

Fonte: Autora, 2019

Pelo motivo exposto no item 5.1, utilizando como referência os resultados de Santos (2013), acredita-se que os valores encontrados na Tabela 7 estão adequados para aplicação do fluido analisado no processo EDM.

7.2 METALOGRAFIA

Como o foco deste trabalho é a NDE, a análise metalográfica restringiu-se às amostras usinadas em solução aquosa de ureia.

Na Figura 41 foram apresentadas micrografias obtidas por microscopia ótica dessas amostras. Com exceção da amostra UreiaPos5A, em todas as imagens foi possível distinguir as diferentes regiões da camada refundida, sendo a ZRI sempre porosa. Também com exclusão da amostra UreiaPos5A, verificou-se que as zonas refundidas externas são mais abundantes nas amostras usinadas com eletrodo ferramenta de polaridade positiva, Figura 41-b) e -c). Nas amostras usinadas com eletrodo ferramenta de polaridade negativa, a ZRE foi identificada em algumas regiões isoladas da superfície, Figura 41-d) e -e). A porosidade da ZRI formada na amostra UreiaNeg15A foi maior que a porosidade da ZRI das demais amostras.

Devido a pequena espessura da camada modificada da amostra UreiaPos5A, Figura 41-a), a morfologia dessa camada foi analisada via microscopia eletrônica de varredura. Na Figura 42, está representada uma imagem de MEV da camada modificada da amostra UreiaPos5A, à esquerda, e, à direita, a mesma imagem foi apresentada com uma linha traçada próxima à interface camada modificada/metal base. Na camada modificada da amostra UreiaPos5A, conforme a Figura 42, não foi possível identificar existência de poros, nem a ocorrência das duas regiões distintas da zona refundida identificadas nas demais amostras.

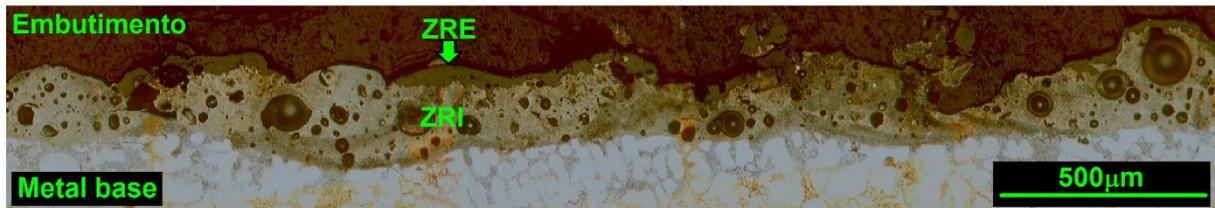
Tanto na Figura 41, como na Figura 42, as camadas modificadas apresentam a aparência de crateras preenchidas dispostas sobre a superfície, como descrito no texto de Camargo, Costa e Raslan (2009) e representado no desenho de Santos (2013), Figura 17, sob a denominação de cavidade fundida.

Figura 41 - Micrografias obtidas por MO de amostras usinadas em solução aquosa de ureia

a) Amostra: UreiaPos5A



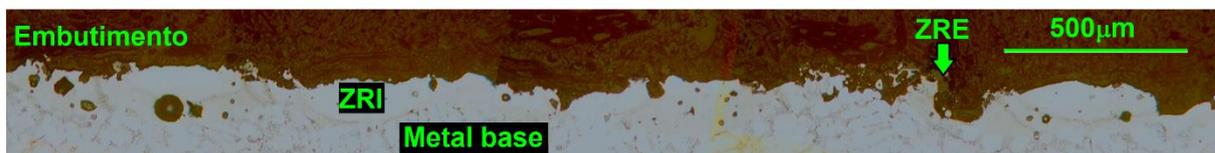
b) Amostra: UreiaPos11A



c) Amostra: UreiaPos15A



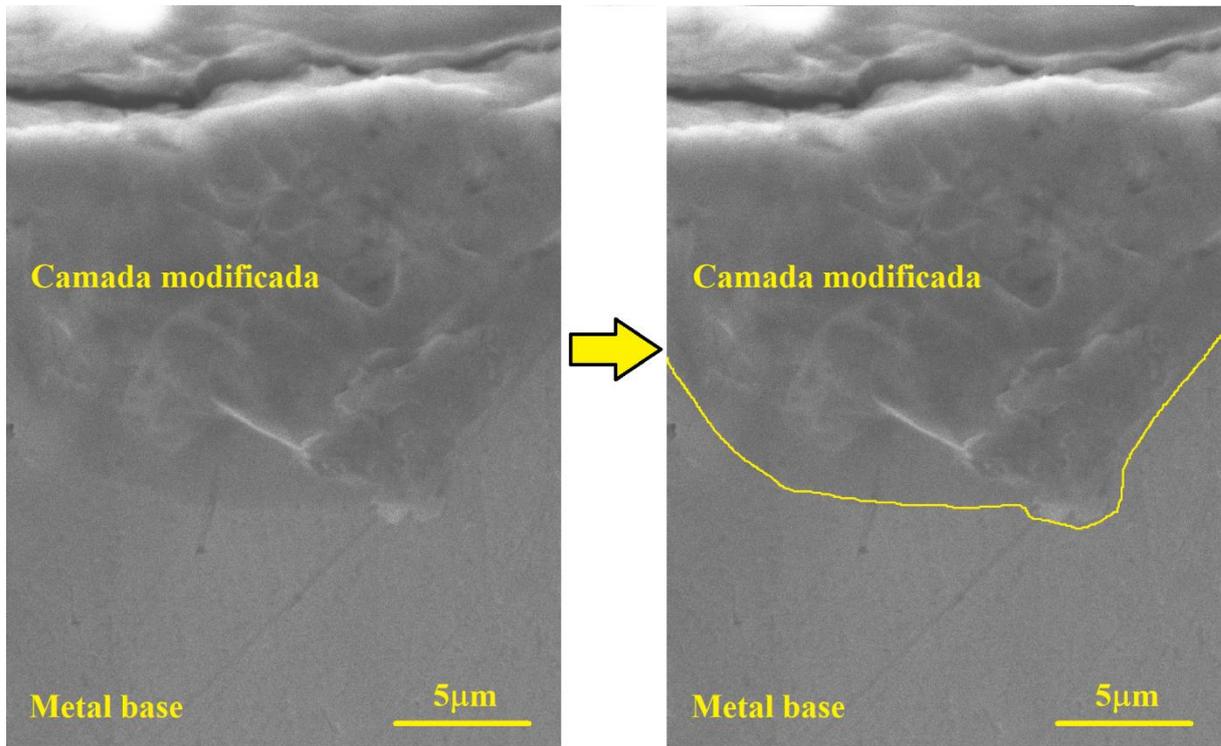
d) Amostra: UreiaNeg11A



e) Amostra: UreiaNeg15A



Figura 42 – Imagem de MEV da camada modificada da amostra UreiaPos5A



Fonte: Autora, 2019

Na Figura 43 foram apresentados os valores médios e respectivos desvios-padrão das espessuras da ZRE e da ZRI das camadas modificadas. Na amostra UreiaPos5A a medida da espessura corresponde à camada inteira, visto que não foi possível diferenciar as zonas da camada refundida pelas imagens obtidas.

Os desvios-padrão das espessuras médias são elevados, assim como observado e exposto no item 5.2, devido à irregularidade das camadas.

As espessuras médias das ZREs e das ZRIs não apresentaram diferenças significativas com: a variação da corrente elétrica, entre 11 e 15A, com a variação da polaridade, nem com a variação de ambos parâmetros.

A amostra UreiaPos40A apresentou espessuras médias de ZRE e ZRI muito superiores às amostras usinadas em 11 e 15A, aumento entre 57 e 200% da ZRE e entre 52 e 131% da ZRI. Vale ressaltar que este aumento não é estatisticamente válido, visto que os desvios-padrão das amostras em questão são demasiadamente grandes. Outra restrição em relação a essa comparação é que na EDM da amostra UreiaPos40A foi utilizada ureia diferente da ureia usada na preparação da solução

dielétrica empregada na EDM das amostras usinadas em correntes de 11 e 15A. Assim, não só a corrente elétrica variou, como também o fluido dielétrico. Em relação à amostra UreiaPos5A, a amostra UreiaPos40A apresentou aumento estatisticamente válido de espessura de camada. Neste caso, assim como no anterior, houve variação de corrente elétrica e de ureia utilizada na preparação do fluido dielétrico.

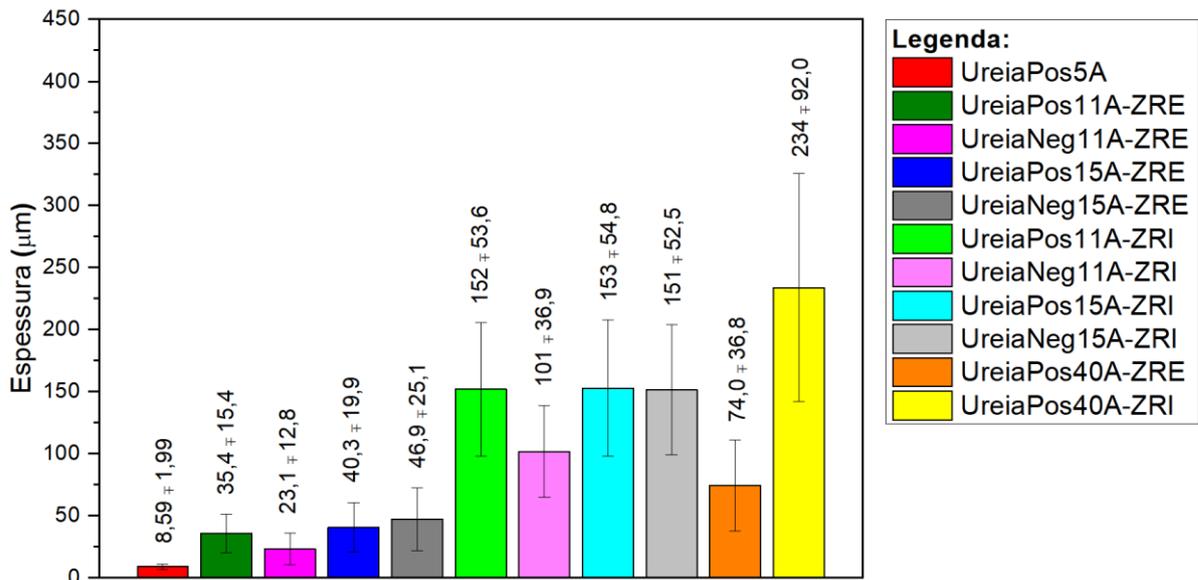
A partir dos resultados obtidos não foi possível identificar correlação entre a polaridade dos eletrodos na usinagem e as espessuras da ZRE e da ZRI.

Estima-se que o aumento da corrente elétrica leve ao aumento da espessura das camadas, embora apenas a amostra UreiaPos5A forneça base de comparação estatisticamente consistente para essa conclusão. Contudo, tal comportamento é referenciado na revisão bibliográfica, reforçando a positividade dessa conclusão.

Mesmo que os desvios-padrão fossem menores, com os resultados obtidos seria difícil provar aumento de espessura da camada refundida da amostra UreiaPos15A em relação à camada refundida da amostra UreiaPos11A, visto que os valores médios encontrados são muito próximos, tanto para a ZRE como para a ZRI.

As espessuras médias das ZRIs são significativamente maiores que as espessuras médias das ZREs, em todas as amostras em que foi possível realizar medição dessas espessuras.

Figura 43 – Gráfico das espessuras médias da ZRE e da ZRI das camadas modificadas das amostras usinadas em solução aquosa de ureia



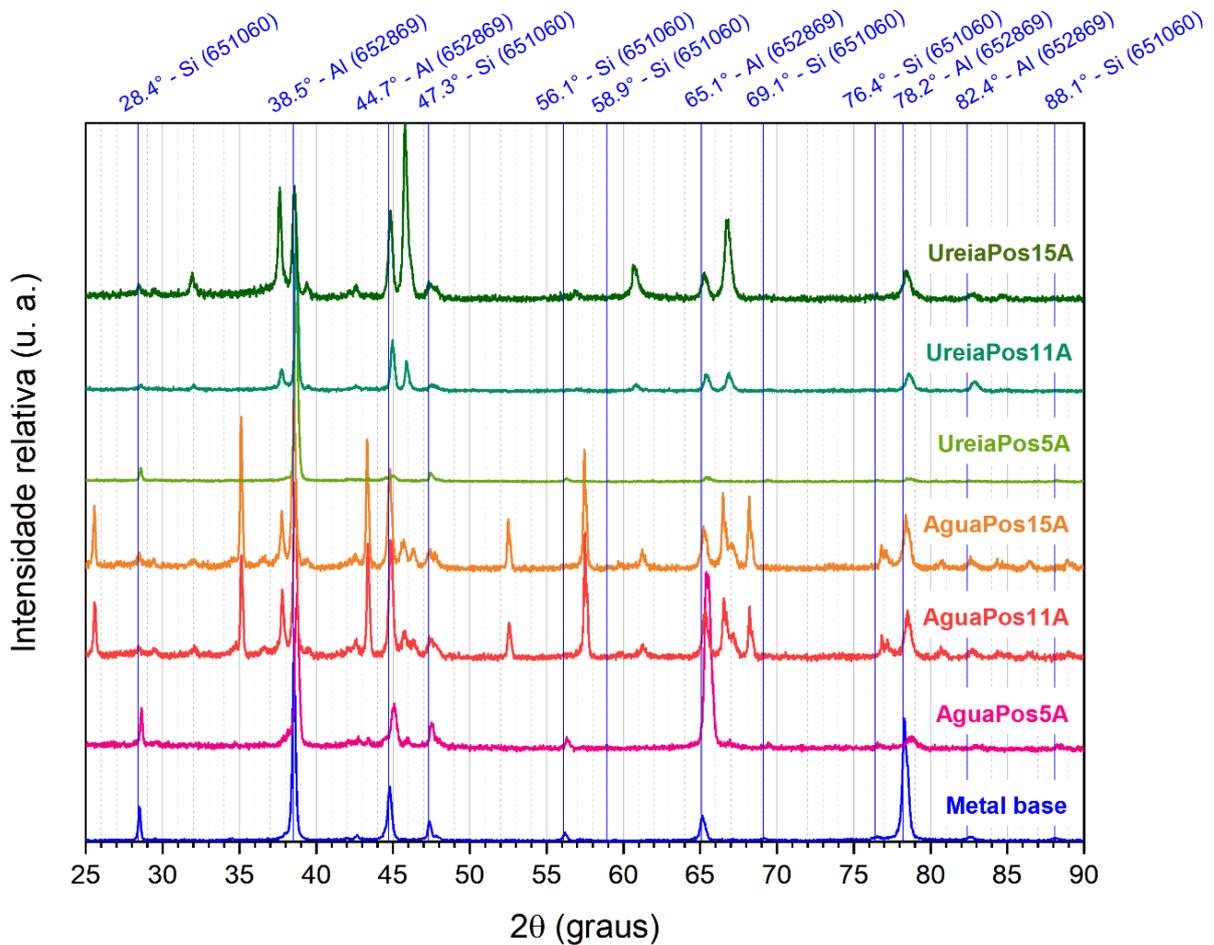
Fonte: Autora, 2019

7.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A identificação de fases cristalinas presentes nas superfícies das amostras e no metal base foi feita pela análise dos difratogramas, com base nos padrões fichados pelo *International Centre for Diffraction Data* (ICDD). Os números de identificação das fichas consultadas foram representados entre parênteses ao lado das fórmulas químicas de suas respectivas fases.

Na Figura 44 foram representados os difratogramas do metal base e das amostras usinadas com eletrodo ferramenta de polaridade positiva. As linhas azuis correspondem aos ângulos de difração das fases identificadas no metal base. Por essa figura, observou-se que os difratogramas das superfícies usinadas são diferentes do difratograma do metal base, fato que sugere ocorrência de alterações microestruturais devidas ao processo de usinagem.

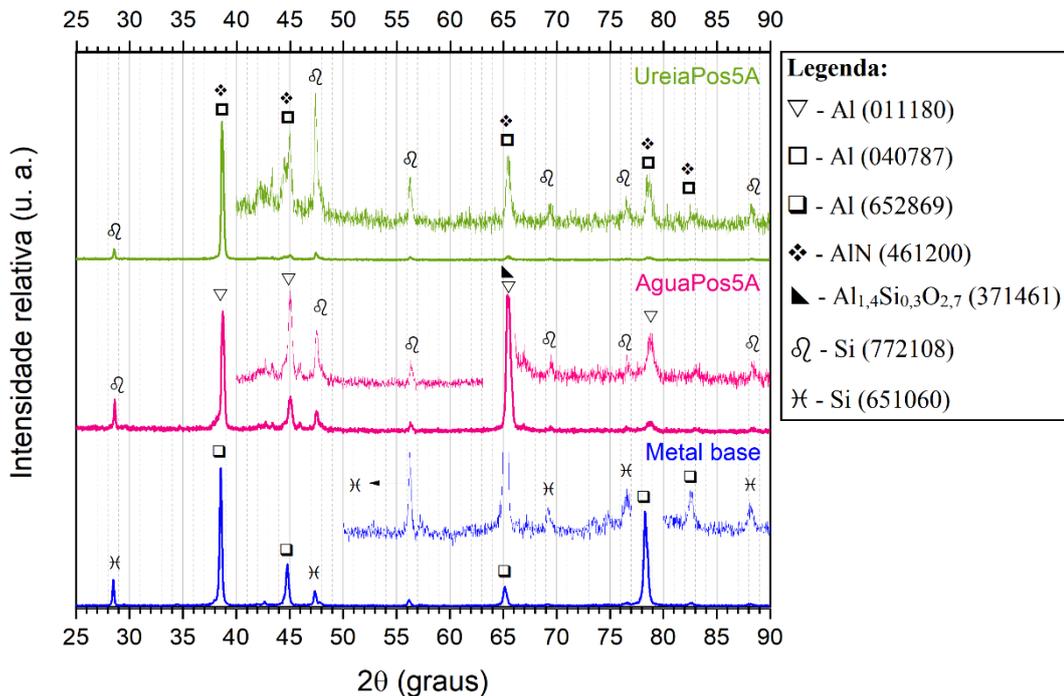
Figura 44 – Difratomogramas do metal base e das amostras usinadas com eletrodo ferramenta de polaridade positiva



Fonte: Autora, 2019

Na Figura 45 foram representados os difratogramas do metal base e das amostras usinadas com corrente elétrica de 5A e eletrodo ferramenta de polaridade positiva. Os difratogramas dessas amostras foram os que menos se diferenciaram do difratograma do metal base. Praticamente só foram verificadas mudanças na intensidade de alguns picos, sem deslocamentos aparentes dos ângulos de difração. No difratograma da amostra AguaPos5A, a alteração da intensidade do pico entre 65° e 66° pode indicar ocorrência de formação de silicato de alumínio ($\text{Al}_{1,4}\text{Si}_{0,3}\text{O}_{2,7}$, ficha número 371461) por incorporação do oxigênio presente na água deionizada pela superfície submetida à usinagem. No difratograma da amostra UreiaPos5A, a alteração na intensidade dos picos pode ser oriunda de formação de AlN (461200) via implantação de íons de nitrogênio na superfície exposta às descargas elétricas.

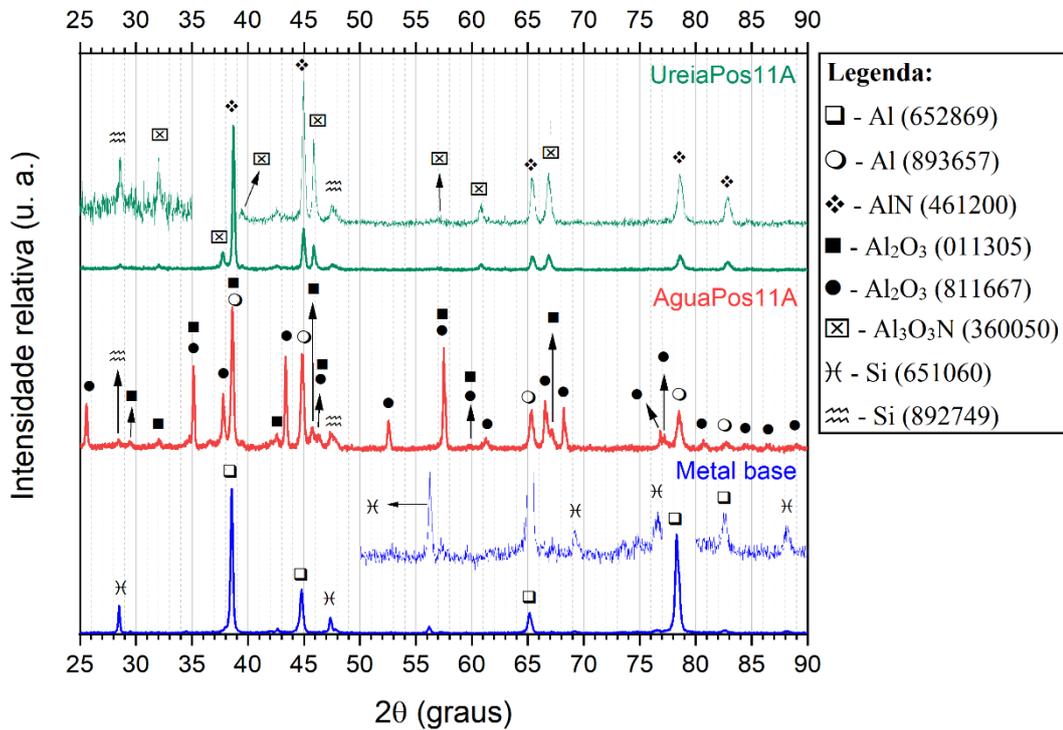
Figura 45 – Difratomogramas do metal base e das amostras usinadas com corrente elétrica de 5A e eletrodo ferramenta de polaridade positiva



Fonte: Autora, 2019

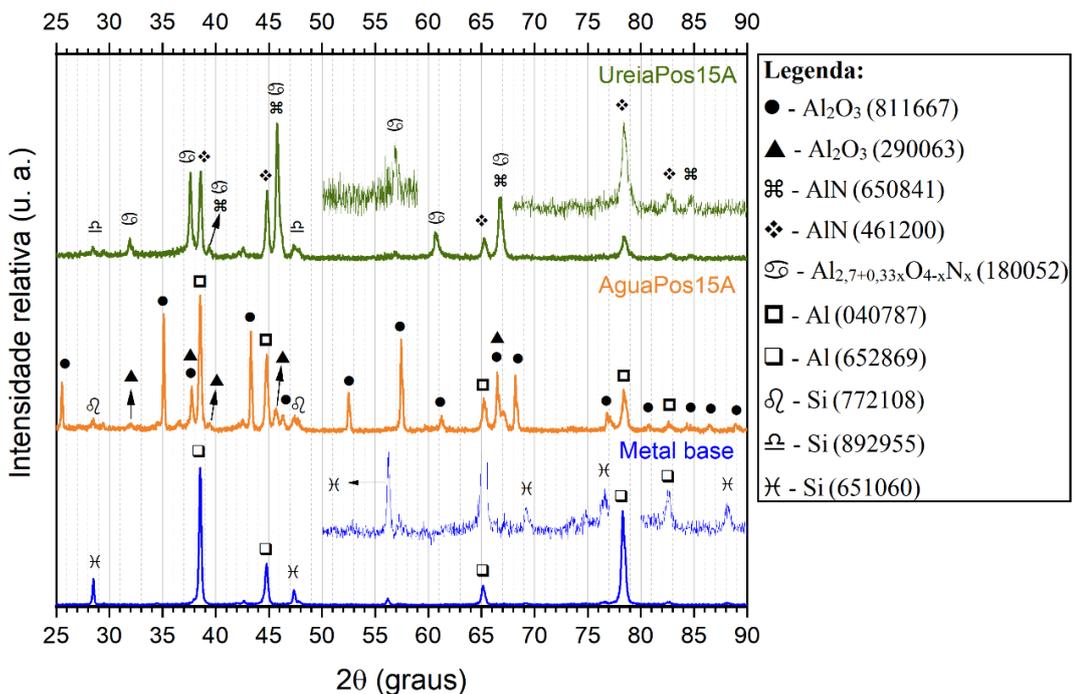
Difratomogramas do metal base e das amostras usinadas com eletrodo ferramenta de polaridade positiva foram representados na Figura 46, usinagem com corrente elétrica de 11A, e na Figura 47, EDM com corrente de 15A. Além de serem diferentes do difratograma do metal base, os difratogramas das amostras usinadas com diferentes fluidos dielétricos também diferiram entre si. Na superfície das amostras usinadas em água deionizada foram identificados picos característicos de Al₂O₃, além das fases presentes na liga alumínio-silício hipoeutética. Nas superfícies usinadas em solução aquosa de ureia foram identificados picos característicos de nitreto e de oxinitretos de alumínio, além de fases existentes na liga original. Pela análise dos difratogramas da Figura 46 e da Figura 47, inferiu-se que nas amostras AguaPos11A e AguaPos15A houve implantação de oxigênio, enquanto nas amostras UreiaPos11A e UreiaPos15A houve implantação tanto de oxigênio, como de nitrogênio.

Figura 46 - Difratomogramas do metal base e das amostras usinadas com corrente elétrica de 11A e eletrodo ferramenta de polaridade positiva



Fonte: Autora, 2019

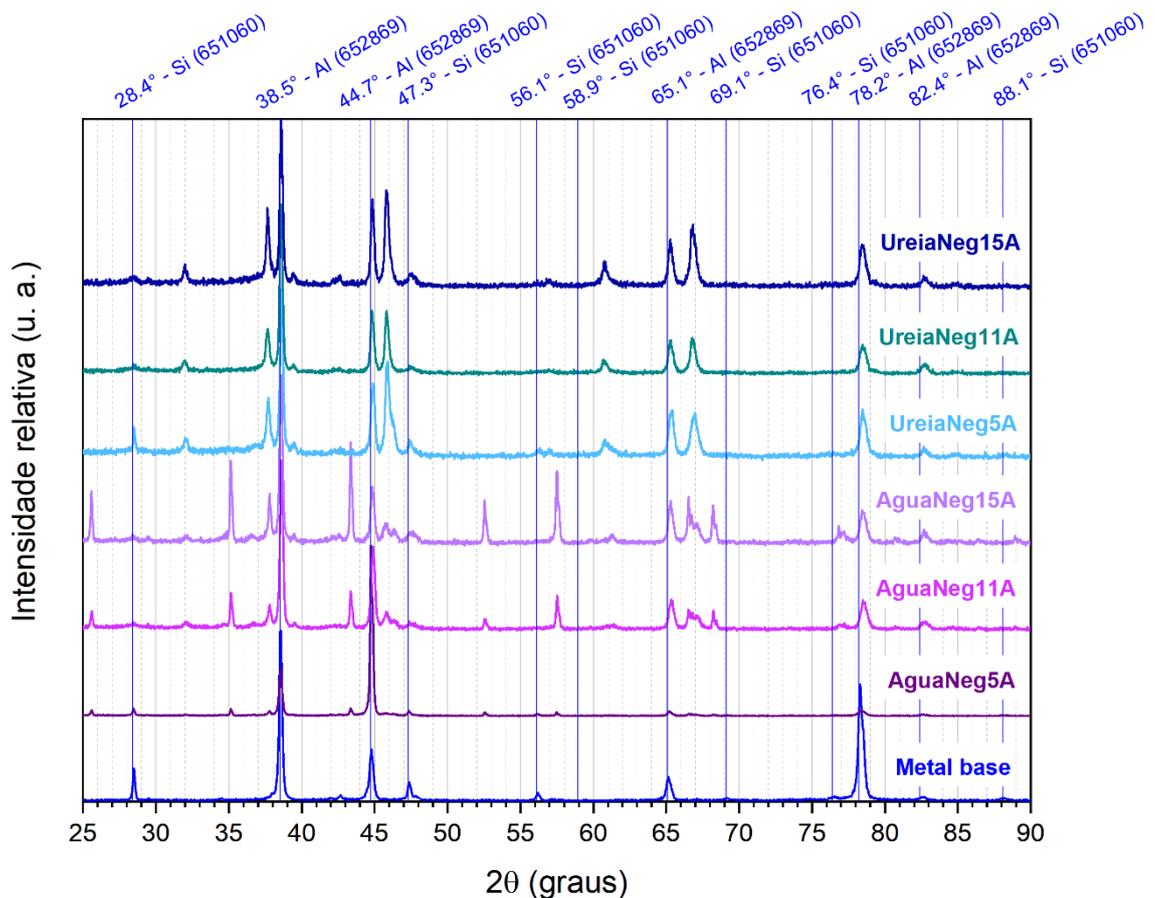
Figura 47 - Difratomogramas do metal base e das amostras usinadas com corrente elétrica de 15A e eletrodo ferramenta de polaridade positiva



Fonte: Autora, 2019

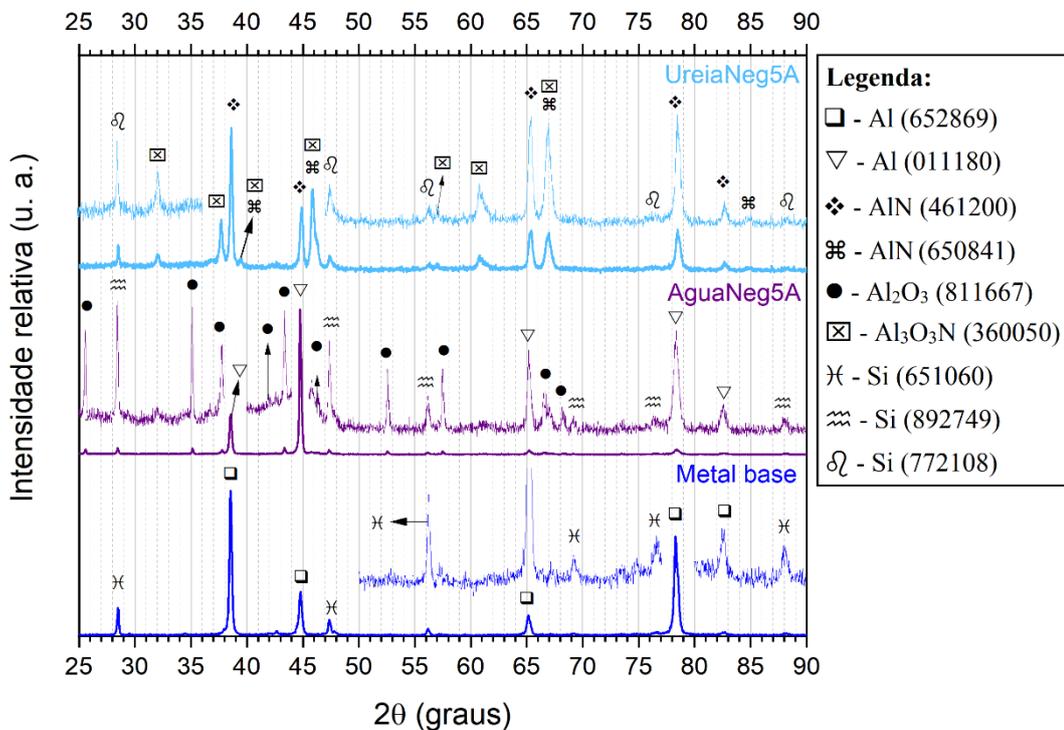
Na Figura 48 foram representados os difratogramas do metal base e das amostras usinadas com eletrodo ferramenta de polaridade negativa. As linhas azuis correspondem aos ângulos de difração das fases identificadas no metal base. Assim como nas amostras usinadas com eletrodo ferramenta de polaridade positiva, observou-se que os difratogramas das superfícies usinadas com eletrodo ferramenta de polaridade negativa são diferentes do difratograma do metal base, fato que sugere ocorrência de alterações microestruturais devidas ao processo de usinagem. Por essa mesma figura, foi possível verificar que os difratogramas de amostras usinadas com os mesmos valores de corrente elétrica, porém com fluidos dielétricos diferentes, são diferentes entre si.

Figura 48 - Difratogramas do metal base e das amostras usinadas com eletrodo ferramenta de polaridade negativa



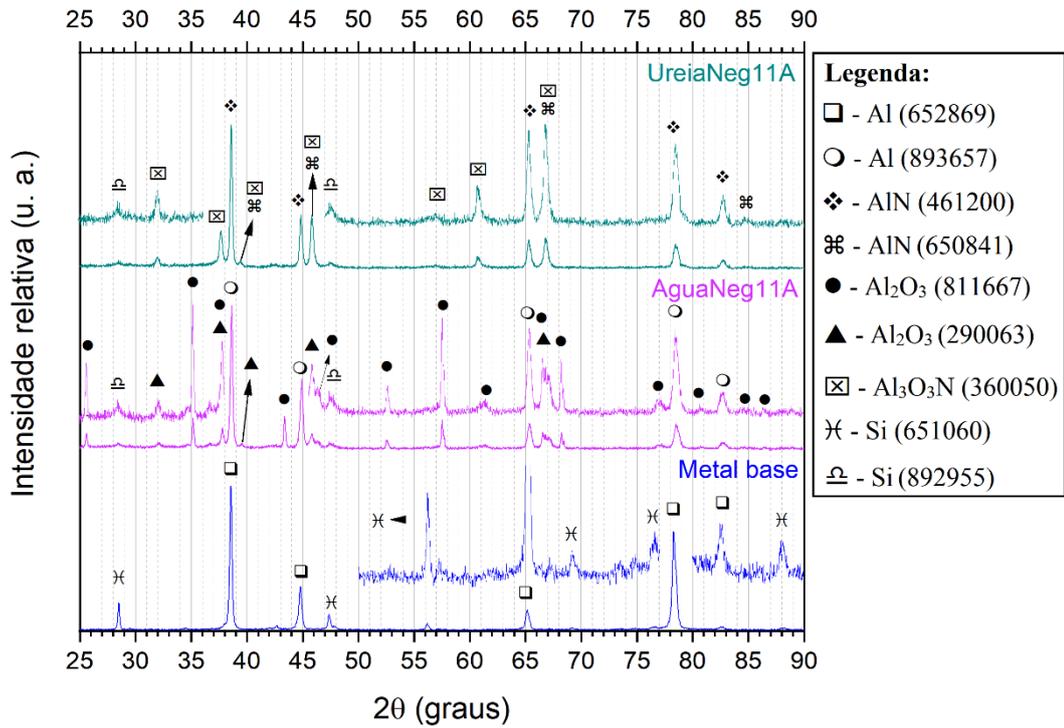
Na Figura 49, na Figura 50 e na Figura 51, foram identificadas fases de Al_2O_3 nos difratogramas das superfícies usinadas em água deionizada e fases de nitreto e oxinitreto de alumínio nos difratogramas das amostras usinadas em solução aquosa de ureia. Fases de alumínio e de silício foram identificadas tanto no metal base, como nas amostras submetidas à EDM. Por essas análises, concluiu-se que nas amostras usinadas em água deionizada ocorreu incorporação de oxigênio e nas amostras usinadas em solução aquosa de ureia houve implantação de oxigênio e de nitrogênio.

Figura 49 - Difratogramas do metal base e das amostras usinadas com corrente elétrica de 5A e eletrodo ferramenta de polaridade negativa



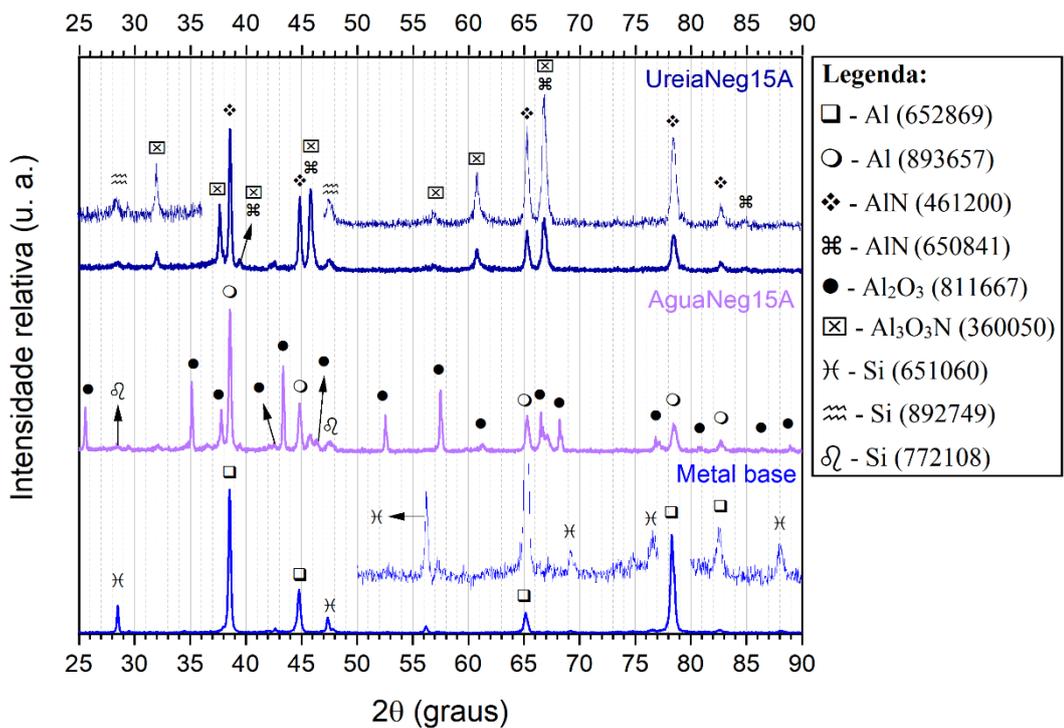
Fonte: Autora, 2019

Figura 50 - Difratomogramas do metal base e das amostras usinadas com corrente elétrica de 11A e eletrodo ferramenta de polaridade negativa



Fonte: Autora, 2019

Figura 51 - Difratomogramas do metal base e das amostras usinadas com corrente elétrica de 15A e eletrodo ferramenta de polaridade negativa

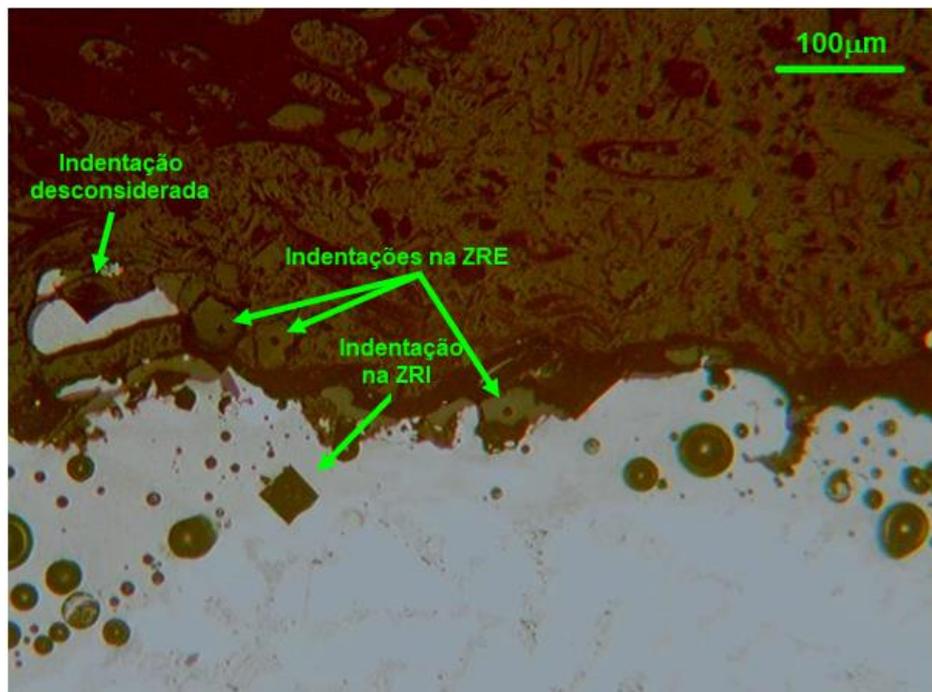


Fonte: Autora, 2019

7.4 MICRODUREZA VICKERS

O ensaio de microdureza Vickers foi realizado nas ZREs e ZRIs das amostras usinadas em correntes elétricas acima de 5A. Os resultados encontrados para as ZREs devem ser analisados mais em sua ordem de grandeza que em seus valores absolutos, visto que a carga utilizada para a realização dos ensaios não é a indicada para durezas dessa magnitude. A carga adequada não foi usada, em virtude da limitação da espessura da ZRE, que não permite indentações maiores. Na Figura 52 essa limitação de tamanho é nítida, sendo uma indentação descartada para efeito de cálculo justamente por abranger parte da ZRE e parte da ZRI. Em relação às ZRIs, existe o problema da elevada porosidade, que causa variações relativamente grandes nos valores de dureza, ocasionando a obtenção de desvios-padrão elevados. A limitação de área para indentações na ZRI também pode ser observada na Figura 52. O mesmo problema foi identificado por Morales (2019), que optou por não medir dureza no que ele chamou de região porosa da camada refundida, aqui tratada por ZRI.

Figura 52 – Micrografia da amostra UreiaNeg15A contendo indentações do ensaio de microdureza Vickers

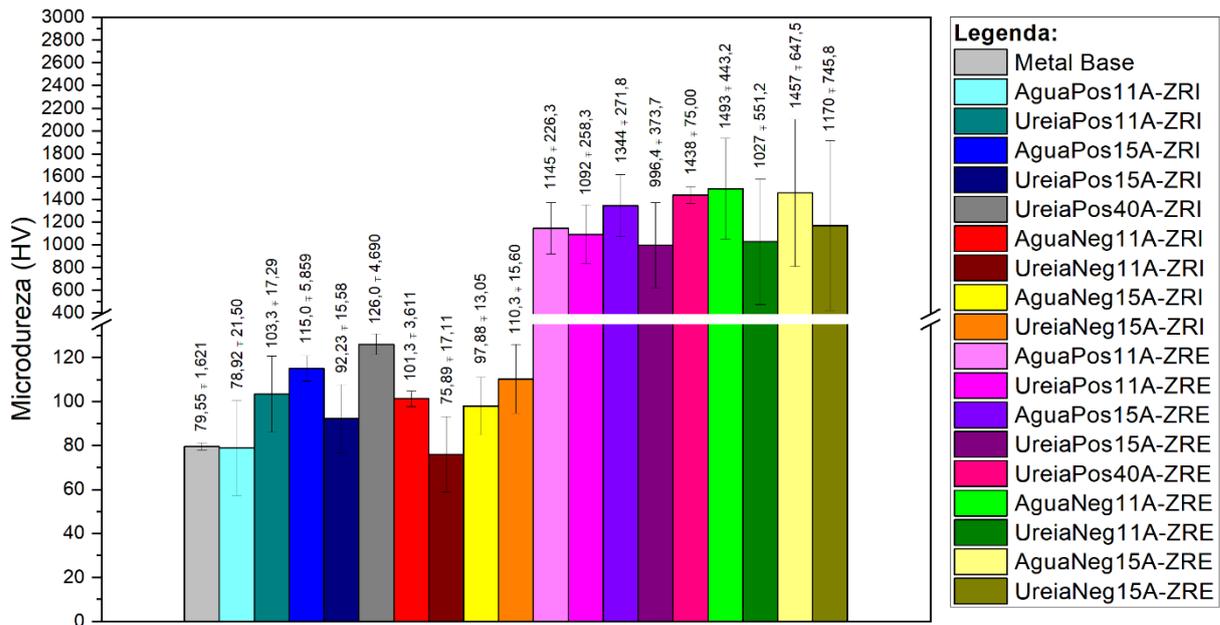


Na Figura 53 foram apresentados os valores médios de dureza do metal base, das ZREs e ZRIs das amostras usinadas na segunda etapa do processo experimental e da amostra UreiaPos40A.

Na Figura 53, nota-se que os valores médios de dureza das ZREs não variaram significativamente entre as amostras usinadas em água deionizada e em solução aquosa de ureia. A mesma observação vale para as peças usinadas em diferentes polaridades e com diferentes valores de corrente elétrica. Esses valores de dureza são da ordem de grandeza das durezas exibidas por óxidos e nitretos de alumínio, denotando obtenção dessas fases nas superfícies das amostras usinadas com os fluidos dielétricos supracitados.

O comportamento da espessura da ZRI em função do dielétrico, da corrente ou da polaridade não ficou bem definido. Em relação ao metal base, as ZRIs apresentaram aumento de dureza, exceto para as amostras AguaPos11A, UreiaPos15A e UreiaNeg11A.

Figura 53 – Médias dos valores de dureza medidos no metal base, nas ZREs e ZRIs das amostras tratadas na segunda etapa do processo experimental e da amostra UreiaPos40A



Fonte: Autora, 2019

8 CONCLUSÕES

A partir dos testes realizados foi possível elaborar as seguintes conclusões:

- A morfologia da seção transversal da camada modificada caracteriza-se pela presença de poros esféricos e de vazios. Já a face usinada, é composta por microcrateras distribuídas sobre toda a superfície, conferindo à peça aspecto visual e tátil de caráter rugoso.
- As camadas refundidas possuem duas regiões com características distintas. A região mais externa é pouco espessa e mais abundante nas amostras usinadas em polaridade positiva; a região mais interna tem maior porosidade.
- As espessuras das ZREs e das ZRIs não diferiram significativamente entre as peças de polaridade positiva e negativa. As espessuras médias das ZREs variam, aproximadamente, entre 31%, na amostra UreiaPos40A, e 22%, na amostra UreiaNeg11A, das espessuras médias das ZRIs, sendo, desta forma, a ZRI maior que a ZRE em todas as amostras com essas regiões mensuráveis.
- A análise das peças por difração de raios x sustenta a hipótese de nitretação da liga alumínio-silício hipoeutética por descargas elétricas, visto que condiz com a possibilidade de formação de AlN cúbico e de oxinitretos de alumínio nas peças submetidas à EDM em solução de água deionizada e ureia.
- Os valores de microdureza da ZRI das superfícies usinadas em solução aquosa de ureia são significativamente maiores que a dureza média do metal base, exceto nas amostras UreiaPos15A e UreiaNeg11A.
- As durezas médias das ZREs são significativamente maiores que as durezas médias das ZRIs, sendo da ordem de grandeza das durezas exibidas por óxidos e nitretos de alumínio. As durezas médias das ZREs são maiores em mais de 422% que a dureza média do metal base.
- O aumento de dureza e as mudanças de perfil entre os difratogramas das amostras: sem tratamento, usinadas em água deionizada e usinadas em solução aquosa de ureia, corroboram com a hipótese da ocorrência do fenômeno de nitretação nas peças usinadas em solução.
- A ocorrência de NDE da liga alumínio-silício hipoeutética é plausível tanto com eletrodo ferramenta de polaridade positiva, como com eletrodo ferramenta de polaridade negativa.

- A ocorrência de NDE da liga alumínio-silício hipoeutética é viável em correntes elétricas que variam de 11 a 40A.
- Como as amostras usinadas com corrente elétrica de 5A não puderam ser submetidas ao ensaio de microdureza e como seus difratogramas não apresentaram grandes alterações em relação ao difratograma do metal base, não foi possível concluir se a NDE é viável ou não com corrente elétrica dessa magnitude.

9 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para uso amplo e aplicações industriais da NDE do alumínio são necessários estudos sobre a influência das variáveis de processo nas características da camada nitretada e sobre a resistência do material tratado sob determinadas solicitações mecânicas.

Sugere-se para trabalhos futuros:

- Análise da viabilidade técnica da NDE com correntes elétricas maiores que 40A;
- Análise da influência dos parâmetros de EDM na uniformidade da camada nitretada;
- Análise dos parâmetros de EDM na espessura da camada nitretada;
- Análise dos parâmetros de EDM na porosidade e na rugosidade da camada nitretada;
- Caracterização do comportamento das superfícies usinadas em diferentes sistemas tribológicos;
- Investigação da influência da NDE na resistência à fadiga de componentes mecânicos.

REFERÊNCIAS

- ALBINSKI, K. et al. The temperature of a plasma used in electrical discharge machining. **Plasma Sources Science and Technology**, v. 5, n. 4, p. 736–742, 1 nov. 1996.
- ARANTES, L. J. et al. Avaliação de superfícies usinadas por diferentes fluidos dielétricos no processo de usinagem por eletroerosão. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 56, n. 2, p. 91–96, jun. 2003.
- AROOJ, S. et al. Effect of current in the EDM machining of aluminum 6061 T6 and its effect on the surface morphology. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 39, n. 5, p. 4187–4199, maio 2014.
- ASM INTERNATIONAL; DAVIS, J. R.; ASM INTERNATIONAL (EDS.). **Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials**. [10. ed.], 6. print ed. Materials Park, Ohio: ASM International, 2000.
- BENEDICT, G. F. **Nontraditional manufacturing processes**. New York: M. Dekker, 1987.
- BLEYS, P. et al. Surface and sub-surface quality of steel after EDM. **Advanced Engineering Materials**, v. 8, n. 1–2, p. 15–25, fev. 2006.
- BUCHWALDER, A. et al. Plasma nitriding of spray-formed aluminum alloys. **Advanced Engineering Materials**, 14 maio 2013.
- CAMARGO, B. C.; COSTA, L. H.; RASLAN, A. A. Endurecimento superficial de uma liga Ti6Al4V por meio de usinagem por descargas elétricas. In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO – COBEF, 2009, Belo Horizonte, **Anais v.5**, Belo Horizonte: COBEF, 2009.
- CHEN, H. Y.; STOCK, H. R.; MAYR, P. Plasma-assisted nitriding of aluminium. **Surface and Coatings Technology**, v. 64, p. 139–147, 1994.
- CHEN, S. L.; YAN, B. H.; HUANG, F. Y. Influence of kerosene and distilled water as dielectrics on the electric discharge machining characteristics of Ti–6Al–4V. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 87, n. 1–3, p. 107–111, mar. 1999.
- DESCOEUDRES, A. et al. Time-resolved imaging and spatially-resolved spectroscopy of electrical discharge machining plasma. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 38, n. 22, p. 4066–4073, 21 nov. 2005.
- EBISAWA, T.; SAIKUDO, R. Formation of aluminum nitride on aluminum surfaces by ECR nitrogen plasmas. **Surface and Coatings Technology**, v. 86–87, p. 622–627, dez. 1996.
- EKMEKCI, B. et al. Residual stress state and hardness depth in electric discharge machining: de-ionized water as dielectric liquid. **Machining Science and Technology**, v. 9, n. 1, p. 39–61, 23 mar. 2005.

ELIAS, L. et al. Nitretação por descargas elétricas do ferro fundido nodular. **Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia - ISSN: 1984-5693**, v. 11, 20 dez. 2019.

EUBANK, P. T. et al. Theoretical models of the electrical discharge machining process. III. The variable mass, cylindrical plasma model. **Journal of Applied Physics**, v. 73, n. 11, p. 7900–7909, jun. 1993.

FERAY GULERYUZ, L. et al. The Influence of process parameters of EDM on the surface roughness of aluminum matrix composites reinforced with SiC particulates. **Acta Physica Polonica A**, v. 123, n. 2, p. 421–423, fev. 2013.

FITZ, T.; MÖLLER, W. AlN growth kinetics during ion nitriding of aluminum. **Journal of Applied Physics**, v. 92, n. 11, p. 6862–6867, dez. 2002.

FREDRIKSSON, G.; HOGMARK, S. Influence of dielectric temperature in electrical discharge machining of hot work tool steel. **Surface Engineering**, v. 11, n. 4, p. 324–330, jan. 1995.

FULLER, J. E. Electrical Discharge Machining. In: **Machining**. 9. ed. [s.l.] ASM International, 1989. v. 16p. 557–564.

FURUTANI, K.; SHIMIZU, Y. Experimental analysis of deposition process of lubricant surface by electrical discharge machining with molybdenum disulfide powder suspended in working oil. **American Society for Precision Engineering**, v. 30, p. 547–550, 2003.

GREDELJ, S. Plasma nitriding and in situ characterisation of aluminium. **Applied surface science**, v. 199, n. 1, p. 234–247, 2002.

GUITRAU, E. B. **The EDM handbook**. Cincinnati: Hanser Gardner Publications, 1997.

HASÇALÝK, A.; ÇAYDAŞ, U. Experimental study of wire electrical discharge machining of AISI D5 tool steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 148, n. 3, p. 362–367, maio 2004.

JAHAN, M. P. et al. An experimental investigation into the micro-electro-discharge machining behaviour of aluminium alloy (AA 2024). **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 78, n. 5–8, p. 1127–1139, 28 dez. 2014.

JESWANI, M. L. Effect of the addition of graphite powder to kerosene used as the dielectric fluid in electrical discharge machining. **Wear**, v. 70, n. 2, p. 133–139, ago. 1981.

KAMGUEM, R.; DJEBARA, A.; SONGMENE, V. Investigation on surface finish and metallic particle emission during machining of aluminum alloys using response surface methodology and desirability functions. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 69, n. 5–8, p. 1283–1298, nov. 2013.

- KHAN, A. A. Electrode wear and material removal rate during EDM of aluminum and mild steel using copper and brass electrodes. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 39, n. 5–6, p. 482–487, nov. 2008.
- KHANRA, A. K.; PATHAK, L. C.; GODKHINDI, M. M. Microanalysis of debris formed during electrical discharge machining (EDM). **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 3, p. 872–877, 12 fev. 2007.
- KÖNIG, W.; KLOCKE, F.; LENZEN, R. The electrical machining processes: what demands will they face in the future? p. 3–8, 1996.
- KUMAR, G. H.; MOHIT, H. Mathematical modeling of electric discharge machining of cast aluminium alloy (AA6061) - 15Wt.% SiCp composites. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 3, n. 6, p. 469–476, jun. 2013.
- KUMAR, S. et al. Surface modification by electrical discharge machining: a review. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 8, p. 3675–3687, abr. 2009.
- KUNIEDA, M. et al. Advancing EDM through fundamental insight into the process. **CIRP Annals**, v. 54, n. 2, p. 64–87, 2005.
- LEÃO, F. N.; PASHBY, I. R. A review on the use of environmentally-friendly dielectric fluids in electrical discharge machining. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 149, n. 1–3, p. 341–346, jun. 2004.
- LIMA, V. S. E. **Nitreção por descargas elétricas do aço AISI 4340 de forma a uniformizar a camada nitretada**. Dissertação (Mestrado) — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
- MAJZOBI, G. H.; JALEH, M. Duplex surface treatments on AL7075-T6 alloy against fretting fatigue behavior by application of titanium coating plus nitriding. **Materials Science and Engineering: A**, v. 452–453, p. 673–681, abr. 2007.
- MARTINS, P. S. **Estudo da furação em altas velocidades de corte em ligas de Al-Si utilizando brocas de aço rápido e metal duro sem e com revestimento DLC (diamond like carbon)**. Tese (Doutorado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
- MCGEOUGH, J. A. **Advanced methods of machining**. London; New York: Chapman and Hall, 1988.
- MOHRI, N. et al. Layer generation process on work-piece in electrical discharge machining. **CIRP Annals**, v. 52, n. 1, p. 157–160, 2003.
- MÖLLER, W. et al. Surface processes and diffusion mechanisms of ion nitriding of stainless steel and aluminium. **Surface and Coatings Technology**, v. 136, n. 1–3, p. 73–79, fev. 2001.

MORALES, F. A. P. **Nitreção por Descargas Elétricas (EDM) do Duralumínio AA 2011**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

NORASETTHEKUL, S. et al. Use of zirconium diboride-copper as an electrode in plasma applications. v. 34, p. 1261–1270, 1999.

ÖSTERLE, W. et al. XPS and XTEM study of AlN formation by N₂ implantation of aluminium. **Surface and Coatings Technology**, v. 102, n. 1–2, p. 168–174, abr. 1998.

PATEL, M. R. et al. Theoretical models of the electrical discharge machining process. II. The anode erosion model. **Journal of Applied Physics**, v. 66, n. 9, p. 4104–4111, nov. 1989.

PATIL, N. G.; BRAHMANKAR, P. K. Some studies into wire electro-discharge machining of alumina particulate-reinforced aluminum matrix composites. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 48, n. 5–8, p. 537–555, maio 2010.

PEÇAS, P.; HENRIQUES, E. Influence of silicon powder-mixed dielectric on conventional electrical discharge machining. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 14, p. 1465–1471, nov. 2003.

RAMASAWMY, H.; BLUNT, L. Effect of EDM process parameters on 3D surface topography. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 148, n. 2, p. 155–164, maio 2004.

RASLAN, A. A.; SILVA, E. R.; SANTOS, R. F. **Método de nitreção através da usinagem com descargas elétricas – NDE**. Uberlândia, MG, [s.d.].

SANTOS, R. N. N. et al. Nitreção por descargas elétricas da liga Ti-6Al-4V com adição de pó abrasivo SiC ao fluido dielétrico. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 3, p. e12474, 2019.

SANTOS, R. F. **Nitreção por EDM do aço AISI 4140**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

SERVSPARK. **Eletroplus EDM-540**, 200DC. 1 fotografia. Disponível em: <<http://www.servspark.com.br/edm540.html>>. Acesso em: 3 jan. 2019

SILVA, E. R. **Otimização e avaliação dos parâmetros de influência do processo AJEDM**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

SILVA, S. P. et al. **Nitreção por descargas elétricas de corpo de prova para ensaio de fadiga em aço AISI 4140 com matriz de cobre**. In: IX CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA. Fortaleza, Ceará, Brasil: 2016. Disponível em: <<http://www.swge.inf.br/proceedings/paper/?P=CON-2016-0430>>. Acesso em: 11 maio 2018.

STEVENS, L. **Improvement of surface quality in die-sinking EDM**. Tese (doutorado) —Leuven: Katholieke Universiteit Leuven, 1998.

STOCK, H. R. et al. Fundamental and applied aspects of the plasma-assisted nitriding process for aluminium and its alloys. **Surface and Coatings Technology**, v. 94–95, p. 247–254, out. 1997.

TARIQ JILANI, S.; PANDEY, P. C. An analysis of surface erosion in electrical discharge machining. **Wear**, v. 84, n. 3, p. 275–284, fev. 1983.

TELBIZOVA, T. et al. Mechanism of diffusional transport during ion nitriding of aluminum. **Applied Physics Letters**, v. 76, n. 11, p. 1404–1406, 13 mar. 2000.

VISSUTIPITUKUL, P.; AIZAWA, T. Wear of plasma-nitrided aluminum alloys. **Wear**, v. 259, n. 1–6, p. 482–489, jul. 2005.

WANG, Z. L. et al. Surface modification process by electrical discharge machining with a Ti powder green compact electrode. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 129, p. 139–142, 2002

YAN, B. H.; CHUNG TSAI, H.; YUAN HUANG, F. The effect in EDM of a dielectric of a urea solution in water on modifying the surface of titanium. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, n. 2, p. 194–200, fev. 2005.

ZALNEZHAD, E.; SARHAN, A.; HAMDI, M. Investigating the effects of hard anodizing parameters on surface hardness of hard anodized aerospace AL7075-T6 alloy using fuzzy logic approach for fretting fatigue application. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 68, n. 1, p. 453–464, 2013.

ZHENG, X. Microstructural characterization and mechanical properties of nitrided layers on aluminum substrate prepared by nitrogen arc. **Applied surface science**, v. 259, p. 508–514, 2012.

ZIPPERIAN, D. C. **Metallographic handbook**. Tucson, Arizona USA: [s.n.].