

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

VICTOR SOUZA ESTEVES LIMA

**NITRETAÇÃO POR DESCARGAS ELETRICAS DO AÇO AISI 4340 DE FORMA A
UNIFORMIZAR A CAMADA NITRETADA**

**Belo Horizonte
Setembro de 2018**

Victor Souza Esteves Lima

**NITRETAÇÃO POR DESCARGAS ELETRICAS DO AÇO AISI 4340 DE FORMA A
UNIFORMIZAR A CAMADA NITRETADA**

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

Orientador: Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva

Belo Horizonte
Setembro de 2018

L732n Lima, Victor Souza Esteves.
Nitretação por descargas elétricas do aço AISI 4340 de forma a uniformizar a camada nitretada / Victor Souza Esteves Lima. – 2018. 99 f. : il., fotos, grafs.
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, 2018.
Bibliografia.

1. Aço. 2. Usinagem por eletroerosão. 3. Nitretação. 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 DO AÇO
AISI 4340 UNIFORMIZANDO A CAMADA NITRETADA”

Autor: Victor Souza Esteves Lima

Orientador: Prof. Dr. Ernane Rodrigues dos Santos

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

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

Profª. Drª. Maria Celeste Monteiro 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, 28 de Setembro de 2018.

*“Não se deve ir atrás de objetivos fáceis, é
preciso buscar o que só pode ser alcançado
por meio dos maiores esforços.”*

Albert Einstein

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, que sempre esteve ao meu lado, guiando e direcionando o caminho, me dando forças nos momentos difíceis e me orientando nas dúvidas diárias.

Aos meus pais que sempre me apoiaram nas minhas decisões, com honestidade e sinceridade, pela compreensão, incentivo diante das dificuldades ao longo dessa jornada, aos meus irmãos que sempre acreditaram no meu potencial sempre me apoiando.

A minha namorada Gláucia Kelly de Oliveira pela compreensão, companheirismo, pelo apoio incondicional nesta jornada.

Ao Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva, pela orientação, oportunidade, confiança, pela dedicação ao acompanhamento dos trabalhos e ajuda sempre que necessárias para alcançarmos nossos objetivos e pela amizade. Meu muito obrigado.

Ao Prof. Dr. Rogério Felício dos Santos que direcionou o foco do trabalho com sua pesquisa de doutorado, como membro da banca examinadora e pelas muitas conversas sobre o tema nos corredores do CEFET-MG.

A Prof. Dra. Maria Celeste Monteiro de Souza Costa pelas críticas e sugestões como membro da banca de avaliação.

A Prof. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa pela colaboração na utilização no laboratório de metalografia e pelos ensinamentos nas disciplinas do mestrado.

Ao Prof. Dr. Carlos Eduardo dos Santos por disponibilizar o dispositivo utilizado para polimento das amostras, pela ajuda na difração de raios x.

Ao DEMAT pela oportunidade e estrutura oferecida para realização de todos os ensaios.

Aos funcionários do laboratório da PUC-MG, campus Contagem, por permitir a utilização de equipamentos fundamentais para a construção dessa pesquisa.

A todas as pessoas que mesmo não mencionadas aqui contribuíram para a conclusão deste trabalho de pesquisa.

RESUMO

O setor industrial procura em todos os seus processos maneiras de otimizar a produção de componentes mecânicos, buscando ainda melhorias nas propriedades físicas e mecânicas dos materiais. A usinagem por descargas elétricas (EDM) é um processo que vem sendo estudado por permitir que algumas modificações superficiais sejam produzidas, ao mesmo tempo em que se usina a peça. Estudos anteriores demonstraram a viabilidade de usinar materiais metálicos por EDM, imerso em solução aquosa contendo ureia, obtendo uma superfície enriquecida com nitretos, o que aumenta a dureza da peça, mas nenhum mostrou uniformidade da camada usinada. Neste trabalho estudou-se a viabilidade de nitretar amostras de aço AISI 4340 pelo processo de EDM por penetração utilizando como fluido dielétrico água deionizada e ureia. Como eletrodo ferramenta foram utilizados a grafita e o cobre eletrolítico. Os parâmetros operacionais da máquina EDM foram ajustados de tal modo a permitir a formação, dissipação de um canal de plasma e manutenção da camada superficial uniforme. Foi analisada a influência do eletrodo ferramenta no desempenho da usinagem, na microestrutura e na uniformidade da camada nitretada, através da taxa de remoção de material (TRM), taxa de desgaste (TD) e desgaste volumétrico relativo (DVR), de imagens da microscopia óptica assim como uma análise de difração de raio X para comprovar a formação de nitretos na superfície usinada. As imagens analisadas comprovaram a formação das camadas refundida e nitretada. Foi avaliada a rugosidade das amostras após a usinagem e nas sucessivas etapas de polimento onde foram retiradas espessuras de 10µm na superfície usinada. Ocorre um decaimento na concentração de nitrogênio a partir da superfície. Foi realizada microdureza onde comprova-se que houve ganho na dureza. Por meio dessas análises pode-se concluir que o eletrodo de cobre apresentou na amostra uma maior uniformidade.

Palavras chave: Aço AISI 4340, Uniformização da camada nitretada, Usinagem por Descargas Elétricas (EDM), Nitretação por Descargas Elétricas (NDE)

ABSTRACT

The industrial sector seeks in all its processes ways to optimize the production of mechanical components, seeking still improvements in the physical and mechanical properties of the materials. Electrical discharge machining (EDM) is a process that has been studied for allowing some surface modifications to be produced, at the same time as the part is machined. Previous studies have demonstrated the feasibility of machining metallic materials by EDM, immersed in aqueous solution containing urea, obtaining a surface enriched with nitrides, which increases the hardness of the part, but none showed uniformity of the machined layer. In this work, the feasibility of nitriding samples of AISI 4340 steel by the EDM process by penetration using dielectric fluid as deionized water and urea was studied. As electrode tool were used graphite and electrolytic copper. The operating parameters of the EDM machine were adjusted in such a way as to allow the formation, dissipation of a plasma channel and maintenance of the uniform surface layer. The influence of the tool electrode on the machining performance, the microstructure and the uniformity of the nitrided layer were analyzed through material removal rate (TDM), wear rate (TD) and relative volumetric wear (DVR), microscopy as well as an X-ray diffraction analysis to prove the formation of nitrides on the machined surface. The analyzed images confirmed the formation of the rectified and nitrided layers. The roughness of the samples after machining and in the successive polishing steps were evaluated where 10 μ m thicknesses were obtained in the machined surface. There is a decrease in the concentration of nitrogen from the surface. It was performed microhardness where it was verified that there was gain in the hardness. By means of these analyzes it can be concluded that the copper electrode presented in the sample a greater uniformity.

Keywords: AISI 4340 steel, Uniformization of the nitrided layer, Electrical Discharge Machining (EDM), Nitriding by Electrical Discharge (NED)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática do processo EDM.....	18
Figura 2 - Camada refundida.....	19
Figura 3 - Efeito da corrente de pico na rugosidade.....	21
Figura 4 - Atração de elétrons e íons positivos para o eletrodo e peça de trabalho..	21
Figura 5 - Baixa frequência / desbaste.....	22
Figura 6 - Frequência moderada / Semi-acabamento.....	23
Figura 7 - Alta frequência / acabamento.	23
Figura 8 - Representação esquemática dá a) fase da ignição e b) evolução da corrente a da tensão.	25
Figura 9 - Representação da a) formação de elétrons secundários e b) evolução da corrente e da tensão.	25
Figura 10 - Representação do a) canal de plasma e b) evolução da corrente e da tensão.	26
Figura 11 - Representação esquemática da fusão de material no anodo e no catodo	27
Figura 12 - Sistemas de lavagem no processo EDM.	30
Figura 13 - Camada branca, com aumento de 500x.	33
Figura 14 - Aspecto físico da ureia.....	34
Figura 15 - Variação da microdureza na seção transversal das superfícies usinadas em EDM usando diferentes dielétricos.....	35
Figura 16 - Imagem da seção transversal da amostra usinada com ureia.	36
Figura 17 - Modelo 3D para o canal de plasma do processo de Nitretação por descargas elétricas (NDE) proposto por Santos (2013).	37
Figura 18 - Seção transversal de amostras de aço AISI 4140 nitretada por EDM com água deionizada e ureia. Nital 2%.....	38
Figura 19 - Taxa de desgaste do aço AISI4140	39
Figura 20 - Microestrutura do aço AISI 4340, sem tratamento térmico, a) 400x e b) 1000x.	41
Figura 21 - Fluxograma representativo do procedimento experimental realizado	42
Figura 22 - Condutivímetro.....	44
Figura 23 - Máquina eletroerosão por penetração utilizada no processo EDM.....	45
Figura 24 - Painel de controle da máquina de eletroerosão.....	47

Figura 25 - Alinhamento do eletrodo peça com relógio comparador.....	48
Figura 26 - Alinhamento do eletrodo ferramenta com relógio comparador.	48
Figura 27 - Amostras embutidas antes do procedimento de polimento superficial. a) amostra 16 usinada com eletrodo de grafita e b) amostra 19 usinada com eletrodo de cobre.	51
Figura 28 - Dispositivo utilizado para polimento das amostras.....	52
Figura 29 - Rugosímetro Tesa.....	54
Figura 30 - Micrografia seção transversal $T_{on}500\mu s$ $T_{off}1,5$ e corrente 40A (a) usinada eletrodo de cobre amostra 4 e (b) usinada eletrodo de grafita amostra 1.....	55
Figura 31 - Micrografia seção transversal da amostra 4 usinada com eletrodo de cobre $T_{on}500\mu s$ $T_{off}1,5$ e corrente 40A.	56
Figura 32 - Micrografia secção transversal da amostra 1 usinada com eletrodo de grafita $T_{on}500\mu s$ $T_{off}1,5$ e corrente 40A.	57
Figura 33 - Micrografia da amostra usinada com eletrodo de cobre, amostra 10, desbaste ($T_{on}500\mu s$, corrente 40A) seguido de acabamento ($T_{on}50\mu s$, corrente 10A) e T_{off} de 1,5.....	58
Figura 34 - Micrografia da amostra usinada com eletrodo de cobre, amostra 11, desbaste ($T_{on}500\mu s$, corrente 40A) seguido de acabamento ($T_{on}50\mu s$, corrente 10A) e T_{off} de 2,5.....	58
Figura 35 - Micrografia da amostra usinada com eletrodo de cobre, amostra 12, desbaste ($T_{on}500\mu s$, corrente 40A) seguido de acabamento ($T_{on}50\mu s$, corrente 10A) e T_{off} de 5.....	59
Figura 36 - Micrografia da amostra usinada com eletrodo de grafita, amostra 7, desbaste ($T_{on}500\mu s$, corrente 40A) seguido de acabamento ($T_{on}50\mu s$, corrente 10A) e T_{off} de 1,5.....	60
Figura 37 - Micrografia da amostra usinada com eletrodo de grafita, amostra 8, desbaste ($T_{on}500\mu s$, corrente 40A) seguido de acabamento ($T_{on}50\mu s$, corrente 10A) e T_{off} de 2,5.....	61
Figura 38 - Micrografia da amostra usinada com eletrodo de grafita, amostra 9, desbaste ($T_{on}500\mu s$, corrente 40A) seguido de acabamento ($T_{on}50\mu s$, corrente 10A) e T_{off} de 5.....	61
Figura 39 - Micrografia da secção transversal da amostra 13 usinada com eletrodo de grafita ($T_{on}10\mu s$, e $T_{off} 1$ e corrente 40A).	63

Figura 40 - Micrografia da secção transversal da amostra 14 usinada com eletrodo de cobre ($T_{on}10\mu s$, e $T_{off} 1$ e corrente 40A).	64
Figura 41 – Micrografia da secção transversal da amostra 18 usinada com eletrodo de cobre ($T_{on}10\mu s$, e $T_{off} 1$ e corrente 40A).	65
Figura 42 – Micrografia da secção transversal da amostra 15 usinada com eletrodo de grafita ($T_{on}10\mu s$, e $T_{off} 1$ e corrente 40A).	66
Figura 43 - Amostra 16 a) inicial, b) após retirada 50 μm , amostra 19 c) inicial e d) após retirada de 20 μm	67
Figura 44 – Micrografia da secção transversal da amostra 16 usinada com eletrodo de grafita e após a retirada de 50 μm com polimento ($T_{on}10\mu s$, e $T_{off} 1$ e corrente 40A).	68
Figura 45 – Micrografia da secção transversal da amostra 16 usinada com eletrodo de cobre e após a retirada de 20 μm com polimento ($T_{on}10\mu s$, e $T_{off} 1$ e corrente 40A).	69
Figura 46 - Espessura das camadas no ensaio principal.	70
Figura 47 - Médias das rugosidades das amostras usinadas com eletrodo de cobre e grafita.	72
Figura 48 - Amostra usinada com eletrodo de grafita e após retirada de 10 em 10 microns. a) NDE, b) 10 microns, c) 20 microns, d) 30 microns, e) 40 microns, f) 50 microns, g) 60 microns, h) 70 microns, i) 80 microns, j) 90 microns, k)100 microns.	73
Figura 49 - Amostra usinada com eletrodo de cobre e após retirada de 10 em 10 microns. a) NDE, b) 10 microns, c) 20 microns, d) 30 microns, e) 40 microns, f) 50 microns, g) 60 microns.	74
Figura 50 - Difratoograma do aço AISI 4340 referência e nitretado nos ensaios preliminares.	75
Figura 51 - Difratoograma do aço AISI 4340 referência e nitretado no ensaio principal com os fatiamentos usinado eletrodo de cobre.	76
Figura 52 - Difratoograma ampliado do aço AISI 4340 referência e início fatiamento usinado eletrodo de cobre.	77
Figura 53 - Difratoograma ampliado do aço AISI 4340 referência e final fatiamento usinado com eletrodo de cobre.	78
Figura 54 - Difratoograma do aço AISI 4340 referência e nitretado no ensaio principal com os fatiamentos usinado eletrodo de grafita.	79

Figura 55 - Difratoograma ampliado do aço AISI 4340 referência e início fatiamento usinado eletrodo de grafita.	80
Figura 56 - Difratoograma ampliado do aço AISI 4340 referência e final fatiamento usinado eletrodo de grafita.	80
Figura 57 - Micrografia com impressões de microdureza Vickers (10 gf, 20 s) amostra 4 usinada com eletrodo de cobre.	81
Figura 58 - Micrografia com impressões de microdureza Vickers (10 gf, 20 s) amostra 1 usinada com eletrodo de grafita.	82
Figura 59 - Perfil de dureza para o ensaio NDE desbaste usinada com os eletrodos de cobre e grafita	83
Figura 60 - Perfil de dureza para o ensaio NDE acabamento usinada com os eletrodos de cobre e grafita.....	84
Figura 61 - Taxa de remoção de material.....	86
Figura 62 - Taxa de desgaste do eletrodo.....	87
Figura 63 - Desgaste volumétrico relativo.	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química da ureia encontrada no Brasil	34
Tabela 2 - Composição química (% em peso) do aço AISI/SAE 4340	40
Tabela 3 - Parâmetros operacionais ajustados na máquina EDM comuns a todos os ensaios	45
Tabela 4 - Parâmetros que foram ajustados durante as etapas dos ensaios.....	46
Tabela 5 - Principais parâmetros adotados na Difração de raios x.	53
Tabela 6 - Parâmetros adotados na Difração de raios x das amostras do processo de fatiamento.....	54
Tabela 7 - Valores de microdureza Vickers (carga de 10gf por 20s) do aço AISI 4340 e da camada nitretada obtida com eletrodos ferramenta de cobre e grafita.	82
Tabela 8 - Condutividade elétrica média do fluido dielétrico.	85

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	: grau centígrado
V	: volt
kHz	: kilo hertz
mm	: milímetro
Cr	: cromo
Ni	: níquel
Mo	: molibdênio
%	: por cento
C	: carbono
Mn	: manganês
Si	: silício
Ti6Al4V	: liga de titânio
TiN	: nitreto de titânio
μm	: micrometro
Cu	: cobre
Ti	: titânio
Min	: minuto
A	: amperes
μs	: microssegundo
g	: grama
seg	: segundo
Hk	: dureza knnop
L	: litro
TD	: taxa de desgaste
TRM	: taxa de remoção de material
DVR	: desgaste volumétrico relativo
μS/cm	: microsiemens por centímetro
g/l	: grama por litro

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

ABNT	: Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	: <i>American Iron and Steel Institute</i> (Instituto Americano do Ferro e Aço)
ASM	: <i>American Society for Metals</i> (Sociedade Americana de Metais)
CNC	: Controle Numérico Computadorizado
DRX	: Difração de raios x
EDM	: <i>Electrical Discharge Machining</i> (Usinagem por Descargas Elétricas)
HV	: Dureza Vickers
NDE	: Nitretação por Descargas Elétricas
SAE	: <i>Society of Automotive Engineers</i> (Sociedade dos Engenheiros Automotivos)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Justificativa.....	16
1.2 Objetivo geral e específicos	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 Usinagem por Descargas Elétricas	18
2.1.1 Fase de ignição	24
2.1.2 Formação do canal de plasma	25
2.1.3 Fusão e evaporação de pequena quantidade do material.....	26
2.1.4 Ejeção do material.....	27
2.2 Materiais para eletrodos ferramentas.....	28
2.3 Fluidos dielétricos.....	29
2.4 Nitretação.....	31
2.5 Ureia	33
2.6 Nitretação por meio de EDM.....	35
2.7 Aço AISI 4340.....	39
3. MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1 Eletrodo peça.....	43
3.2 Eletrodo ferramenta	43
3.3 Fluido dielétrico.....	43
3.4 Máquina de EDM por penetração	44
3.5 Desempenho da usinagem por NDE.....	49
3.6 Metalografia	50
3.7 Microdureza	50
3.8 Fatiamento (polimento).....	51
3.9 Difração de raios X.....	53
3.10 Rugosidade.....	54
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1 Formação das camadas nitretadas.....	55
4.1.1 Espessura das camadas.....	70
4.2 Rugosidade.....	71
4.3 Difração de Raios X.....	75
4.4 Microdureza	81
4.5 Desempenho do processo NDE	85
5 CONCLUSÕES	89
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	90
RERFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
APÊNDICE A – Programa utilizado para fatiamento	98
APÊNDICE B – Medidas das espessuras.....	99

1 INTRODUÇÃO

A usinagem por descargas elétricas (EDM) se destaca como um dos processos não convencionais mais utilizados na fabricação de moldes e matrizes, por trabalhar peças de elevadas durezas, com geometrias complexas e com um alto grau de exatidão que seriam difíceis de serem usinadas pelos processos convencionais (EL-HOFY, 2005).

O processo EDM permite que algumas modificações superficiais sejam produzidas, podendo assim afetar as propriedades da peça usinada. Isso acontece devido ao canal de plasma formado, que podem conter partículas de materiais erodidos da peça, do eletrodo e do fluido dielétrico. De acordo com Kumar et al. (2009), os elementos químicos de interesse devem fazer parte do material do eletrodo ou do fluido dielétrico.

O processo de nitretação é um método de endurecimento superficial para aumentar a resistência ao desgaste por deslizamento e à fadiga de superfícies metálicas. De acordo com Alves (2001) o processo de nitretação consiste de três etapas: Primeiro é a formação de nitrogênio atômico como resultado das diversas reações químicas, a segunda é a adsorção dos átomos na superfície da peça e a terceira é a difusão dos átomos absorvidos.

Atualmente é possível utilizar o processo EDM para Nitretação de superfícies por meio da adição de ureia no fluido dielétrico, denominando Nitretação por Descargas Elétricas (NDE) (RASLAN, 2012).

O processo (NDE) foi estudado por Yan et al. (2005) e Camargo et. Al. (2009) no endurecimento da camada superficial do titânio. Yan (2005) utilizou água destilada e ureia e Camargo (2009) utilizou água deionizada e ureia, como fluido dielétrico. Foi observado pelos pesquisadores a formação de uma camada de nitreto de titânio na superfície do material. Com essa camada na peça pode-se observar o ganho na resistência ao desgaste por deslizamento.

Nos trabalhos de Santos (2013) e de Nicesio (2017), foi demonstrado a heterogeneidade da camada da zona refundida e da camada nitretada do aço 4140 usinado por EDM utilizando como meio fluído dielétrico água deionizada e ureia. As diferenças de espessura das camadas das amostras produzidas podem estar associadas aos parâmetros elétricos utilizados, a natureza do canal de plasma e a sua intensidade (SANTOS, 2013). Dessa forma, para obter uma camada nitretada uniforme é necessário um estudo dos parâmetros do processo para otimizar o produto obtido com a usinagem EDM em fluído dielétrico de ureia.

O aço AISI 4340, segundo Abdalla et al. (2010) este é um aço popular no meio industrial, é comercial além de suportar elevados níveis de resistência. É um aço de grande interesse para a indústria automobilística, aeronáutica e espacial por combinar resistência e tenacidade. Este aço alcança elevados valores nos limites de escoamento e de resistência, além de apresentar boa forjabilidade e usinabilidade, facilidade para tratamento térmico e boa resistência à fadiga. Proteções superficiais, como a nitretação, pode ser realizada e garantir resistência a corrosão e ao desgaste abrasivo.

1.1 Justificativa

A indústria busca constantemente o desenvolvimento de materiais para aplicações mais severas, exigindo cada vez mais propriedades mecânicas elevadas, ou seja, melhor resistência mecânica, resistência térmica, resistência ao desgaste, resistência à corrosão. Aliado a procura por materiais para aplicações severas a indústria busca também a redução do tempo dos processos de fabricação de forma a minimizar seus custos. A EDM é um processo que pode ser usado para melhorar as camadas superficiais das peças que são usinadas, sendo assim, podendo unir dois processos em apenas um: a usinagem por descargas elétricas e a nitretação.

1.2 Objetivo geral e específicos

O objetivo geral deste trabalho é estudar uma metodologia para promover a nitretação das superfícies de amostras do aço AISI 4340 no processo de usinagem por descargas elétricas em uma solução de água deionizada e ureia uniformizando assim a camada nitretada.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Identificar as alterações microestruturais decorrentes da NDE;
- Desenvolver uma metodologia para retirada da camada refundida da amostra.
- Avaliar a uniformidade da camada nitretada.
- Medir e quantificar a espessura da camada NDE;
- Avaliar a rugosidade da superfície usinada;
- Caracterizar os nitretos formados por difração de raios x;
- Avaliar as propriedades mecânicas da camada nitretada por meio de ensaios de microdureza.
- Avaliar a usinabilidade relacionando taxa de remoção de material (TRM), taxa de desgaste (TD) e desgaste volumétrico relativo (DVR).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

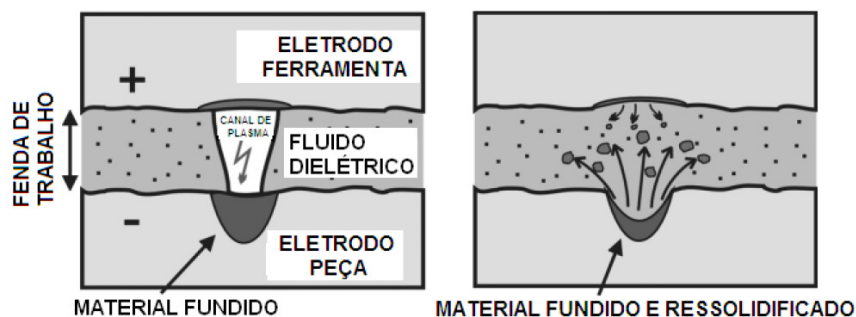
2.1 Usinagem por Descargas Elétricas

A erosão de metais devido às descargas elétricas foi primeiramente observada por Sir Joseph Priestley em 1768. Em 1943 dois Russos B. R. Lazarenko e N. I. Lazarenko ao investigarem o desgaste de contatos de interruptores deduziram que as descargas elétricas poderiam ser utilizadas para usinar os novos metais que eram desenvolvidos, mas que eram difíceis de serem usinados pelos métodos convencionais (MCGEOUGH, 1988).

Segundo McGeough (1988) o princípio de remoção de material por EDM ocorre por dois eletrodos metálicos, um sendo a ferramenta com forma determinada e outro sendo a peça, elas são imersas em um líquido dielétrico. Uma serie de pulsos elétricos de magnitude de 80V a 120V e frequência na ordem de 5kHz, é aplicada entre os eletrodos que estão afastados a uma distância 0,01-0,5mm denominada *gap*.

Para o bom funcionamento é preciso que o eletrodo se aproxime de forma controlada e lenta da peça, para isso, um servo mecanismo é necessário. Este mecanismo mantém a distância controlada para a abertura do arco elétrico. A figura 1 ilustra a representação esquemática do processo EDM.

Figura 1 - Representação esquemática do processo EDM.



Fonte: Bleys et al, 2001.

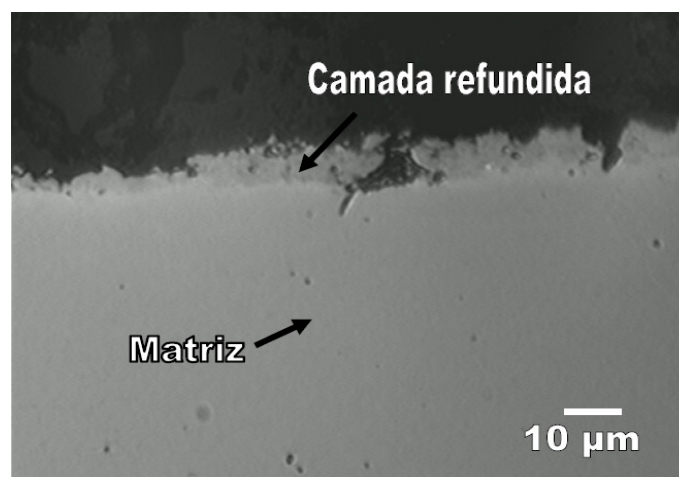
A descarga elétrica é modificada para energia térmica que gera um canal de plasma entre o eletrodo peça e eletrodo ferramenta que inicia o aquecimento e fusão (e/ou

vaporização) dos mesmos. Quando a fonte de corrente é interrompida o plasma cessa e causa assim a redução abrupta da temperatura (HO, 2003), o que permite o fluido dielétrico circular e retirar parte do material fundido e uma outra parte se solidifica novamente na superfície da peça (KUNIEDA et al.,2005). A taxa de material removido é baixa. A temperatura da centelha varia em até mais de 20000°C (MCGEOUGH, 1988).

Assim como em todos os processos de usinagem, o tempo e a precisão são fatores de grande importância. A corrente de descarga no processo é um parâmetro que influencia na qualidade e no rendimento da operação. A seleção da corrente depende da rugosidade esperada, do máximo desgaste do eletrodo, da velocidade, das características térmicas do eletrodo, das condições da fenda de trabalho e da área de contato eletrodo/peça (SANTOS, 2013).

Segundo Santos (2013) por ser um processo térmico de remoção de material, as camadas superficiais apresentam modificações na sua composição química e estrutural. Uma parte do material liquefeito durante o processo não é levado pelo jato de dielétrico, o qual é solidificado novamente na peça de trabalho e esta zona de material é chamada de “camada refundida”. Ela apresenta mudanças químicas devido a interações químicas do fluido dielétrico e do próprio eletrodo ferramenta, além de modificações na sua estrutura pela rápida solidificação. A figura 2 ilustra a camada refundida devido a rápida solidificação na superfície usinada em uma liga de titânioTi-6Al-4V.

Figura 2 - Camada refundida



Fonte: Camargo et al, 2009.

A usinagem por EDM de acordo com El-Hofy (2005) tem as seguintes vantagens:

- Cavidades com paredes finas podem ser produzidas.
- Peças com geometrias complexas.
- O uso de EDM independe da dureza do material de trabalho.
- O processo é livre de rebarbas.

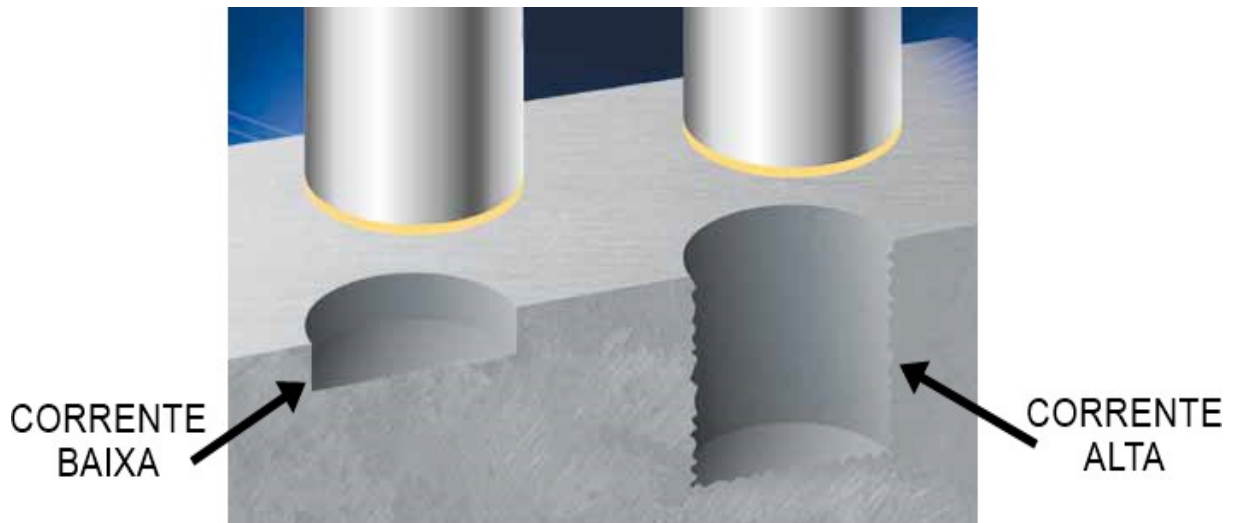
Em EDM, o material é removido na peça de trabalho e no eletrodo ferramenta que segundo El-Hofy (2005), a taxa de remoção do material não depende apenas do material da peça de trabalho, mas também do material do eletrodo ferramenta e das variáveis da usinagem, que podem ser controlados durante o processo. Alguns dos principais parâmetros da usinagem são:

Tensão (V): A tensão na EDM está relacionada com a faísca e a resistência a ruptura do dielétrico de acordo com Kumar et al. (2009). Antes da corrente poder fluir, a tensão em aberto aumenta até que tenha criado um caminho de ionização através do dielétrico. Uma vez que a corrente começa a fluir, a tensão cai e se estabiliza no nível da tensão média de trabalho. A tensão predefinida determina a largura da faísca entre o eletrodo ferramenta e o eletrodo peça.

Corrente (I): Este é o parâmetro mais importante da usinagem por EDM segundo Kumar et al. (2009). Durante cada pulso de tempo, a corrente aumenta até atingir um nível predefinido, que é expresso como corrente de pico. Uma maior corrente é usada para operações de desbaste e em cavidades ou detalhes com grandes áreas de superfície. Com correntes altas tem-se uma melhor taxa de remoção do material, mas com um pior acabamento superficial e um maior desgaste do eletrodo ferramenta, ilustrado pela figura 3 (STORR, 2007).

A cavidade usinada é a réplica do eletrodo ferramenta e o desgaste excessivo causará problemas quanto a tolerâncias dimensionais e geométricas da peça (HO, 2003). Uma combinação entre uma boa taxa de remoção de material e mínimo desgaste é possível com o ajuste de diversos parâmetros como corrente, frequência e polaridade.

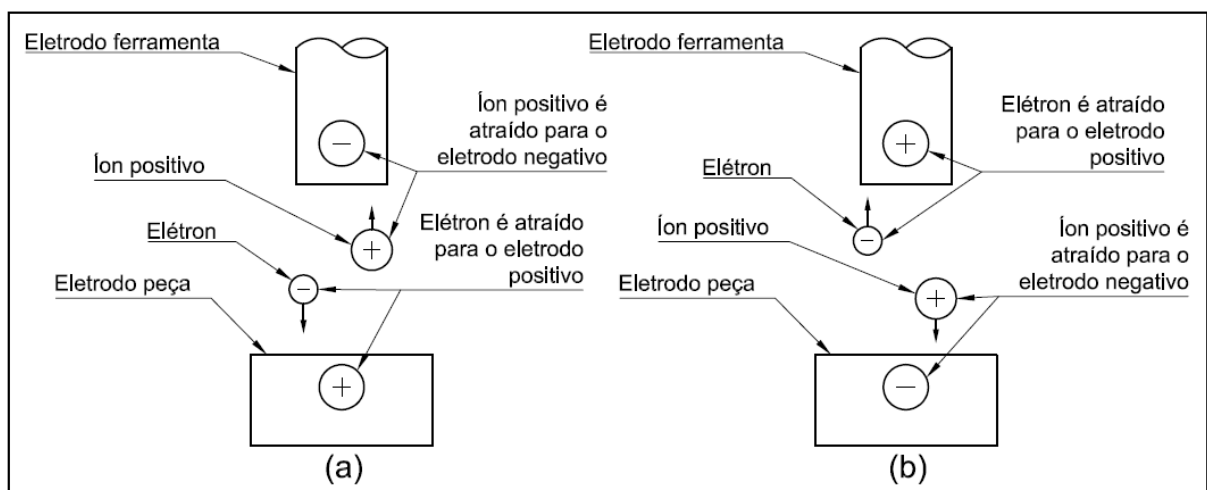
Figura 3 - Efeito da corrente de pico na rugosidade



Fonte: Storr, 2007 (adaptado pelo autor, 2018).

Polaridade: A polaridade elétrica do eletrodo e da peça determina a direção do fluxo de elétrons e íons positivos. Quando o eletrodo é carregado negativamente, os íons positivos são atraídos para ele e os elétrons são atraídos para a peça de trabalho como ilustra a figura 4(a). Quando a polaridade é invertida e o eletrodo é carregado positivamente, os elétrons são atraídos para o eletrodo e os íons positivos são atraídos para a peça de trabalho carregada negativamente como mostra a figura 4(b) (JAMESON, 2001).

Figura 4 - Atração de elétrons e íons positivos para o eletrodo e peça de trabalho.



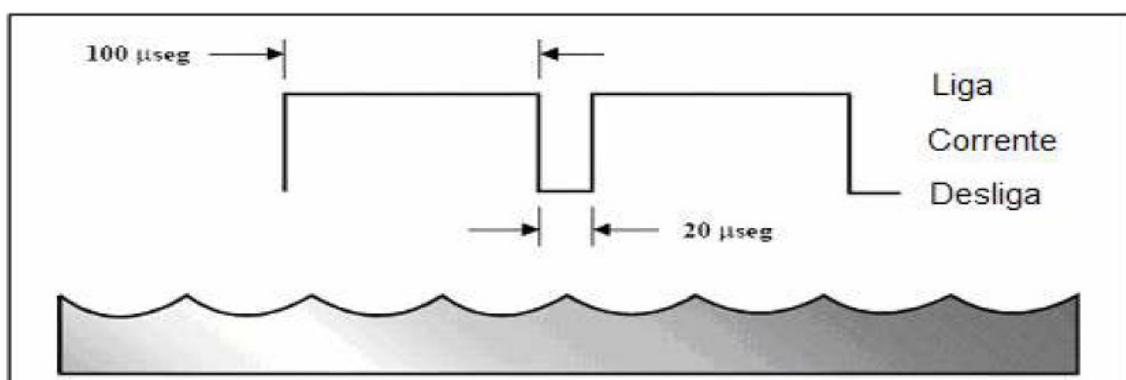
Fonte: Jameson, 2001 (adaptado pelo autor, 2018).

De acordo com Guitrau (1997), a polaridade pode afetar a velocidade, o acabamento, o desgaste e a estabilidade da usinagem. A maioria das operações utilizando uma máquina de eletroerosão por penetração é realizada utilizando o eletrodo como polo positivo. A polaridade positiva é mais lenta que a polaridade negativa, mas é utilizada na maioria das vezes para proteger o eletrodo contra o desgaste excessivo.

Frequência: É a medida usada para medir o número de vezes que a corrente é ligada e desligada. Durante operações de desbaste, o tempo é geralmente estendido para alta remoção de material, e como há menos ciclos por segundo esse é um ajuste de baixa frequência. Operações de acabamento, com tempos de onda ligado mais curtos são considerados de alta frequência (GUITRAU, 1997).

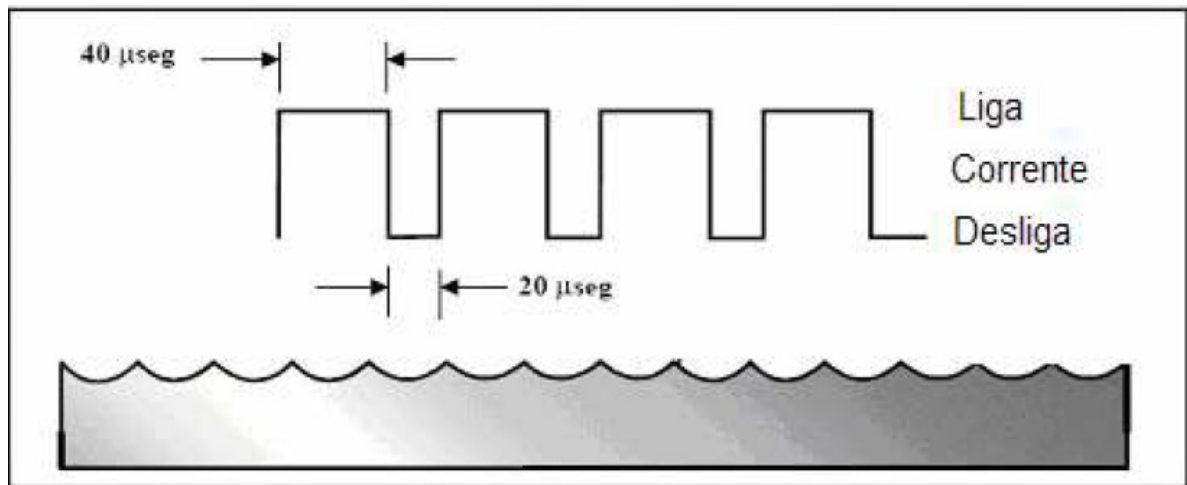
As figuras 5, 6 e 7 apresentam as formas das superfícies usinadas por eletroerosão, de forma representativa, em diferentes frequências e os efeitos na superfície da peça. Na figura 5 com o tempo de onda ligado (T_{on}) longo, a superfície da peça apresenta um aspecto grosseiro, devido ao fato de que a longa duração da descarga é suficiente para fundir uma grande cratera. Na figura 6, a duração da descarga decai, produzindo crateras menores e menos material fundido, em função do tempo de onda ligado. O acabamento melhora, mas a velocidade de usinagem diminui e aumenta o desgaste do eletrodo. A figura 7 apresenta a característica da superfície em operações de acabamento, o tempo das descargas é curto, com uma intensidade de descargas maior pela mesma unidade de tempo. As descargas de curta duração produzem pouco material erodido, gerando pequenas crateras.

Figura 5 - Baixa frequência / desbaste.



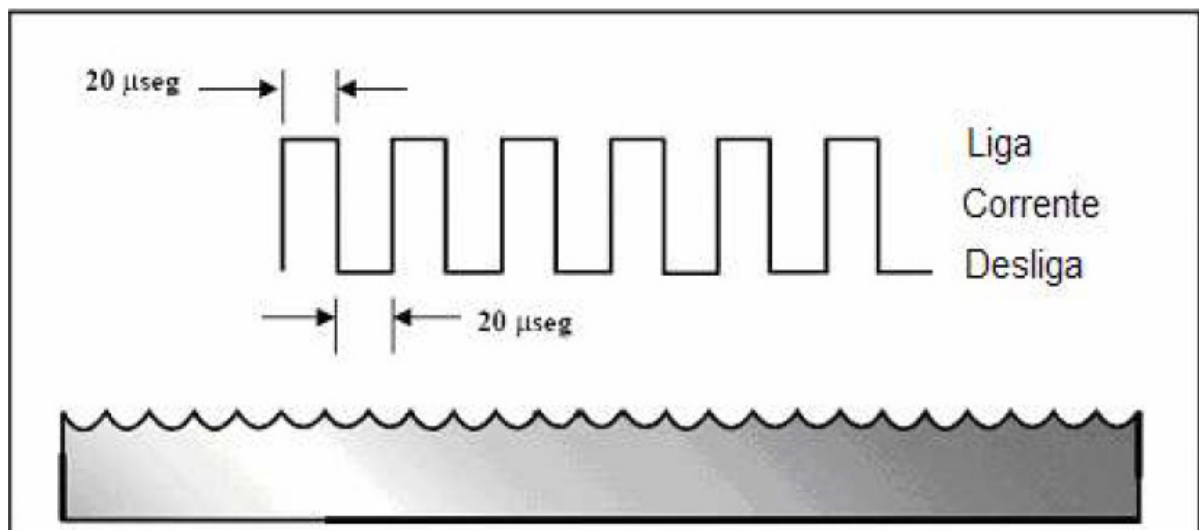
Fonte: Guitrau, 1997.

Figura 6 - Frequência moderada / Semi-acabamento.



Fonte: Guitrau, 1997.

Figura 7 - Alta frequência / acabamento.



Fonte: Guitrau, 1997.

Tempo de onda ligado (T_{on}) e tempo de onda desligado (T_{off}): No processo de eletroerosão cada ciclo é composto de um pulso ligado, onde ocorrem as faíscas, e outro desligado, pulsos esses que duram alguns microssegundos (μ s). A taxa de remoção de material é diretamente proporcional a energia aplicada durante a duração do pulso. Quanto maior a duração do pulso maior a quantidade de material fundido e/ou vaporizado (CRUZ JR, 2015).

Segundo Guitrau (1997), a relação entre T_{on} e T_{off} é a medida da eficiência, chamada de *duty cycle*. Que pode ser calculada pela equação (1) onde se obtêm a

porcentagem da eficiência.

$$Dt = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \times 100 \quad (1)$$

O trabalho de remoção de material é realizado somente durante o T_{on} , a duração das pausas são necessárias para reionização do fluido dielétrico o que pode aumentar muito o tempo de trabalho, pois com tempos maiores de pausa maior será o tempo total de usinagem (GUITRAU, 1997).

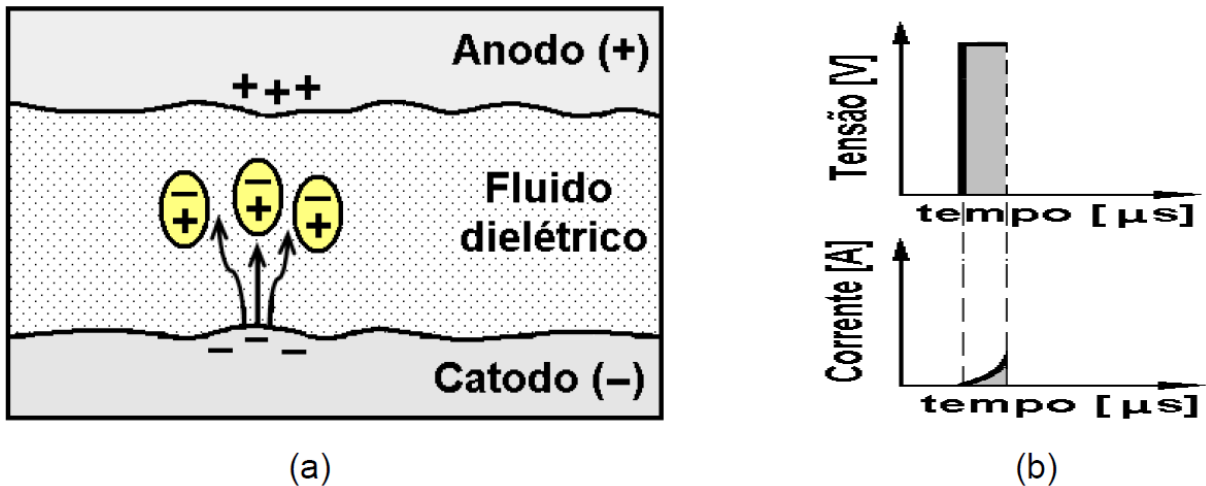
A partir da descarga elétrica entre eletrodo ferramenta e peça pode-se dividir o processo em quatro etapas sucessivas:

1. Fase de ignição;
2. Formação do canal de plasma;
3. Fusão e evaporação de pequena quantidade do material e;
4. Ejeção do material.

2.1.1 Fase de ignição

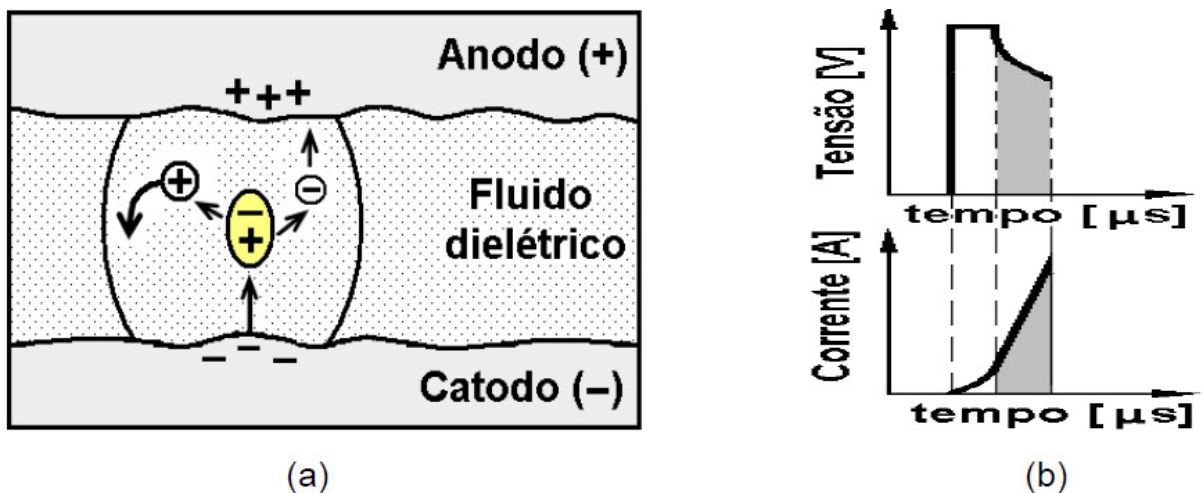
Os eletrodos são posicionados na máquina a uma pequena distância, algo em torno de 0,5 a 1mm. É aplicada uma tensão entre os eletrodos que pode variar de 60 a 300V, neste instante não há fluxo de corrente devido à resistência do fluido dielétrico. O servomecanismo avança o eletrodo-ferramenta em direção a peça até chegar a distância de trabalho, causando assim o aumento do campo elétrico. No local onde o gradiente é máximo, nos picos de rugosidade, ocorre a emissão de elétrons primários que são acelerados pelo campo magnético em direção ao anodo, a figura 8 ilustra essa fase, bem como a variação de tensão e corrente durante a mesma. (AMORIM, 2002). Em seu caminho através do fluido dielétrico, os elétrons primários chocam-se com moléculas do dielétrico, como consequência, os átomos do dielétrico separam-se em íons positivos e negativos ou elétrons secundários. A figura 9 ilustra esse movimento (STEVENS, 1998).

Figura 8 - Representação esquemática dá a) fase da ignição e b) evolução da corrente a da tensão.



Fonte: Stevens, 1998.

Figura 9 - Representação da a) formação de elétrons secundários e b) evolução da corrente e da tensão.



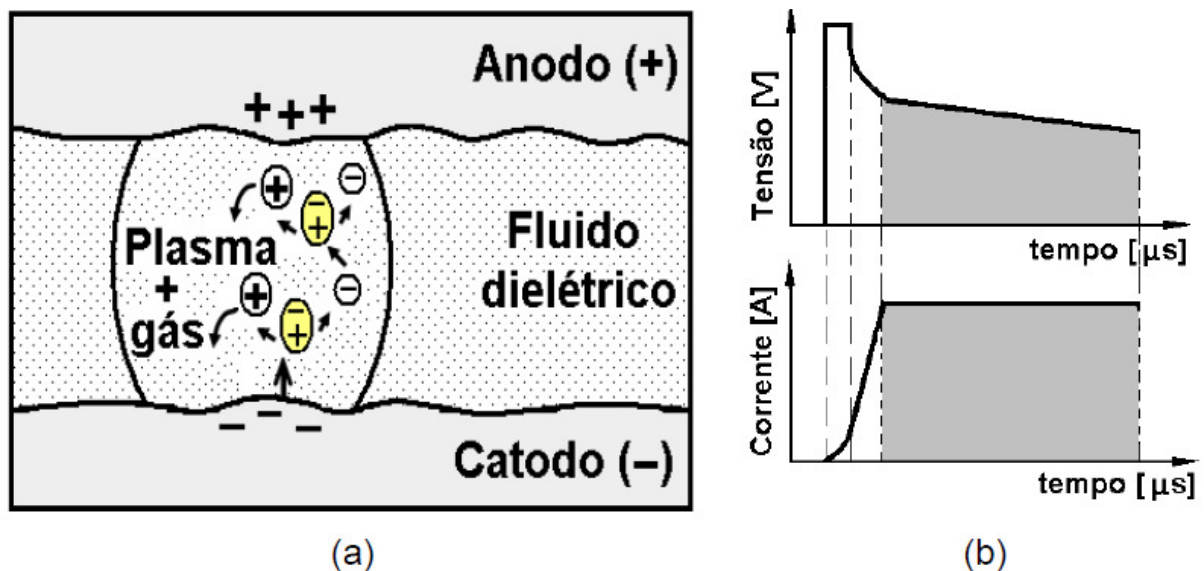
Fonte: Stevens, 1998.

2.1.2 Formação do canal de plasma

De acordo com Amorim (2002) e Santos (2013) íons positivos originados do dielétrico chocam-se contra o catodo e assim liberando elétrons que são atraídos para o anodo. Esse fenômeno vai se multiplicando em altíssima velocidade dando origem a ionização por impacto, gerando assim um superaquecimento e evaporação de uma pequena quantidade do dielétrico. Desta maneira, ocorre um aumento da corrente elétrica e um decréscimo da resistência do fluido dielétrico. Assim neste

momento é observada a formação e a intensificação de túneis transportadores de energia elétrica (*streamers*), tanto para o anodo quanto para o catodo, causando a queda da tensão para a tensão de ruptura do dielétrico, e assim um grande aumento da corrente elétrica, até o nível especificado pelo operador. Ocorre o canal de plasma que fica contornado por uma bolha de vapor e pelo dielétrico que faz com que a energia da descarga fique concentrada em um pequeno volume como apresentado na figura 10.

Figura 10 - Representação do a) canal de plasma e b) evolução da corrente e da tensão.



Fonte: Stevens, 1998.

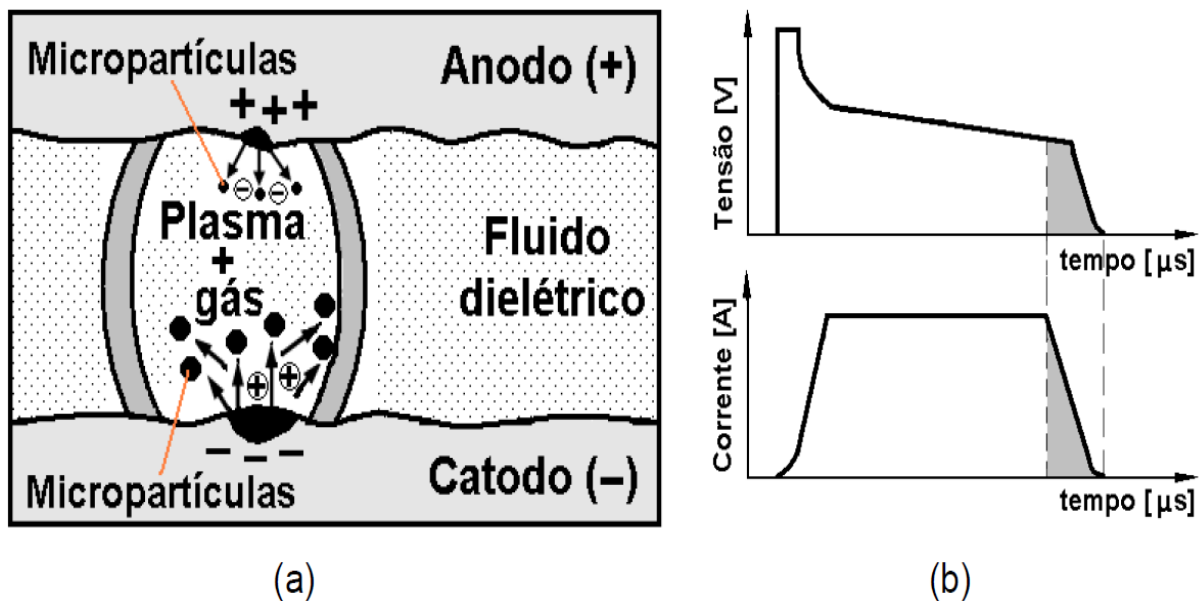
Essa formação do canal de plasma também é conhecida como colapso da tensão em aberto, porque a tensão decai rapidamente para a tensão de ruptura do dielétrico, a qual depende dos materiais utilizados como eletrodo ferramenta e eletrodo peça (AMORIM, 2002; SANTOS, 2013).

2.1.3 Fusão e evaporação de pequena quantidade do material

Durante a descarga, para evitar a formação de arcos e curtos circuitos, o servomecanismo da máquina EDM controla e mantém equilibrada a amplitude da fenda de trabalho, a qual depende do nível da energia da corrente de descarga. Ao longo do tempo o plasma funde por condução térmica certa quantidade de material

de ambos os eletrodos, como ilustra a figura 11 (AMORIM, 2002). A quantidade de material que é fundido, depende entre outros fatores como do número de elétrons ou íons que colidem contra a superfície. O número de elétrons e íons gerados pela descarga elétrica depende da corrente e do tempo de duração da descarga (STEVENS, 1998).

Figura 11 - Representação esquemática da fusão de material no anodo e no catodo



Fonte: Stevens, 1998.

2.1.4 Ejeção do material

Ao final do tempo de descarga, o sistema de controle do gerador da máquina interrompe a corrente elétrica bruscamente. Como consequência, o canal de plasma se desfaz e a pressão cai. Isso faz com que o material fundido nos eletrodos evapore e pequenas gotas líquidas são ejetadas da poça fundida. O material dos eletrodos é removido pela circulação do fluido dielétrico (STEVENS, 1998).

Segundo Stevens (1998), somente 10% do material fundido é ejetado da poça fundida devido à queda de pressão e que cerca de 90% do material é resolidificado na superfície da peça, produzindo a camada refundida.

2.2 Materiais para eletrodos ferramentas

De acordo com McGeough (1988) metais com alto ponto de fusão boa condutividade elétrica são escolhidos para materiais de ferramentas e, além disso, devem ser baratos e de fácil fabricação pelos processos convencionais.

Há uma vasta variedade de materiais utilizados como eletrodo ferramentas como o latão, carboneto de tungstênio, cobre eletrolítico, liga de cobre tungstênio, liga de prata tungstênio, liga de cobre telúrio, outras ligas de cobre, grafita, etc. Eletrodos metálicos geralmente funcionam melhor com materiais de baixo ponto de fusão, como o alumínio, cobre e o latão. Para usinar materiais metálicos, aços e suas ligas, o eletrodo de grafita é o preferido (Müller, 2015).

O cobre também tem as qualidades para alta taxa de remoção de material, ele se mantém estável durante o processo de centelhamento. O seu desgaste se compara com o da grafita e com certos materiais da peça de trabalho. O cobre produz um acabamento de superfície mais fino (MCGEOUGH, 1988).

Segundo Guitrau (1997) o processo de seleção de material de eletrodo deve começar com a consideração de cinco fatores importantes.

1. Taxa de remoção de material: É a medida do material removido em um determinado tempo, medido como mm^3/hora .
2. Resistência ao desgaste: Aspecto esse muito importante da seleção do material do eletrodo. Existem quatro tipos de desgaste a considerar: volumétrico, de borda, frontal e lateral, com o desgaste de borda sendo o mais importante.
3. Acabamento superficial desejado: O acabamento desejado pode ditar a seleção do eletrodo. Para obter um acabamento fino com grafita, este deve ser denso. Acabamentos espelhados são geralmente obtidos com vários eletrodos metálicos ou eletrodos de grafita em movimento de rotação e translação.
4. Custos de fabricação: Quanto mais complexo o eletrodo, maiores serão os custos de fabricação. Eletrodos de grafita são geralmente mais fáceis de

serem fabricados em relação aos de cobre eletrolítico.

5. Custos de matéria-prima: Está é apenas uma pequena parte da avaliação de tempo e custo sendo que as considerações de 1 a 4 devem ser verificadas antes de que isso se torne um fator.

Em operações de acabamento segundo Guitrau (1997) apesar do eletrodo feito de grafita ser muito mais resistente a danos causados pelo calor em relação ao cobre ele também é muito menos denso. Embora o cobre seja mais suscetível a danos térmicos que a grafita, há muito pouco calor gerado em operações de acabamento (alta frequência). Por essa razão o eletrodo de cobre é o preferido para acabamento em metais.

2.3 Fluidos dielétricos

Em geral, a remoção de material na EDM é feita sob um líquido não condutor de eletricidade, denominado dielétrico (LIMA, 2009).

O fluido dielétrico tem função extremamente importante em relação a qualidade das peças usinadas. Como os dielétricos tem diferentes taxas de resfriamento e composição, a escolha do dielétrico desempenha um papel importante no processo de EDM. Os meios dielétricos que envolvem os eletrodos durante a usinagem devem ser cuidadosamente selecionados e aplicados para manter o desempenho máximo e o controle das descargas elétricas (CHAKRABORTY et al., 2015).

De acordo com Lima (2009) e Chakraborty et al. (2015) o fluido dielétrico tem várias funções.

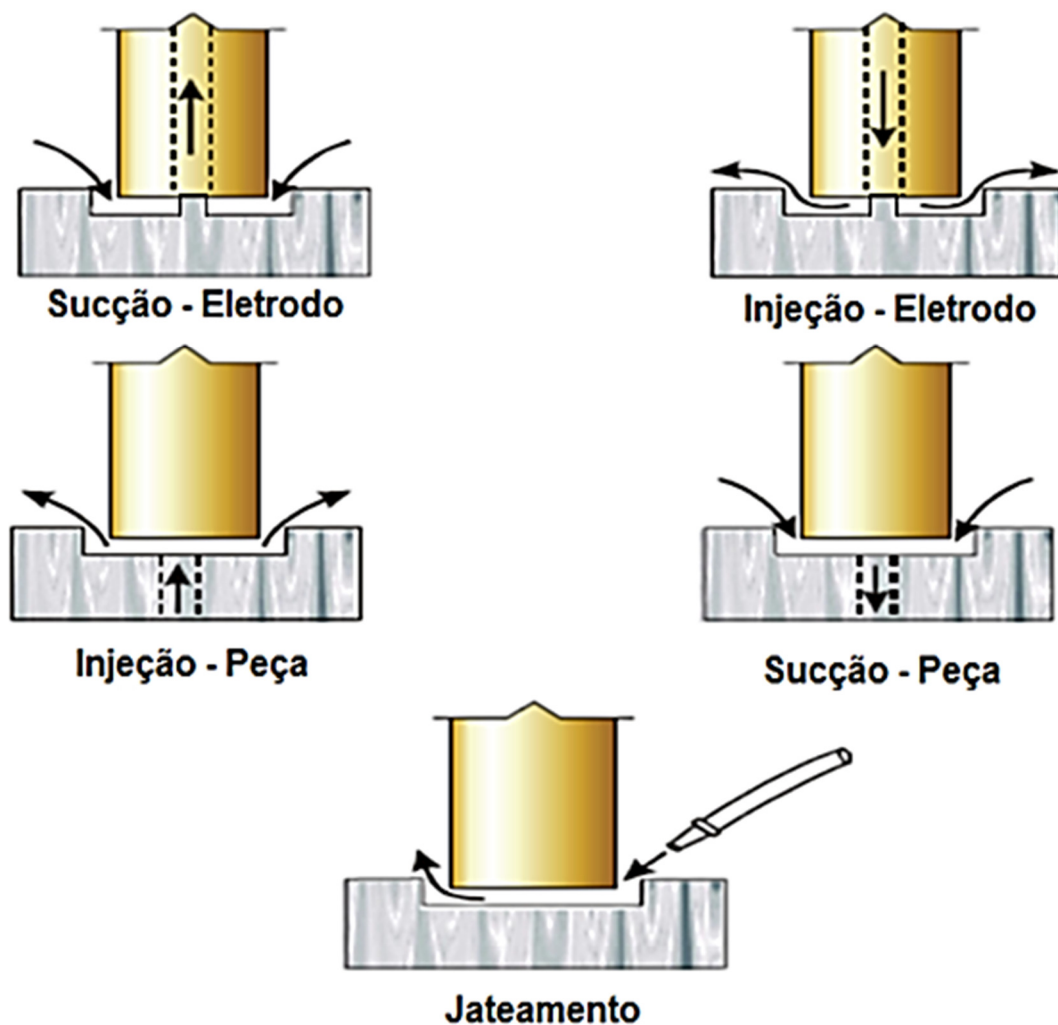
1. Funciona como um meio onde ocorrem descargas elétricas controladas.
2. Meio de resfriamento para solidificar partes fundidas dos eletrodos resultantes das descargas elétricas.
3. Usado para transportar os meios sólidos da fenda de trabalho para o sistema de filtragem.
4. Transferência de calor para absorver e transportar o calor gerado pelas descargas dos eletrodos.

Segundo Chakraborty et al. (2015) diferentes tipos de fluidos dielétricos estão disponíveis para usinar as peças em EDM. A eletroerosão por penetração geralmente opera com óleo hidrocarboneto, enquanto que a eletroerosão a fio geralmente trabalha com água deionizada.

A limpeza adequada da região usinada é importante para o desempenho do processo, sendo grande responsável pela presença de camada refundida mais ou menos profunda (LIMA, 2009).

No processo de limpeza apresentado na figura 12 podem ser usados vários sistemas. As vantagens de um ou outro depende de cada caso e deve ser levado em conta não só a geometria, mas também a precisão requerida (ARANTES, 2001).

Figura 12 - Sistemas de lavagem no processo EDM.



Fonte: Arantes, 2001.

Segundo Leão (2004) o desempenho da água natural em termos de taxa de remoção de material e desgaste do eletrodo é geralmente menor quando comparado com o obtido com óleos de hidrocarbonetos na EDM. No entanto, o uso de água deionizada ou mesmo de água da torneira pode resultar em níveis mais elevados de taxa de remoção de material em algumas situações especiais, como quando um eletrodo de latão com polaridade negativa é usado, durações de pulso menores do que 500 μ s são empregadas e usinagem da liga de titânio Ti-6Al-4V com eletrodo de cobre.

Embora o uso de água pura resulte num melhor desempenho em algumas situações, os óleos de hidrocarbonetos são superiores numa gama mais ampla de condições de usinagem. Isto tem sido atribuído à menor viscosidade da água, que produz menos restrição do canal de descarga, reduzindo assim a densidade de energia e, como consequência, diminuindo a taxa de remoção de material. Além disso, a grande quantidade de energia necessária para aquecer e vaporizar água em comparação com o óleo resulta em menor pressão de gás no intervalo. Consequentemente, o metal fundido não é removido adequadamente em cada descarga, devido à pressão insuficiente produzida pela explosão de água (LEÃO, 2004).

Leão (2004) afirma que uma das principais fontes de poluição na usinagem por EDM de moldes e matrizes é o fluido dielétrico, principalmente os óleos de hidrocarbonetos. Uma alternativa seria o uso no gás (ar, oxigênio), pois não produziria resíduos e não causaria nenhum efeito nocivo à saúde. No entanto, essa técnica ainda não foi desenvolvida para que se possa ser utilizada eficientemente. O uso de dielétricos a base de água pode ser uma alternativa para minimizar os problemas ambientais.

2.4 Nitretação

A nitretação é um tratamento de endurecimento superficial em que se introduz superficialmente no aço o nitrogênio. Aços que são nitretados geralmente possuem médio teor de carbono que contêm fortes elementos formadores de nitretos, como cromo, alumínio, vanádio e molibdênio (KRAUSS, 2000).

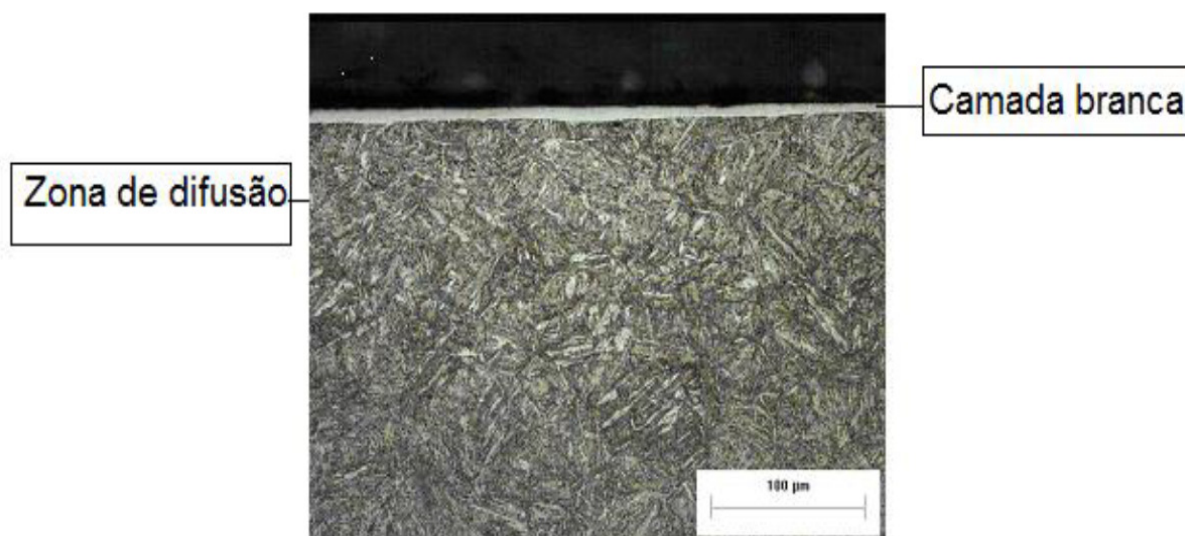
Chiaverini (2012) lista os seguintes objetivos para se realizar a nitretação:

- obtenção de elevada dureza superficial;
- aumento da resistência ao desgaste e da resistência à escoriação;
- aumento da resistência a fadiga;
- melhora da resistência a corrosão;
- melhora da resistência superficial ao calor, até temperaturas correspondentes às de nitretação.

A nitretação tem vantagens sobre outros processos termoquímicos de endurecimento superficial, pois para nitretar usa-se uma faixa de temperatura relativamente baixa, entre 500°C e 550°C (no máximo 650°C), aliado ainda a ausência de qualquer tratamento térmico posterior, que reduz a probabilidade de empenamento das peças (CHIAVERINI, 2012).

A nitretação iônica, também conhecida como nitretação a plasma utiliza o fenômeno de descarga de corrente contínua para introduzir o elemento químico nitrogênio na superfície de peças metálicas, para posterior processo de difusão na rede cristalina do material. O processo é realizado em uma câmara de vácuo onde a amostra é diretamente conectada a um cátodo. É aplicada alta tensão entre o cátodo e o ânodo (as paredes do vaso atuam como o ânodo) para gerar um plasma em uma mistura de gases, geralmente em vácuo. A reação de nitretação ocorre na superfície, bem como na subsuperfície, pela difusão de átomos de nitrogênio da superfície em direção ao núcleo. A camada superficial, também chamada de “camada branca” que é apresentada na figura 13, é uma camada fina de nitreto de ferro constituída de γ -Fe₄N e/ou ϵ -Fe₂₋₃N. Esta camada é consideravelmente dura e tem melhor resistência ao desgaste e à corrosão do que o substrato não tratado (SIRIN et al., 2008; DÍAZ-GUILLÉN et al., 2013).

Figura 13 - Camada branca, com aumento de 500x.



Fonte: Corazza, 2012.

Segundo Sirin et al. (2008) a nitretação iônica recebeu considerável interesse industrial devido à sua característica de penetração mais rápida de nitrogênio, menor tempo de tratamento, baixa temperatura de processo, mínima distorção, limpeza de amostras, baixo consumo de energia e controle mais fácil da formação de compostos e camadas de difusão em comparação com técnicas convencionais como gás e nitretação líquida.

A nitretação cresceu especialmente a partir do fato de que, através da nitretação, camadas superficiais muito duras podem ser obtidas sem modificação substancial das propriedades do material. Isso levou a inúmeras aplicações do processo em indústrias como a fabricação de peças de máquinas para processamento de plásticos e alimentos, embalagens e ferramentas, bem como bombas e peças de máquinas hidráulicas, virabrequins, rolos e engrenagens pesadas, construção de motores e carros, matrizes de trabalho a quente e a frio e ferramentas de corte (SIRIN et al., 2008).

2.5 Ureia

Ureia, também denominada carbamida, a diamida do ácido carbônico. Sua fórmula é H_2NCONH_2 . A ureia tem importantes usos como adubo e suplemento alimentar animal, bem como um material de partida para fabricação de plásticos e alguns

condicionadores de cabelo e loções. É uma substância cristalina incolor, figura 14, que funde a 132,7 ° C (271 ° F) e decompõe-se antes da ebulição. A ureia é o principal produto nitrogenado da degradação metabólica das proteínas em todos os mamíferos e alguns peixes. A ureia é encontrada não apenas na urina de todos os mamíferos, mas também no sangue, leite e transpiração. Possui aplicação importante para a agricultura, representando alta concentração de nitrogênio (BRITANNICA ACADEMIC, 2017).

Figura 14 - Aspecto físico da ureia.



Fonte: Guimarães Jr, 2016.

A tabela 1 apresenta a composição química da ureia brasileira.

Tabela 1 - Composição química da ureia encontrada no Brasil

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

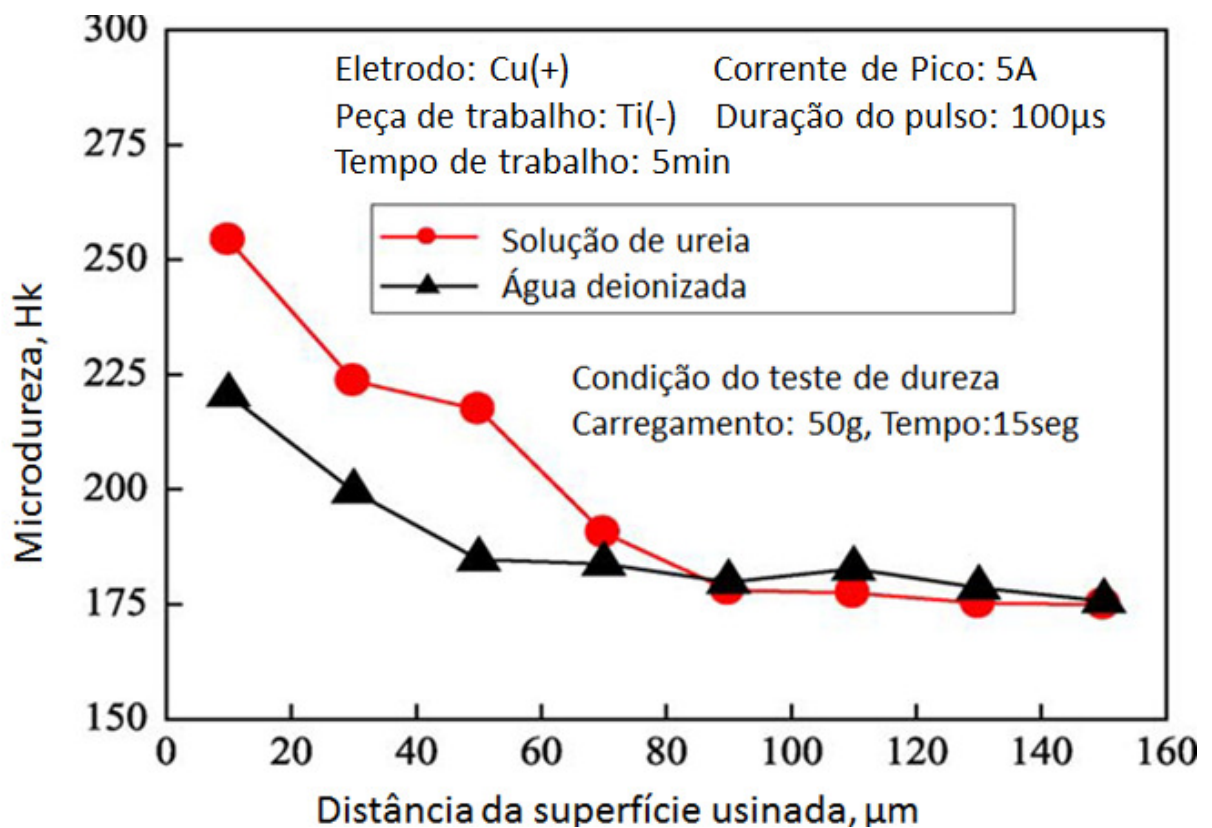
Fonte: Guimarães Jr, 2016 (Adaptado).

2.6 Nitretação por meio de EDM

Estudos têm sido realizados visando possibilitar o enriquecimento superficial de várias ligas metálicas com nitrogênio, carbono, boro, cálcio entre outros elementos, por meio da usinagem por descargas elétricas. Pesquisadores têm utilizado como fonte de nitrogênio soluções aquosas de ureia como fluido dielétrico.

Yan et al. (2005) estudaram o enriquecimento da superfície com nitrogênio do titânio puro no qual foram verificados os efeitos da diluição de ureia em água destilada para ser utilizada como fluido dielétrico, ureia que é a fonte de nitrogênio a ser incorporada a superfície da peça. Os resultados experimentais indicaram uma migração do nitrogênio para a superfície da peça formando uma camada endurecida de TiN, com espessura média de 60µm. A figura 15 mostra a variação da microdureza.

Figura 15 - Variação da microdureza na seção transversal das superfícies usinadas em EDM usando diferentes dielétricos.

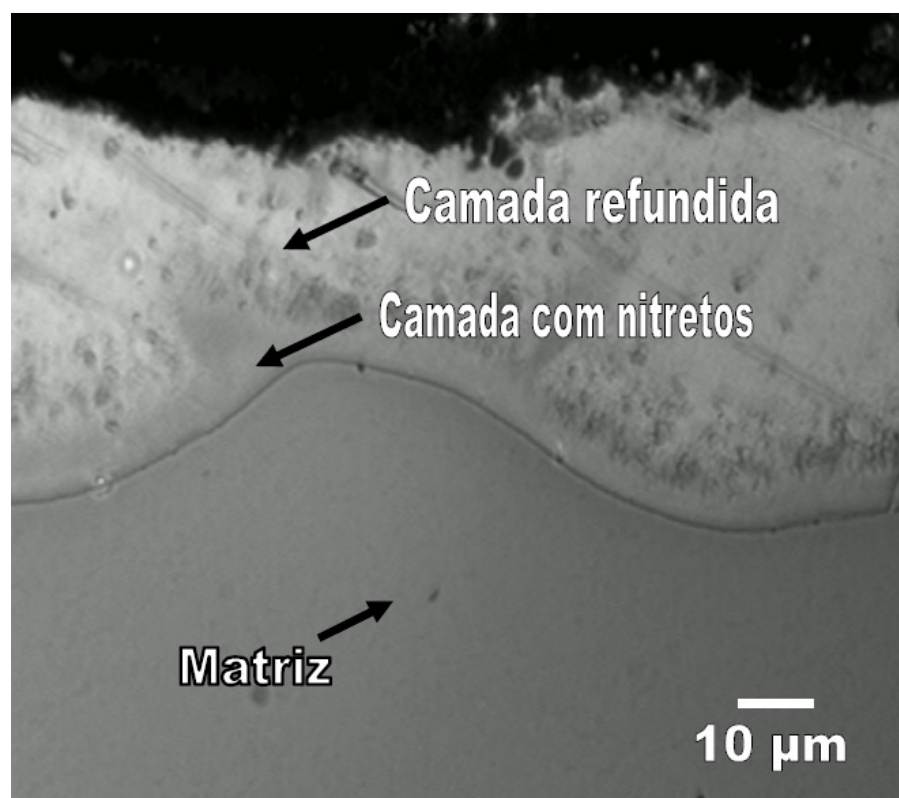


Fonte: Yan et al., 2005 (Adaptado).

Camargo et al. (2009) também estudaram o enriquecimento da superfície da liga de titânio utilizando ureia diluída (10g/l) em água deionizada comprovando assim a viabilidade técnica de enriquecer e elevar a dureza de superfícies, pela formação de nitretos em ligas Ti6Al4V, através de processos EDM por penetração. A Figura 16 ilustra as três regiões distintas na amostra usinada com ureia.

Segundo Santos (2013), que estudou o enriquecimento superficial de Aço AISI 4140 com nitrogênio através da usinagem por descargas elétricas utilizando como fluido dielétrico água deionizada com adição de ureia, os íons de nitrogênio foram implantados a profundidades de 20 a 25µm. Em suas análises ele evidenciou que a concentração de nitrogênio decai com a profundidade, mas não interfere nos tipos de nitretos formados, e sim na quantidade dos mesmos.

Figura 16 - Imagem da seção transversal da amostra usinada com ureia.

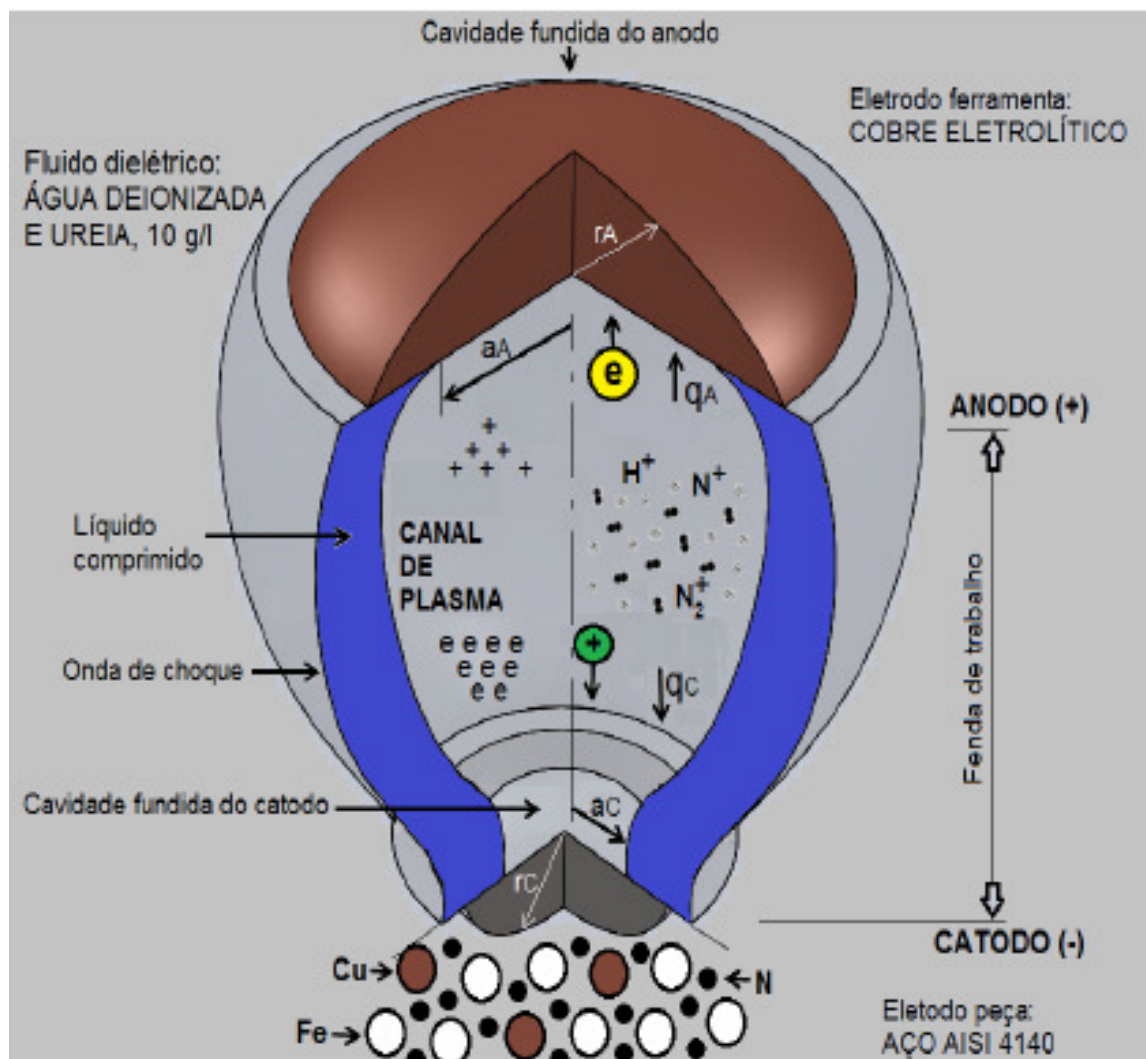


Fonte: Camargo et al.,2009.

Santos (2013) ainda supõe que não ocorra uma zona de difusão neste processo apesar de temperaturas relativamente altas, o tempo é muito curto, ou seja, da ordem de 10^{-6} segundos, este fato reforça a hipótese da inserção, do nitrogênio e

também de cobre oriundo do eletrodo ferramenta, por implantação iônica e não por difusão. Um modelo para explicar este fenômeno de enriquecimento superficial de nitrogênio e cobre foi proposto. A figura 17 ilustra os detalhes do formato do canal de plasma em corte ilustrando o que ocorre no interior do canal. O raio a_c do plasma na região próxima ao catodo é inferior ao raio a_A próximo ao anodo. O raio a_c é menor devido a emissão de elétrons pelo catodo. No anodo o raio a_A aumenta continuamente durante a evolução da descarga. O fluxo de calor é representado por q_c e q_A , sendo r_c e r_A os raios das cavidades fundidas no catodo e anodo.

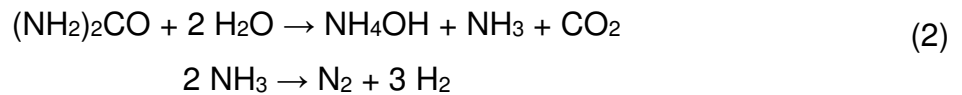
Figura 17 - Modelo 3D para o canal de plasma do processo de Nitretação por descargas elétricas (NDE) proposto por Santos (2013).



Fonte: Santos, 2013.

Na fase de ignição do canal de plasma elétrons são acelerados pelo campo elétrico em direção ao anodo e colidem com moléculas do fluido dielétrico e os íons positivos

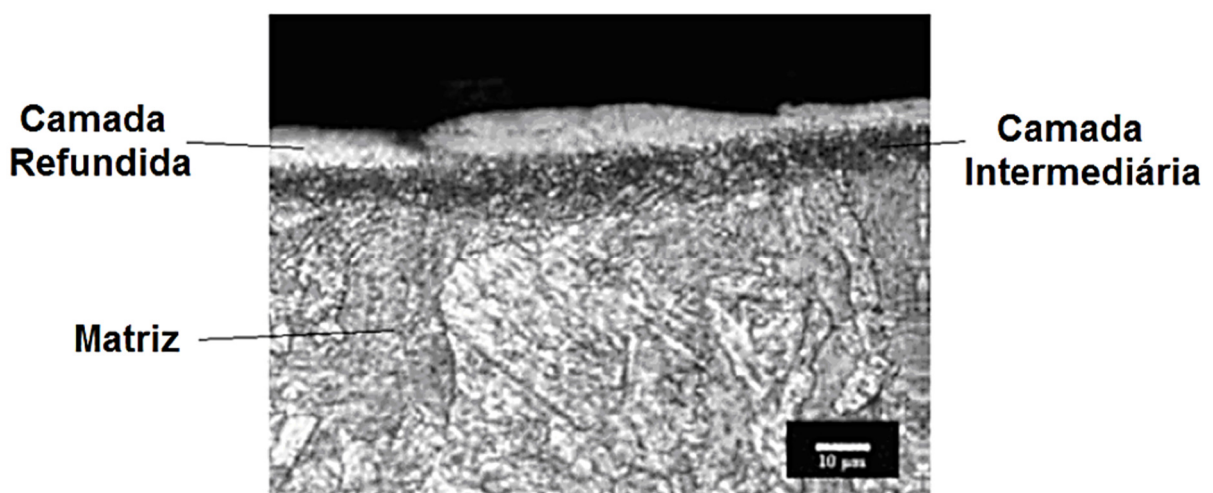
de direcionam ao catodo caracterizando o fenômeno de ionização por impacto. Esse mecanismo causa ruptura do dielétrico, água deionizada com ureia, e gera NH_3 e CO_2 gasosos. O NH_3 gerado se decompõe em N_2 e H_2 conforme as reações (2) (SANTOS, 2013).



O N_2 e H_2 irão se difundir no canal de plasma na forma de íons, como N_{+2} , N_{+} e H_{+2} . Por serem positivos, eles serão impulsionados para a superfície do eletrodo peça (catodo) e, pela alta energia cinética que adquirem, implantam-se no interior da mesma. Íons oriundos do eletrodo ferramenta (anodo), cobre e carbono, também podem ser formados (SANTOS, 2013).

Raslan (2015) também estudou a nitretação por descargas elétricas no aço AISI 4140 onde seus resultados mostraram a formação de uma camada nitretada que eleva a resistência ao desgaste por deslizamento das amostras nitretadas. A figura 18 apresenta a microestrutura da seção transversal, onde pode se observar a formação de uma camada afetada pelo calor, típica de processos EDM. Avaliou-se a resistência ao desgaste por deslizamento utilizando um tribômetro. Foi utilizado a configuração esfera-plano em movimento alternado com amplitude de 5 mm.

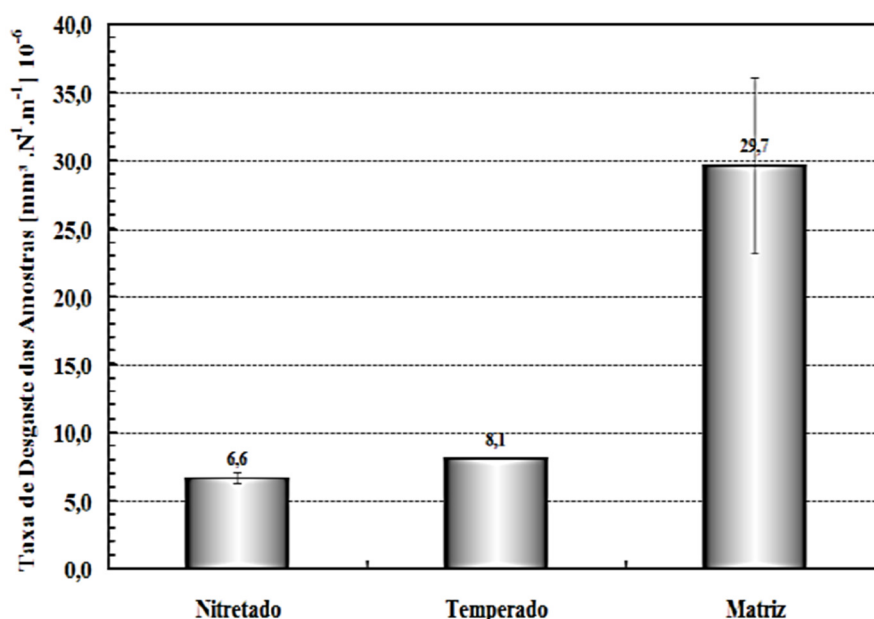
Figura 18 - Seção transversal de amostras de aço AISI 4140 nitretada por EDM com água deionizada e ureia. Nital 2%.



Fonte: Raslan, 2015.

A figura 19 apresenta a taxa de desgaste comparando amostra nitretada por NDE, temperada e sem tratamento. Observa-se que as taxas de desgaste para as amostras nitretada e temperada apresentaram valores três vezes menor do que o material base (sem tratamento). Observa-se ainda que a amostra nitretada apresenta desgaste 18% menos que a amostra temperada.

Figura 19 - Taxa de desgaste do aço AISI4140



Fonte: Raslan, 2015.

Silva et al. (2015), estudaram uma maneira de melhorar a taxa de remoção de material aliado a Nitretação por descargas elétricas. Foi usinado aço AISI 4140 pelo processo de usinagem por descargas elétricas e jato de água abrasivo (AJEDM) e nitretando pelo processo NDE simultaneamente. Foi usinado pelo processo AJEDM, na pressão de 240 bar, com abrasivo SiC 600 mesh em água deionizada com ureia na concentração de 10g/l. Além de verificar a nitretação, aumentou o rendimento em 70% da TRM.

2.7 Aço AISI 4340

Segundo a ASM (1990), o AISI ou SAE 4340 combina dureza com alta ductilidade. Tem alta resistência à fadiga e à fluência. Muitas vezes, é usado onde existem condições severas de serviço e onde é necessária uma alta resistência. O aço 4340

está disponível em forma de barra, haste, peças forjadas, chapas, tubos e fios de solda. Também é produzido como chapas finas e por fundição. Aplicações típicas deste aço incluem parafusos, engrenagens, pinhões, eixos e componentes de máquinas, virabrequim e pistão para motores, trem de pouso e outros membros estruturais críticos para aeronaves.

O AISI 4340 é classificado como aço ligado ao cromo-níquel-molibdênio (CrNiMo) com valor médio de 0,4% de carbono (C). Este aço contém médio teor de carbono, baixa liga de cromo níquel molibdênio (CrNiMo) e possui limite de resistência à tração, limite de escoamento e resistência à fadiga superiores em comparação com aços carbono comum como o AISI 1045 (ASM, 1990).

A faixa de composição química deste aço, conforme dados da literatura e catálogos de fabricantes, esta apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química (% em peso) do aço AISI/SAE 4340

Carbono (C)	Manganês (Mn)	Silício (Si)	Níquel (Ni)	Cromo (Cr)	Molibdênio (Mo)
0,38 – 0,43	0,60 – 0,80	0,15 – 0,35	1,65 – 2,00	0,70 – 0,90	0,20 – 0,30

Fonte: ABNT NBR NM 87, 2000.

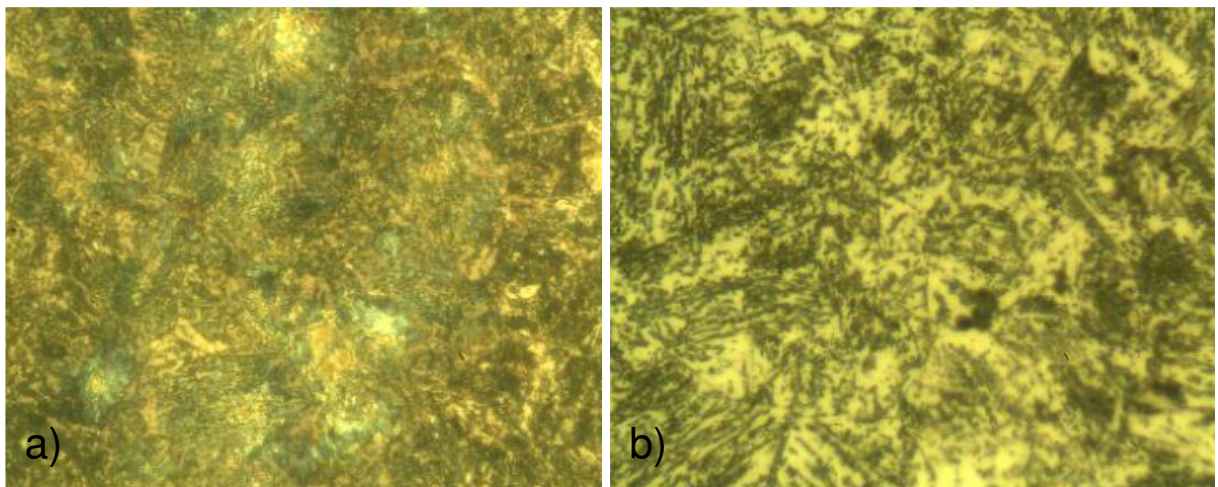
Segundo Díaz-guillén et al. (2013) o aço AISI 4340 é comumente usado na fabricação de várias peças que devem apresentar alto desgaste e condições quimicamente agressivas. Apesar de sua boa resistência, ductilidade e tenacidade, seu tempo de vida não é longo o suficiente, devido à sua baixa resistência à corrosão e propriedades tribológicas baixas.

De acordo com Bhattacharya et al. (2011) e Anazawa et al. (2012) o aço AISI 4340 é amplamente utilizado nas indústrias aeronáutica e espacial por combinarem resistência e tenacidade, podendo trabalhar nos variados tipos e níveis de solicitação.

Freitas et. Al (2016) apresentaram a microestrutura do aço AISI 4340 sem tratamento térmico onde a mesma apresentou uma microestrutura com a presença

de muitas fases de coloração distinta e bem parecidas. Na figura 20 (a) com aumento de 400x as fases claras representam as fases dúcteis ferrita e austenita e as várias fases escuras representam as fases mais duras de perlita e as ligas presentes no aço. Porém na figura 20 (b) com aumento de 1000x observa-se uma matriz de fase ferrita envolvendo a fase perlita.

Figura 20 - Microestrutura do aço AISI 4340, sem tratamento térmico, a) 400x e b) 1000x.



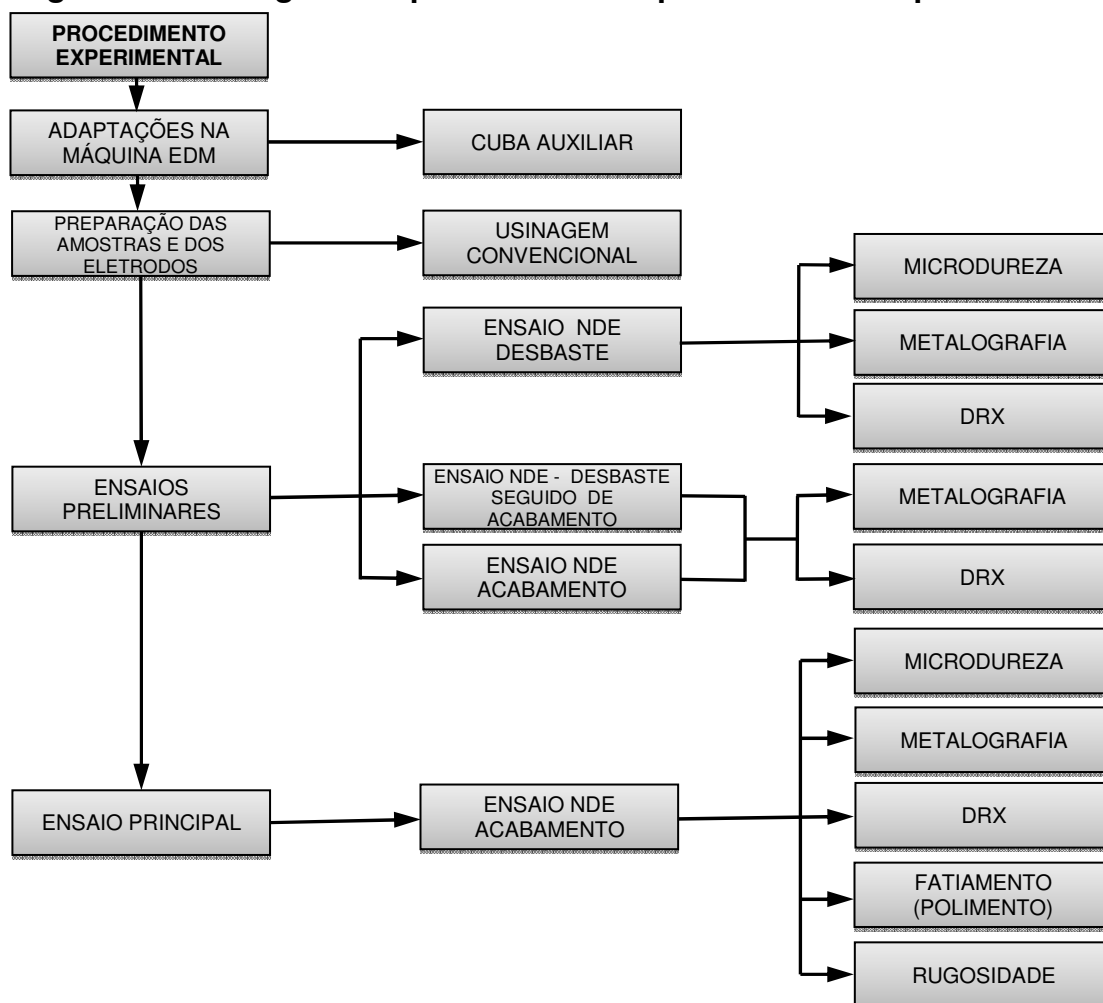
Fonte: Freitas, 2016.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento experimental deste trabalho foi dividido em quatro etapas, que compreenderam na adaptação da máquina de EDM, preparação das amostras, ensaios preliminares e ensaios principais. A adaptação da máquina foi realizada para evitar a contaminação do fluido dielétrico. A preparação das amostras foi feita em máquinas convencionais (serra de fita e fresadora universal). Os ensaios preliminares foram realizados para determinar os parâmetros do processo NDE e o ensaio principal foi realizado com a utilização dos melhores parâmetros adquiridos.

A figura 21 apresenta esquematicamente a sequência metodológica utilizada para que fosse atingido o objetivo deste trabalho, relacionando cada etapa com a sequência de realização das atividades experimentais.

Figura 21 - Fluxograma representativo do procedimento experimental realizado



Fonte: Autor, 2018

3.1 Eletrodo peça

Para a execução dos ensaios foi utilizado como eletrodo peça o aço AISI 4340 no estado laminado a quente (conforme recebido). Inicialmente o material foi cortado com o auxílio de uma máquina serra de fita, obtendo assim amostras com comprimento de 15 mm, as quais foram usinadas por meio de processos convencionais, de forma que as amostras ficassem com as medidas de 13mm x 19mm x 9,5mm. Essas amostras foram usinadas na EDM em pares.

3.2 Eletrodo ferramenta

O cobre eletrolítico e a grafita foram utilizados como eletrodos ferramenta para os processos de usinagem e nitretação por EDM das amostras. Por meio do processo de fresamento, foi realizada a usinagem e esquadrejamento das faces externas de cada amostra nas dimensões de 25mm x 25mm x 23mm.

3.3 Fluido dielétrico

O fluido dielétrico utilizado foi a solução de água deionizada misturada com ureia, utilizada em manipulações farmacológicas tópicas, rica em nitrogênio cerca de 46% de sua composição química. Para se obter a água deionizada foi utilizada água potável obtida pela empresa de abastecimento da região metropolitana de Belo Horizonte. Para que a mesma ficasse deionizada foi utilizado um deionizador portátil a base de resina.

A condutividade da água antes da deionização era de 102 μ S/cm e após a deionização passou a ser de 0 μ S/cm. O controle da condutividade foi efetuado com condutímetro portátil que opera na faixa de 0 a 1999 μ S/cm, incerteza de $\pm 2\%$, ilustrado na figura 22. A remoção de material na usinagem por EDM é feita utilizando como fluido dielétrico líquidos que não conduzem eletricidade para que as descargas elétricas ocorram de maneira controlada.

Figura 22 - Condutivímetro.



Fonte: Autor, 2018

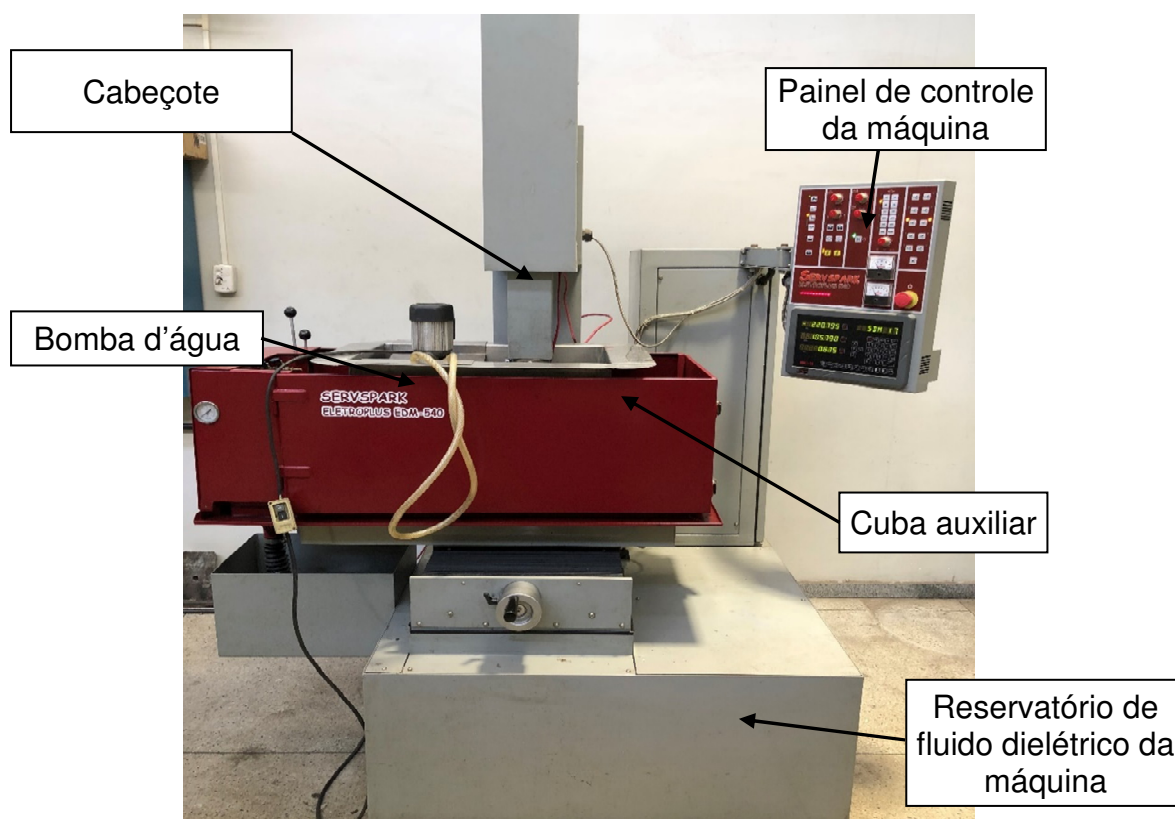
Foram preparados 30 litros de solução aquosa com concentração 33,33g/l, com a ureia farmacológica. Para medir a massa da ureia foi utilizado uma balança analítica de precisão, BEL Engineering M214Ai, com resolução 0,0001g e linearidade $\pm 0,0003g$. Esta mesma balança também foi utilizada para a avaliação das amostras, antes e após a NDE, permitindo verificar o desempenho da usinagem.

Santos (2015) realizou a NDE do aço AISI H13 utilizando soluções aquosas com concentrações 10, 20, 30 e 40g/l de ureia em água deionizada, e notou que a concentração de ureia não influenciou a espessura das camadas refundidas e nitretada. A opção de trabalhar com solução de concentração de 33,33g/l baseou-se na baixa condutividade elétrica apresentada. Destacando-se que a alta condutividade do fluido dielétrico dificulta a abertura do arco.

3.4 Máquina de EDM por penetração

Os experimentos foram realizados em uma máquina de EDM convencional por penetração, modelo Eletroplus EDM-540 da Servspark, apresentada na figura 23. Este equipamento foi adaptado, colocando uma cuba auxiliar fabricada de aço AISI 304 para evitar a contaminação do fluido da máquina e prevenir a corrosão do tanque de trabalho, causada pelo fluido dielétrico de água deionizada. Além disso, foi utilizada uma bomba centrífuga modelo CD 3002 de fabricação ASTEN com capacidade de 51 litros por minuto e pressão de 2 metros de coluna d'água (0,2 bar), motor elétrico de corrente alternada, rotação de 3100 RPM e potência de 120 Watts (0,16 CV), frequência de 60Hz. O objetivo da bomba foi proporcionar a limpeza de partículas refundidas no local da fenda de trabalho e recircular o fluido dielétrico, através de uma mangueira com jato d'água.

Figura 23 - Máquina eletroerosão por penetração utilizada no processo EDM.



Fonte: Autor, 2018.

Para a realização da NDE no aço AISI 4340 vários parâmetros foram ajustados no painel de controle da máquina, como apresentado na figura 24 e listados na tabela 3 com os parâmetros comuns a todos os ensaios e na tabela 4 com parâmetros que foram sendo ajustados durante os ensaios. Para o ajuste inicial desses parâmetros foi tomado como referência os trabalhos de Santos (2013), Santos (2015), Silva (2016) e Nicesio (2017).

Tabela 3 - Parâmetros operacionais ajustados na máquina EDM comuns a todos os ensaios

Parâmetros de trabalho	Descrição
Polaridade do eletrodo ferramenta	Positiva (+)
Fenda de trabalho (gap)	1*
Velocidade do servo	5*
Afastamento periódico da ferramenta	3*
Tempo de erosão	5*

*Parâmetros ajustados nos botões do painel de controle da máquina (sem unidade)

Fonte: Autor, 2018.

Tabela 4 - Parâmetros que foram ajustados durante as etapas dos ensaios

ETAPAS (ENSAIO NDE)	AÇO AISI 4340	ELETRODO FERRAMENTA UTILIZADO	PARÂMETROS UTILIZADOS			TEMPO DE ENSAIO (minutos)
			T _{ON} (µs)	T _{OFF} *	CORRENTE (A)	
ENSAIO PRELIMINAR INICIAL DESBASTE	AMOSTRA 1	GRAFITA	500	1,5	40	10
	AMOSTRA 2					
	AMOSTRA 3					
	AMOSTRA 4	COBRE				
	AMOSTRA 5					
	AMOSTRA 6					
ENSAIO PRELIMINAR DESBASTE SEGUIDO DE ACABAMENTO	AMOSTRA 7	GRAFITA	500	1,5	40	10
			50		10	10
	AMOSTRA 8		500	2,5	40	10
			50		10	10
	AMOSTRA 9		500	5	40	10
			50		10	10
	AMOSTRA 10	COBRE	500	1,5	40	10
			50		10	30
	AMOSTRA 11		500	2,5	40	10
			50		10	30
	AMOSTRA 12		500	5	40	10
			50		10	30
ENSAIO PRELIMINAR ACABAMENTO	AMOSTRA 13	GRAFITA	10	1	40	10
	AMOSTRA 14	COBRE				
ENSAIO PRINCIPAL ACABAMENTO	AMOSTRA 15	GRAFITA	10	1	40	5
	AMOSTRA 16					
	AMOSTRA 17					
	AMOSTRA 18	COBRE				
	AMOSTRA 19					
	AMOSTRA 20					

*Parâmetro ajustados no botão do painel de controle da máquina (sem unidade)

Fonte: Autor, 2018.

Foram realizadas 20 amostras divididas em quatro etapas, sendo três etapas com ensaios preliminares para determinar os melhores parâmetros buscando a regularidade da camada nitretada e uma etapa com os ensaios principais.

O ensaio preliminar de desbaste seguido de acabamento foi realizado em 2 etapas: uma de desbaste com T_{on} de 500 μ s e corrente de 40A onde se utilizou uma face do eletrodo ferramenta e após essa etapa o eletrodo ferramenta foi virado para uma

nova face que estivesse lisa para realizar a etapa de acabamento onde os parâmetros utilizados foram T_{on} de $50\mu s$ e corrente de 10^a . Segundo Guitrau (1997) e Kumar (2009) quanto menor for a corrente melhor acabamento superficial.

Os parâmetros que foram alterados durante os ensaios foram T_{on} , T_{off} e a corrente que segundo Guitrau (1997) reduzindo os seus valores obtêm-se usinagem de alta frequência sendo parâmetros utilizados para operações de acabamento.

Figura 24 - Painel de controle da máquina de eletroerosão.



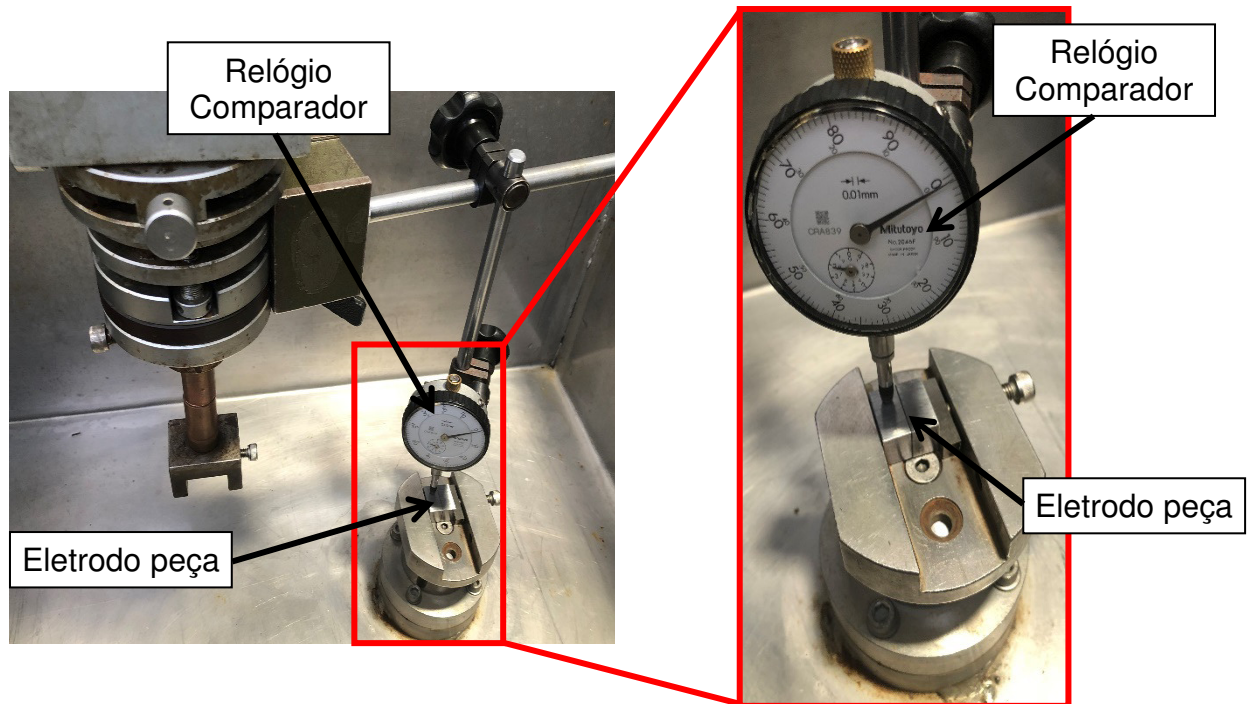
Fonte: Autor, 2018.

Visando uniformidade e paralelismo da camada nitretada foi utilizado um relógio comparador marca Mitutoyo com resolução de $0,01mm$ e uma base magnética para alinhamento dos eletrodos ferramenta e eletrodos peça conforme apresentado nas figuras 25 e 26.

A ponta do relógio comparador foi deslocada por toda a superfície da amostra (eletrodo peça) e pela superfície do eletrodo ferramenta no sentido longitudinal e transversal, quando o ponteiro do relógio parou de se mover durante o seu deslocamento foi confirmado o alinhamento dos eletrodos. Somente após o alinhamento do eletrodo peça e eletrodo ferramenta é que foi executada a usinagem por EDM, e a cada troca de eletrodo foi repetido o mesmo procedimento de

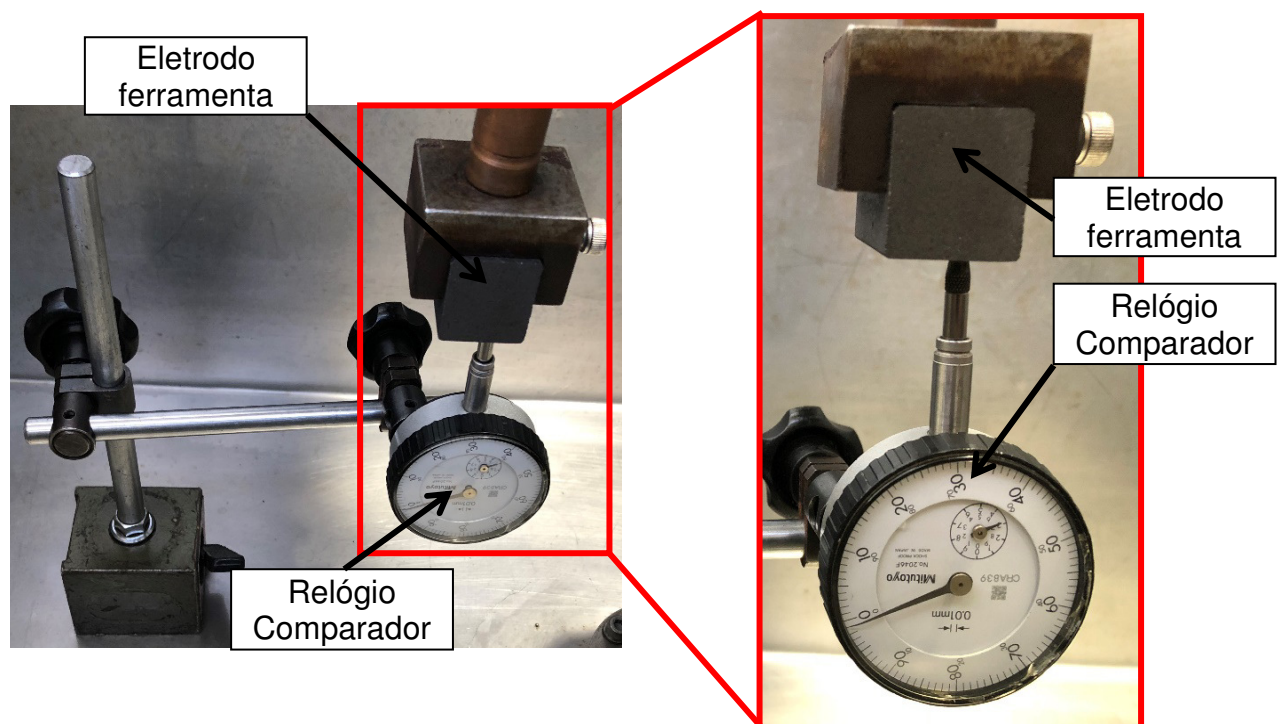
alinhamento para que pudesse garantir que todas as amostras tivessem as mesmas condições de testes.

Figura 25 - Alinhamento do eletrodo peça com relógio comparador.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 26 - Alinhamento do eletrodo ferramenta com relógio comparador.



Fonte: Autor, 2018.

3.5 Desempenho da usinagem por NDE

Os eletrodos peça e ferramenta foram pesados em balança de precisão, BEL Engineering M214Ai, com resolução 0,0001g e linearidade $\pm 0,0003g$, antes e após a usinagem por descargas elétricas, para avaliação de desempenho de usinagem EDM. Os testes foram repetidos por 3 vezes. A variação da massa foi determinada pela diferença entre as massas inicial (m_i) e final (m_f) pela equação (3). Os eletrodos de grafita foram colocados em forno tipo mufla com temperatura de 300°C por 3 horas antes e depois do processo de eletroerosão, para retirar a umidade, e pesados após a secagem em forno.

$$\Delta_m = m_i - m_f \quad (3)$$

- **Taxa de desgaste do eletrodo ferramenta (TD)**: representa o volume de material do eletrodo ferramenta perdido durante a usinagem, em um determinado tempo, expressa em mm³/min. Para quantificar a TD foi utilizada a equação 4.

$$TD = \frac{\Delta_m}{\rho \cdot t} \quad (4)$$

Onde: Δ_m = variação de massa [g], t = tempo de usinagem [min] e a constante $\rho=0,0089$ g/mm³ que corresponde ao peso específico do cobre eletrolítico e 0,0021g/mm³ que corresponde ao peso específico da grafita.

- **Taxa de remoção de material do corpo de prova (TRM)**: representa o volume de material do eletrodo peça perdido durante a usinagem, em um determinado tempo, expressa em mm³/min. Para quantificar a TRM foi utilizada a equação 5.

$$TRM = \frac{\Delta_m}{\rho \cdot t} \quad (5)$$

Onde: Δ_m = variação de massa [g], t = tempo de usinagem [min] e a constante $\rho=0,00785$ g/mm³ corresponde ao peso específico do aço AISI 4340.

-Desgaste volumétrico relativo (DVR): relaciona o volume de material perdido pelo eletrodo ferramenta em relação ao volume de material removido do eletrodo peça, dado pela razão entre TD e TRM, em percentual. Para determinar o DVR foi usada a equação 6.

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

3.6 Metalografia

Após os testes de usinagem EDM as amostras 1, 4, 7 a 15 e 18, foram preparadas de acordo com as técnicas metalográficas para a visualização da secção transversal. Para o embutimento das amostras foi utilizado a resina epóxi termo-endurecível, carregada de minerais, baixa contração e boa aderência. Essa resina possui dureza suficiente para preservação de bordas, evitando assim que a camada refundida se desprendesse durante o processo de lixamento. O lixamento foi feito de forma manual utilizando lixas de carbeto de silício com granulometria na seguinte sequência: 120, 240, 320, 600, 1000 mesh. O polimento foi feito com o auxílio de uma politriz com pasta de diamante de granulometria de 3 µm. Após a superfície obter o acabamento superficial espelhado, foi realizado o ataque com Nital 3%. As micrografias foram realizadas com auxílio de um microscópio óptico e as imagens capturadas foi por meio de uma câmera digital acoplada ao equipamento. O microscópio óptico utilizado foi o Fortel com sistema de aquisição de imagens Kontrol modelo M713.

De posse das imagens foi realizado a medição das espessuras das camadas utilizando o software AxioVision SE64 Rel. 4.9.1. Foram feitas medidas da espessura da camada nitretada e da camada refundida espaçadas entre si de 0,2mm a partir da borda da amostra, as medidas do primeiro e o último milímetro foram descartadas pela irregularidade da borda da amostra.

3.7 Microdureza

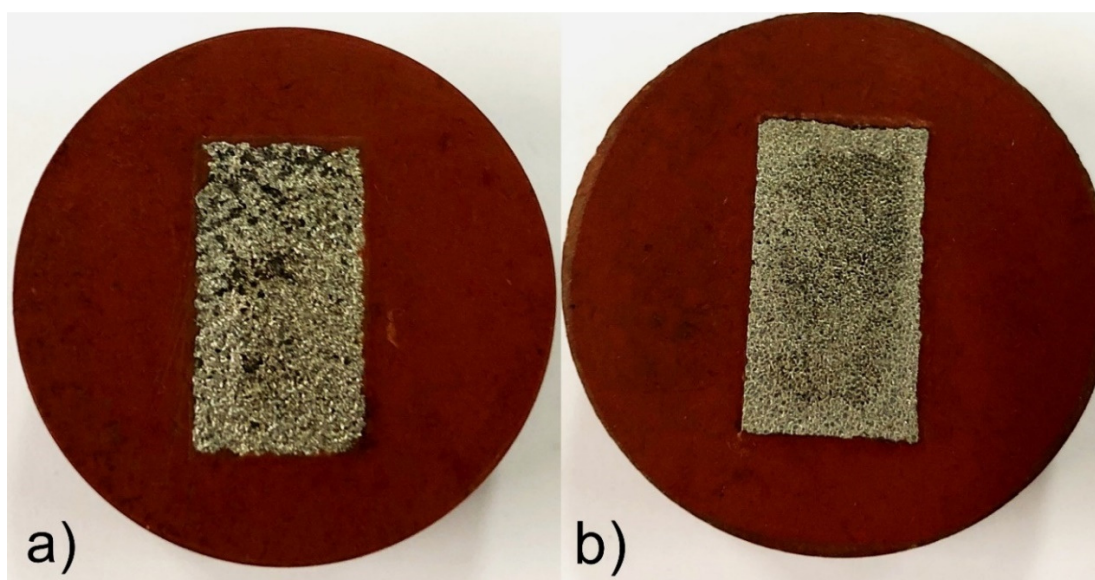
Foi realizado ensaios de microdureza Vickers (HV) com o auxílio de um microdurômetro Shimadzu modelo HVM-2T E, com microscópio óptico incorporado e

software Easy Test HVM-AD para obtenção de imagens capturadas por meio de câmera digital incorporada ao equipamento, com cargas de 10 gf a 20 segundos. As indentações foram feitas na matriz da amostra, próximo ao centro das camadas refundidas e camadas nitretadas. Foi realizado ainda um perfil de dureza para as amostras 1, 4, 15 e 18.

3.8 Fatiamento (polimento)

Duas amostras 16 e 19 foram embutidas em baquelite como apresenta a figura 27 e passaram por um processo de polimento onde tiveram sua espessura reduzida de 10 μ m em 10 μ m na região usinada e a cada redução foi realizada difração de raios x e medição de rugosidade. Para medir a redução da espessura foi utilizado um micrometro externo com capacidade de medição de 0 – 25mm e graduação 0,001mm exatidão de $\pm 2\mu$ m.

Figura 27 - Amostras embutidas antes do procedimento de polimento superficial. a) amostra 16 usinada com eletrodo de grafita e b) amostra 19 usinada com eletrodo de cobre.



Fonte: Autor, 2018.

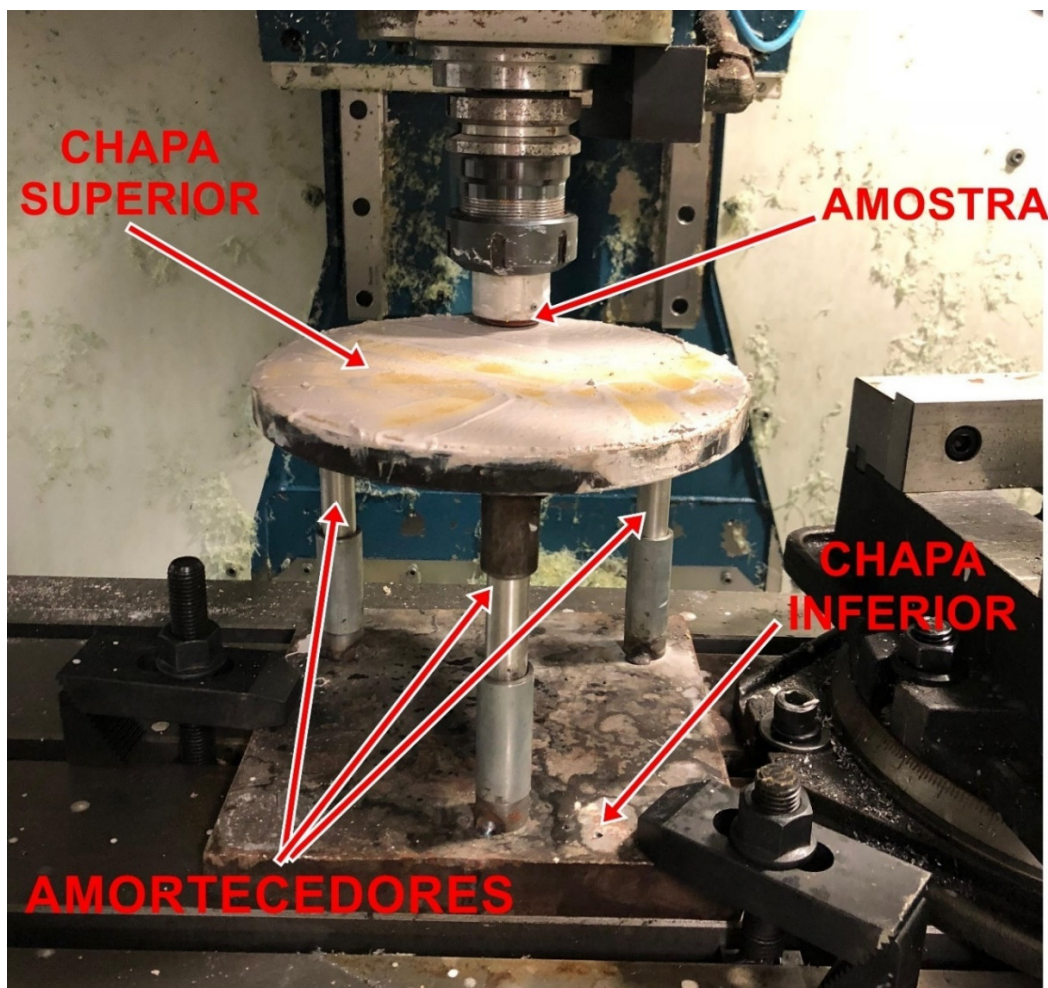
Para o polimento foi utilizado um dispositivo apresentado na figura 28 composto de duas chapas de metal e entre elas 3 amortecedores com molas que fazem com que a pressão exercida durante o polimento seja constante e uniforme. O abrasivo

utilizado foi alumina de $0,3\mu\text{m}$.

O dispositivo foi colocado dentro de uma fresadora com comando numérico computadorizado - CNC marca Romi modelo Discovery 560 com comando Fanuc 21i-MB onde foi feito um programa Apêndice 1 para que a amostra colocada no eixo principal da máquina além de rotacionar em seu próprio eixo translada-se em movimento de espiral da borda da chapa superior ao centro, e do centro para a borda da chapa em movimento constante.

Foi retirado na superfície usinada $50\mu\text{m}$ na amostra 16, usinada com eletrodo de grafita, e $20\mu\text{m}$ na amostra 19, usinada com eletrodo de cobre, e foi feita uma micrografia de toda a extensão da secção transversal para verificar a retirada da camada refundida.

Figura 28 - Dispositivo utilizado para polimento das amostras.



Fonte: Autor, 2018.

3.9 Difração de raios X

A presença de nitretos foi verificada por difração de raios x convencional, Bragg-Brentano ou θ - 2θ utilizando um difratômetro Shimadzu XRD – 7000X – “Ray Diffractometer”. Os parâmetros de varredura estão descritos na tabela 5.

Tabela 5 - Principais parâmetros adotados na Difração de raios x.

Radiação	CuK α
Tensão	40,0 kV
Corrente	30,0 mA
Modo de varredura	Tempo fixo
Faixa de varredura	20° a 120°
Passo da amostragem	0,02°
Tempo de varredura por ponto	5 s

Fonte: Autor, 2018.

Foi realizada nas amostras 16 e 19 o polimento usando o dispositivo para retirada de camadas de 10 μ m e feito a difração até que não encontrasse a presença de nitretos para se comprovar a profundidade de penetração do nitrogênio na amostra conforme foi feito por Santos (2013) em seus trabalhos. A cada retirada de 10 μ m, antes da amostra ser colocada na máquina para realização da difração, a resina era quebrada para não ocorrer a contaminação da difração com picos de baquelite. Para um novo polimento de 10 μ m a amostra era embutida novamente e esse ciclo se repetiu até a amostra apresentar acabamento polido.

Cada difração utilizando os parâmetros da tabela 5 tiveram um tempo de duração em média de 7 horas. Para que a mesma fosse realizada em um tempo menor os parâmetros foram ajustados e apresentados na tabela 6 tendo como base os parâmetros utilizados por Ranieri (2010) em seus trabalhos. O tempo médio com esses parâmetros foi de cerca de 50 minutos e foram utilizados nas amostras que passaram pelo processo de fatiamento.

Tabela 6 - Parâmetros adotados na Difração de raios x das amostras do processo de fatiamento

Radiação	CuK α
Tensão	40,0 kV
Corrente	30,0 mA
Modo de varredura	Tempo fixo
Faixa de varredura	20° a 120°
Passo da amostragem	0,04°
Tempo de varredura por ponto	1 s

Fonte: Autor, 2018.

3.10 Rugosidade

A rugosidade das amostras foi medida utilizando um rugosímetro portátil da marca Tesa modelo Rugosurf 20 com ponta de diamante apresentado na figura 29. Foram feitas 6 medições em cada amostra no centro da superfície usinada. A Configuração utilizada para a medição das rugosidades foi a da rugosidade media R_a , comprimento de amostragem cut-off 2,5mm por 5 medições.

Figura 29 - Rugosímetro Tesa.



Fonte: Autor, 2018.

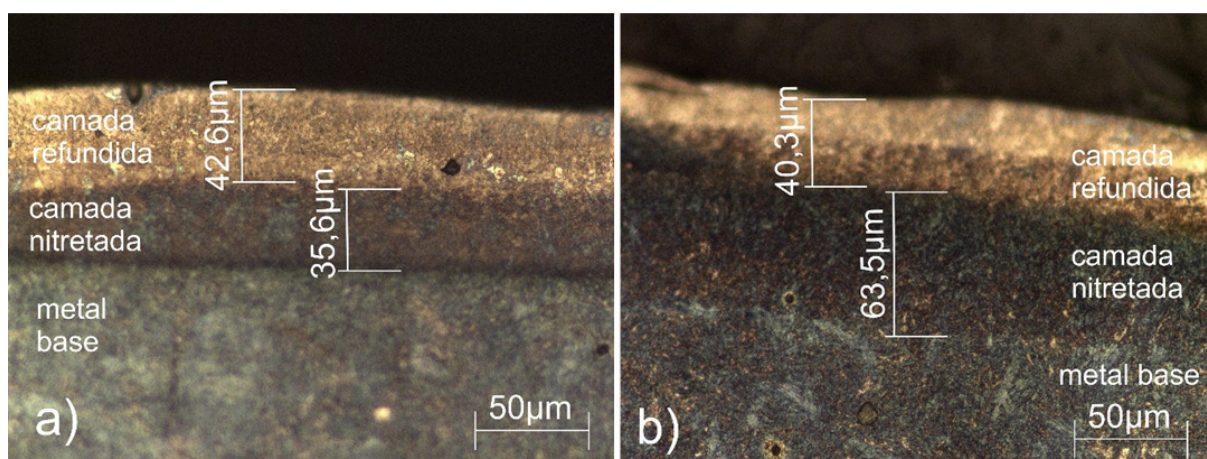
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo foram apresentados a formação das camadas refundida, nitretada e valor das espessuras que foram medidos a partir das imagens de microscopia óptica. A rugosidade foi avaliada durante a etapa de fatiamento. A formação de nitretos no aço AISI 4340 foi avaliada pela variação na dureza das camadas nitretadas e identificação de picos típicos em difratogramas de raios X, e ainda os resultados da avaliação dos parâmetros que medem o desempenho durante o processo de NDE.

4.1 Formação das camadas nitretadas

A figura 30 apresenta a micrografia das amostras 4 e 1 do ensaio preliminar de NDE desbaste, obtidas por microscopia óptica, onde evidencia a formação de duas regiões distintas, sendo elas camada refundida, mais superficial e de coloração mais clara, e a camada nitretada, camada mais escura logo abaixo da refundida. A formação destas camadas foi confirmada quando se utilizou os dois tipos de eletrodos ferramenta, cobre amostra 4 (a) e grafita amostra 1 (b). Nota-se diferença de espessura da camada nitretada comparando a usinagem com os eletrodos, cobre e grafita. Observa-se ainda uma camada nitretada de aproximadamente de $63,5\mu\text{m}$ quando se utilizou o eletrodo de grafita e de $35,6\mu\text{m}$ quando se utilizou o eletrodo de cobre.

Figura 30 - Micrografia seção transversal $T_{on}500\mu\text{s}$ $T_{off}1,5$ e corrente 40A (a) usinada eletrodo de cobre amostra 4 e (b) usinada eletrodo de grafita amostra 1.



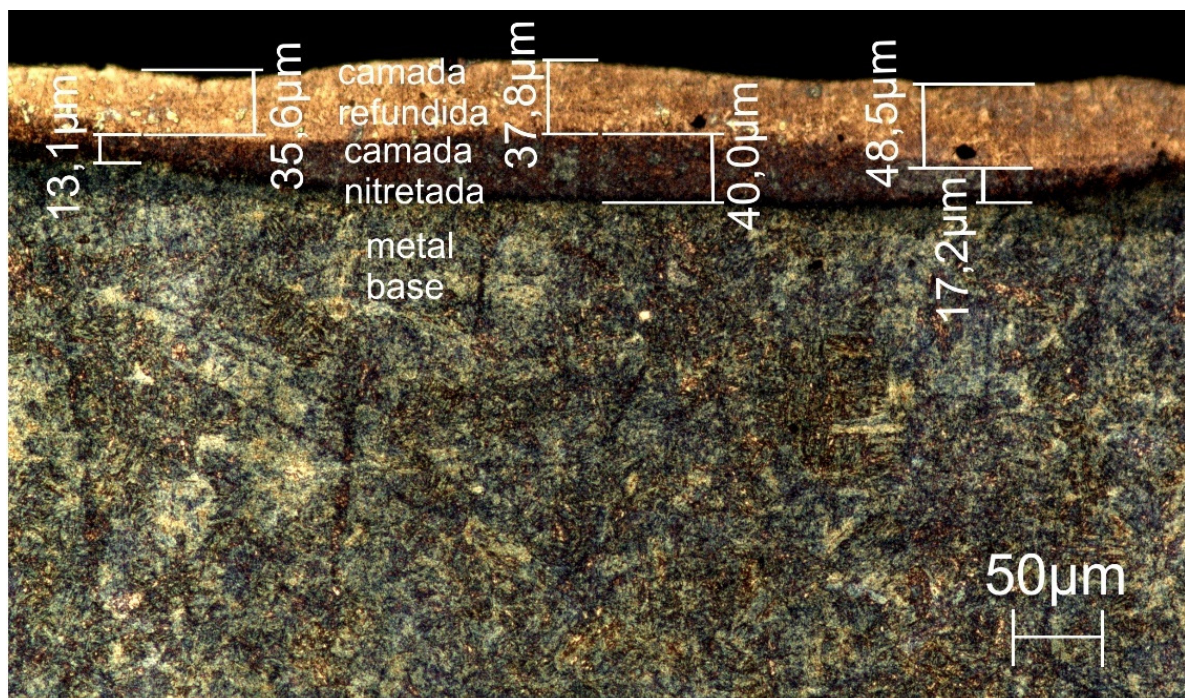
Fonte: Autor, 2018.

Observa-se ainda na figura 30 com imagem ampliada em 500x, que as camadas tendem a ter uma espessura regular, mas observando na figura 31 e 32 com ampliação de 200x constata-se que a camada nitretada e a camada refundida não são regulares assim.

Na figura 31 (amostra 4) observa-se que a maior espessura encontrada na camada nitretada foi de aproximadamente de 40 μ m e observando as bordas da imagem a espessura foi diminuindo para valores próximos de 13 μ m. Constata-se que a camada refundida manteve uma regularidade melhor que a camada nitretada.

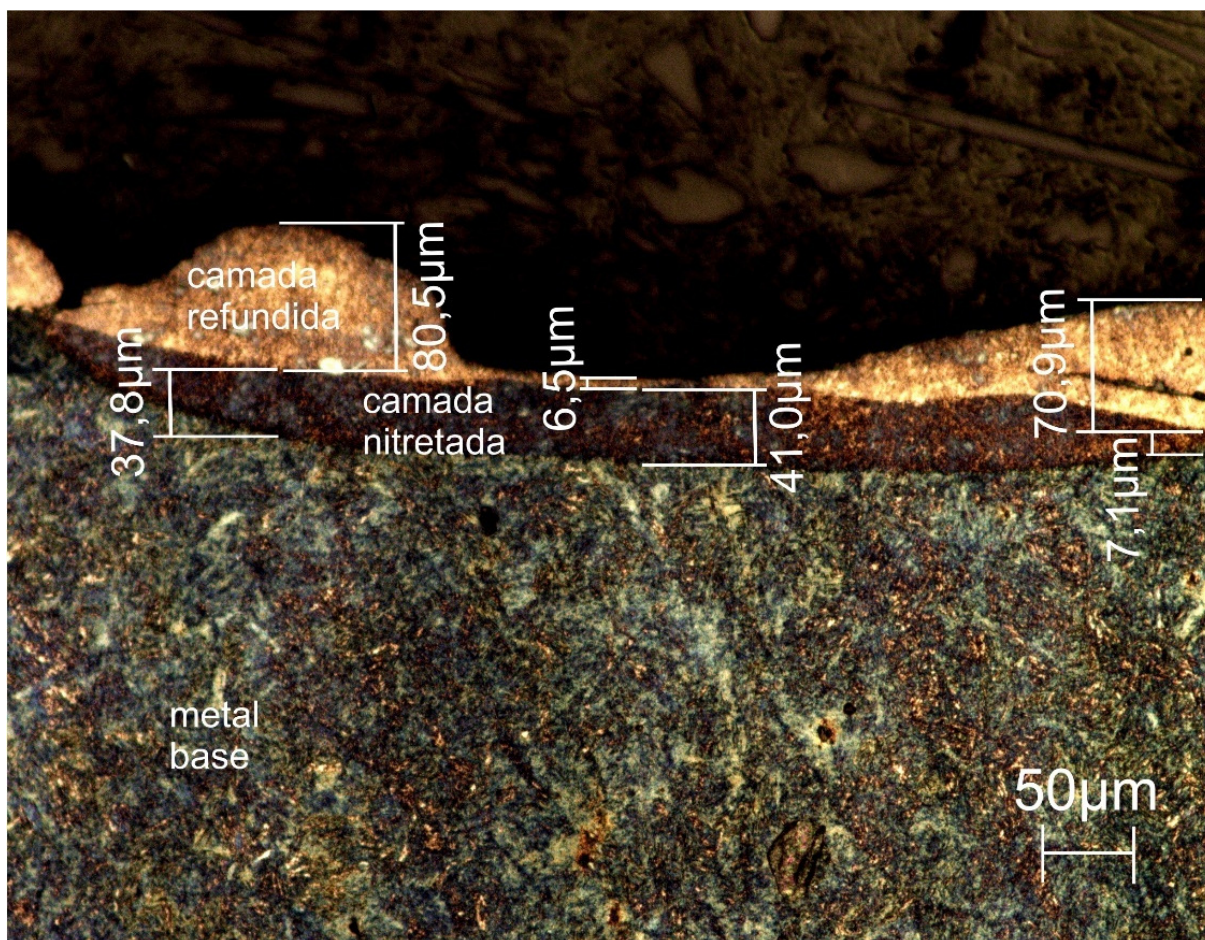
Na figura 32 (amostra 1) que foi usinada com eletrodo de grafita pode-se observar a mesma ocorrência de camada nitretada, no centro da imagem uma espessura maior que nas bordas e constata-se também uma curvatura maior da camada nitretada na amostra 1 que na amostra 4, nota-se ainda uma irregularidade maior na camada refundida. Acredita-se que as camadas refundida e nitretada apresentaram-se irregulares possivelmente pelo T_{on} 500 μ s que foi maior em relação a Santos (2013) e Nicesio (2017) que usaram um T_{on} de 100 μ s.

Figura 31 - Micrografia seção transversal da amostra 4 usinada com eletrodo de cobre T_{on} 500 μ s T_{off} 1,5 e corrente 40A.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 32 - Micrografia secção transversal da amostra 1 usinada com eletrodo de grafita $T_{on}500\mu s$ $T_{off}1,5$ e corrente 40A.

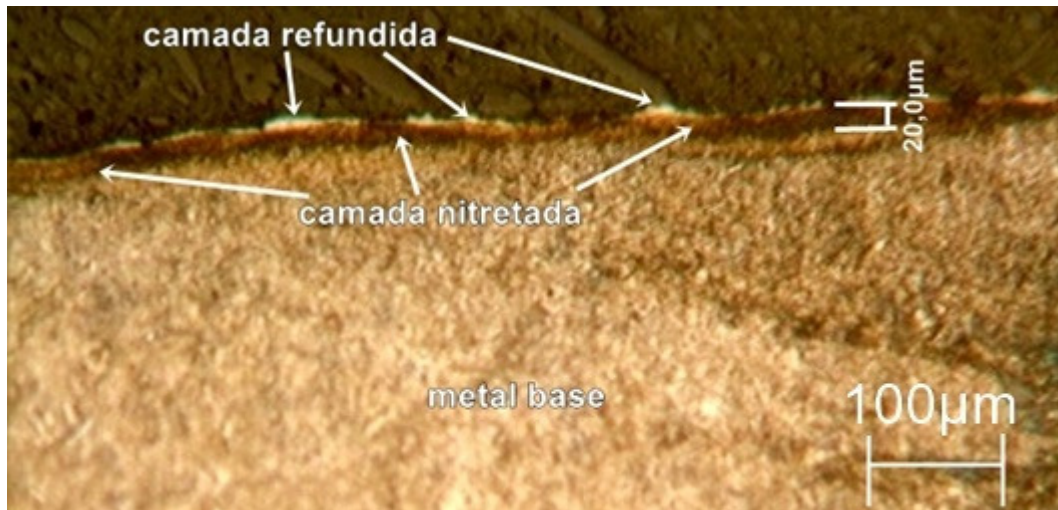


Fonte: Autor, 2018.

Devido as irregularidades nas camadas das amostras apresentadas nas figuras 31 e 32 foi alterado os parâmetros para o ensaio usinagem de desbaste com ($T_{on}500\mu s$, corrente 40A) seguido de acabamento ($T_{on}50\mu s$, corrente 10A) e variando o T_{off} de 1,5 a 5. Foram usinadas as amostras de 7 a 12 buscando assim uma regularidade das camadas.

A figura 33 apresenta a micrografia da amostra 10 onde pode-se observar a camada nitretada com espessura de aproximadamente $20\mu m$ em toda a sua extensão. Observa-se ainda uma pequena camada refundida em alguns pontos, ressalta-se que durante a etapa de acabamento as amostras usinadas com o eletrodo ferramenta de cobre tiveram o tempo de usinagem de 30 minutos, pois com os parâmetros utilizados para essa usinagem a remoção de material quase não ocorreu.

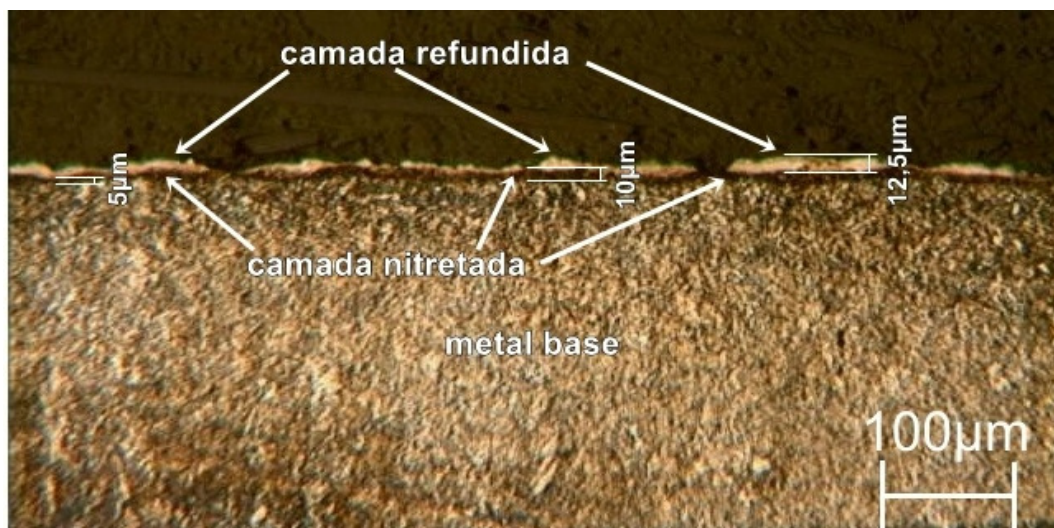
Figura 33 - Micrografia da amostra usinada com eletrodo de cobre, amostra 10, desbaste ($T_{on}500\mu s$, corrente 40A) seguido de acabamento ($T_{on}50\mu s$, corrente 10A) e T_{off} de 1,5.



Fonte: Autor, 2018.

A figura 34 apresenta a micrografia da amostra 11 usinada com eletrodo de cobre, pode-se observar que a camada refundida ficou maior que a amostra da figura 10 e uma camada nitretada menor, sua espessura é aproximadamente de 10 μm . A camada se apresenta com uma regularidade melhor que a amostra 10, mas sua espessura é menor.

Figura 34 - Micrografia da amostra usinada com eletrodo de cobre, amostra 11, desbaste ($T_{on}500\mu s$, corrente 40A) seguido de acabamento ($T_{on}50\mu s$, corrente 10A) e T_{off} de 2,5.

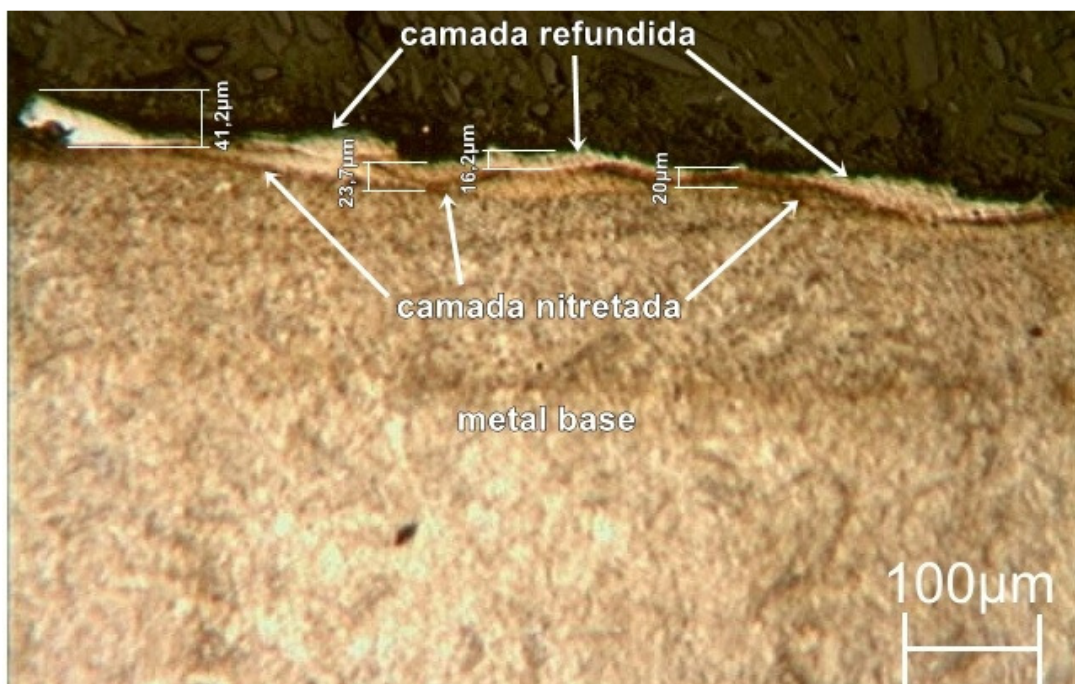


Fonte: Autor, 2018.

A figura 35 apresenta a micrografia da amostra 12 usinada com eletrodo de cobre, pode-se observar que a camada refundida ficou com maior irregularidade que as amostras das figuras 33 e 34 e a camada nitretada com regiões de espessura aproximada de $20\mu\text{m}$. A camada nitretada apresenta-se bastante irregular e nas extremidades da figura quase não se nota a presença. Observa-se também que a amostra 12 utilizou um T_{off} de 5 onde a irregularidade das camadas se acentuou.

A pequena espessura da camada nitretada nessas amostras podem ser atribuídas a quase não usinagem, elas foram usinadas durante 30 minutos na operação de acabamento e usinou menos de $0,2\text{mm}$ na espessura da amostra.

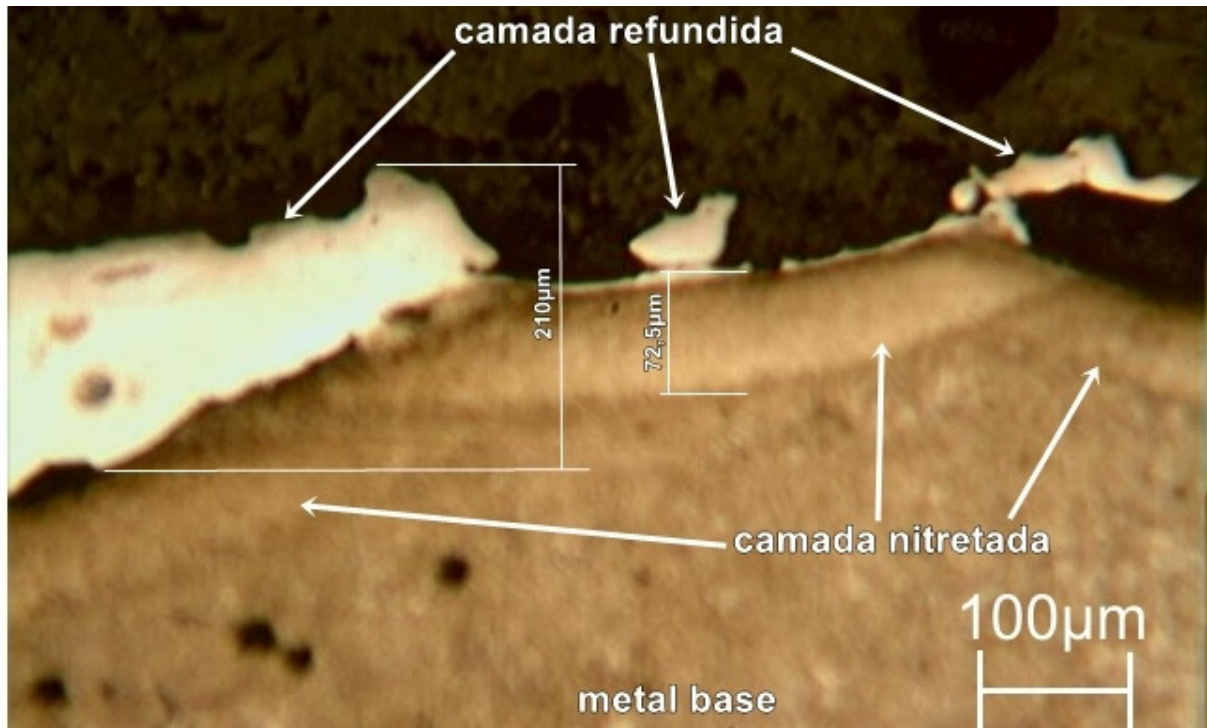
Figura 35 - Micrografia da amostra usinada com eletrodo de cobre, amostra 12, desbaste ($T_{\text{on}}500\mu\text{s}$, corrente 40A) seguido de acabamento ($T_{\text{on}}50\mu\text{s}$, corrente 10A) e T_{off} de 5.



Fonte: Autor, 2018.

A figura 36 apresenta a micrografia da amostra 7 usinada com eletrodo de grafita, observa-se a camada refundida com grande espessura chegando a $210\mu\text{m}$, a camada nitretada com espessura aproximada de $72,5\mu\text{m}$. Essas espessuras de camadas são maiores que em todas as amostras que se utilizou o eletrodo de cobre, mas pode-se observar a irregularidade das mesmas, observa-se que ainda camada refundida se desprendendo da amostra.

Figura 36 - Micrografia da amostra usinada com eletrodo de grafita, amostra 7, desbaste ($T_{on}500\mu s$, corrente 40A) seguido de acabamento ($T_{on}50\mu s$, corrente 10A) e T_{off} de 1,5.

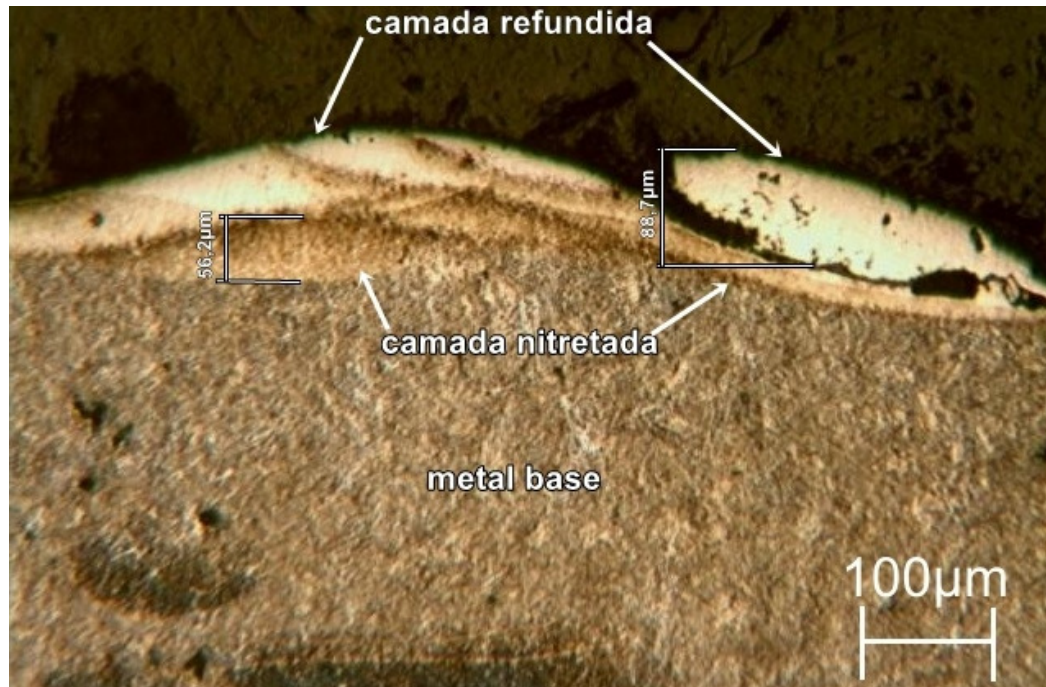


Fonte: Autor, 2018.

A figura 37 apresenta a micrografia da amostra 8 usinada com eletrodo de grafita, pode-se observar a camada refundida com espessura aproximada de 88,7μm e a camada nitretada com espessura aproximada de 56,2μm. Se comparada a figura 36 da amostra 7 que também foi usinada com eletrodo de grafita essa amostra apresentou as camadas com espessuras menores, aproximadamente 88,7μm de camada refundida e 56,2μm de camada nitretada, e apresenta também muita irregularidade das camadas.

A figura 38 apresenta a micrografia da amostra 9 usinada com eletrodo de grafita observa-se pouca camada refundida espessura de 33,7μm e a camada nitretada com regularidade maior que as outras amostras usinadas com eletrodo de grafita, mas espessura menor aproximadamente 40μm. Observa-se espessuras das camadas maiores nas amostras usinadas com eletrodo de grafita, mas camadas mais irregulares que as encontradas com as amostras usinadas com o eletrodo de cobre.

Figura 37 - Micrografia da amostra usinada com eletrodo de grafita, amostra 8, desbaste ($T_{on}500\mu s$, corrente 40A) seguido de acabamento ($T_{on}50\mu s$, corrente 10A) e T_{off} de 2,5.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 38 - Micrografia da amostra usinada com eletrodo de grafita, amostra 9, desbaste ($T_{on}500\mu s$, corrente 40A) seguido de acabamento ($T_{on}50\mu s$, corrente 10A) e T_{off} de 5.



Fonte: Autor, 2018.

Após a realização do ensaio de desbaste com acabamento, não se obteve amostras com uma regularidade de camadas que pudessem ser trabalhadas com um processo para a retirada da camada refundida, assim foi realizado um teste alterando os parâmetros para uma usinagem de acabamento, não se reduziu a corrente, pois segundo o trabalho de Santos (2015) o aumento da corrente elétrica se mostrou um fator para o aumento na espessura da camada nitretada.

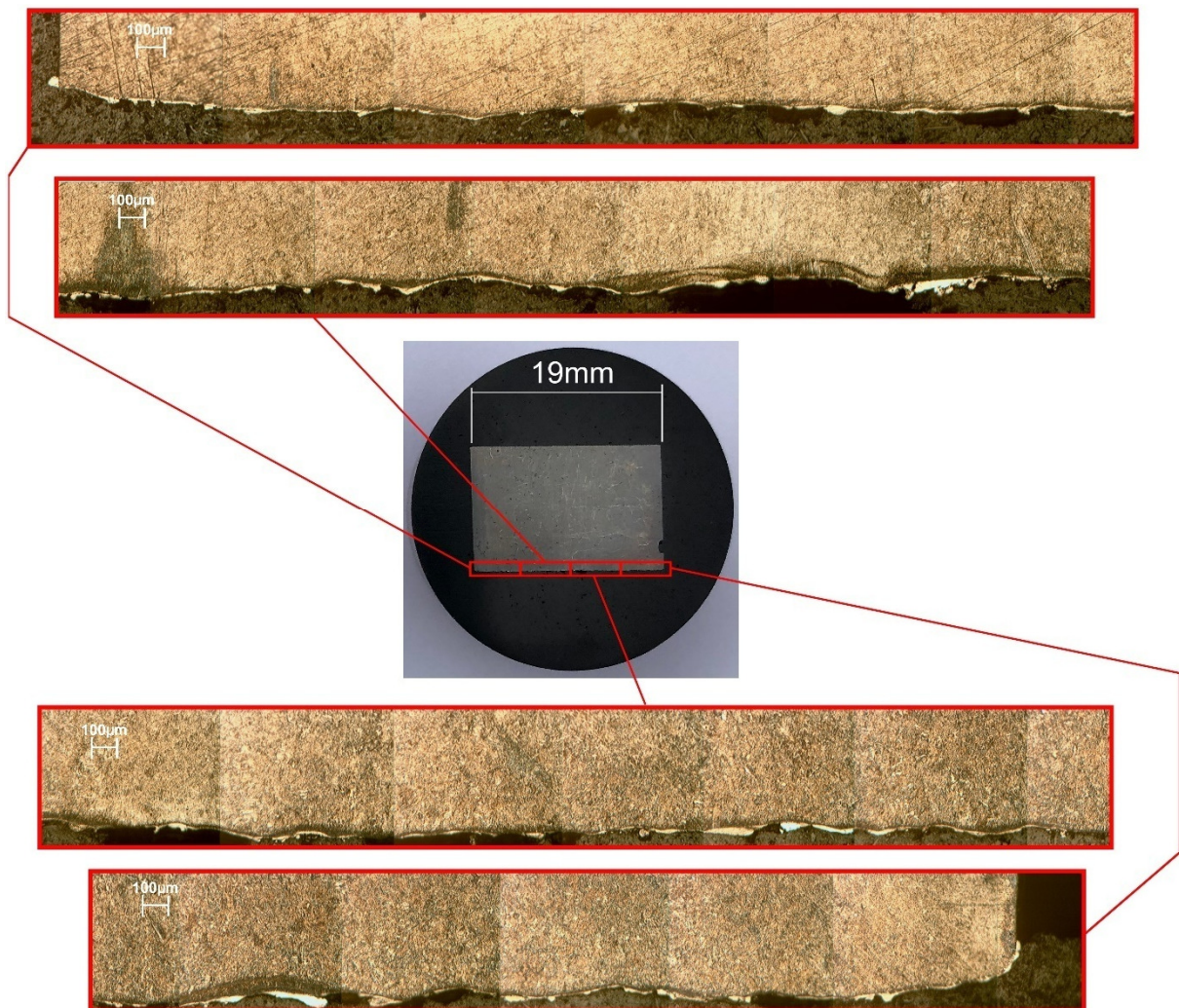
Muthuramalingam (2019) pode avaliar que a corrente de pico é o fator mais importante para o aumento da camada refundida, devido a sua maior influência na determinação da energia da centelha no processo de EDM. Também foi observado que o eletrodo tem a quantidade considerável de contribuição na determinação da espessura da camada refundida no processo EDM. O que pode ser observado nos ensaios o eletrodo de grafita apresentou uma camada refundida maior.

Como a corrente de pico é um fator importante para o aumento da camada nitretada, ela foi mantida em 40A e foram modificados o T_{on} para 10 μ s e o T_{off} para 1.

Molinetti et al. (2015) usou em seus trabalhos pó de Si e Mn adicionado ao fluido dielétrico para melhorar a uniformidade da camada refundida. Segundo Torres, Puertas e Luis (2015) as superfícies sujeitas a polaridade positiva apresentam uma superfície mais lisa, em linha com uma fusão mais homogênea do material.

As figuras 39 (amostra 13) e 40 (amostra14) apresentam as micrografias de toda a secção transversal das amostras ampliação de 100x como feito por Silva (2012) em seus trabalhos, as amostras tem 19mm de comprimento, e foi utilizado eletrodo de grafita e de cobre com T_{on} 10 μ s, T_{off} 1 e corrente 40A.

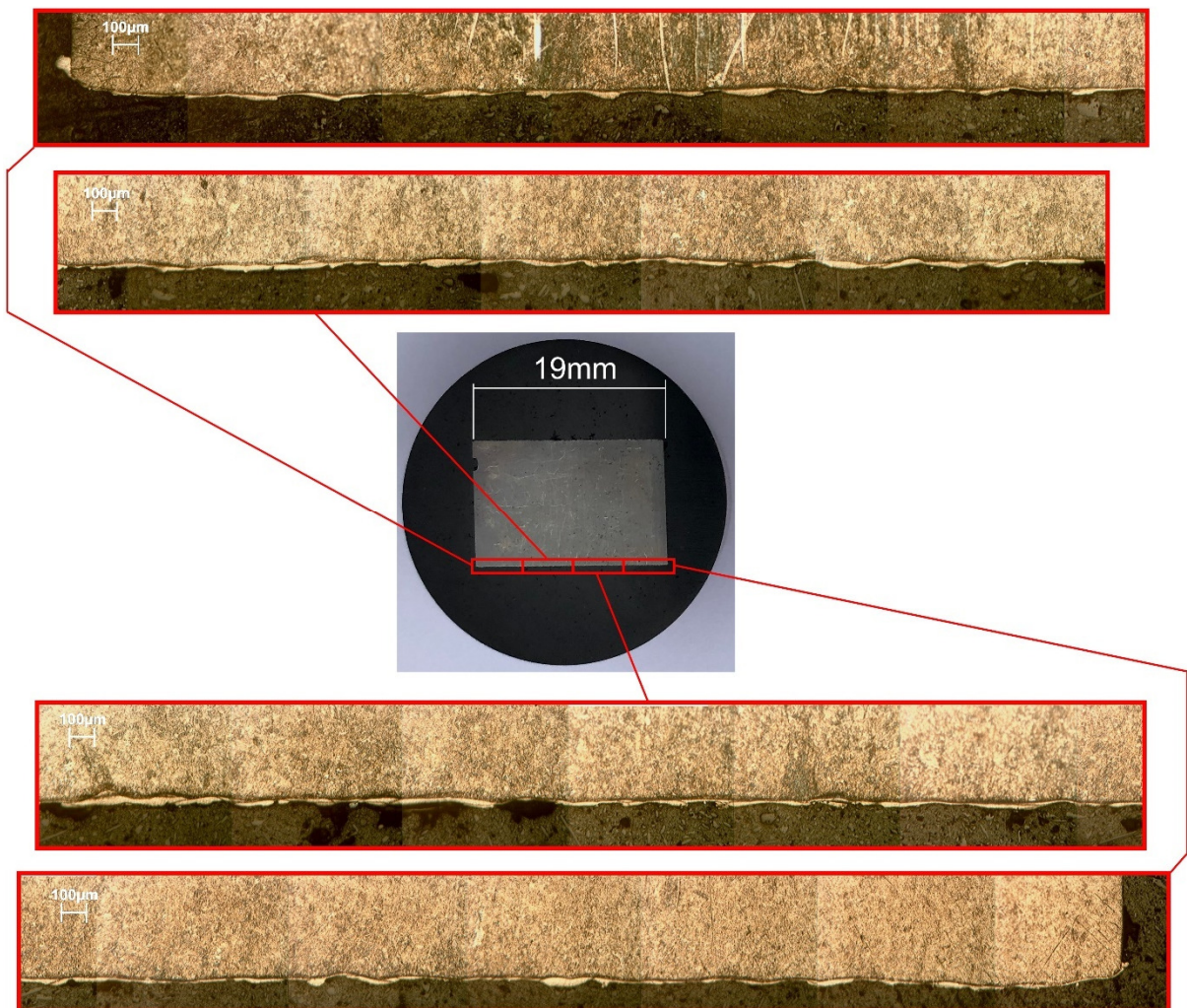
Figura 39 - Micrografia da secção transversal da amostra 13 usinada com eletrodo de grafita ($T_{on}10\mu s$, e $T_{off} 1$ e corrente 40A).



Fonte: Autor, 2018.

Pode-se observar na micrografia da amostra 13 a irregularidade das camadas mesmo se utilizando parâmetros que favoreçam uma usinagem com acabamento superficial melhor.

Figura 40 - Micrografia da secção transversal da amostra 14 usinada com eletrodo de cobre ($T_{on}10\mu s$, e $T_{off} 1$ e corrente 40A).

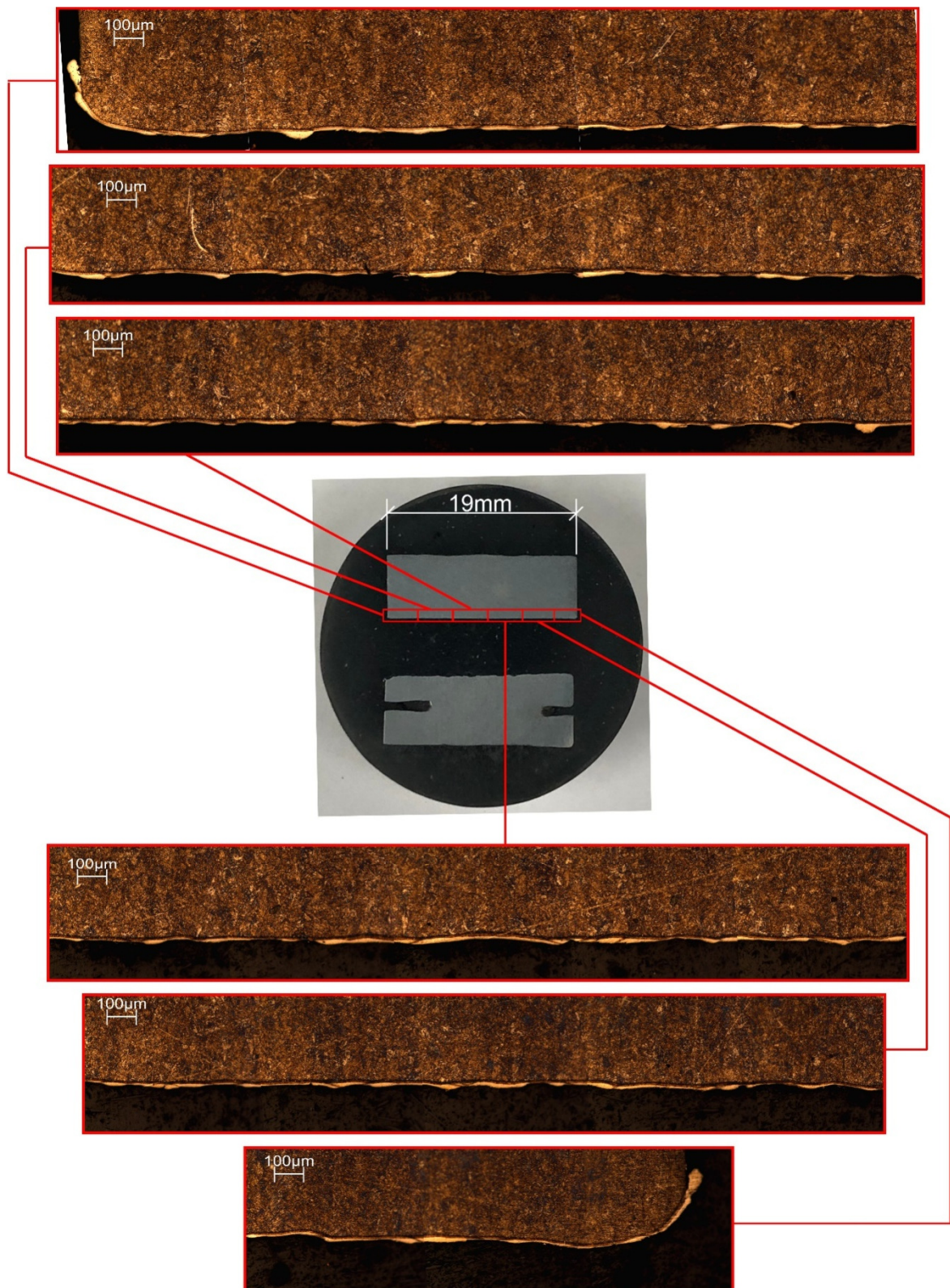


Fonte: Autor, 2018.

Pode-se observar na micrografia da amostra 14 que as camadas ficaram com uma regularidade. A vantagem da regularidade é que pode possibilitar a retirada da camada refundida.

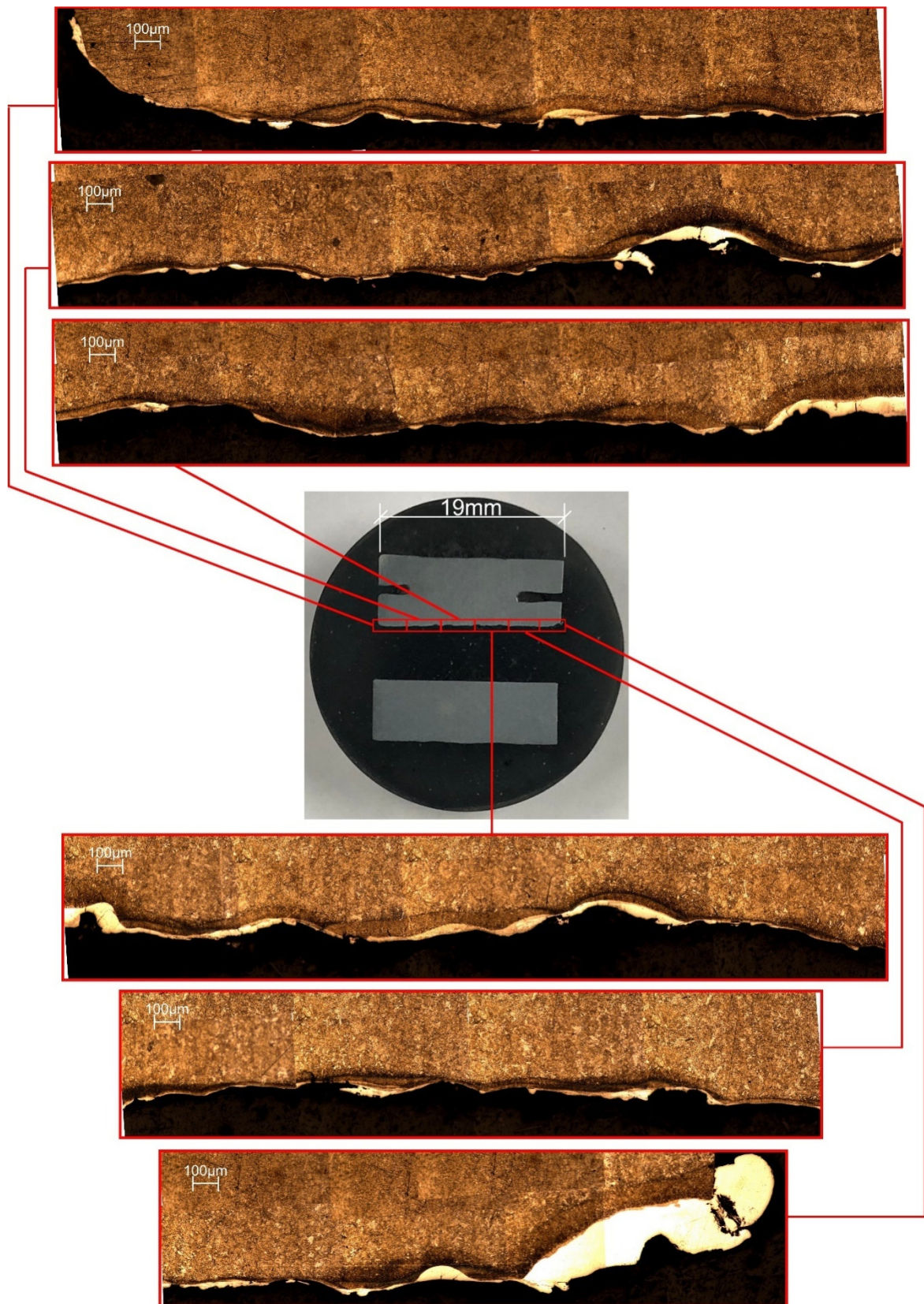
Sendo essa regularidade constatada na usinagem com eletrodo de cobre foi realizado assim os ensaios principais onde a figura 41 usinada com eletrodo de cobre e figura 42 usinada com eletrodo de grafita apresentam a micrografia do ensaio principal, foi utilizada uma ampliação de 200x.

Figura 41 – Micrografia da secção transversal da amostra 18 usinada com eletrodo de cobre ($T_{on}10\mu s$, e $T_{off} 1$ e corrente 40A).



Fonte: Autor, 2018.

Figura 42 – Micrografia da secção transversal da amostra 15 usinada com eletrodo de grafita ($T_{on}10\mu s$, e $T_{off} 1$ e corrente 40A).



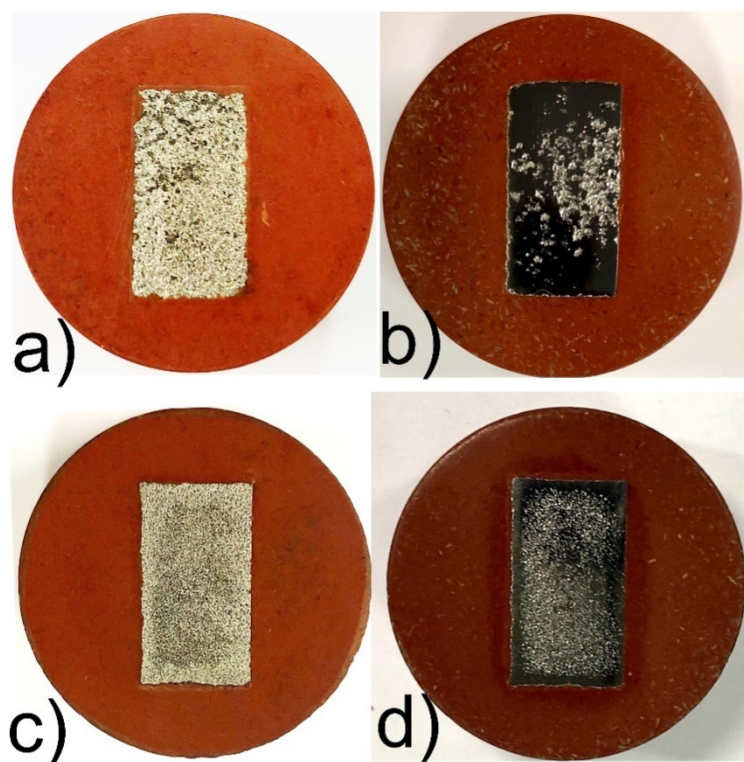
Fonte: Autor, 2018.

Observando as figuras 41 e 42 pode-se verificar a diferença de regularidade, a amostra 18 usinada com eletrodo de cobre tem suas camadas bem regulares, pode-se observar a camada nitretada em toda a extensão da amostra o que possibilita a retirada da camada refundida.

Encontra-se na amostra 15 usinada com eletrodo de grafita camadas nitretadas de espessura maior, mas nota-se também uma maior irregularidade das camadas, nota-se cavidades profundas em vários locais da secção transversal, isso impossibilita a retirada somente da camada refundida, pois ao retirar material para deixar a camada regular tiraria toda a camada nitretada.

As amostras 16 e 19 passaram pelo processo de fatiamento e ao retirar 50 μ m e 20 μ m respectivamente foi feita a microscopia da secção transversal para evidenciar a retirada da camada refundida. A figura 43 apresenta as amostras antes e depois do polimento e as figuras 44 e 45 apresentam a micrografia da secção transversal.

Figura 43 - Amostra 16 a) inicial, b) após retirada 50 μ m, amostra 19 c) inicial e d) após retirada de 20 μ m



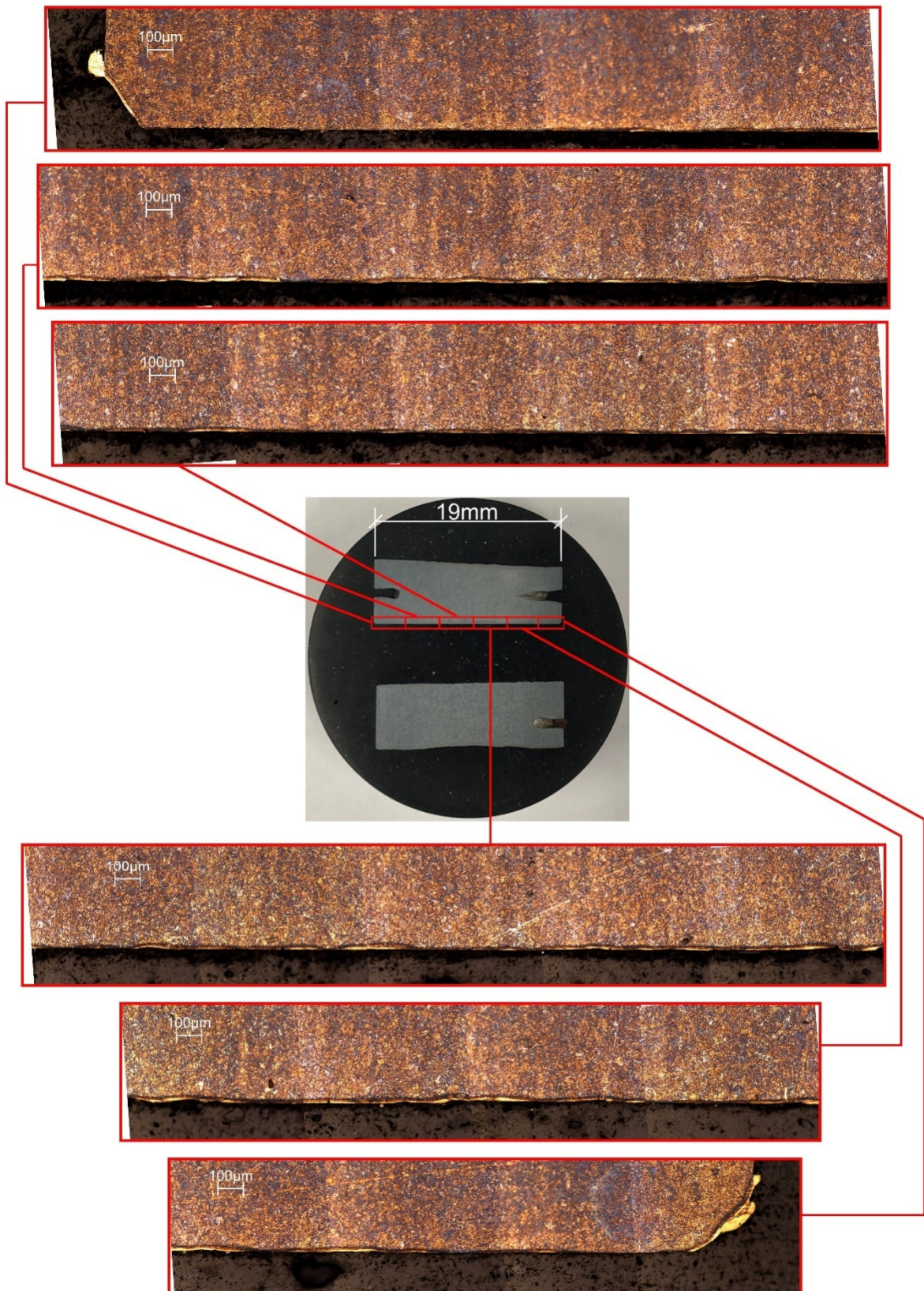
Fonte: Autor, 2018.

Figura 44 – Micrografia da secção transversal da amostra 16 usinada com eletrodo de grafita e após a retirada de 50µm com polimento ($T_{on}10\mu s$, e $T_{off} 1$ e corrente 40A).



Fonte: Autor, 2018.

Figura 45 – Micrografia da secção transversal da amostra 16 usinada com eletrodo de cobre e após a retirada de 20 μ m com polimento (T_{on} 10 μ s, e T_{off} 1 e corrente 40A).



Fonte: Autor, 2018

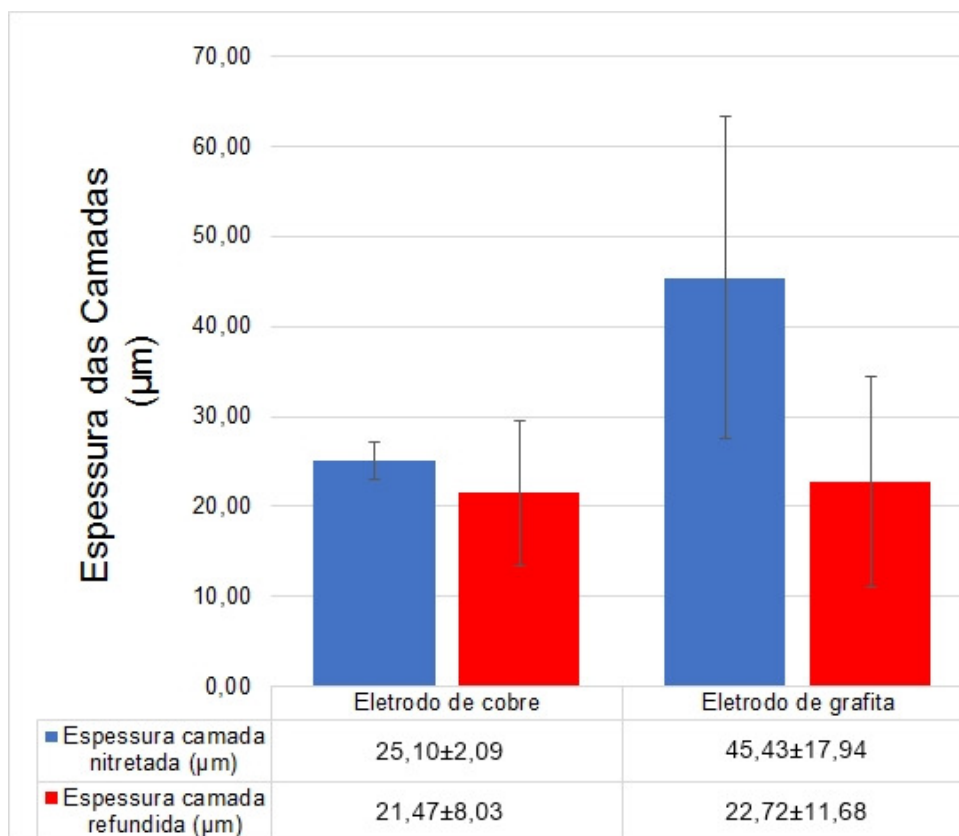
Observa-se na figura 44 que mesmo após a retirada de 50µm na espessura da amostra a mesma ainda continuou muito irregular precisando assim que fosse retirado mais material para que a superfície se tornasse regular o que possivelmente retiraria boa parte da camada nitretada deixando somente os locais onde ocorreram crateras que acabam nitretando a uma profundidade maior.

Observando-se a figura 45 pode-se notar a regularidade que o polimento promoveu na superfície, percebe-se ainda pontos com uma pequena porção de camada refundida, mas a superfície já encontra-se bem regular não havendo cavidades ou crateras nesta situação.

4.1.1 Espessura das camadas

A figura 46 apresenta a espessura das camadas nitretada e refundida utilizando os eletrodos ferramenta de cobre eletrolítico e grafita realizados no ensaio principal.

Figura 46 - Espessura das camadas no ensaio principal.



Fonte: Autor, 2018

Pode-se observar que a espessura da camada nitretada utilizando o eletrodo de grafita é maior, mas pode-se notar que o desvio padrão é muito alto pela irregularidade da camada. A camada refundida utilizando os dois eletrodos ficaram com espessuras bem parecidas onde o desvio padrão com o eletrodo de grafita é maior devido as maiores irregularidades da camada. Santos (2016) utilizou como eletrodo peça o aço AISI 4140 e obteve espessura de $11,8\mu\text{m}$ na camada nitretada utilizando o eletrodo de cobre e $12,3\mu\text{m}$ com o eletrodo de grafita. Na camada refundida obteve $9,4\mu\text{m}$ para o eletrodo de cobre e $9,8\mu\text{m}$ para o eletrodo de grafita.

Pode-se observar o ganho de espessura acima de 100% em relação ao encontrado por Santos (2016) para os dois eletrodos.

4.2 Rugosidade

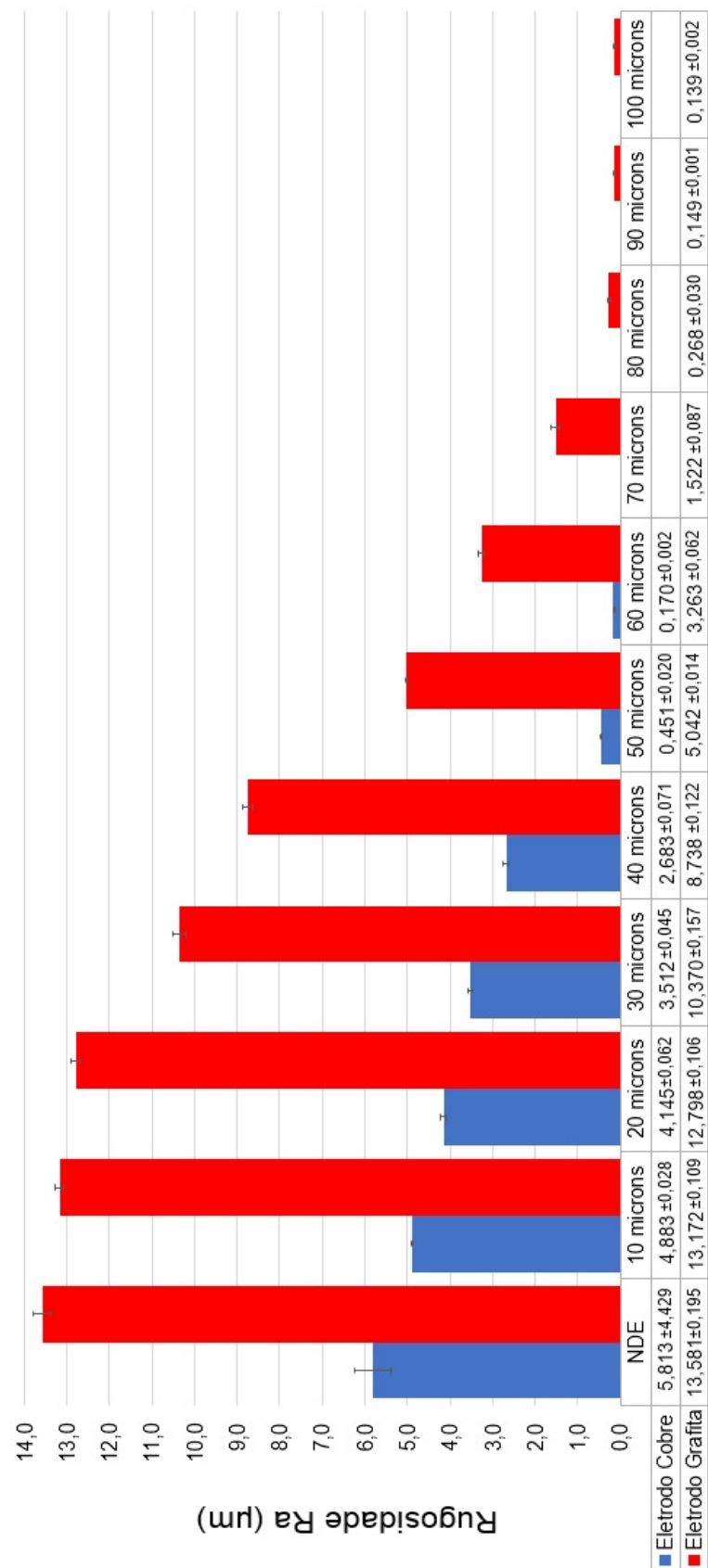
No trabalho de Torres, Puertas e Luis (2015) os parâmetros que mais influenciaram a rugosidade superficial foram a intensidade da corrente e o T_{on} . O menor valor encontrado para rugosidade R_a foram com intensidade de corrente de 4A e T_{on} $50\mu\text{s}$.

A figura 47 apresenta as médias das rugosidades do ensaio principal medidas na amostra após o ensaio NDE acabamento ($T_{on}10\mu\text{s}$, e T_{off} 1 e corrente 40A) e após cada retirada de 10 microns de espessura.

Pode ser observado que a rugosidade inicial para o eletrodo de cobre é cerca de 2,3 vezes menor que a rugosidade com o eletrodo de grafita e com 60 microns retirado observa-se a rugosidade com eletrodo de cobre é menor que $0,2\mu\text{m}$ de rugosidade e que para o eletrodo de grafita somente ficou abaixo deste valor quando se retirou 0,9 microns.

De acordo com Muttamara et al. (2016) o eletrodo de grafita produz na superfície da amostra rugosidade de valores maiores que o encontrado com o eletrodo de cobre, este fenômeno pode ser explicado como o pó de grafita originado do eletrodo fazem com que a camada superficial da amostra se torne mais áspera do que se utilizando o eletrodo de cobre.

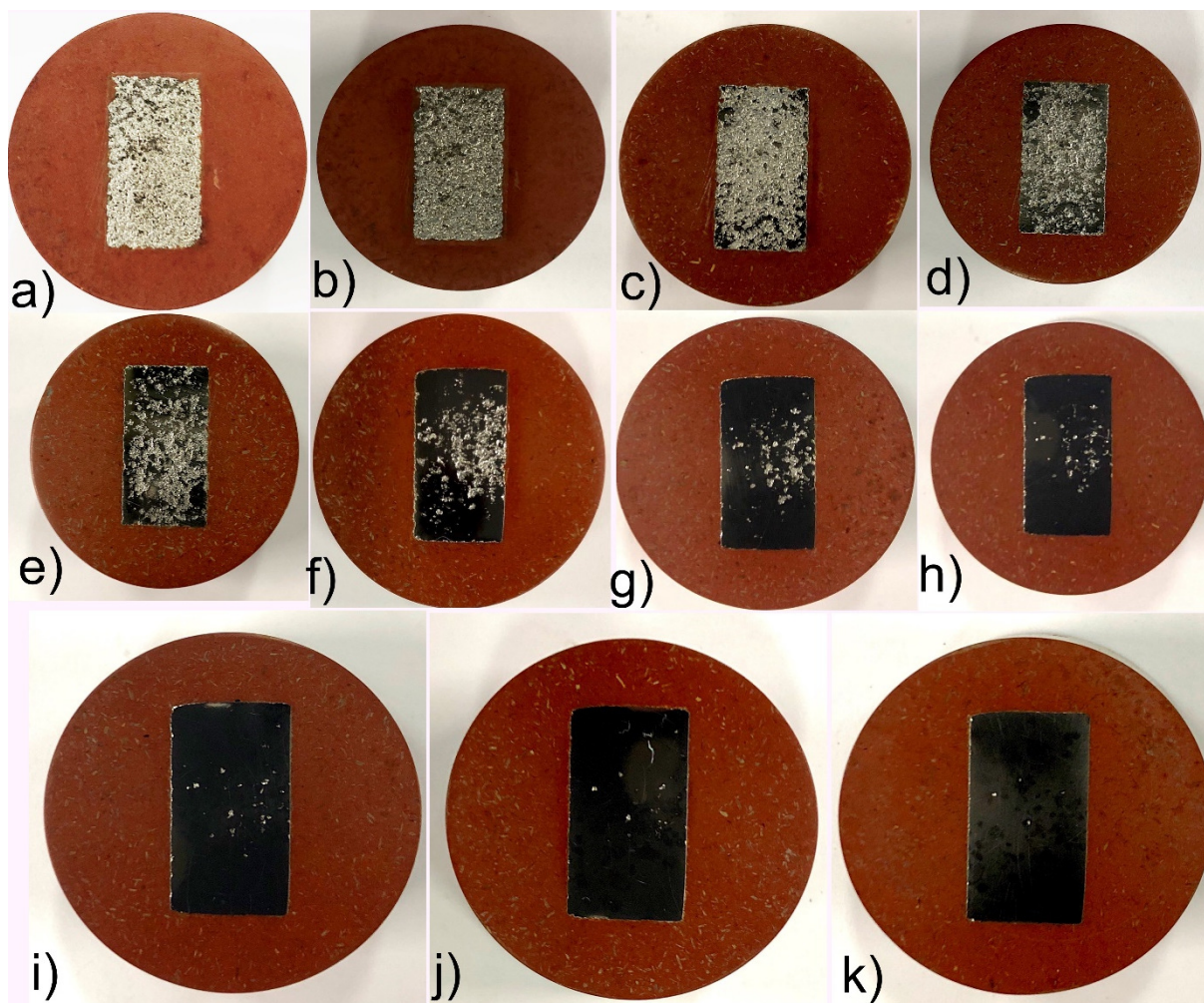
Figura 47 - Médias das rugosidades das amostras usinadas com eletrodo de cobre e grafita.



Fonte: Autor, 2018.

As figuras 48 e 49 apresentam as imagens das amostras usinadas com eletrodo de grafita e cobre após a NDE e a retirada de camadas de 10 microns.

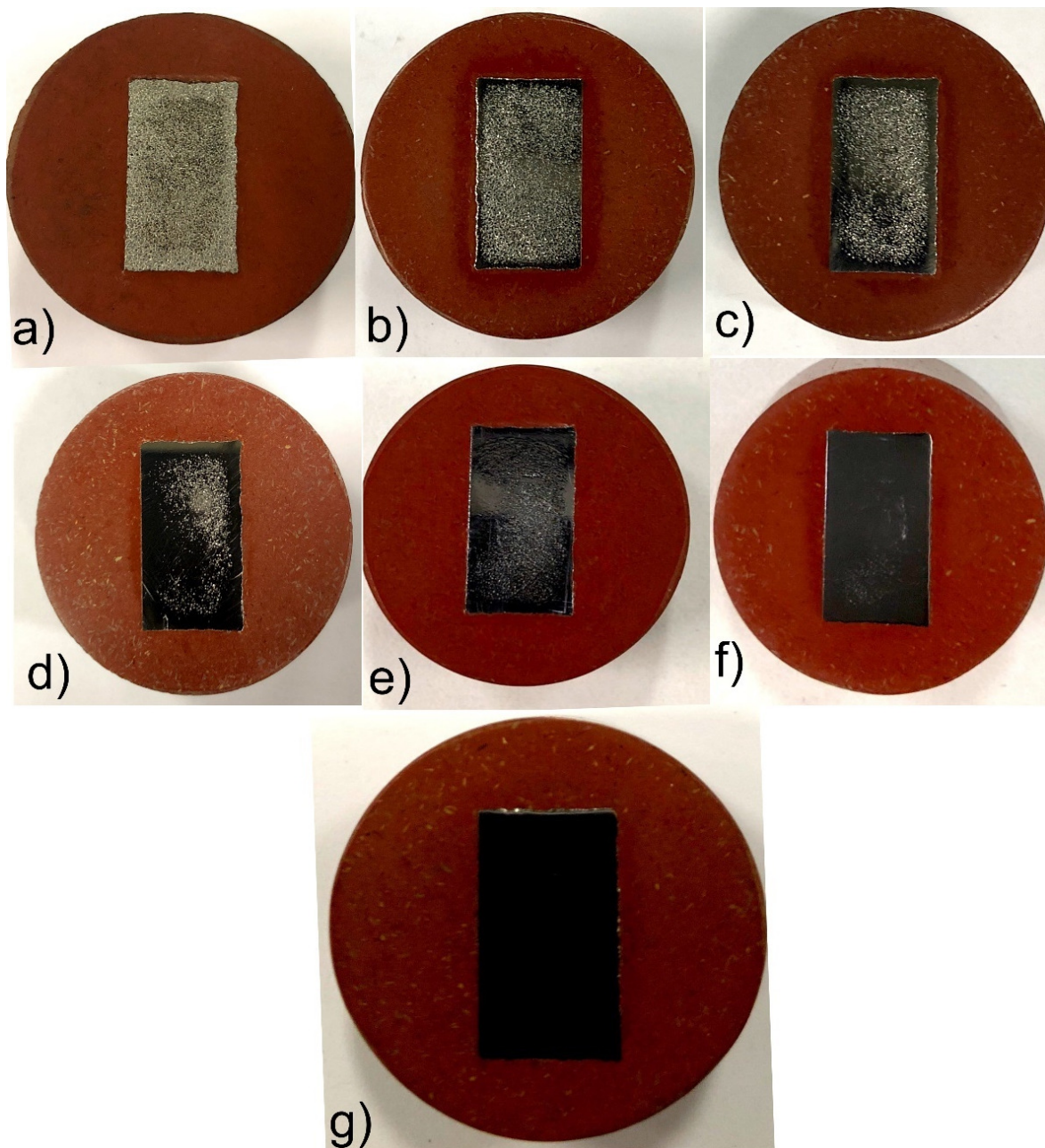
Figura 48 - Amostra usinada com eletrodo de grafita e após retirada de 10 em 10 microns. a) NDE, b) 10 microns, c) 20 microns, d) 30 microns, e) 40 microns, f) 50 microns, g) 60 microns, h) 70 microns, i) 80 microns, j) 90 microns, k)100 microns.



Fonte: Autor, 2018.

Observa-se que após a retirada de 10 microns de espessura a amostra foi apresentando um aspecto de polimento começando inicialmente pelas bordas da amostra. Observa-se ainda alguns pontos brancos na figura 48(k) onde a mesma ainda não apresenta toda a sua superfície polida.

Figura 49 - Amostra usinada com eletrodo de cobre e após retirada de 10 em 10 microns. a) NDE, b) 10 microns, c) 20 microns, d) 30 microns, e) 40 microns, f) 50 microns, g) 60 microns.



Fonte: Autor, 2018.

Na amostra usinada com eletrodo de cobre observa-se também que a cada retirada de 10 microns de espessura a mesma foi apresentando um aspecto de polimento iniciando pelas bordas da amostra. Nota-se na figura 49 (g) que toda a superfície apresenta aspecto de polimento diferente do que aconteceu com a amostra usinada com eletrodo de grafita.

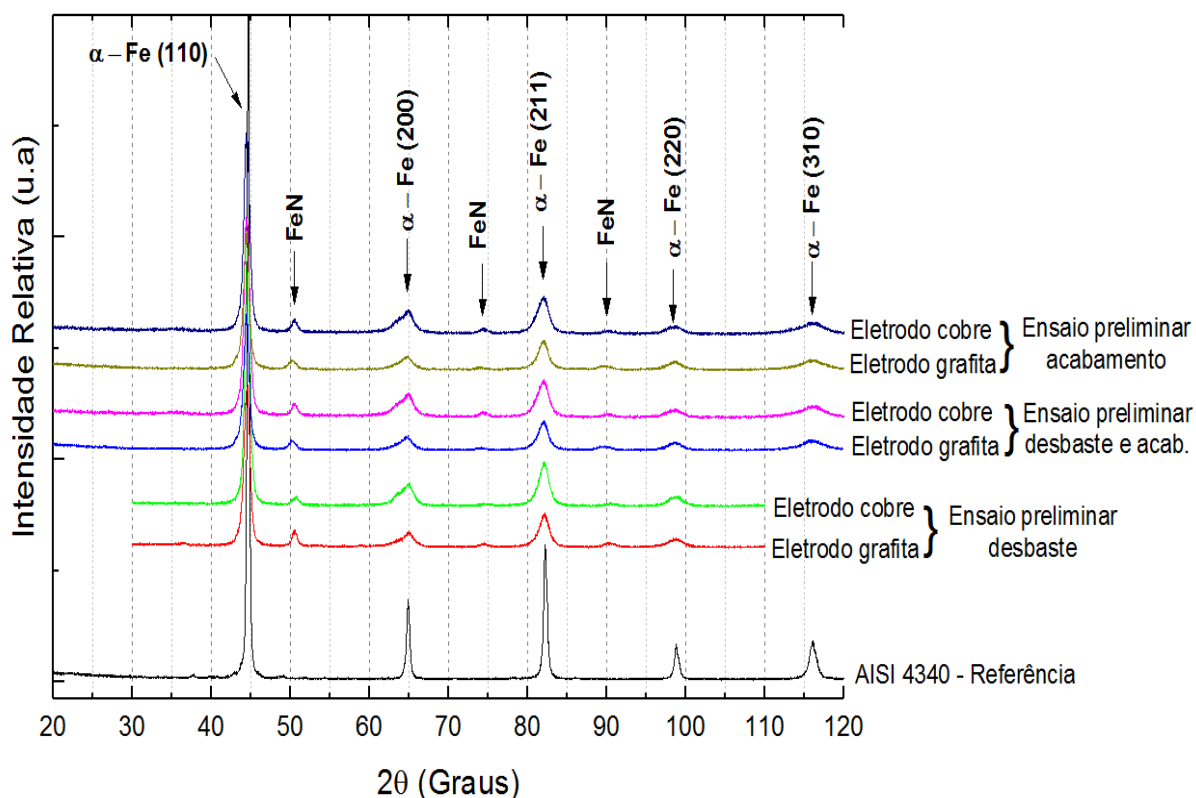
4.3 Difração de Raios X

A análise dos difratogramas permitiu identificar as fases majoritárias presentes em todas as amostras, constituídas pelo elemento ferro. A orientação cristalográfica (110), Fe- α (ccc – cúbica de corpo centrado), foi predominante, conforme ilustra a figura 50.

Após identificar as fases majoritárias buscou-se identificar os possíveis picos de nitretos de ferro. Segundo Santos (2015) a pequena espessura das camadas nitretadas faz com que o volume difratado seja reduzido de tal forma que eventuais reflexões provenientes das camadas nitretadas sejam fracas.

Os picos identificados nos difratogramas são compatíveis com os nitretos de ferro apontados por Ribeiro et al (2008), Santos et al (2011), Santos (2015) e Nicesio (2017).

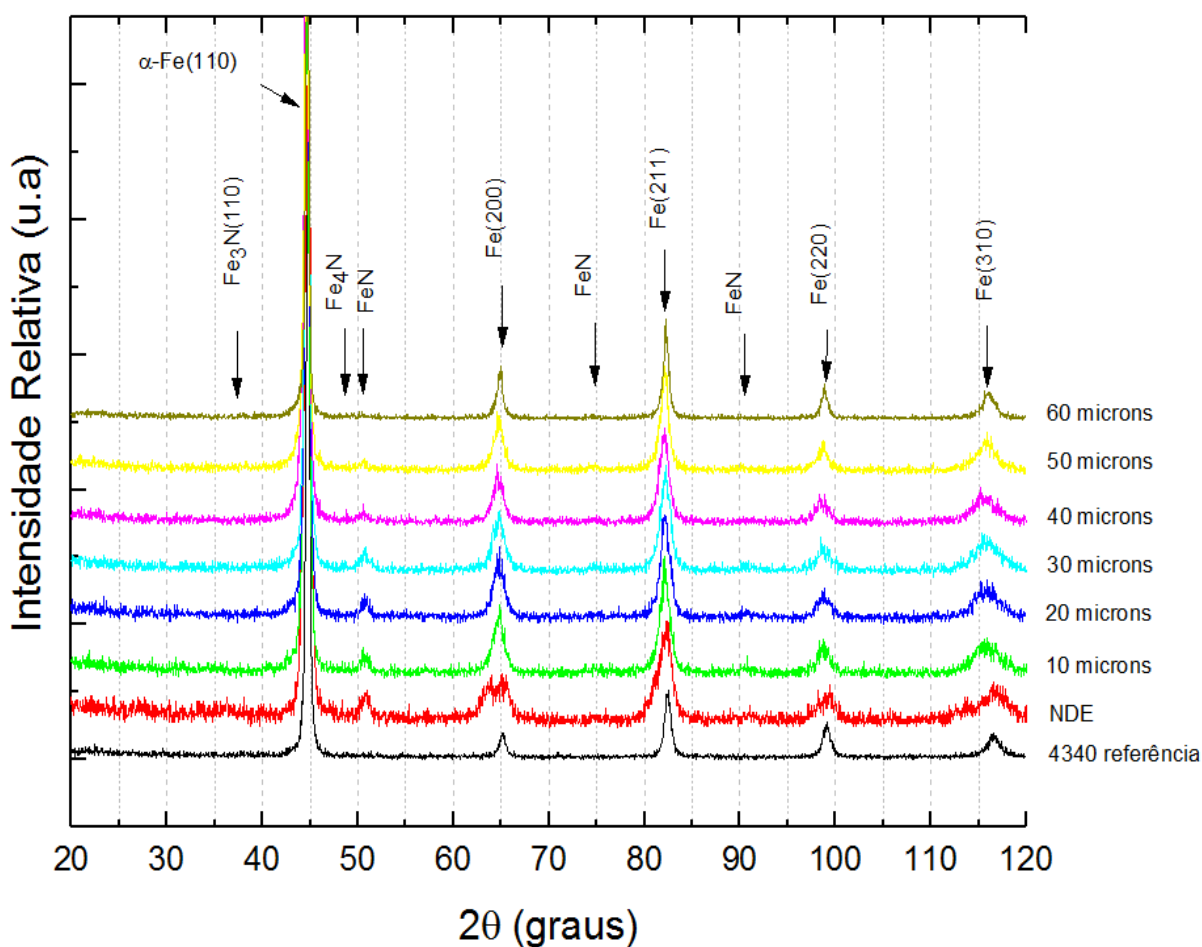
Figura 50 - Difratograma do aço AISI 4340 referência e nitretado nos ensaios preliminares.



Fonte: Autor, 2018.

A figura 51 apresenta o difratograma da amostra do ensaio principal que foi usinada com eletrodo de cobre e que foi realizado o fatiamento. Foram feitas difrações após cada fatiamento de 10µm. Santos (2013) realizou o fatiamento em seus trabalhos para comprovar a profundidade de penetração do nitrogênio em suas amostras de aço AISI 4140.

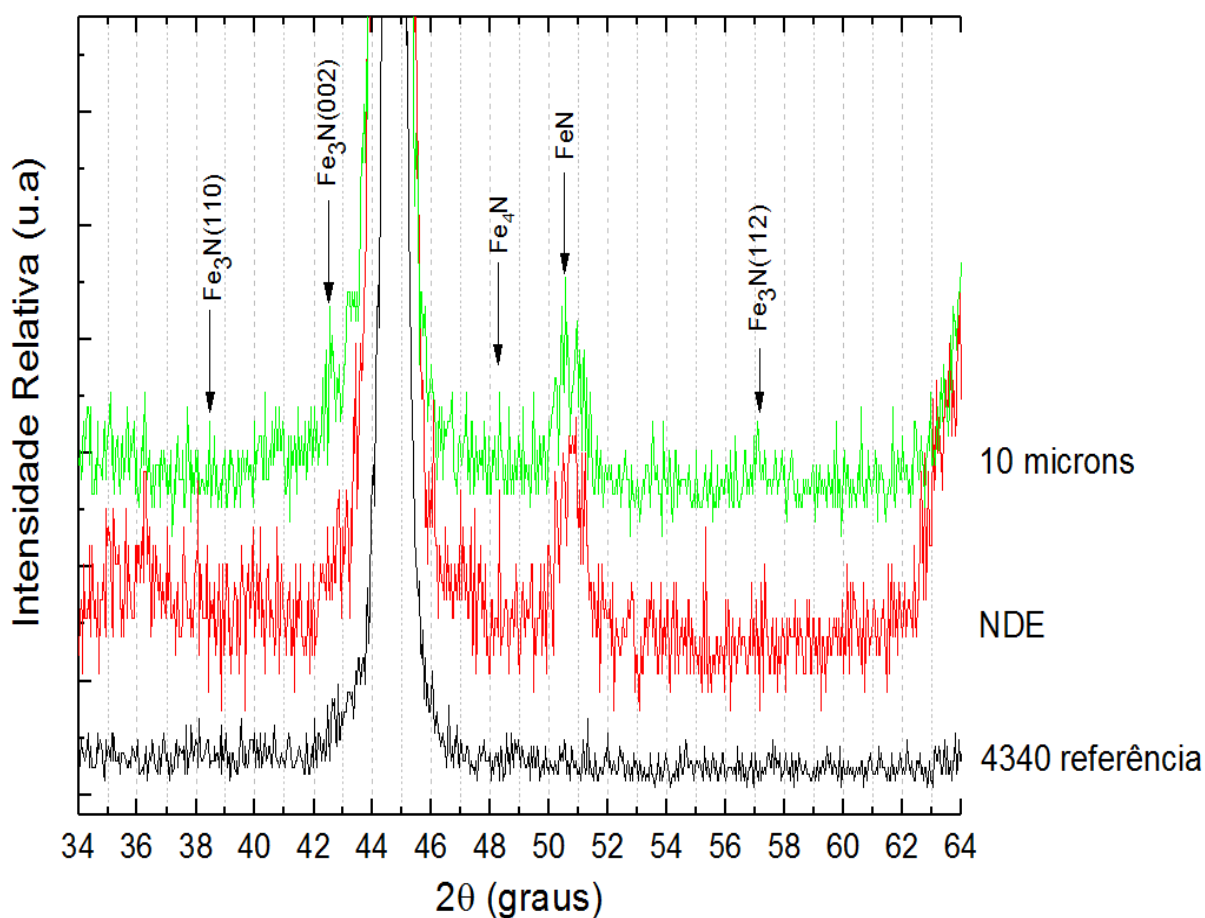
Figura 51 - Difratograma do aço AISI 4340 referência e nitretado no ensaio principal com os fatiamentos usinado eletrodo de cobre.



Fonte: Autor, 2018.

Observa-se no difratograma a identificação de picos de nitretos encontrados e com o fatiamento a diminuição gradativa da intensidade dos picos. Com o intuito de melhorar a visualização dos picos provenientes dos nitretos, os difratogramas foram ampliados dando ênfase ao início do polimento e ao final. As figuras 52 e 53 apresentam os difratogramas com escala ampliada com identificação dos nitretos.

Figura 52 - Difratoograma ampliado do aço AISI 4340 referência e início fatiamento usado eletrodo de cobre.

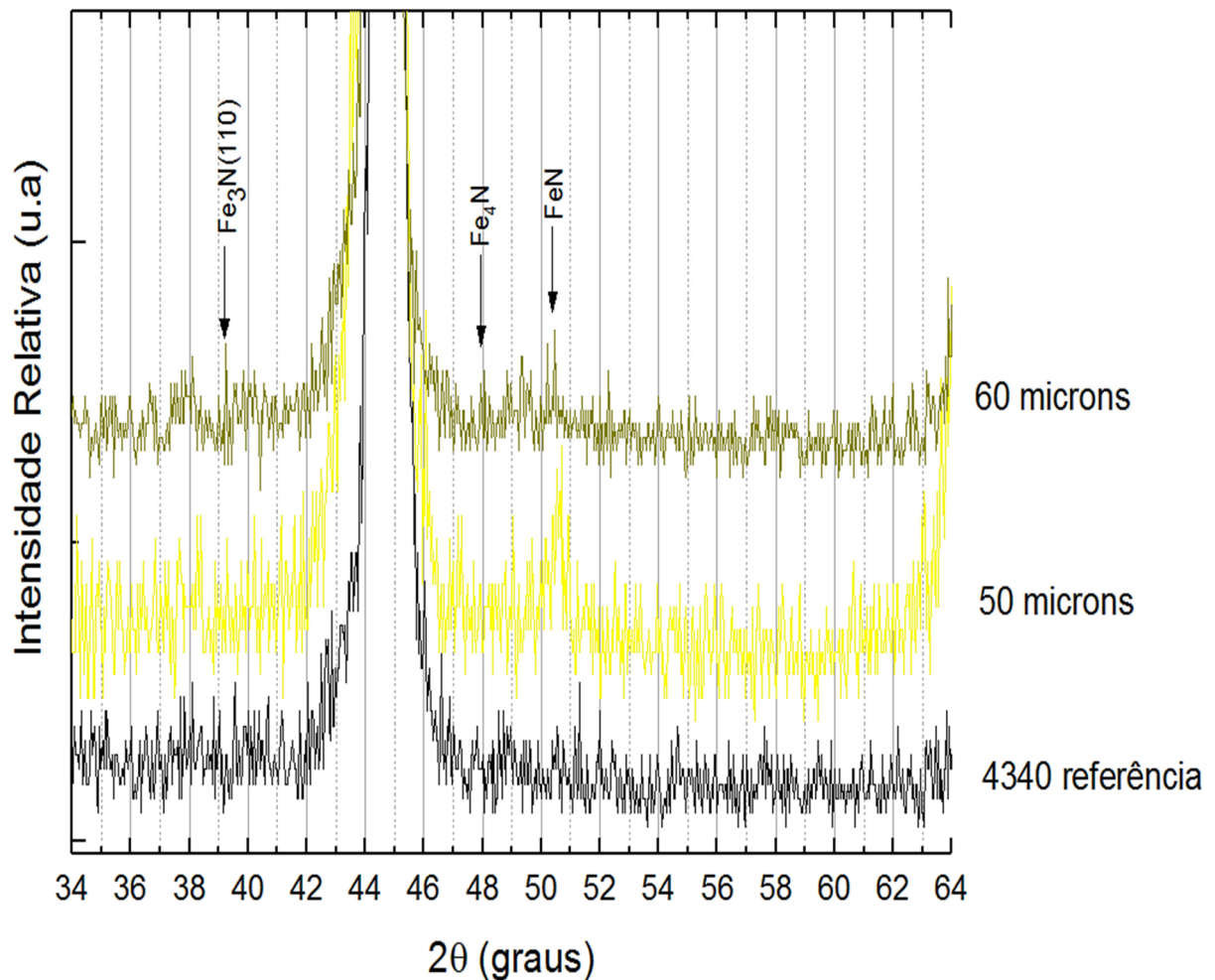


Fonte: Autor, 2018.

Conforme Santos (2015) foi possível identificar na figura 52 a presença de picos nas posições $38,5^\circ$, $42,5^\circ$ e $57,1^\circ$ que correspondem a fase Fe_3N nos planos (110), (002) e (112). Foi identificado pico da fase FeN como apontado por Nicesio (2015) e pico da fase Fe_4N apontado por Ribeiro et al (2008).

Na figura 53 após o polimento da amostra ainda foi possível identificar picos de nitretos de fase FeN , Fe_3N e Fe_4N com intensidades menores que as iniciais, mas que ainda indicam a presença de nitrogênio na superfície da amostra.

Figura 53 - Difratoograma ampliado do aço AISI 4340 referência e final fatiamento usinado com eletrodo de cobre.

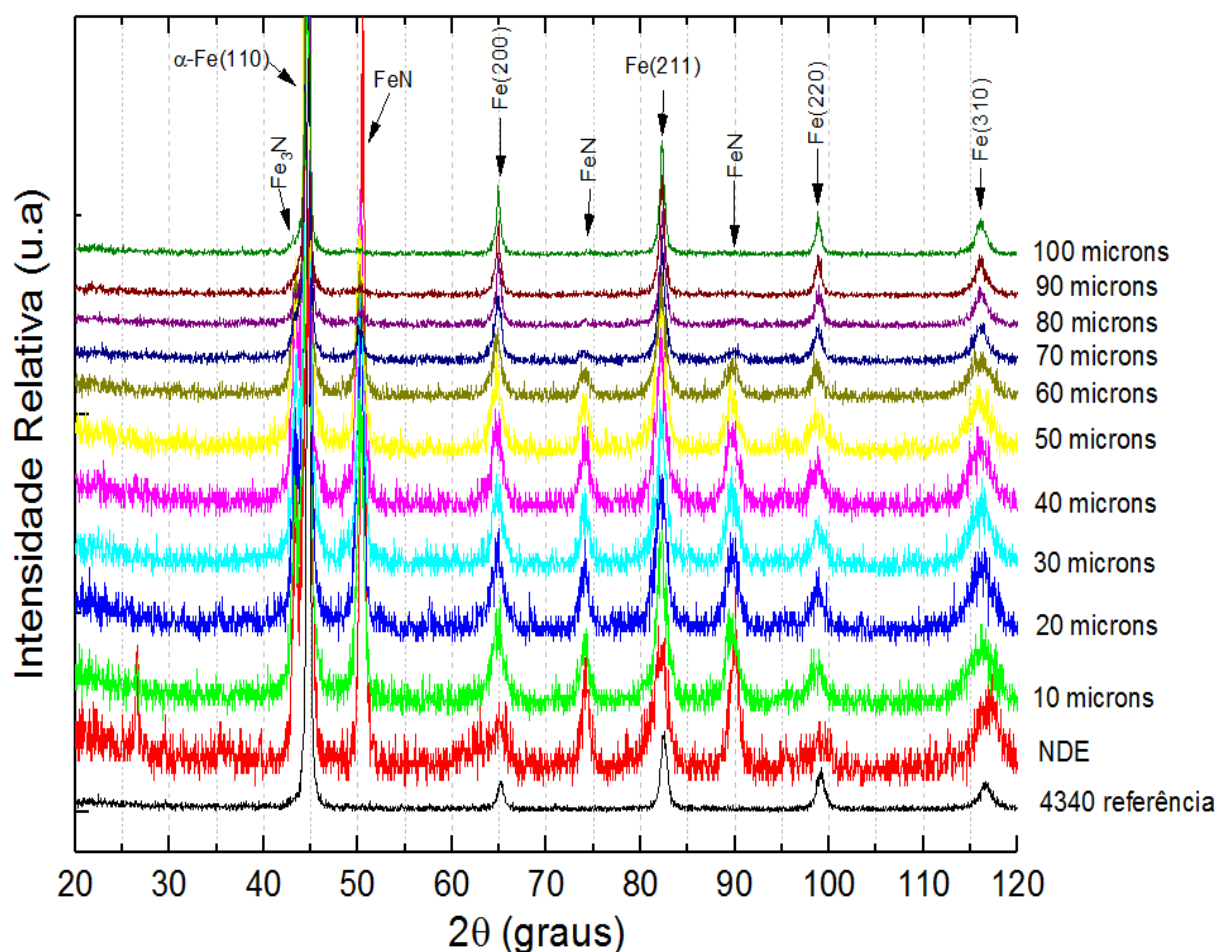


Fonte: Autor, 2018.

A figura 54 apresenta o difratograma da amostra do ensaio principal que foi usinada com eletrodo de grafita, também foram feitas difrações após cada fatiamento de 10 μm .

Pode-se notar a identificação de picos e sua diminuição gradativa como aconteceu com o eletrodo de cobre. Percebe-se também que a intensidade inicial dos picos utilizando o eletrodo de grafita são mais intensas. Nas figuras 55 e 56 foram apresentados os difratogramas da amostra usinada com eletrodo de grafita ampliados no início e no final do fatiamento.

Figura 54 - Difratograma do aço AISI 4340 referência e nitretado no ensaio principal com os fatiamentos usando eletrodo de grafita.

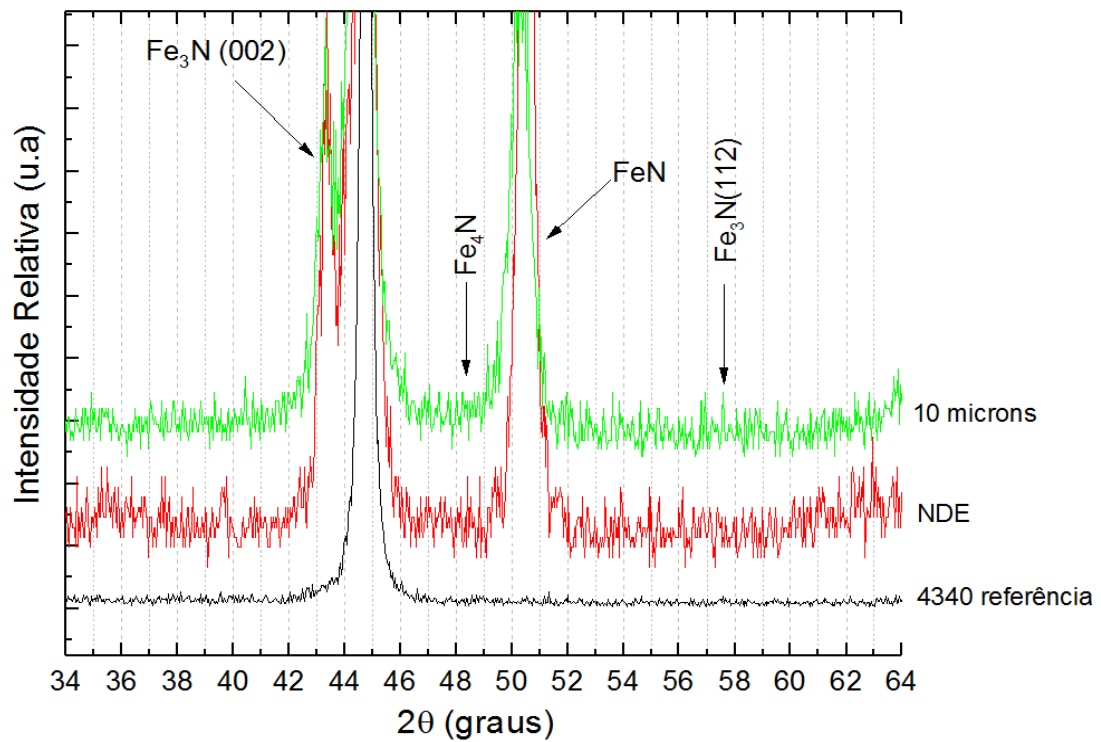


Fonte: Autor, 2018.

Foi possível identificar na figura 55 a presença de picos nas posições $42,5^\circ$ e $57,1^\circ$ que correspondem a fase Fe₃N nos planos (002) e (112). Foram encontrados também picos das fases FeN e Fe₄N da mesma forma que foram encontrados utilizando eletrodo de cobre, a intensidade do pico de FeN foi intensa na superfície inicial.

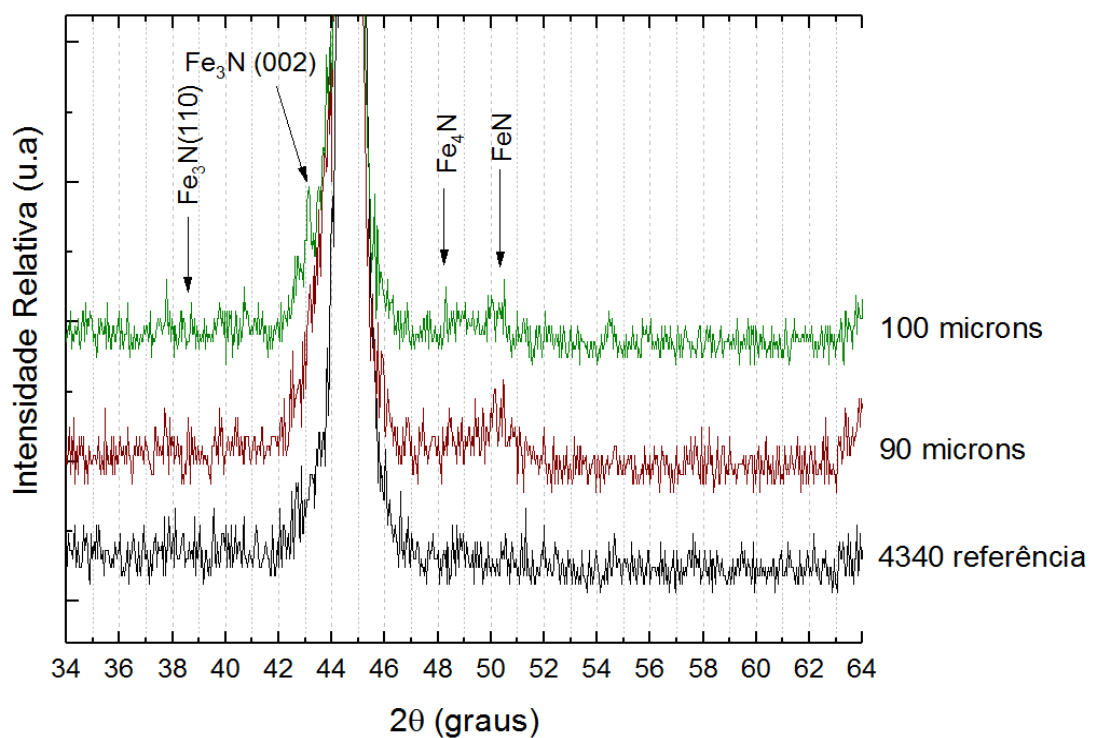
Na figura 56 como ocorrido para o eletrodo de cobre, os picos foram perdendo intensidade, mas ainda é possível identificar alguns picos indicando a presença de nitrogênio na superfície da amostra mesmo com o polimento de 100 μ m.

Figura 55 - Difrátograma ampliado do aço AISI 4340 referência e início fatiamento usinado eletrodo de grafita.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 56 - Difrátograma ampliado do aço AISI 4340 referência e final fatiamento usinado eletrodo de grafita.

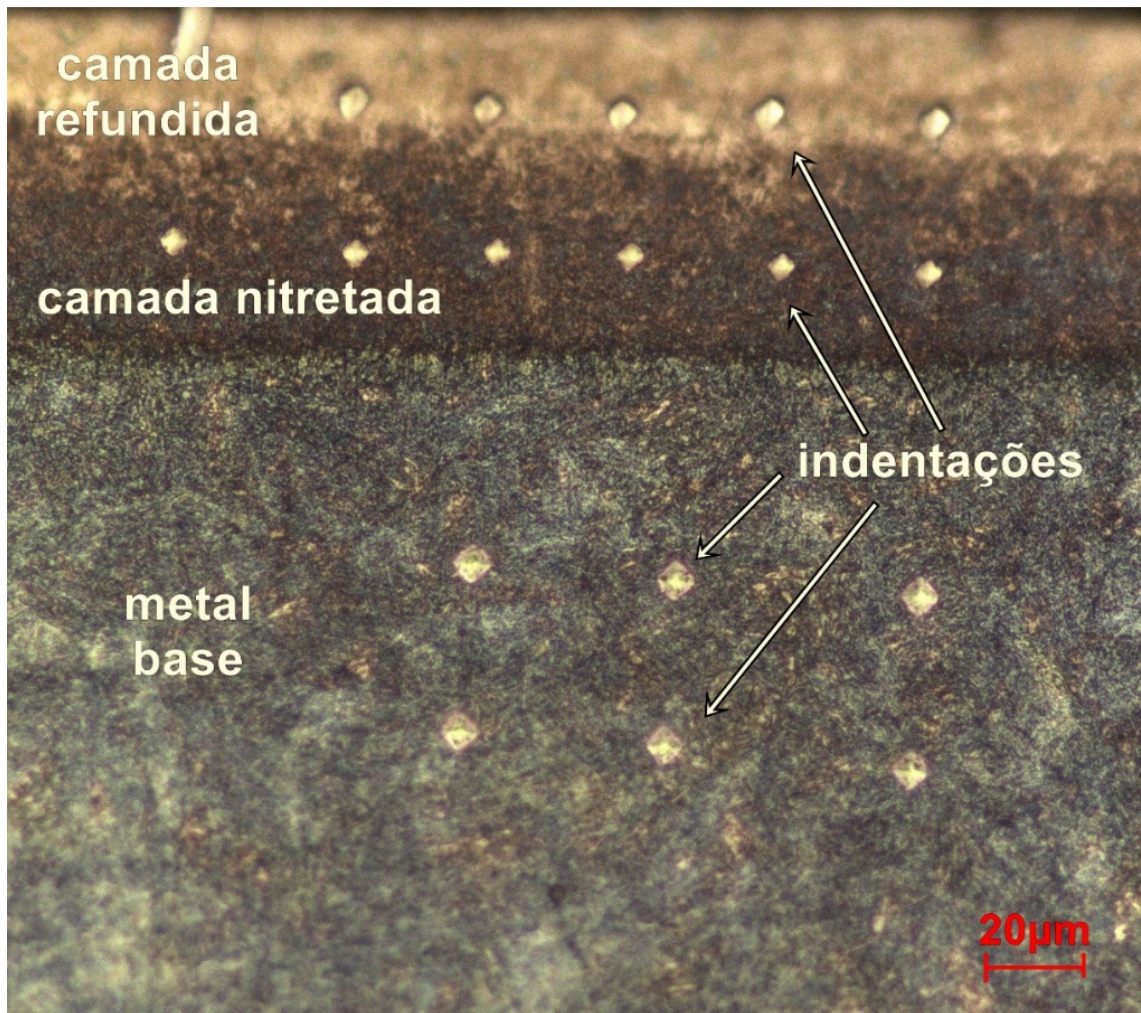


Fonte: Autor, 2018.

4.4 Microdureza

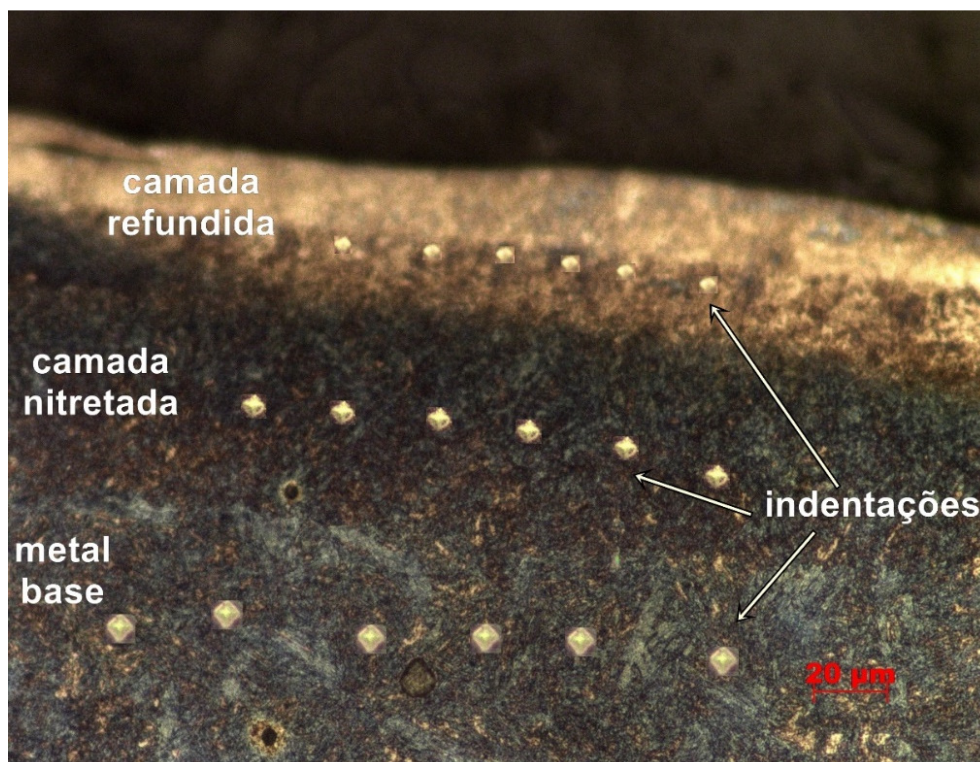
A figura 57 (amostra 4) e 58 (amostra 1) apresentam a seção transversal da amostra do aço AISI 4340 usinada por EDM com fluido dielétrico água deionizada com algumas indentações de microdureza Vickers (10 gf, 20 s) utilizando eletrodo de cobre e grafita respectivamente. Foram feitas 6 indentações para cada camada do material.

Figura 57 - Micrografia com impressões de microdureza Vickers (10 gf, 20 s) amostra 4 usinada com eletrodo de cobre.



Fonte: Autor, 2018.

**Figura 58 - Micrografia com impressões de microdureza Vickers (10 gf, 20 s)
amostra 1 usinada com eletrodo de grafita.**



Fonte: Autor, 2018.

A Tabela 7 apresenta os resultados médios e os respectivos desvios padrões obtidos com a microdureza Vickers das camadas e do metal base no ensaio preliminar de desbaste e no ensaio principal de acabamento.

Tabela 7 - Valores de microdureza Vickers (carga de 10gf por 20s) do aço AISI 4340 e da camada nitretada obtida com eletrodos ferramenta de cobre e grafita.

ensaio		Metal Base (AISI4340)	Camada nitretada		Camada refundida	
			Eletrodo de cobre	Eletrodo de grafita	Eletrodo de cobre	Eletrodo de grafita
preliminar NDE desbaste	Dureza HV	276,83 ±14,82	487,00 ±16,43	425,33 ±12,59	505,66 ±16,69	774,33 ±81,06
	Aumento em relação ao metal base		75,92%	53,64%	82,66%	179,71%
principal NDE acabamento	Dureza HV	306,00 ±3,4	477,8 ±22,4	484,4 ±12,9	686,2 ±49,3	787,00 ±16,7
	Aumento em relação ao metal base		56,10%	58,30%	124,20%	157,20%

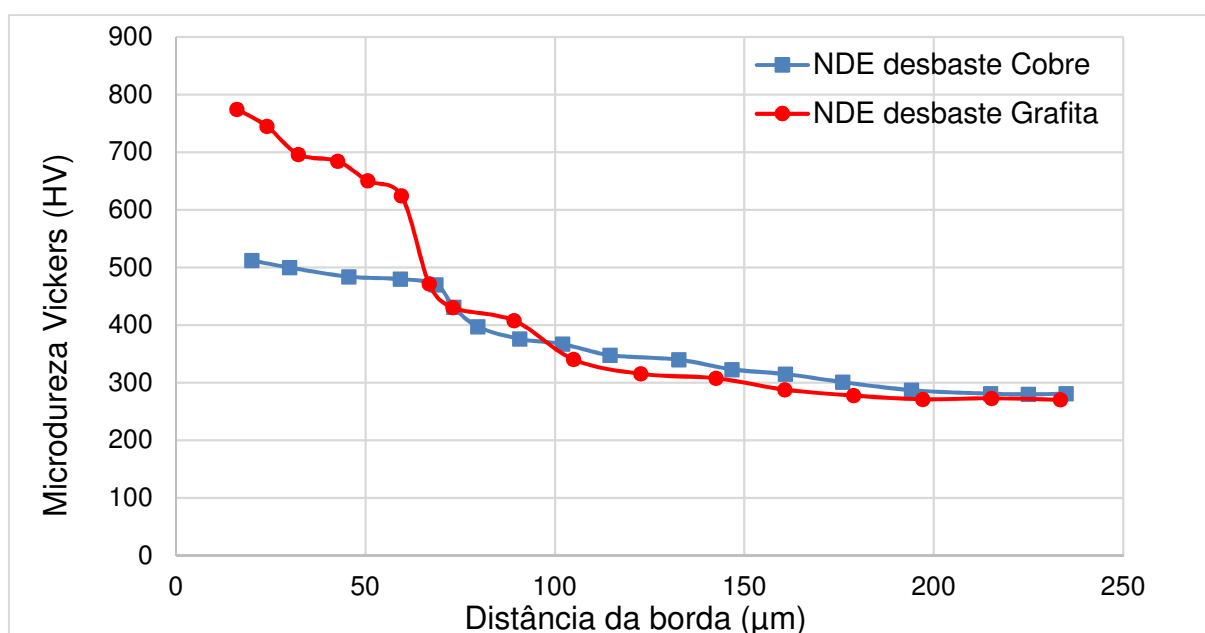
Fonte: Autor, 2018.

Ocorreu aumento no valor da microdureza na camada nitretada em relação ao metal base. Os resultados de microdureza mostraram um acréscimo de cerca de 75% de dureza na camada nitretada com o eletrodo de cobre e de 53% com o eletrodo de grafita, aproximadamente, no ensaio de desbaste. No ensaio de acabamento houve um acréscimo de 56% quando se utilizou o eletrodo de cobre e de 58% quando utilizou o eletrodo de grafita, aproximadamente. Esses resultados são semelhantes aos obtidos por Raslan (2015) quando avaliou o aço AISI 4140.

A camada refundida apresentou um ganho na dureza de 82% para a amostra usinada com eletrodo de cobre e 179% para o eletrodo de grafita no ensaio preliminar e no ensaio de acabamento. A amostra usinada com eletrodo de cobre apresentou um ganho de 124% e com eletrodo de grafita 157%.

A figura 59 apresenta o perfil de dureza para o ensaio NDE desbaste realizado para os dois eletrodos, observou-se que a camadas refundidas no eletrodo de cobre apresentou dureza menor que as camadas refundidas no eletrodo de grafita. Observa-se também que a dureza na camada nitretada com o eletrodo de cobre apresentou-se com dureza maior que a camada nitretada com o eletrodo de grafita.

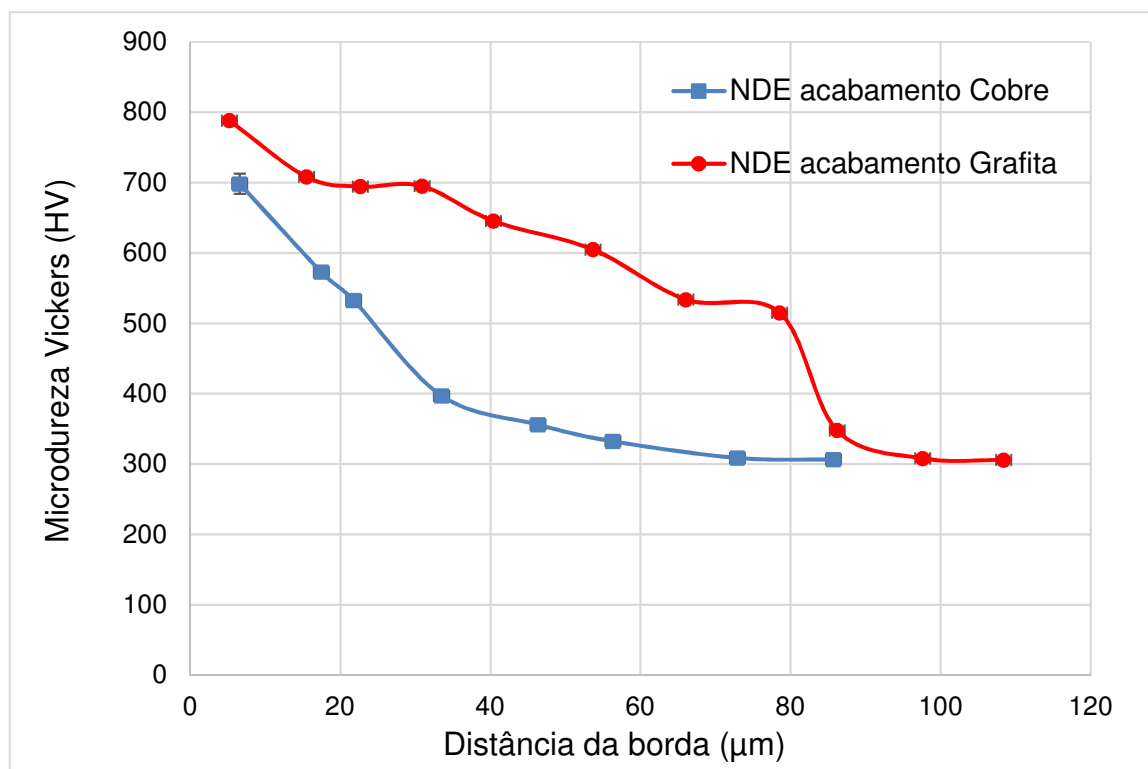
Figura 59 - Perfil de dureza para o ensaio NDE desbaste usinada com os eletrodos de cobre e grafita



Fonte: Autor, 2018.

A figura 60 apresenta o perfil de dureza para o ensaio principal realizado para os dois eletrodos.

Figura 60 - Perfil de dureza para o ensaio NDE acabamento usinada com os eletrodos de cobre e grafita



Fonte: Autor, 2018.

Observa-se que o eletrodo de grafita proporcionou uma maior dureza no perfil, apresentou também uma profundidade de camada maior. Comparando-se os gráficos das figuras 59 e 60 pode-se notar que utilizando uma configuração de desbaste a profundidade da dureza é maior chegando a profundidades de 150μm para os dois eletrodos utilizados.

Segundo Muttamara e Kanchanomai (2016) a água deionizada causa a descarbonetação da superfície usinada por EDM. O que faria com que a superfície das amostras apresentassem uma dureza inferior à do metal base. Como se obteve ganho no valor de dureza nas amostras utilizando os eletrodos de cobre e grafita, comprova-se a inserção de nitrogênio na superfície das amostras.

De acordo com Muttamara et al. (2016) carbono do eletrodo ferramenta de grafita é

incorporado na superfície das amostras. Pode-se então atribuir a maior dureza na camada refundida para o eletrodo de grafita pela possibilidade da inserção de carbono originário do eletrodo.

4.5 Desempenho do processo NDE

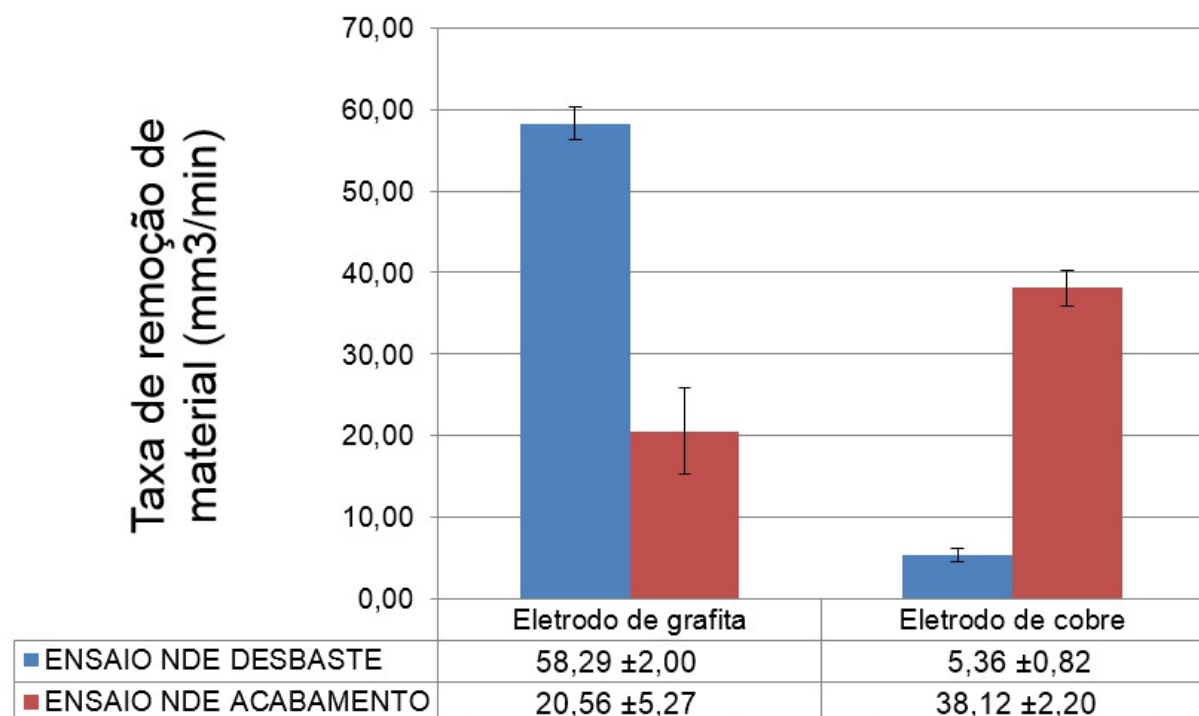
Um fator importante na avaliação do desempenho do processo de EDM é a condutividade elétrica do fluido dielétrico utilizado. A medição da condutividade foi realizada no ensaio principal, sendo medida após a adição da ureia na água deionizada, após a usinagem de 3 amostras com eletrodo de grafita e 3 amostras com eletrodo de cobre. A tabela 8 apresenta a condutividade elétrica da solução antes e após a usinagem. Percebe-se uma baixa condutividade elétrica se comparada com Santos (2016), que na concentração de 12,5g/l de ureia a sua condutividade ficou em 1570 $\mu\text{S/cm}$.

Tabela 8 - Condutividade elétrica média do fluido dielétrico.

Água deionizada	Água deionizada + ureia	Após usinagem com eletrodo de grafita	Após usinagem com eletrodo de cobre
0 $\mu\text{S/cm}$	17,25 $\pm$ 1,5 $\mu\text{S/cm}$	23,5 $\pm$ 1 $\mu\text{S/cm}$	28,5 $\pm$ 1 $\mu\text{S/cm}$

Fonte: Autor, 2018.

A TRM, TD e DVR no processo NDE foram comparadas entre a utilização dos dois eletrodos ferramentas, grafita e cobre eletrolítico, e entre os ensaios de desbaste e acabamento. A figura 61 apresenta a comparação da TRM.

Figura 61 - Taxa de remoção de material.

Fonte: Autor, 2018.

No ensaio com parâmetros de desbaste nas amostras usinadas com eletrodo de grafita a TRM encontrada foi de 58,29mm³/min e de 5,36mm³/min para as amostras usinadas com eletrodo de cobre, observa-se que para essa configuração de usinagem o eletrodo de grafita usinou 10,8 vezes a mais do que com eletrodo de cobre. De acordo com Sommer e Sommer (2005) os eletrodos de grafita têm uma maior taxa de remoção de material em relação ao seu desgaste. Grafita não derrete na abertura do arco elétrico, ao invés, a cerca de 3350°C transforma-se em gás. Para maioria dos casos, a grafita é o material de eletrodo mais eficiente, devida resistência relativamente elevada da grafita ao calor (quando comparado ao cobre).

Na configuração de usinagem acabamento com o eletrodo de cobre, a TRM encontrada foi de 38,12mm³/min e para o eletrodo de grafita foi de 20,56mm³/min. Observa-se que com eletrodo de cobre usinou 1,85 vezes a mais do que com o eletrodo de grafita. Segundo Muller (2015) o uso do cobre se dá quando são necessários acabamentos de superfícies lisas na peça de trabalho, ou seja, eletrodo de cobre é o preferido em processos de acabamento fino, garantindo uma menor rugosidade.

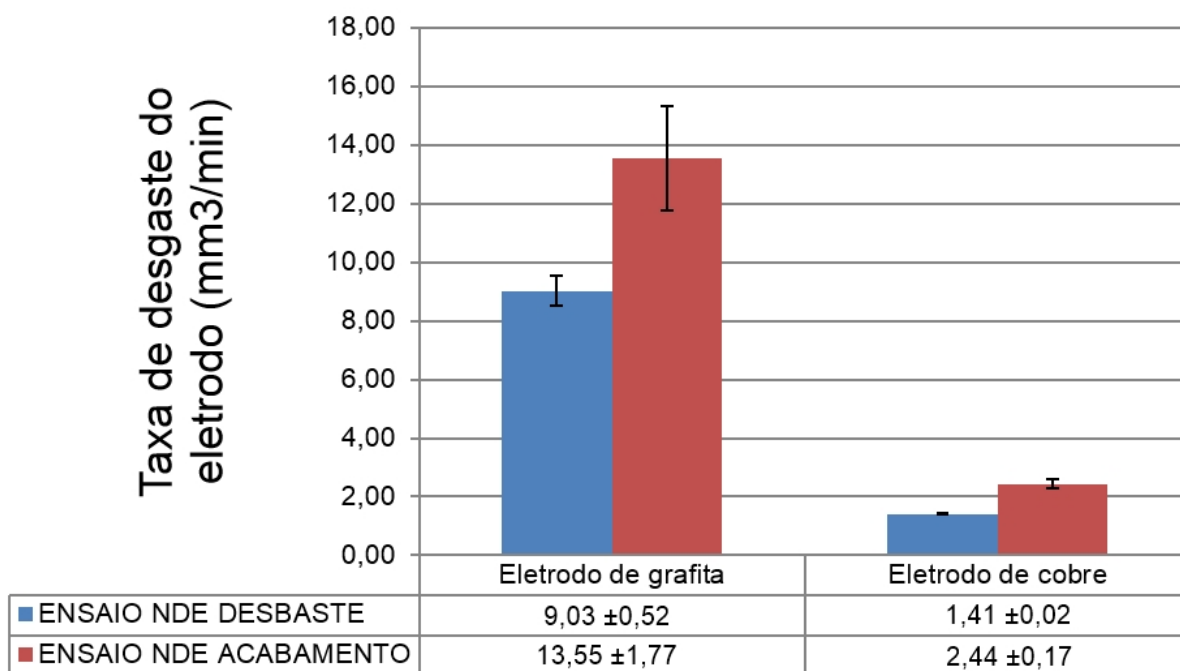
Observa-se uma TRM alta do eletrodo de grafita se comparar com a TRM do eletrodo de cobre no ensaio NDE desbaste e no ensaio NDE acabamento as TRM se invertem com eletrodo de cobre a TRM é maior.

Nicesio (2017) em seu trabalho, utilizando três tipos diferentes de ureia, obteve de 32,65 a 38,09 mm³/min na TRM para o eletrodo peça de aço AISI 4140 e eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico utilizando T_{on} de 100µs, resultados similares aos encontrados nos testes de acabamento se comparando a utilização do mesmo eletrodo ferramenta de cobre.

Santos (2013) encontrou em seus trabalhos uma TRM de $7,2 \pm 0,1$ mm³/min valores bem menores que os encontrados no teste de acabamento, mas no seu trabalho foi provavelmente devido à alta condutividade adquirida pela solução de água deionizada e ureia na concentração de 10 g/l. A ureia diluída na água deionizada em seu trabalho elevou a condutividade elétrica de 2µS/cm para 1455µS/cm.

A figura 62 apresenta a comparação da TD e a figura 63 apresenta a comparação da DVR.

Figura 62 - Taxa de desgaste do eletrodo.

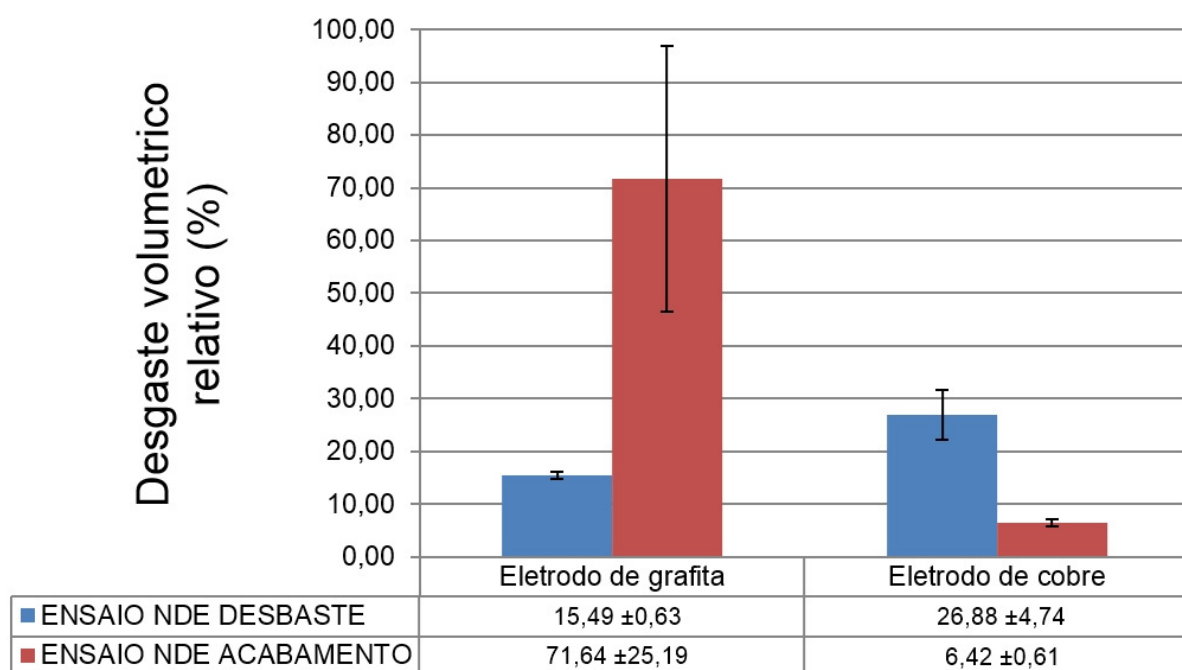


Fonte: Autor, 2018.

Avaliando a TD o desgaste do eletrodo de grafita foi maior nos dois ensaios e o desgaste foi maior no ensaio de acabamento.

Avaliando a TD para o ensaio de desbaste nota-se que o desgaste do eletrodo ferramenta é menor que a TRM cerca de 6,45 vezes para o eletrodo de grafita e 3,80 para o eletrodo de cobre, já na usinagem de acabamento a TD para o eletrodo de grafita é 1,51 vezes menor que a TRM e para o eletrodo de cobre 15,62 vezes menor, o que nos apresenta que o eletrodo de grafita foi melhor para a usinagem de desbaste e o cobre foi melhor para a usinagem de acabamento. O ideal na usinagem por descargas elétricas seria um desgaste zero dos eletrodos.

Figura 63 - Desgaste volumétrico relativo.



Fonte: Autor, 2018.

O DVR relaciona a TD com a TRM, o menor valor de DVR caracteriza o melhor desempenho, pois a quantidade de material retirado da peça é maior com pouco desgaste do eletrodo ferramenta. O menor valor encontrado para a DVR 6,42% foi utilizando o eletrodo ferramenta de cobre na condição de ensaio de NDE acabamento e o pior foi 71,64% utilizando o eletrodo de grafita também na condição NDE acabamento.

5 CONCLUSÕES

Com a análise dos resultados obtidos foi possível concluir que:

- Foi formada na superfície da amostra uma camada refundida, e logo abaixo, percebeu-se alterações microestruturais, de cor ligeiramente mais escura denominada camada nitretada.
- Foi possível a retirada da camada refundida da amostra por meio de polimento.
- A uniformidade da camada nitretada utilizando o eletrodo de cobre foi evidenciada, a camada nitretada utilizando o eletrodo de grafita não foi uniforme.
- A espessura das camadas foram maiores utilizando o eletrodo de grafita.
- A rugosidade da superfície usinada foi menor utilizando o eletrodo de cobre, precisando assim retirar menos material para deixar a superfície polida.
- Foi evidenciada a formação de nitretos de ferro FeN , Fe_3N e Fe_4N por meio de difração de raio x, para ambos os tipos de eletrodo ferramenta.
- A análise da dureza apresentou elevações em relação ao substrato em todas as amostras analisadas. A camada refundida apresentou maiores valores de dureza em todas as amostras.
- A taxa de remoção de material (TRM) foi maior utilizando o eletrodo de grafita na configuração desbaste e na configuração acabamento foi maior com o eletrodo de cobre. O melhor DVR apresentado nos testes e o menor desgaste do eletrodo foram utilizando o eletrodo de cobre na configuração acabamento.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a rugosidade e uniformidade da camada com baixa corrente na usinagem NDE.
- Avaliar a resistência a fadiga após retirada da camada refundida.
- Avaliar o potencial de se utilizar nitrogênio líquido como fluido dielétrico na NDE.
- Realizar análise tribológica após a retirada da camada refundida.

RERFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLA, A. J. et al. Estudo de fluência em aços 4340 com diferentes microestruturas e tratamento de carbonitretação a plasma. **19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat**, novembro, Campos do Jordão, p. 7139-7146, 2010.

ALVES, C. Jr. **Nitretação a plasma**: Fundamentos e aplicações. Natal: EDUFRRN, 2001. 108p.

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

ANAZAWA R. M.; ABDALLA A.J.; HASHIMOTO T. M.; PEREIRA M.S. Caracterização microestrutural e mecânica dos aços 4340 e 300m após tratamentos térmicos isotérmicos e Intercríticos. VI CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE TEMAS DE TRATAMENTO TÉRMICO. Atibaia, 2012.

ARANTES, L. J. **Avaliação de fluidos dielétricos no processo de usinagem por descargas elétricas**. 2001. 74f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

ASM HANDBOOK. **Properties and selection**: irons, steels, and high-performance alloys. 10 ed. American Society for Metals – ASM International, Ohio, v.1, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 87**: aço carbono e ligados para construção mecânica - designação e composição química. Rio de Janeiro, 2000.

BHATTACHARYA, S.; DINDA, G.P.; DASGUPTA, A.K.; MAZUMDER, J. Microstructural evolution of AISI 4340 steel during Direct Metal Deposition process. **Materials Science And Engineering: A**, [s.l.], v. 528, n. 6, p.2309-2318,

mar. 2011. Elsevier BV.

BLEYS, P.; KRUTH, J-P.; LAUWERS, B.; SCHACHT, B.; BALASUBRAMANIAN, V.; FROYEN, L.; HUMBEECK, J. V. Surface and sub-surface quality of steel after EDM. **Advanced Engineering Materials**. N. 1-2, p. 15-25. 2006.

BRITANNICA ACADEMIC. **Urea**. Novembro, 2017. Disponível em <<http://academic-britannica.ez107.periodicos.capes.gov.br/levels/collegiate/article/urea/74456>>. Acesso em 30 jan. 2018.

CAMARGO, B. C.; COSTA, L. H.; RASLAN, A. A. Endurecimento superficial de uma liga Ti₆Al₄V por meio de usinagem por descargas elétricas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO – COBEF, 2009, Belo Horizonte, **Anais v.5**, Belo Horizonte: COBEF, 2009.

CHAKRABORTY, S.; DEY, V.; GHOSH, S. K. A review on the use of dielectric fluids and their effects in electrical discharge machining characteristics. A review. **Precision Engineering**. p. 1-6, 2015.

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

CORAZZA, E. J. – **Influência do tratamento de Nitretação em cavidades de aço P20 de moldes de injeção de termoplásticos**. 2012. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) Universidade da região de Joinville - Univille, Joinville, 2012.

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

DÍAZ-GUILLÉN, J.c. et al. Surface Properties of Fe₄N Compounds Layer on AISI 4340 Steel Modified by Pulsed Plasma Nitriding. **Journal Of Materials Science &**

Technology, [s.l.], v. 29, n. 3, p.287-290, mar. 2013. Elsevier BV.

EL-HOFY, H. **Advanced Machining Processes**. Egypt. Mechanical Engineering Series, 2005. P115-130.

FREITAS, B. M.; SOUZA P. P.; MACEDO NETO J. C.; TORRES A. R. Comparativo da microestrutura e da microdureza no aço 4340 a diferentes tempos de recozimento. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA - CONTECC', 2016, Foz do Iguaçu-PR.

GUIMARÃES JR, R.; PEREIRA, L. G. R.; TOMICH, T. R.; GONÇALVES, L. C. Informações gerais – O que é ureia. **Cadernos Técnicos de Veterinária e Zootecnia**. N.80, 2016.

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

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

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12106:2003(E)** Metallic materials - Fatigue testing - Axialstrain-controlled method– ISO International. Netherlands Normalisatie-instituut, 2003.

JAMESON, Elman C. **Electrical discharge machining**. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 2001. 344p.

KRAUSS, G. **Steels: heat treatment and processing principles**. 6. ed. Ohio: ASM International, 2000. 497p.

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

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

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

LIMA, R. M.; RASLAN, A. A. Utilização de fluidos dielétricos à base de óleos vegetais na usinagem por descargas elétricas por penetração. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO – COBEF, 2009, Belo Horizonte, **Anais v.5**, Belo Horizonte: COBEF, 2009.

MCGEOUGH, J. A. Advanced methods of machining. **Chapman and Hall**, London, p. 128-152, 1988.

MOLINETTI, Anderson et al. Surface modification of AISI H13 tool steel with silicon or manganese powders mixed to the dielectric in electrical discharge machining process. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 83, n. 5-8, p.1057-1068, 6 ago. 2015. Springer Nature.

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

MUTHURAMALINGAM, T.. Measuring the influence of discharge energy on white layer thickness in electrical discharge machining process. **Measurement**, [s.l.], v. 131, p.694-700, jan. 2019. Elsevier BV.

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

MUTTAMARA, Apiwat; KANCHANOMAI, Chaosuan. Effect of Carbon in the

Dielectric Fluid and Workpieces on the Characteristics of Recast Layers Machined by Electrical Discharge Machining. **Metallurgical And Materials Transactions A**, [s.l.], v. 47, n. 6, p.3248-3255, 23 mar. 2016. Springer Nature.

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

RANIERI, Arus **Caracterização mecânica e microestrutural de um aço 4340 com estruturas multifásicas e tratamento de nitrocarbonetação a plasma**. 2010. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, São Paulo, 2010.

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

RASLAN, A. A. Implantação iônica em meio aquoso por EDM: resistência ao desgaste de aço AISI 4140. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO – COBEF, 2015, Salvador, **Anais v.8**, Salvador: COBEF, 2015.

RIBEIRO, K.J.B.; et al. Industrial application of AISI 4340 steels treated in cathodic cage plasma nitriding technique. *Materials Science and Engineering*. v.479, p. 142-147, 2008.

SANTOS, C. E. **Influência da corrente elétrica no processo de nitretação por descargas elétricas do aço AISI H13**. 2015. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SANTOS, R. F.; SILVA, E. R.; PEREIRA, G. C. S.; GOUVEIA, V. J. P.; COSTA, H. L.; RASLAN, A. A. Nitriding process of SAE 4140 steel using FJEDM. Natal-RN, 2011. In: Brazilian Congress of Mechanical Engineering, 21. **Anais...**

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

SANTOS, Rogério Felício dos et al. Influence of urea content blended with deionized water in the process of nitriding using electrical discharge machining on AISI 4140 steel. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 89, n. 1-4, p.1251-1257, 23 jul. 2016. Springer Nature.

SANTOS, Rogério Felício dos et al. Influence of the electrode material on the nitriding of medium carbon steel using sink electrical discharge machining. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 90, n. 5-8, p.2001-2007, 7 out. 2016. Springer Nature.

SILVA, E. R. **Otimização e avaliação dos parâmetros de influência do processo AJEDM**. 2012. 125f. Tese (Doutorado)) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

SILVA, E. R.; SANTOS, R. F.; RASLAN, A. A. Usinagem e nitretação do aço AISI 4140 pelos processos NDE e AJEDM. . In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO – COBEF, 2015, Salvador, **Anais v.8**, Salvador: COBEF, 2015.

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

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

SOMMER, C.; SOMMER, S. **Complete EDM Handbook**, Advance Pub, 2005

Disponível em: < <http://www.reliableedm.com/handbook.php>>. Acesso em: 09 ago. 2018.

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

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

TORRES, A.; PUERTAS, I.; LUIS, C. J.. Modelling of surface finish, electrode wear and material removal rate in electrical discharge machining of hard-to-machine alloys. **Precision Engineering**, [s.l.], v. 40, p.33-45, abr. 2015. Elsevier BV.

TORRES, A.; PUERTAS, I.; LUIS, C. J.. EDM machinability and surface roughness analysis of INCONEL 600 using graphite electrodes. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 84, n. 9-12, p.2671-2688, 6 out. 2015. Springer Nature.

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

APÊNDICE A – Programa utilizado para fatiamento

%	N280G3X20.616Y-5R20.009
:espiral	N290G3X0.0Y15R20.009
N10G17G21G90G94	N300G3Y-15R15.0
N20G53Z-110H0	N310G17G3Y15R15.0F500
N30T01	N320G3X-20.538Y-5R20.009
N40M6	N330G3X0.078Y-25R20.009
N50G54S300M03	N340G3Y25R25.0
N60G0X0.0Y85	N350G3X-30.336Y-5R30.003
N70G43Z5H12	N360G3X0.078Y-35R30.003
N80G1Z-5F100	N370G3Y35R35.0
N90G3Y-85R85.0F300	N380G3X-40.233Y-5R40.001
N100G3X80.156Y-5R80.0	N390G3X0.078Y-45R40.001
N110G3X0.0Y75R80.0	N400G3Y45R-45.0
N120G3Y-75R75.0	N410G3X-50.171Y-5R50.001
N130G3X70.178Y-5R70.0	N420G3X0.078Y-55R50.001
N140G3X0.0Y65R70.0	N430G3Y55R55.0
N150G3Y-65R65.0	N440G3X-60.13Y-5R60.0
N160G3X60.208Y-5R60.0	N450G3X0.078Y-65R60.0
N170G3X0.0Y55R60.0	N460G3Y65R-65.0
N180G3Y-55R55.0	N470G3X-70.1Y-5R70.0
N190G3X50.249Y-5R50.001	N480G3X0.078Y-75R70.0
N200G3X0.0Y45R50.001	N490G3Y75R-75.0
N210G3Y-45R45.0	N500G3X-80.078Y-5R80.0
N220G3X40.311Y-5R40.001	N510G3X0.078Y-85R80.0
N230G3X0.0Y35R40.001	N520G3Y85R85.0
N240G3Y-35R35.0	N530G0Z5
N250G3X30.414Y-5R30.003	N540G53Z-110H0
N260G3X0.0Y25R30.003	N550M30
N270G3Y-25R25.0	%

APÊNDICE B – Medidas das espessuras

	Eletrodo de cobre		Eletrodo de grafita	
Medida a partir da lateral (mm)	Espessura a camada nitretada (µm)	Espessura a camada refundida (µm)	Espessura a camada nitretada (µm)	Espessura a camada refundida (µm)
1,00	21,33	20,33	11,04	15,27
1,20	23,03	5,50	49,60	21,69
1,40	21,90	8,23	43,82	10,15
1,60	26,29	54,76	21,27	16,47
1,80	20,87	23,57	61,55	11,55
2,00	23,10	21,42	38,61	11,01
2,20	25,79	21,36	35,07	49,67
2,40	22,51	29,03	53,71	13,69
2,60	24,15	11,01	43,29	11,77
2,80	23,60	8,76	25,49	13,15
3,00	26,86	20,27	41,94	18,07
3,20	26,34	11,55	82,54	22,72
3,40	21,90	23,60	11,53	11,31
3,60	25,74	15,34	31,21	14,55
3,80	21,90	13,14	18,35	21,09
4,00	27,98	14,80	11,78	17,82
4,20	25,19	27,93	18,07	7,12
4,40	27,33	19,20	23,91	20,44
4,60	29,59	9,87	10,13	21,36
4,80	28,50	15,89	38,65	12,05
5,00	23,55	9,87	46,28	10,96
5,20	27,95	3,87	45,18	8,76
5,40	24,65	12,06	23,00	4,94
5,60	24,10	18,65	19,99	7,39
5,80	22,48	12,61	66,54	39,16
6,00	24,10	12,64	70,10	46,56
6,20	23,65	24,67	83,51	74,75
6,40	25,24	20,38	50,33	17,49
6,60	22,46	13,69	62,17	10,57
6,80	23,01	20,29	36,97	15,06
7,00	26,83	26,29	56,68	24,10
7,20	23,55	14,81	45,64	26,84
7,40	22,51	9,86	32,87	8,21
7,60	26,84	6,57	33,58	7,52
7,80	24,65	10,46	41,36	36,42
8,00	20,82	17,56	20,83	8,77
8,20	27,39	10,42	20,61	1,99
8,40	23,55	28,48	37,94	20,21
8,60	23,55	14,88	36,19	15,77
8,80	26,49	24,74	48,19	11,50
9,00	26,84	15,34	16,70	12,32
9,20	30,24	28,50	40,28	5,48
9,40	29,07	29,57	60,53	11,23
9,60	26,34	18,62	35,05	6,87
9,80	24,10	10,95	31,52	5,48

	Eletrodo de cobre		Eletrodo de grafita	
Medida a partir da lateral (mm)	Espessura camada nitretada (µm)	Espessura camada refundida (µm)	Espessura camada nitretada (µm)	Espessura camada refundida (µm)
10,00	20,27	33,45	62,48	11,55
10,20	28,45	26,31	70,10	13,97
10,40	23,01	17,52	63,25	13,14
10,60	26,34	22,45	70,37	23,56
10,80	26,88	19,20	29,58	23,55
11,00	24,67	46,58	67,54	41,65
11,20	23,55	29,07	68,76	48,83
11,40	21,97	41,71	101,87	62,44
11,60	26,29	28,52	115,82	40,55
11,80	26,84	13,69	107,95	69,28
12,00	27,39	59,14	103,27	70,65
12,20	25,19	30,69	65,89	18,89
12,40	25,20	14,25	56,55	15,15
12,60	26,29	34,52	61,88	15,34
12,80	21,97	31,22	41,91	24,66
13,00	27,95	26,29	54,17	33,54
13,20	29,64	16,87	46,55	30,73
13,40	28,36	19,90	43,72	24,24
13,60	30,12	19,20	65,99	19,72
13,80	25,74	26,83	72,29	19,17
14,00	27,39	12,05	66,95	21,80
14,20	27,95	22,46	45,18	36,97
14,40	27,63	32,61	45,36	47,05
14,60	23,01	34,52	45,16	28,88
14,80	28,67	11,62	45,03	23,79
15,00	26,31	13,25	54,55	43,62
15,20	24,67	29,75	25,52	15,22
15,40	26,29	27,47	9,35	15,94
15,60	22,24	14,33	36,25	15,39
15,80	22,51	37,30	43,81	18,89
16,00	24,79	23,78	11,79	10,69
16,20	24,45	33,48	50,50	32,88
16,40	26,31	19,20	29,08	12,89
16,60	26,38	12,70	33,90	26,76
16,80	25,79	36,21	52,40	26,57
17,00	23,78	21,16	25,67	28,37
17,20	20,84	21,39	16,98	5,21
17,40	26,38	27,73	14,51	26,57
17,60	26,83	33,41	15,88	29,57
17,80	18,10	17,83	85,70	30,12
18,00	24,12	15,42	50,11	56,68
Média	25,10	21,47	45,43	22,72
Desvio Padrão	2,09	8,03	17,94	11,68