

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS  
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

RAFAEL TEIXEIRA DE BRITO MACEDO

**INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO  $T_{OFF}$  NO PROCESSO DE NITRETAÇÃO POR  
DESCARGAS ELÉTRICA DO AÇO AISI 4140**

BELO HORIZONTE

2020

RAFAEL TEIXEIRA DE BRITO MACEDO

**INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO  $T_{OFF}$  NO PROCESSO DE NITRETAÇÃO POR  
DESCARGAS ELÉTRICA DO AÇO AISI 4140**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao curso de graduação em  
Engenharia de Materiais do Centro  
Federal de Educação Tecnológica de  
Minas Gerais como requisito parcial para  
obtenção do título de bacharel em  
Engenharia de Materiais

Orientador: Ernane Rodrigues da Silva

Belo Horizonte  
2020

RAFAEL TEIXEIRA DE BRITO MACEDO

**INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO  $T_{OFF}$  NO PROCESSO DE NITRETAÇÃO POR  
DESCARGAS ELÉTRICA DO AÇO AISI 4140**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao curso de graduação em  
Engenharia de Materiais do Centro  
Federal de Educação Tecnológica de  
Minas Gerais como requisito parcial para  
obtenção do título de bacharel em  
Engenharia de Materiais

APROVADO EM 07/04/2021  
**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva

---

Prof. Victor Souza Esteves Lima

---

Prof. Claudinei Alfredo do Nascimento

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho principalmente ao professor Ernane, que aceitou o desafio de me orientar e me auxiliou durante todos esses meses que estive escrevendo o projeto.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que fizeram parte do meu esforço para chegar aonde estou hoje, principalmente aos meus amigos e família, que sem eles nada disso seria possível.

## RESUMO

O presente estudo foi realizado com o intuito de avaliar a influência que o parâmetro  $T_{off}$  exerce sobre as características e propriedades das camadas nitretadas. Foi avaliado, com o auxílio da técnica de difração de raios X, a formação de nitretos na superfície usinada. Além disso, foi realizado através de imagens obtidas da microscopia óptica estudos com relação a homogeneidade e espessura das camadas nitretadas formadas. Os resultados encontrados comprovaram a presença de picos referentes as fases FeN, Fe<sub>2-3</sub>N ( $\gamma'$ ) e Fe<sub>4</sub>N ( $\epsilon$ ), comprovando que o nitrogênio desprendido das soluções aquosas de ureia se implantou na superfície dos corpos de prova. A partir da análise das imagens, foi possível perceber que a variação do parâmetro  $T_{off}$ , dentro dos limites utilizados durante o estudo, possuem pequena influência no aumento ou diminuição da espessura da camada nitretada, sendo a principal podendo ser provida da quantidade de energia introduzida no processo, representada pelo parâmetro  $T_{on}$ .

PALAVRAS-CHAVE: EDM, nitretação, aço AISI 4140, NDE, Toff, Ton.

## ABSTRACT

The objective of the present study was to evaluate the influence that the  $T_{off}$  parameter has on the characteristics and properties of the nitrided layers. The formation of nitrides on the machined surface was evaluated with the aid of the X-ray diffraction technique. In addition, studies were carried out using images obtained through optical microscopy regarding the homogeneity and thickness of the formed nitrided layers. The results found proved the presence of peaks referring to the FeN, Fe<sub>2-3</sub>N ( $\gamma'$ ) and Fe<sub>4</sub>N ( $\epsilon$ ) phases, proving that the nitrogen released from the aqueous solutions of urea was implanted on the surface of the materials. From the analysis of the images, it was possible to notice that the variation of the  $T_{off}$  parameter, within the limits used during the study, has very little influence on the increase or decrease in the thickness of the nitrided layer, the main influence being that it can be provided by the amount of energy introduced in the process, represented by the  $T_{on}$  parameter.

KEYWORDS: EDM, nitriding, AISI 4140 steel, NDE, Toff, Ton.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1</b> - Esquemática da seção transversal da região nitretada.....  | 13 |
| <b>Figura 2</b> - Diagrama de fase do sistema Fe-N.....  | 14 |
| <b>Figura 3</b> - Diagrama de Lehrer .....   | 15 |
| <b>Figura 4</b> - Desenho esquemático da câmara de nitreção.....   | 17 |
| <b>Figura 5</b> - Representação esquemática do processo de nitreção a plasma.....  | 18 |
| <b>Figura 6</b> - Representação Esquemática do Processo EDM.....   | 19 |
| <b>Figura 7</b> - As quatro fases de uma descarga elétrica no processo EDM.....  | 20 |
| <b>Figura 8</b> - Microscopia ótica da amostra do aço AISI D6 beneficiada, usinado por EDM em regime de acabamento .....                                     | 23 |
| <b>Figura 9</b> - Comportamento da Tensão e Corrente Elétrica durante o ciclo de uma descarga elétrica no processo EDM .....                                 | 24 |
| <b>Figura 10</b> - Difratoograma do aço AISI 4140 NDE.....   | 26 |
| <b>Figura 11</b> - Fluxograma das etapas de desenvolvimento do trabalho.....   | 27 |
| <b>Figura 12</b> - Amostras confeccionadas para o projeto.....   | 28 |
| <b>Figura 13</b> - Equipamento TDS&EC Meter usado para medição da condutividade do fluido antes e durante realização dos experimentos .....                  | 29 |
| <b>Figura 14</b> - Esquema de máquina EDM por penetração.....  | 30 |
| <b>Figura 15</b> - ENGEMAQ EDM 200 NC série L com cuba instalada.....  | 31 |
| <b>Figura 16</b> - Configuração de montagem da amostra dentro do porta amostra .....   | 31 |
| <b>Figura 17</b> - Painel de controle da máquina EDM com indicação dos parâmetros ajustados.....   | 32 |
| <b>Figura 18</b> - Aspecto visual das Amostras após processo de NDE .....  | 35 |
| <b>Figura 19</b> - Espectro de DRX das Amostras.....   | 36 |
| <b>Figura 20</b> - Imagem de microscopia ótica da seção transversal da superfície usinada da Amostra 1. Camadas refundida e intermediária em destaques. .... | 38 |
| <b>Figura 21</b> - Imagem de microscopia ótica da seção transversal da superfície usinada da Amostra 2. Camadas refundida e intermediária em destaques. .... | 39 |
| <b>Figura 22</b> - Imagem de microscopia ótica da seção transversal da superfície usinada da Amostra 3. Camadas refundida e intermediária em destaques. .... | 39 |
| <b>Figura 23</b> - Imagem de microscopia ótica da seção transversal da superfície usinada da Amostra 4. Camadas refundida e intermediária em destaques. .... | 40 |
| <b>Figura 24</b> - Comparação entre a espessura média da Zona Refundida (ZR) das Amostras. ....  | 42 |
| <b>Figura 25</b> - Comparação entre a espessura média das Zona Termicamente Afetada (ZR) das Amostras. ....  | 43 |
| <b>Figura 26</b> - Imagem metalográfica de região em que a espessura da ZAC é mínima (Amostra 3). ....   | 44 |
| <b>Figura 27</b> - Comparação entre a espessura a espessura total média (ZR+ZAC) das Amostras.....   | 45 |



**LISTA DE TABELAS**

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabela 1</b> - Composição química do aço AISI 4140 .....                               | 28 |
| <b>Tabela 2</b> - Parâmetros que foram empregados na máquina Engemac .....                | 33 |
| <b>Tabela 3</b> - Especificação técnica e parâmetros usados no DRX.....                   | 34 |
| <b>Tabela 4</b> - Dados de espessura média das camadas e desvio padrão das amostras ..... | 40 |

**Sumário**

|   |    |
|---|----|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....  | 10 |
| <b>2. OBJETIVOS</b> .....   | 11 |
| 2.1. Objetivos Gerais .....                                       | 11 |
| 2.2. Objetivos Específicos.....                                   | 11 |
| <b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....                             | 12 |
| 3.1 Nitretação .....  | 12 |
| 3.1.1 Nitretação Gasosa .....                                     | 15 |
| 3.1.2 Nitretação Iônica.....                                      | 16 |
| 3.2 Processo EDM.....   | 19 |
| 3.2.1 Definição dos parâmetros de usinagem no processo EDM .....  | 24 |
| 3.3 Nitretação por descargas elétricas (NDE) .....                | 25 |
| <b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....                                | 27 |
| 4.1 Preparação do material.....                                   | 27 |
| 4.2 Fluidos dielétricos .....                                     | 28 |
| 4.3 Testes de usinagem e Nitretação por Descargas Elétricas ..... | 29 |
| 4.4 Procedimento experimental .....                               | 32 |
| 4.5 Metalografia .....  | 33 |
| 4.6 Difração de Raio X.....                                       | 34 |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....                            | 35 |
| 5.1 Aspecto Visual das Amostras Nitretadas .....                  | 35 |
| 5.2 Determinação das fases por Difração de Raios X.....           | 35 |
| 5.3 Micrografia .....   | 37 |
| 5.3.1 Formação e homogeneidade das camadas nitretadas.....        | 37 |
| 5.3.2 Espessura e uniformidade da camada nitretada .....          | 40 |
| <b>6 CONCLUSÕES</b> .....   | 46 |
| <b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....                         | 47 |

## 1. INTRODUÇÃO

Usinagem por descarga elétrica (EDM) é um processo que provoca erosão em um material quando descarga elétrica, em meio dielétrico líquido, é aplicada aos eletrodos e, geralmente, a erosão em um deles é muito mais acentuada. O tempo de duração do pulso está na faixa de microssegundos a milissegundos, se iniciando como uma faísca e se desenvolvendo em uma descarga de arco, desde que a duração do pulso seja longa o suficiente (alguns microssegundos) (ALBINSKI, 1996).

Conforme apresentado por Santos (2013), o processo EDM vem sendo usado predominantemente na produção de matrizes e moldes metálicos.

A Nitretação acontece quando átomos de nitrogênio atômico (N) são difundidos na superfície de um material. Mittemeijer (2013) afirma que, devido a temperatura na qual ocorre o processo, apenas transformações de fase relacionadas a precipitação de nitretos ou carbonitretos ocorrem, o que permite a alteração de propriedades como dureza superficial, resistência ao desgaste, à corrosão e térmica do material. Este método tem se tornado o mais versátil e eficaz para o tratamento térmico em superfícies de materiais à base de ferro por muitas décadas.

Devido ao canal de plasma formado pelo processo EDM, é possível gerar algumas modificações superficiais nas peças usinadas, podendo assim afetar suas propriedades. Isso acontece porque o canal de plasma formado pode conter partículas de materiais erodidos da peça, do eletrodo e do fluido dielétrico. Porém é necessário que os elementos químicos de interesse devem fazer parte do material, do eletrodo ou do fluido dielétrico (KUMAR, 2009).

Nos estudos de Santos (2013) foi apresentado um problema relacionado a heterogeneidade da camada da zona refundida (ZR) e da camada da zona afetada pelo calor (ZAC) do aço 4140 usinado por eletroerosão utilizando como meio fluido dielétrico água deionizada e ureia. É muito importante para os processos de

Nitreção que utilizam essa técnica, conseguir controlar a espessura e homogeneidade da camada nitretada, já que dessa forma seria possível ter mais controle das propriedades do material usinado. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência do parâmetro  $T_{off}$  na uniformidade e espessura da camada nitretada pelo processo EDM do aço AISI 4140, podendo servir como base para futuros estudos acerca do assunto.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivos Gerais**

Avaliar a influência do parâmetro  $T_{off}$  na uniformidade e espessura da camada nitretada pelo processo EDM do aço AISI 4140, em meio fluido dielétrico constituído de água deionizada e ureia farmacológica.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- ✓ Analisar por meio de microscopia óptica, a uniformidade das camadas nitretadas por eletroerosão do aço AISI 4140;
- ✓ Medir a espessura da zona refundida (ZR), da zona termicamente afetada (ZAC) e o valor total da camada nitretada;
- ✓ Investigar a influência do parâmetro  $T_{off}$ , na homogeneidade e morfologia da camada nitretada;
- ✓ Determinar, por meio da difração de raio X (DRX), os nitretos formados.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

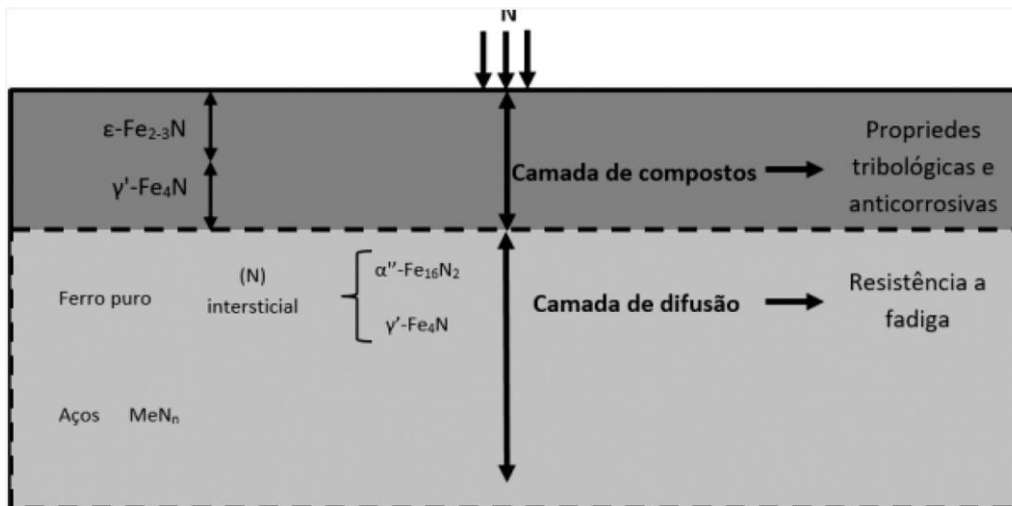
#### 3.1 Nitretação

O processo de nitretação envolve a introdução de nitrogênio atômico (N) na superfície de um material, por difusão intersticial ou por lacunas, no interior do reticulado cristalino de ligas ferrosas, no campo de estabilidade da ferrita, em temperaturas normalmente na faixa de 500 a 590 °C. Dessa forma, transformações de fase que não se relacionam com a precipitação de nitretos ou carbonitretos não ocorrem, quando presente também o carbono na liga ou no meio nitretante. É um processo que permite alterar as propriedades de dureza superficial, resistência ao desgaste, à corrosão e térmica do material. Este método tem se tornado o mais versátil e eficaz para o tratamento térmico em superfícies de materiais à base de ferro por muitas décadas. Ela começou a ser utilizada como um processo técnico no início do século XX, desde então se tornou uma tecnologia de importância cada vez maior, se tornando objeto para diversos estudos (MITTEMEIJER, 2013).

A zona nitretada, especialmente no caso de ligas à base de ferro ferrítico ou aços ferríticos nitretados a temperaturas inferiores a 590 °C, pode ser subdividida em duas regiões, dependendo do “poder” de nitretação da atmosfera de nitretação em torno do material. A Figura 1 apresenta a esquematização da seção transversal da região nitretada de uma amostra ferrítica, mostrando a camada de compostos e camada de difusão com seus possíveis constituintes (BRINKSMEIER, 2013).

A primeira região é uma camada composta em grande parte por nitretos de ferro, chamada de camada de compostos. A outra região é uma zona de difusão com ferro puro ou aço carbono, após nitretação, resfriamento lento ou envelhecimento após a têmpera, o nitrogênio dissolvido à temperatura de nitretação precipita como nitretos de ferro na zona de difusão ou, no caso de aço que contenha elementos de liga com afinidade por nitrogênio, como alumínio e cromo, os nitretos de elemento de liga precipitam durante a nitretação (BRINKSMEIER, 2013).

**Figura 1** - Esquematização da seção transversal da região nitretada



Fonte: DIEHL, DONG e ROCHA, 2017.

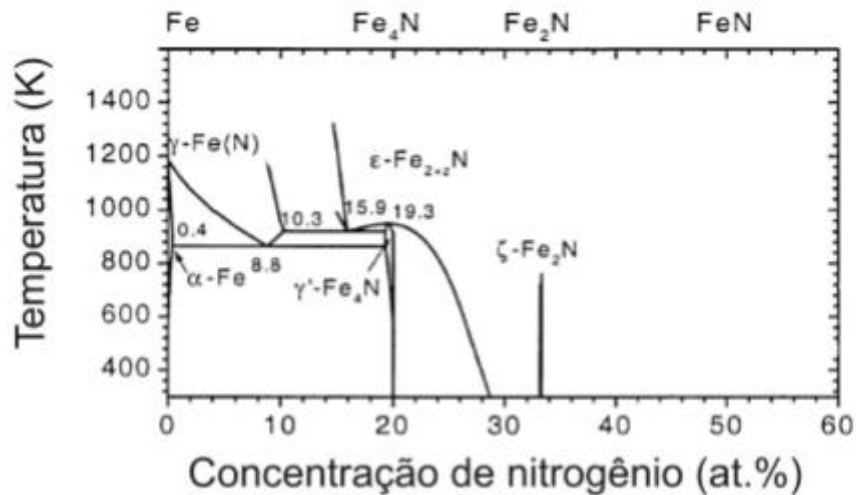
O que mais confere uma importância tecnológica à nitretação é o fato dela ser capaz de aumentar de forma pronunciada a resistência contra fadiga, desgaste e corrosão do material. Essa melhoria acentuada de propriedade é, a grosso modo, devido à alta dureza, tensões internas e às modificações químicas na zona nitretada (BRINKSMEIER, 2013).

Durante a nitretação é muito importante saber o equilíbrio entre as fases do sistema ferro-nitrogênio. De acordo com Zagonel (2006):

Por ser um átomo relativamente pequeno, o nitrogênio não pode ser colocado na rede cristalina do primeiro em um sítio substitucional, onde o átomo de nitrogênio ocuparia um lugar do átomo de ferro. Ao mesmo tempo, o nitrogênio não é pequeno o bastante para ocupar sítios intersticiais. Essa característica forma um sistema semelhante ao ferro-carbono em certos aspectos. Apenas uma pequena quantidade de nitrogênio pode ser diluída na rede cristalina do ferro, e fases cristalinas de nitretos de ferro são formadas para concentrações maiores que o limite de solubilidade. Nesses casos, a rede cristalina é basicamente a rede cúbica de face centrada, rede do ferro em temperatura ambiente, com distorções que formam a fase cúbica de corpo centrado de estequiometria  $\text{Fe}_4\text{N}$  ou, para maiores concentrações, a fase hexagonal compacta, de estequiometria  $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ .

As regiões em que as fases citadas acima são termodinamicamente estáveis é mostrado na Figura 2.

**Figura 2** - Diagrama de fase do sistema Fe-N

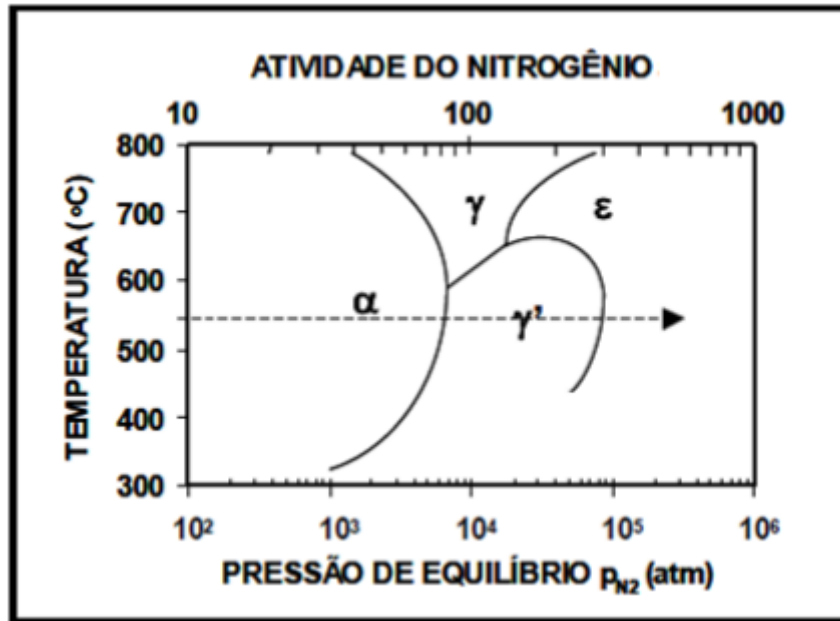


Fonte: ZAGONEL, 2006.

Como é possível perceber pelo diagrama: A solubilidade máxima de nitrogênio na ferrita é da ordem de 0,1% em massa. Além disso, quando o limite de solubilidade é ultrapassado pelo teor de nitrogênio, acontece a precipitação de compostos intermetálicos, chamados de nitretos. O primeiro a se formar é denominado de  $\gamma'$ , de estequiometria  $\text{Fe}_4\text{N}$ , cúbico de face centrada e com uma composição de nitrogênio próxima de 5,9% em massa. Para teores de nitrogênio maior que 6,1% em massa, ocorre a precipitação simultânea do nitreto  $\epsilon$ , de estequiometria  $\text{Fe}_{2,3}\text{N}$ , com estrutura cristalina hexagonal compacta. Já para teores de nitrogênio acima de 8%, o nitreto presente é o tipo  $\epsilon$ . No ferro, pode ocorrer a precipitação do nitreto metaestável  $\alpha''$  (SANTOS, 2013).

As regiões de estabilidade de fase para o sistema Fe-N, podem ser visualizadas em um diagrama que mostra a temperatura versus o potencial químico de nitrogênio, ou potencial de nitretação, da atmosfera ao redor da amostra (MITTEMEIJER, 2013). O diagrama de Lehrer, mostrado na Figura 3, permite entender como pode ser realizado o controle sobre a metalurgia da superfície nitretada.

**Figura 3 - Diagrama de Lehrer**



Fonte: SANTOS, 2013.

É possível perceber pelo diagrama que é utilizado como variável a pressão parcial de nitrogênio, ou como citado anteriormente, o potencial de nitretação. O equilíbrio de fases depende do potencial de nitrogênio, como é possível perceber pela linha tracejada, nas temperaturas usuais de nitretação. Além disso, o aumento na pressão parcial de nitrogênio ou da atividade do nitrogênio dissolvido desloca o equilíbrio de Fe- $\alpha$  para nitreto tipo  $\gamma'$  e de nitreto  $\gamma'$  para nitreto tipo  $\epsilon$ . Esse diagrama é o mais adequado para o fornecimento de massa (pela atmosfera) e é limitado pela diferença de potencial do constituinte (SANTOS, 2013).

### 3.1.1 Nitretação Gasosa

Na nitretação a gás, é mantido na superfície da peça uma certa atividade de nitrogênio, através da decomposição do  $\text{NH}_3$ , que é proveniente de uma mistura gasosa de  $\text{NH}_3/\text{H}_2$ . Sendo assim, dependendo das pressões parciais dos gases e da temperatura, uma concentração constante na superfície da amostra é mantida. Quando a atividade de nitrogênio é alta o suficiente, inicia-se a nucleação de  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N e  $\epsilon$ -Fe<sub>2-3</sub>N na superfície e posteriormente formação da camada branca (DIEHL et. al., 2017). Essa camada branca é seguida de uma zona de difusão. A nitretação é



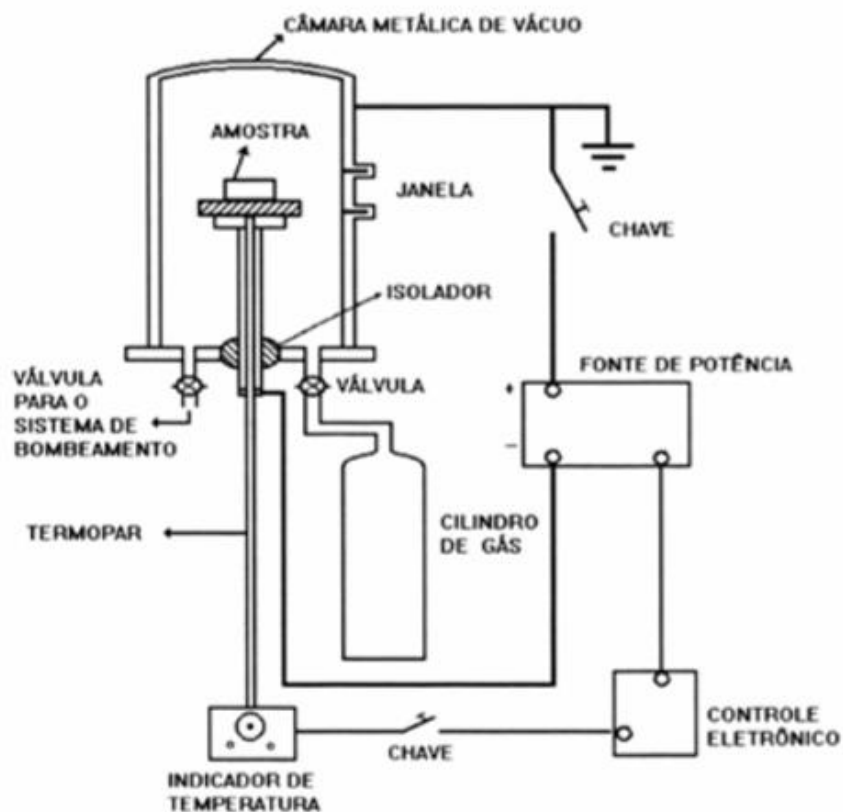
feita numa atmosfera de amônia em uma temperatura entre 500 e 565°C, onde ocorre a dissociação parcial da amônia na superfície da amostra. O nitrogênio é liberado de acordo com a reação:  $\text{NH}_3 \leftrightarrow 3/2\text{H}_2 + \text{N}$  (dissolvido no ferro). Normalmente, o processo é conduzido numa condição em que a dissociação de amônia esteja entre 15 e 30% (SANTOS, 2013).

Esse tipo de nitretação possui algumas vantagens em relação aos outros processos, dentre elas estão menor distorção e empenamento, além de boa resistência à corrosão e bom acabamento superficial das peças. Porém, da mesma forma que possui algumas vantagens no processo de nitretação, ele possui também algumas desvantagens atreladas ao processo, dentre elas estão: Camada nitretada pouco profunda, descoloração das peças, camada branca com profundidade excessiva e trincas na superfície nitretada (GOBBI, 2009).

### 3.1.2 Nitretação Iônica

Na nitretação a plasma, o nitrogênio está na forma de íon. Ele é um Processo físico-químico ativado pelo efeito da temperatura e pela ação cinética de íons acelerados contra o substrato. Após nitretação a plasma, a superfície possui macroscopicamente o mesmo aspecto que aquelas nitretadas convencionalmente. Porém, existem consideráveis diferenças quando esta camada é observada através de um microscópio. De acordo com Gobbi (2009), os componentes são comumente colocados em uma câmara de reação, onde uma atmosfera nitretante, em geral misturas  $\text{N}_2\text{-H}_2$ , a baixa pressão, de 133 a 1333 Pa (1 a 10 Torr), é ionizada por meio de uma diferença de potencial elétrico de 350 a 1000V entre dois eletrodos imersos no reator. O componente a ser tratado fica acoplado ao cátodo e as paredes da câmara funciona como ânodo. Essa montagem é descrita pela Figura 4.

**Figura 4** - Desenho esquemático da câmara de nitretação



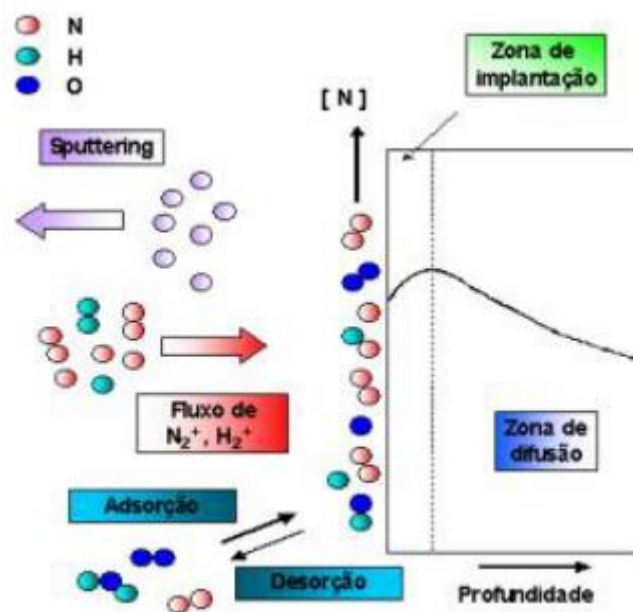
Fonte: GOBBI, 2009.

De acordo com Santos (2013) o grau de ionização, ou seja, a fração das espécies neutras originalmente ionizadas, é um importante parâmetro. Além disso, o plasma é classificado como fracamente ionizado quando o grau de ionização é muito menor que a unidade, sendo este utilizado no processo de nitretação iônica. O que difere as características do plasma são os átomos e moléculas constituintes, densidade, energia e grau de ionização. Porém, a quase-neutralidade é uma característica que independe desses parâmetros. Nela, as cargas livres se movem em resposta a qualquer campo elétrico no sentido de neutralizá-lo.

Quando uma carga é inserida num plasma, ou um campo elétrico é imposto, as cargas livres compostas por elétrons vão mover-se formando uma blindagem elétrica, denominada de blindagem de Debye, alterando o potencial original, o que atenuará exponencialmente com o comprimento de decaimento característico,  $\lambda_D$ , conhecido como comprimento de Debye. Na nitretação o valor  $\lambda_D$  de interesse é da ordem de

0,1 mm. Outro ponto importante de ser abordado é a oscilação do plasma, porém quando ocorre um desbalanceamento de carga em um plasma, os elétrons presentes se deslocam para neutralizar seus efeitos. Esse movimento é oscilatório em torno da carga, cuja frequência de oscilação é denominada de frequência do plasma. Ele é conhecido como parâmetro de secção de choque, é usado para se especificar um processo colisional entre espécies do plasma e a superfície do catodo. É relacionado à probabilidade de que um dado processo possa ocorrer (SANTOS, 2013).

**Figura 5** - Representação esquemática do processo de nitretação a plasma



Fonte: ECHEVERRIGARAY, 2006.

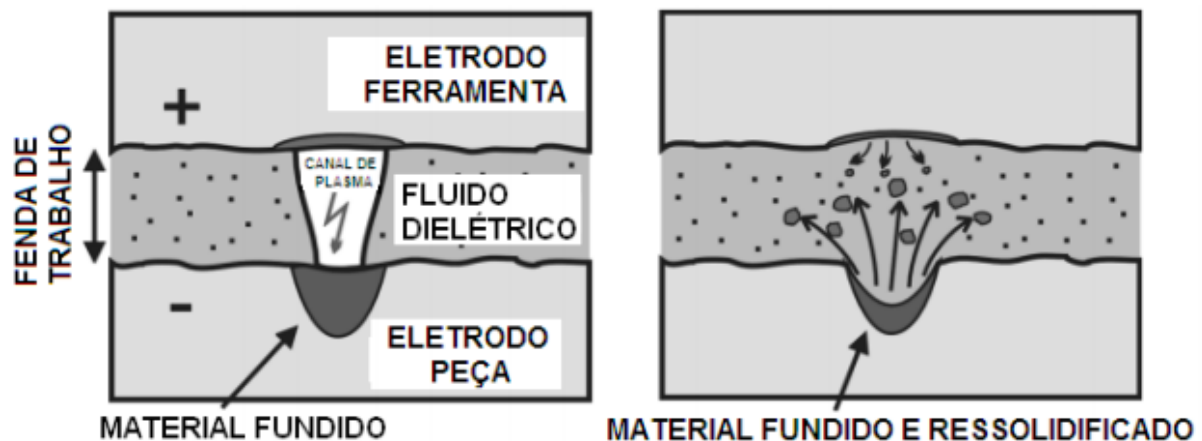
Como mostrado pela Figura 5, nesse tipo de nitretação o plasma é primariamente constituído por um gás, sendo ele parcialmente ionizado, com um sistema em equilíbrio dinâmico entre os íons e elétrons. Nele, os íons são acelerados na direção do material devido à aplicação de um campo elétrico negativo nas peças a serem tratadas. Depois de implantados, eles neutralizam-se e penetram por difusão no corpo do material (SANTOS, 2013).

Esse processo apresenta vantagens com relação a qualidade, repetibilidade do processo e, principalmente, às baixas temperaturas de tratamento.

### 3.2 Processo EDM

De acordo com Bleys et al. (2006), a usinagem por descarga elétrica (EDM) é um processo de remoção de material eletro-térmico amplamente utilizado para fabricação de ferramentas e moldes. Como descrito pela Figura 6, a energia elétrica é transformada em calor, durante uma descarga de EDM, resultando em uma pequena quantidade de material sendo derretida no eletrodo da ferramenta e na superfície da peça. No final da faísca, o canal de descarga do plasma entra em colapso e parte do metal fundido é ejetada, deixando uma cratera na superfície. Abaixo da superfície, o caráter térmico da EDM induz uma zona derretida e solidificada e uma zona afetada pelo calor. Ela é amplamente usada para usinar metais duros e para executar tarefas específicas que não podem ser alcançadas através de técnicas convencionais.

**Figura 6** - Representação Esquemática do Processo EDM



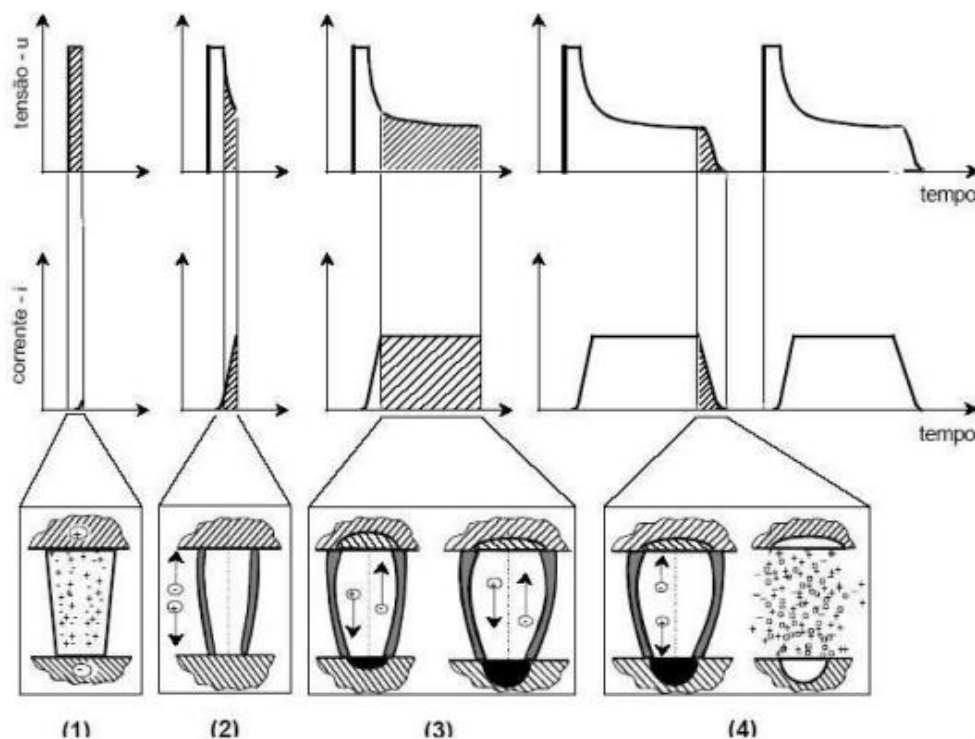
Fonte: BLEYS et al., 2006 (adaptada).

Existem diversas teorias que explicam o funcionamento. Porém a teoria termoelétrica é a que apresenta melhores explicações para o efeito da usinagem de materiais pela descarga elétrica. Esta teoria divide o ciclo de uma descarga elétrica em quatro etapas diferentes e em sequência:

- 1) Ignição;
- 2) Criação do canal de plasma;
- 3) Fusão e sublimação dos resíduos da peça e eletrodo;

4) Limpeza dos materiais que se fundiram (KAHNG, 1977). Essas etapas são descritas pela Figura 7.

**Figura 7** - As quatro fases de uma descarga elétrica no processo EDM



Fonte: SANTOS, 2013.

De acordo com Santos (2013), a primeira etapa, chamada de ignição, ocorre quando a distância entre o eletrodo e a peça é entre aproximadamente 0,05 a 1,00 mm. Devido à resistência do fluido dielétrico, não há fluxo de corrente, mesmo com a tensão variando em aberto de até 300 V. O eletrodo avança na direção da superfície da peça uma distância que possibilita o trabalho. Essa distância é denominada de fenda de trabalho e seu controle é fundamental para o êxito do processo.

De acordo com Oliniki (2009), a formação do canal de plasma, é devido à multiplicação em altíssima velocidade do fenômeno descrito na fase de ignição, a partir disso tem-se o início da ionização por impacto e origina-se um superaquecimento, seguido da evaporação de uma pequena quantidade do fluido dielétrico. Durante esse processo, ocorre em simultâneo um decréscimo da

resistência do dielétrico e um aumento da corrente elétrica, gerando túneis transportadores de cargas. A formação deles é decorrente do decaimento da tensão em aberto para a tensão de ruptura do fluido dielétrico, conseqüentemente, verifica-se o acréscimo da corrente elétrica até atingir o nível determinado pelo operador da máquina de EDM.

Durante a fase de sublimação dos materiais da peça e eletrodo, a área usinada é fortemente bombardeada por elétrons e íons positivos. Ocorrendo a alteração da energia cinética em calor, acarretando a fusão e a sublimação do material. Essa transformação se deve à penetração dos elétrons no anodo e dos íons positivos no catodo. A parcela de material fundido é dependente da quantidade de elétrons e íons que colidem com a superfícies dos eletrodos, porém está relacionada a outros aspectos. Esses aspectos são as propriedades físicas do eletrodo ferramenta e peça, tempo da descarga e intensidade de corrente (OLINIKI, 2009).

Durante a última etapa, ocorre a expulsão do material fundido durante as etapas anteriores. Ela ocorre ao término do tempo de descarga especificado, sendo interrompida a corrente elétrica pelo sistema de controle do gerador da máquina. O processo responsável pela retirada de material está ligado ao superaquecimento do material fundido nas cavidades dos eletrodos. Oliniki (2009) diz que:

“O mecanismo determina que durante o tempo de aplicação da descarga, as superfícies das cavidades fundidas nos eletrodos apresentam temperaturas próximas do ponto de ebulição dos materiais. Entretanto, pouco material é evaporado devido à alta pressão exercida pelo plasma sobre as cavidades. Com a interrupção da descarga, e o conseqüente colapsos do canal de plasma e da bolha de vapor por causa da queda brusca de pressão são geradas forças associadas ao fenômeno do superaquecimento com intensidade suficiente para separar o material fundido das paredes das cavidades, gerando assim uma pequena cratera nas superfícies dos eletrodos. Uma parte do material expelido é carregada pelo fluxo do dielétrico para fora da fenda de trabalho, e a outra parte se solidifica na própria cratera e em regiões próximas, constituindo a camada superficial chamada de camada branca”.

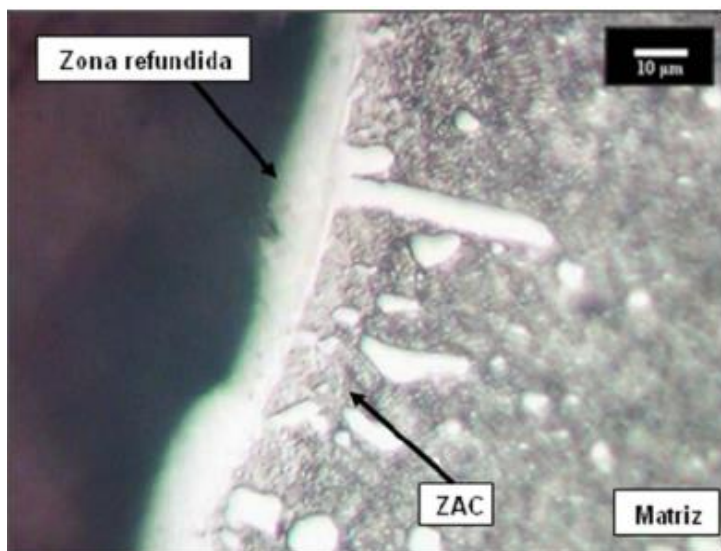
Existem diversos parâmetros que influenciam a qualidade e o rendimento do processo EDM. Um destes parâmetros é a corrente de descarga consumida, o limite da quantidade dessa corrente é diretamente relacionado com a circunstância de operação existente no canal. É necessário ter conhecimento da rugosidade esperada,

do desgaste máximo permitido ao eletrodo, da velocidade, das características térmicas do eletrodo e das condições do canal para selecionar a melhor corrente para o processo.

É possível observar, que as camadas superficiais dos materiais usinados apresentam modificações na sua composição química e estrutural, resultado esperado em um processo baseado em um mecanismo térmico de remoção de material. Esse mecanismo cria no material uma região chamada de “zona refundida”, resultado da solidificação de materiais liquefeitos não expelidos pela lavagem, que acabam se solidificando na cratera ou em zonas vizinhas. Essa região apresenta composição e estrutura bastante heterogêneas, além de apresentar propriedades mecânicas completamente diferentes daquelas encontradas no material base da liga (SANTOS, 2013).

Posteriormente a zona refundida, situa-se a zona afetada pelo calor (ZAC). Esta é uma camada que não sofreu fusão. Porém mesmo não tendo contato com o fluido dielétrico, a composição química e estrutura são modificadas pelo calor irradiado do plasma, através do fenômeno de difusão de átomos de áreas com maior concentração para aquelas de menor concentração atômica. A Figura 8 apresenta a microestrutura de um aço AISI D6 submetido à EDM por penetração, onde é possível notar a formação da zona refundida, região esbranquiçada, resultado do ataque químico do Nital na metalografia. É possível observar também a presença da ZAC e de carbonetos (SANTOS, 2007).

**Figura 8** - Microscopia ótica da amostra do aço AISI D6 beneficiada, usinado por EDM em regime de acabamento



Fonte: SANTOS, 2007.

Para um material ser utilizado como eletrodo ferramenta na EDM, deve apresentar características desejáveis como: alta condutividade elétrica, alto ponto de fusão, desgaste, custo, disponibilidade do material e facilidade de fabricação. Seguindo esses critérios, o que se tem atualmente é o emprego, em sua ampla maioria, de eletrodos de cobre e grafita (SANTOS, 2013).

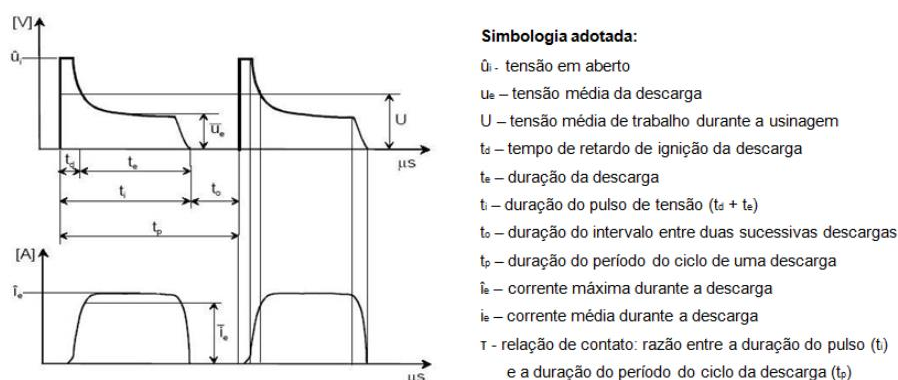
Já em relação aos fluidos dielétricos, são requeridas algumas qualidades, dentre elas a capacidade de ionizar rapidamente, após a descarga elétrica, além de ser necessário que possuam alta força dielétrica para permanecer como isolante até que ocorra a tensão de desequilíbrio, para que ocorra a formação do canal de plasma. Dessa forma, os materiais mais usados para essa aplicação são os líquidos à base de hidrocarbonetos. Porém, esses líquidos podem causar problemas com a saúde ocupacional, sendo exigido atualmente que eles sejam biodegradáveis, justificando o emprego de óleos modificados de origem vegetal e água deionizada. Estes fluidos apresentam um papel muito importante no controle da potência e abertura do arco, além da remoção das partículas sublimadas da peça, refrigeração e proteção contra oxidação e contaminação durante todo o processo (SANTOS, 2013).



### 3.2.1 Definição dos parâmetros de usinagem no processo EDM

Com o intuito de realizar a correta aplicação no processo de EDM, é essencial ter o conhecimento, além do princípio físico de remoção do material, dos parâmetros elétricos que podem influenciar no comportamento equilibrado da fenda de trabalho resultando em condições estáveis de eletroerosão, que significa, geralmente, a ausência ou diminuição da ocorrência de arcos e curtos-circuitos e, conseqüentemente, melhor rendimento do trabalho da usinagem (AMORIM, 2002). A Figura 9 apresenta o comportamento da tensão e a corrente elétrica durante o ciclo de uma descarga elétrica no processo EDM, além de apresentar todos os parâmetros que estão presentes no processo.

**Figura 9** - Comportamento da Tensão e Corrente Elétrica durante o ciclo de uma descarga elétrica no processo EDM



Fonte: SANTOS, 2013.

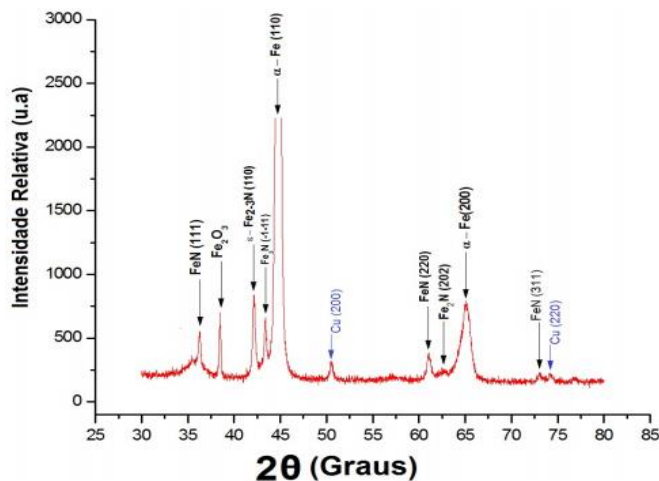
Os parâmetros que definem as configurações básicas de uma máquina EDM, de acordo com Kumar et al. (2009), são frequência de pulso, fator de serviço (DT) e a corrente média (Amper). Todos eles estão relacionados a duas variáveis muito importantes para o processo, tempo de duração do pulso ( $t_{on}$ ), tempo de intervalo do pulso ( $t_{off}$ ) e o tempo de ciclo do processo ( $t_{on} + t_{off}$ ), que são objetos de estudos deste trabalho. De acordo com Pedroso et al. (2016), fator de serviço é definido como um percentual do  $t_{on}$  sobre o tempo de ciclo. A medida que o valor do fator de serviço aumenta, também se tem uma maior eficiência de corte.

O parâmetro de duração da descarga ( $t_{on}$ ) exerce forte influência nas características superficiais da peça usinada. Quando se tem baixa frequência, ou seja, com  $t_{on}$  longo o acabamento observado é grosseiro, pois a longa duração da descarga é suficiente para fundir uma grande cratera. À medida que o valor de  $t_{on}$  diminui, menos material é fundido e é produzido crateras menores. Dessa forma, o acabamento superficial melhora, mas a velocidade de usinagem diminui e aumenta o desgaste do eletrodo (SANTOS, 2013). Essa frequência de pulso (kHz) é calculada dividindo o valor de 1000 pelo tempo total de ciclo em  $\mu s$ .

Pedroso et al. (2016) define corrente de pico como a corrente máxima fornecida pela fonte de alimentação/gerador disponível para cada pulso. Corrente média é a amperagem média da abertura da faísca ao longo de um ciclo completo. Ela é calculada pela multiplicação da corrente de pico pelo fator de serviço (PEDROSO, 2016).

### **3.3 Nitretação por descargas elétricas (NDE)**

A nitretação através do EDM é objeto de estudos de vários projetos acadêmicos. Santos (2013) analisou o enriquecimento do aço AISI 4140, no qual o principal objetivo do trabalho foi desenvolver uma metodologia para promover a nitretação das superfícies de amostras fabricadas em aço baixa liga. Onde foi mostrado que a nitretação pode ocorrer simultaneamente à usinagem por EDM. Em que foi observado a formação de Nitretos de Ferro (FeN) na superfície do material até uma profundidade de 25  $\mu m$ . Como é possível observar pelo difratograma da Figura 10.

**Figura 10** - Difratoograma do aço AISI 4140 NDE

Fonte: SANTOS, 2013.

Santos (2013) também constatou que não foram observados a presença dos nitretos  $\gamma$  e  $\gamma'$ , previstos no diagrama de Lehrer (Figura 3). Isso se deve ao fato da termodinâmica do processo de Nitretação por Descargas Elétricas divergir das condições apresentadas pelo diagrama de Lehrer, já que as temperaturas são altas (cerca de 20.000 °C) e as pressões baixas (cerca de 200 bar).

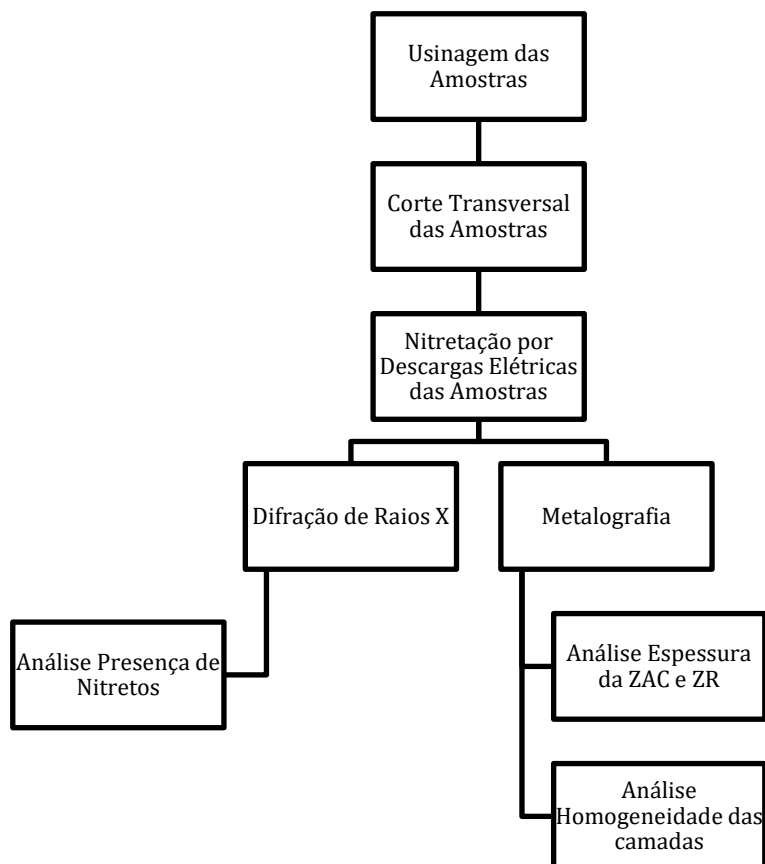
Estudos realizados por Raslan, Santos e Silva (2012) e Pedroso et al. (2016) também estudaram sobre esta técnica de enriquecimento de superfícies com nitretos por meio do EDM, que pelo pedido de depósito de patente feito por Raslan, Santos e Silva (2012) foi possível destacar a relevância tecnológica da pesquisa.

Já a influência do parâmetro  $T_{off}$  no processo NDE em um aço ferramenta ABNT H13, foi estudado por Silva et al. (2018), no qual o principal objetivo do trabalho foi investigar a configuração do parâmetro que resulta em melhor uniformidade de camadas (refundida e nitretada), maior camada nitretada e microdureza, variando o parâmetro  $T_{off}$  da máquina de eletroerosão através do processo NDE. Para isso foi utilizado solução aquosa de ureia em água deionizada na concentração de 30 g/l, e eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico. Os resultados do trabalho mostraram que o parâmetro  $T_{off}$  exerce influência no processo NDE, com alteração de espessura das camadas refundidas (ZR) e nitretadas (CN).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 11. apresenta a sequência de atividades executadas durante a confecção do projeto.

**Figura 11** - Fluxograma das etapas de desenvolvimento do trabalho



Fonte: Autor

O trabalho experimental foi realizado no Laboratório de Usinagem e Ajustagem e Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

### 4.1 Preparação do material

O material escolhido para ser usado como eletrodo peça foi o aço AISI 4140, por ser um material com grande potencial para nitretação. A tabela 1 apresenta a composição do aço liga AISI 4140, é possível observar a presença de elementos formadores de

nitretos, como cromo e molibdênio. Foram preparadas 8 amostras com dimensões de 19 mm de diâmetro e 13 mm de espessura por processo de usinagem convencional, sendo 4 destinadas as análises de DRX e 4 aos ensaios metalográficos.

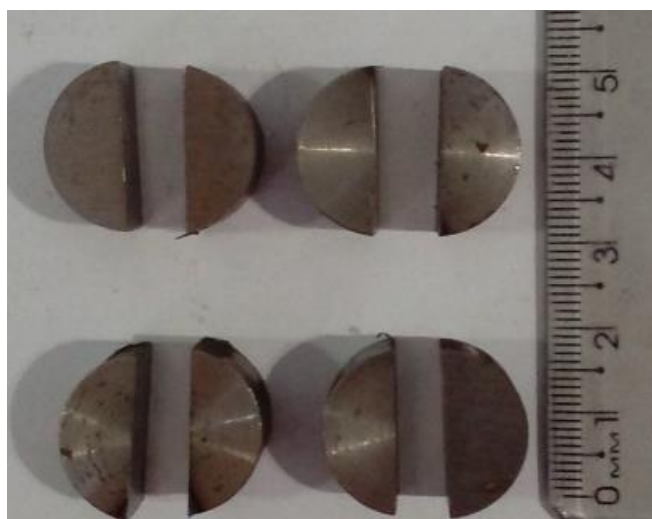
**Tabela 1** - Composição química do aço AISI 4140

| Elementos | C (%) | Si (%) | Mn (%) | Cr (%) | Mo (%) |
|-----------|-------|--------|--------|--------|--------|
| AISI 4140 | 0,40  | 0,25   | 0,90   | 0,95   | 0,20   |

Fonte: VILLARES METALS, 2004

Para facilitar a visualização das camadas nitretadas pela metalografia, todas as amostras foram divididas ao meio, conforme é possível observar na Figura 12. O corte para preparação das amostras foi realizado com máquina serra de fita horizontal Timemaster SM200M. O material selecionado para confecção dos eletrodos ferramenta foi cobre eletrolítico nas dimensões de 22 mm de diâmetro e 30 mm de comprimento.

**Figura 12** - Amostras confeccionadas para o projeto



Fonte: Autor

## 4.2 Fluidos dielétricos

Como foi necessário diluir ureia no fluido, foi descartado o uso de fluidos a base de hidrocarbonetos. O fluido dielétrico utilizado foi uma solução aquosa, com

aproximadamente 40 litros de água deionizada e 1kg de ureia farmacológica. A condutividade elétrica da água antes da deionização era de 131  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , após a deionização e antes do ensaio foi realizada nova medição, que constatou 0  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . Após adição da ureia farmacológica, foi realizada uma nova medição da condutividade elétrica do fluido elétrico que passou para 27  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . As medições da condutividade elétrica do fluido foram realizadas utilizando o equipamento TDS&EC Meter, conforme apresentado na Figura 13.

**Figura 13** - Equipamento TDS&EC Meter usado para medição da condutividade do fluido antes e durante realização dos experimentos

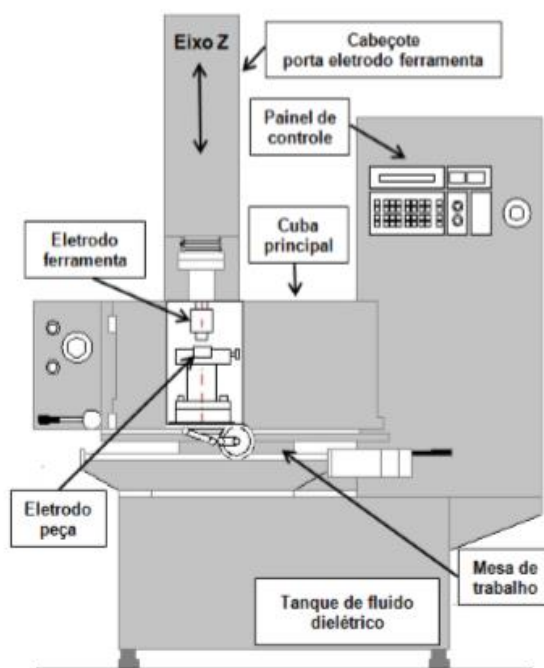


Fonte: Autor

### 4.3 Testes de usinagem e Nitretação por Descargas Elétricas

Os testes de usinagem e nitretação por descargas elétricas foram realizados em máquina EDM convencional por penetração, como ilustrado na Figura 14, o modelo usado foi o presente no Laboratório de Ajustagem do DEMAT, modelo Eletroplus EDM-540/340; Servspark. Ela possui porta eletrodo ferramenta, reservatório de fluido dielétrico, cabeçote, cuba principal e um painel de controle em que se ajusta os parâmetros do processo. Além disso, para este trabalho, foi utilizado uma cuba auxiliar de aço inoxidável austenítico ABNT 304 adaptada no equipamento.

**Figura 14** - Esquema de máquina EDM por penetração



Fonte: SANTOS, 2013.

A principal função da cuba auxiliar foi prevenir corrosão provocada pelos fluidos dielétricos. Ao mesmo tempo, ela evita que ocorra a contaminação tanto do óleo mineral presente no reservatório de 400 litros do equipamento, quanto da água na cuba auxiliar. Ela é fabricada de aço inoxidável austenítico ABNT 304 para permitir a troca rápida das amostras após os testes de usinagem por descargas elétricas. A Figura 15 apresenta o equipamento utilizado com a cuba inserida.

Foi usado também uma bomba modelo CD 3002 de fabricação ASTEN com vazão de 51 L/m 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 60 Hz. O principal motivo para utilização da bomba foi proporcionar a limpeza de partículas em suspensão no local da fenda de trabalho, através de uma mangueira com jato d'água.

Conforme descrito anteriormente, o eletrodo ferramenta com polaridade positiva (anodo) utilizado foi o cobre eletrolítico e o eletrodo peça com polaridade negativa (catodo) foi o aço AISI 4140.

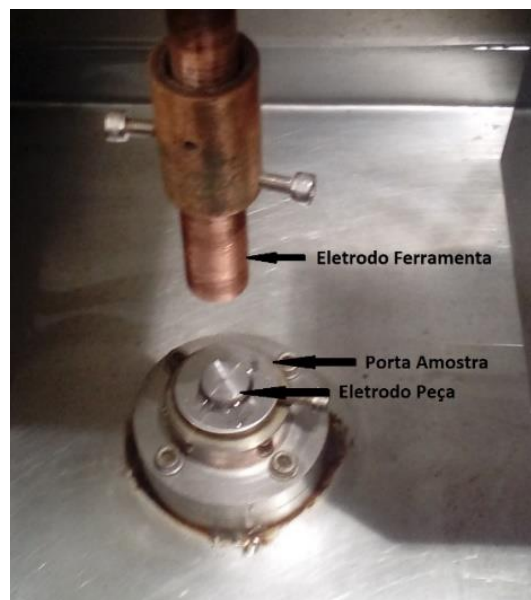
**Figura 15** - Eletroplus EDM-540/340 com cuba instalada



Fonte: Autor

A Figura 16 apresenta a disposição do dispositivo porta amostra dentro da cuba auxiliar. O dispositivo é fabricado em aço AISI 304, que possui como objetivo permitir a troca rápida das amostras após os testes de usinagem por descargas elétricas.

**Figura 16** - Configuração de montagem da amostra dentro do porta amostra



Fonte: Autor



A Figura 17 apresenta os parâmetros que podem ser ajustados no painel de controle da máquina EDM.

**Figura 17** - Painel de controle da máquina EDM com indicação dos parâmetros ajustados



Fonte: PEDROSO, 2016

#### 4.4 Procedimento experimental

Tendo em vista os objetivos apresentados anteriormente, para avaliar a influência do parâmetro  $T_{off}$  na espessura e homogeneidade da camada nitretada, os ensaios foram realizados variando entre quatro valores diferentes para o  $T_{off}$ . A corrente resultante do processo, medida através do visor da máquina EDM, para cada amostra também foi anotada, conforme é mostrado na Tabela 2. O valor de  $T_{on}$  foi mantido em 500  $\mu$ s para todos os casos. Cada amostra foi mantida na máquina durante o processo EDM por 10 minutos.

**Tabela 2** - Parâmetros que foram empregados na máquina Eletroplus

| <b>Amostra</b> | <b>Ton</b>  | <b>Toff</b>  | <b>Corrente</b> | <b>Duração Teste</b> |
|----------------|-------------|--------------|-----------------|----------------------|
| 1 e 5          | 500 $\mu$ s | 2,5 $\mu$ s  | 35 A            | 10 minutos           |
| 2 e 6          | 500 $\mu$ s | 5,0 $\mu$ s  | 30 A            | 10 minutos           |
| 3 e 7          | 500 $\mu$ s | 7,5 $\mu$ s  | 25 A            | 10 minutos           |
| 4 e 8          | 500 $\mu$ s | 10,0 $\mu$ s | 20 A            | 10 minutos           |

Fonte: Autor

#### 4.5 Metalografia

Devido a necessidade de preservação das bordas do material e manutenção da planicidade, o ensaio metalográfico foi realizado através do embutimento das amostras utilizando resina epóxi termo-endurecível, carregada com minerais. Essa resina é a mais adequada por possuir baixa contração e alta aderência com o material. Dessa forma, é evitado que a camada fundida se desprenda durante o corte e o lixamento (SANTOS, 2013).

Para realização dos testes metalográficos, as amostras embutidas foram lixadas manualmente usando lixas de carbeto de silício com granulometrias de 220, 400, 600 e 1000 mesh. Em seguida, foi executado o polimento em politriz automática, com pastas de diamante de granulometrias 9, 3 e 1  $\mu$ m. Após polimento, as amostras foram atacadas quimicamente com Nital 3%. As imagens foram obtidas com auxílio de um microscópio óptico.

O principal objetivo do ensaio foi avaliar a espessura e homogeneidade da camada nitretada após o processo NDE. A medição da espessura da camada nitretada foi realizada com o auxílio do programa ImageJ, que é um programa de processamento de imagem Java de código aberto inspirado no NIH Image.

#### 4.6 Difração de Raio X

Com o objetivo de verificar a presença de nitretos, foi realizado o ensaio de Difração de Raio X (DRX) convencional nas amostras 1 a 4. As especificações técnicas do Difratorômetro e os parâmetros são apresentados na **Tabela 3**.

**Tabela 3** - Especificação técnica e parâmetros usados no DRX

| <b>Parâmetros</b>            | <b>Valor</b> | <b>Unidade</b> |
|------------------------------|--------------|----------------|
| Radiação                     | Cu           |                |
| Voltagem do Tubo             | 40           | kV             |
| Corrente                     | 30           | mA             |
| Modo de Varredura            | Tempo fixo   |                |
| Espaçamento                  | 0,02°        |                |
| Velocidade de Varredura      | 2,00         | graus/min      |
| Tempo de Varredura por ponto | 5,00         | seg            |
| Ângulo Inicial ( $2\theta$ ) | 30,00°       |                |
| Ângulo Final ( $2\theta$ )   | 110,00°      |                |

Fonte: Autor

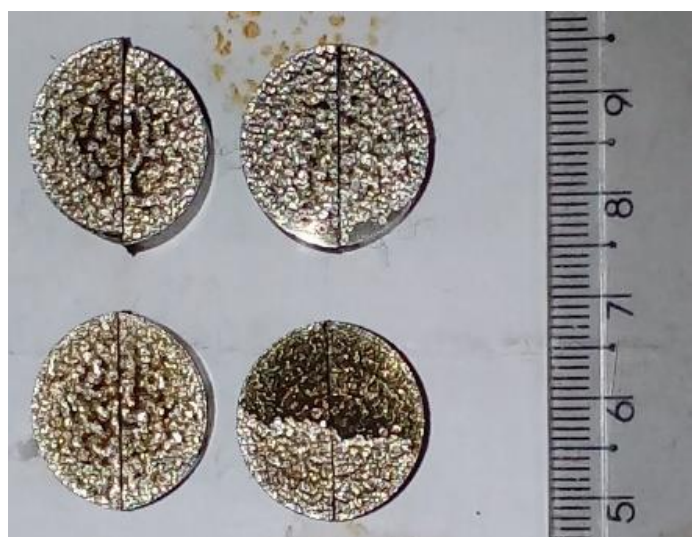
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão apresentados neste capítulo os resultados e discussões referente ao processo de NDE do aço AISI 4140, como variação análise visual das amostras nitretadas, avaliação da espessura e homogeneidade das zonas ZR e ZAC e identificação de fases segundo difratograma de raios-X.

### 5.1 Aspecto Visual das Amostras Nitretadas

As características visuais das amostras são apresentadas pela Figura 18. É possível observar que as amostras sofreram o processo de Nitretação.

**Figura 18** - Aspecto visual das Amostras após processo de NDE



Fonte: Autor

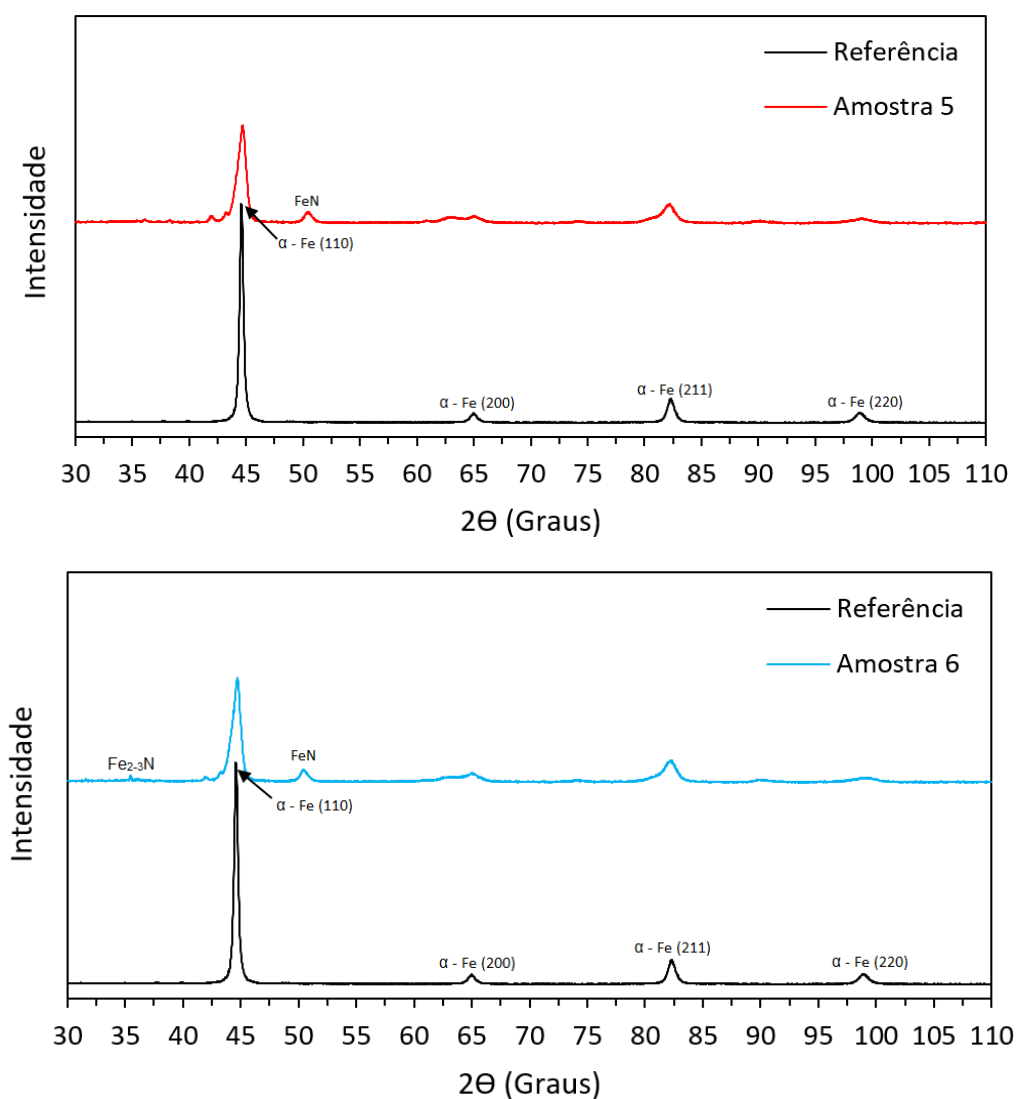
### 5.2 Determinação das fases por Difração de Raios X

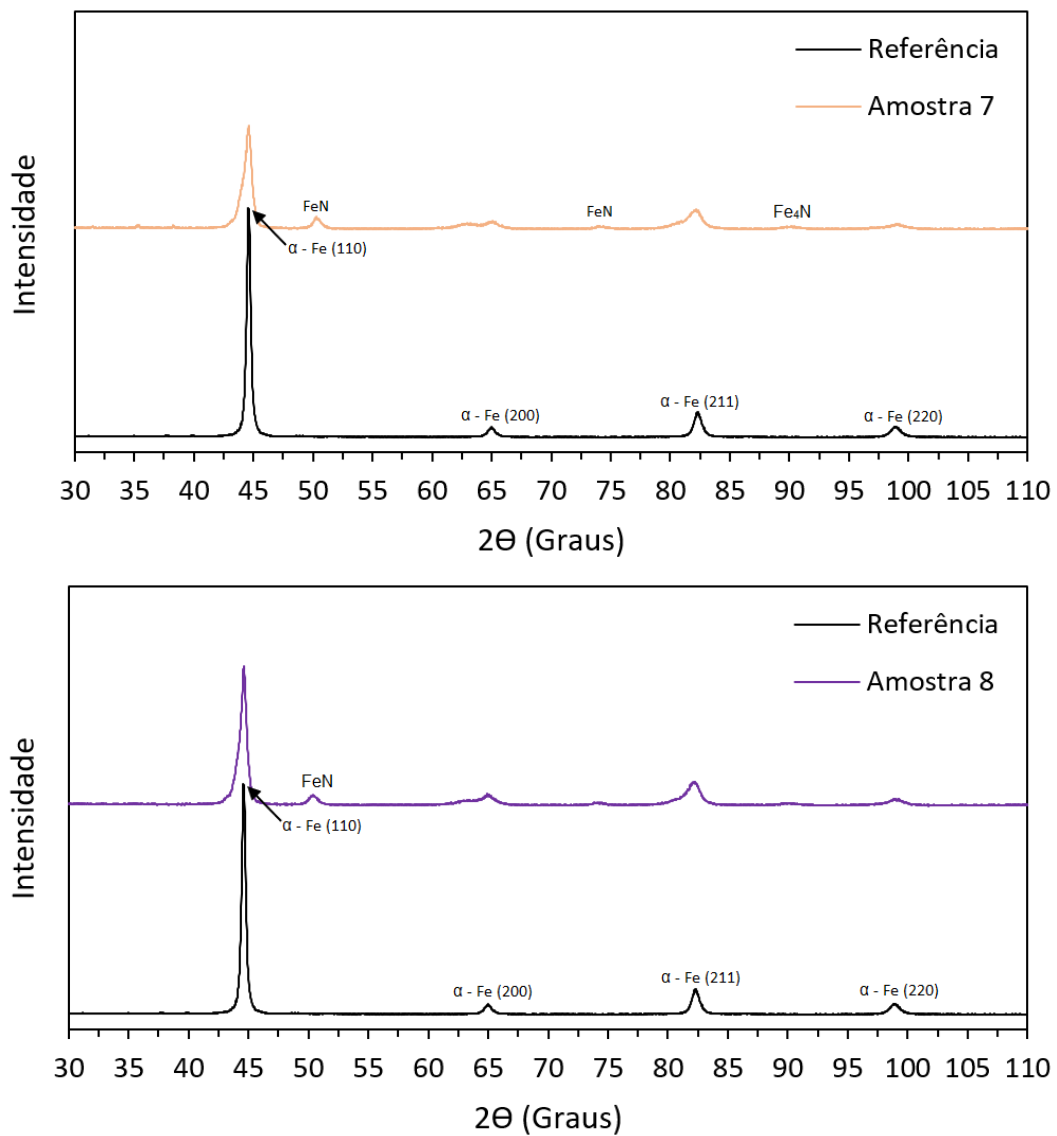
Foi possível confirmar pelos Difratogramas acima a nitretação das amostras, devido aos novos picos formados, em relação a referência, pelo processo de eletroerosão. As fases majoritárias foram identificadas. Conforme apresentado pela Figura 19, a fase predominante do material é a Fe- $\alpha$  (cúbica de corpo centrado) com a orientação cristalográfica (110). Porém, nota-se também a presença dos picos cristalinos (200), (211) e (220). As bases dos picos presentes nas amostras nitretadas são mais

alargadas e distorcidas se comparadas a Amostra Referência, de acordo com Santos (2013), essa característica das curvas pode ser atribuída à presença do nitrogênio introduzido devido ao processo de EDM em fluido dielétrico de ureia.

Foi possível identificar em todas as amostras, picos referentes as fases FeN, Fe<sub>2-3</sub>N (γ') e Fe<sub>4</sub>N (ε). A intensidade dos picos para essas fases é muito baixa, pois as camadas nitretadas possuem uma espessura muito pequena, o que acarreta a redução do volume difratado e, conseqüentemente, enfraquecendo as eventuais reflexões provenientes das camadas nitretadas (SANTOS, 2015).

**Figura 19 - Espectro de DRX das Amostras**





Fonte: Autor

### 5.3 Micrografia

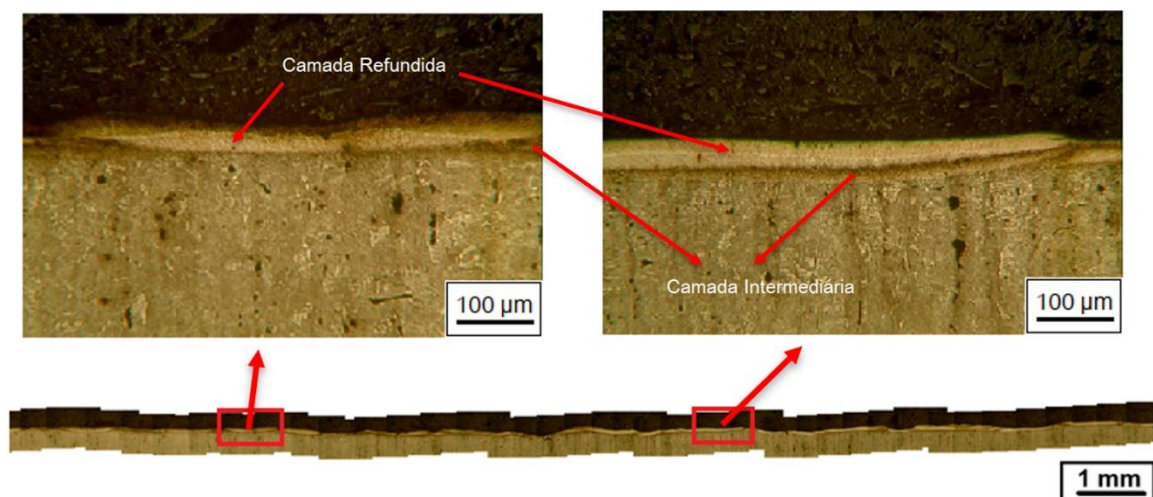
#### 5.3.1 Formação e homogeneidade das camadas nitretadas

As Figuras 20 a 23 apresentam os resultados da microscopia ótica da seção transversal da superfície usinada das amostras. É possível observar pelas imagens a formação da camada refundida (ZR) e camada intermediária (ZAC). Também nota-se a presença de algumas regiões de fratura, que podem ter surgido em decorrência do manuseio durante a usinagem das peças, durante a preparação metalográfica ou durante o processo de nitretação.

Verifica-se que a espessura da ZAC ao longo das amostras é descontínua e, em alguns trechos das amostras, se apresenta fina e pouco perceptível, conforme será apresentado no tópico 5.3.2. Um outro ponto importante a ser notado, é que a espessura média da ZR é superior a ZAC em todas as amostras, porém em algumas regiões a espessura da ZAC é muito maior que da ZR, confirmando a heterogeneidade das camadas formadas. Nas amostras 3 e 4, foi possível observar que a heterogeneidade da ZR é menor, do que se comparados as Amostra 1 e 2, podendo indicar que o aumento do parâmetro  $T_{off}$  acarreta na diminuição da não uniformidade da camada.

A ZAC está presente abaixo da ZR em todas as imagens a ZAC. Observa-se que a ZAC é mais escura e nítida em alguns pontos das amostras o que Santos (2013) explica como sendo devido a quantidade de nitrogênio introduzido no material.

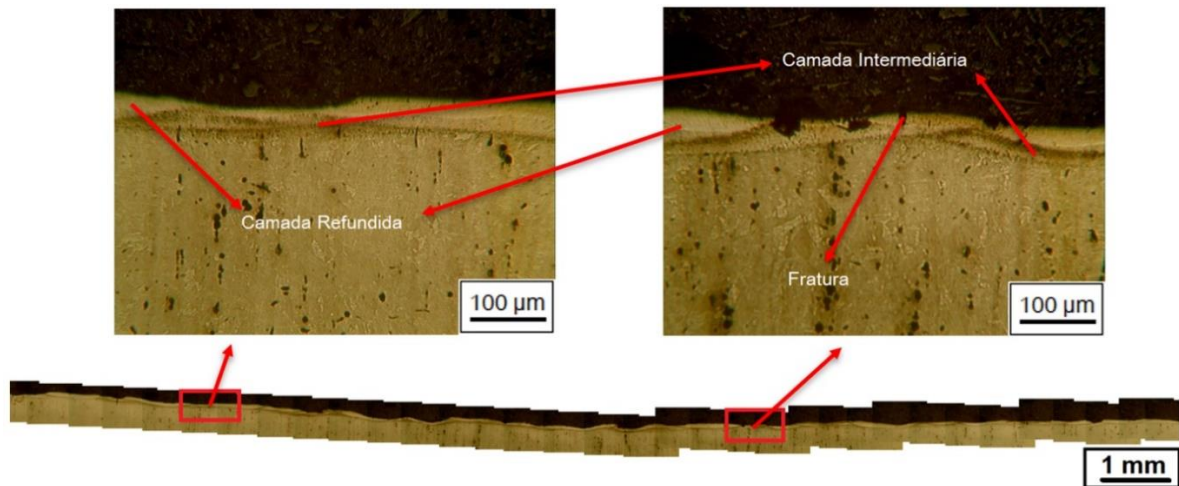
**Figura 20** - Imagem de microscopia ótica da seção transversal da superfície usinada da Amostra 1. Camadas refundida e intermediária em destaques.



Fonte: Autor



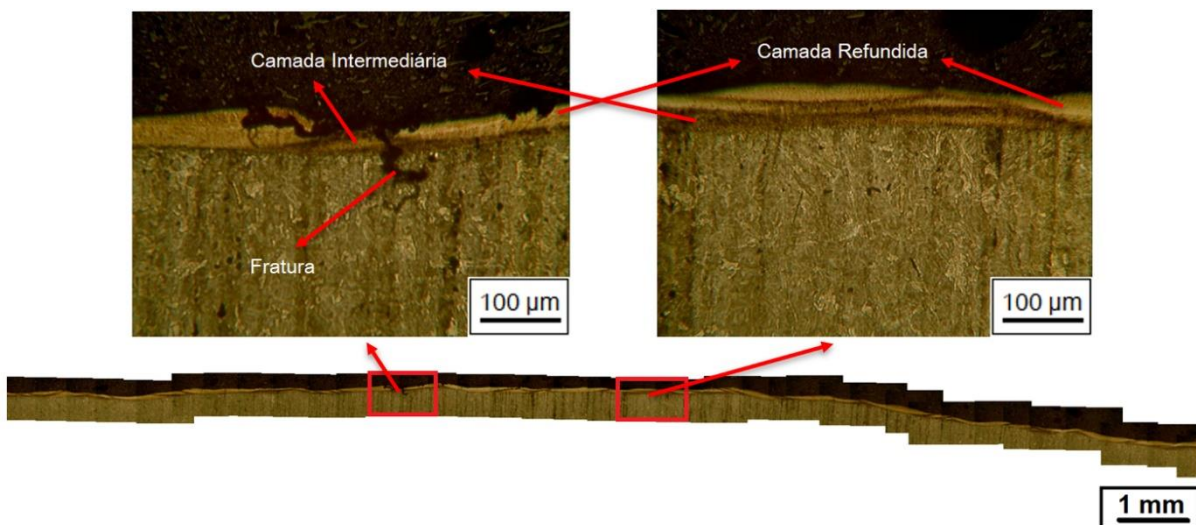
**Figura 21** - Imagem de microscopia ótica da seção transversal da superfície usinada da Amostra 2. Camadas refundida e intermediária em destaques.



Fonte: Autor

A amostra 3 e 4 apresentaram micro trincas maiores que as observadas nas amostras 1 e 2. Essa diferença pode ser devido ao maior valor de  $T_{off}$  ( $7,5 \mu s$  e  $10,0 \mu s$ ) utilizado nessas amostras, porém serão necessários mais estudos para comprovar a influência do parâmetro na formação de microtrincas.

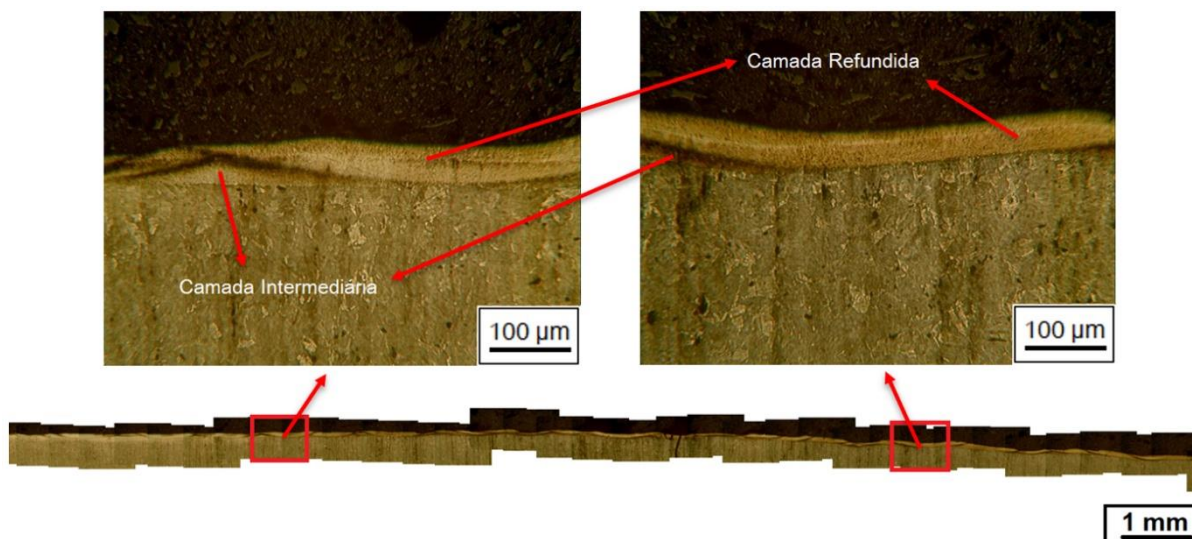
**Figura 22** - Imagem de microscopia ótica da seção transversal da superfície usinada da Amostra 3. Camadas refundida e intermediária em destaques.



Fonte: Autor



**Figura 23** - Imagem de microscopia ótica da seção transversal da superfície usinada da Amostra 4. Camadas refundida e intermediária em destaques.



Fonte: Autor

### 5.3.2 Espessura e uniformidade da camada nitretada

Foram realizadas 24 medições da ZR e 24 medições da ZAC para cada amostra. Foi utilizado a média dos valores obtidos para comparação e análise das espessuras da camada nitretada. Para análise de uniformidade da camada nitretada, foi usado o desvio padrão das medições obtidas. Todos os valores calculados para cada amostra são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4** - Dados de espessura média das camadas e desvio padrão das amostras

| Amostra | ZR ( $\mu\text{m}$ ) | ZAC ( $\mu\text{m}$ ) | Espessura Total ( $\mu\text{m}$ ) |
|---------|----------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| 1       | 41,84 $\pm$ 14,16    | 17,61 $\pm$ 6,57      | 59,45 $\pm$ 17,10                 |
| 2       | 47,62 $\pm$ 13,17    | 15,36 $\pm$ 5,12      | 62,98 $\pm$ 13,35                 |
| 3       | 45,70 $\pm$ 11,29    | 17,75 $\pm$ 8,74      | 63,45 $\pm$ 11,39                 |
| 4       | 49,59 $\pm$ 10,35    | 13,10 $\pm$ 5,47      | 62,70 $\pm$ 10,61                 |

Fonte: Autor

Com o objetivo de padronizar as medições e aumentar a assertividade dos valores encontrados, as imagens metalográficas apresentadas nas Figuras 20 a 23 foram

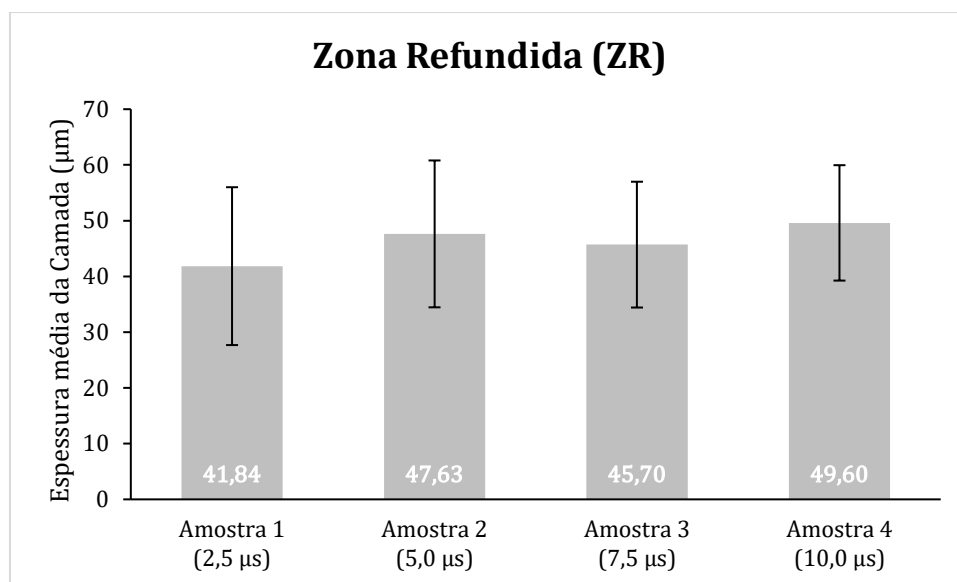
divididas em 8 regiões, sendo 4 com camadas mais espessas e 4 com camadas mais finas e em cada uma dessas regiões foram realizadas 3 medições.

A Figura 24 apresenta a comparação entre a média e variação da espessura da Zona Refundida (ZR) entre as amostras. Como é possível observar, a amostra 4 apresentou a maior espessura da camada e a amostra 1 apresentou a menor espessura da camada. Porém, a diferença observada entre as amostras 2, 3 e 4 é pequena, o que sugere que o aumento do parâmetro  $T_{off}$  não influenciou de forma significativa no tamanho da ZR, mas também é possível inferir com os resultados obtidos que o aumento no valor do  $T_{off}$  gera maior espessura da ZR.

A espessura da ZR para os materiais produzidos pelo processo NDE por Santos (2013), foi na ordem de  $12,5 \mu\text{m}$ , quando se compara os valores encontrados é possível notar que a espessura da ZR obtida foi em média quatro vezes maior para todas as amostras. A diferença das camadas pode ser explicada pelos valores usados como tempo de pulso ( $T_{on}$ ), em ambas as pesquisas. Santos (2013), utilizou como parâmetro o valor de  $100 \mu\text{s}$ , número este cinco vezes menor que o utilizado para este trabalho. De acordo com Stevens (1988), o aumento da espessura da camada superficial é diretamente proporcional a elevação da energia aplicada ao processo.

Com relação a homogeneidade da camada, o mesmo observado para espessura se repete, sendo a Amostra 4 que apresentou o melhor resultado. Os resultados obtidos, porém, indicam que não foi possível obter camadas homogêneas, mas as variações encontradas para todas as amostras são proporcionalmente semelhantes, indicando que a variação do parâmetro  $T_{off}$  pode não influenciar no aumento ou diminuição da homogeneidade da Camada Refundida de materiais obtidos pelo processo NDE.

**Figura 24** - Comparação entre a espessura média da Zona Refundida (ZR) das Amostras.



Fonte: Autor

A Figura 25 apresenta a comparação entre a média e variação da espessura da Zona Termicamente Afetada (ZAC) entre as amostras. Diferente do que é observado para a ZR, as amostras 1 e 3 apresentaram os maiores valores de espessura média da camada e a amostra 4, ao contrário do constatado para a ZR, apresentou a menor espessura média da camada.

Com os dados apresentados, não é possível inferir que o aumento da espessura da ZAC está correlacionado a alteração do valor do parâmetro  $T_{off}$ . São necessários mais estudos para comprovar de fato a influência do parâmetro na espessura das camadas.

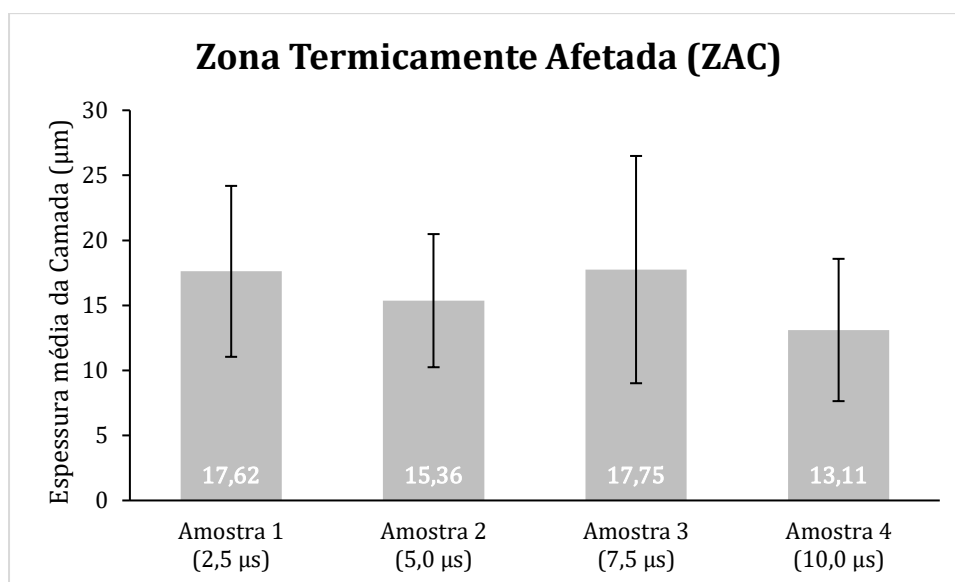
Outro fator importante que deve ser levantado, é que novamente o valor da largura da camada nitretada encontrada por Santos (2013), que foi em média  $10,5 \mu\text{m}$ , é menor que o valor encontrado para este trabalho, sugerindo novamente a influência do  $T_{on}$  na espessura da camada.

Com relação a homogeneidade da ZAC, a amostra 2 apresentou o melhor resultado, tendo aproximadamente 33% de variação máxima. Ao se comparar com os resultados obtidos para ZR, é possível notar que a variação da ZAC foi proporcionalmente maior,

chegando a ter pontos que a camada não estava visível, conforme apresentado na Figura 26.

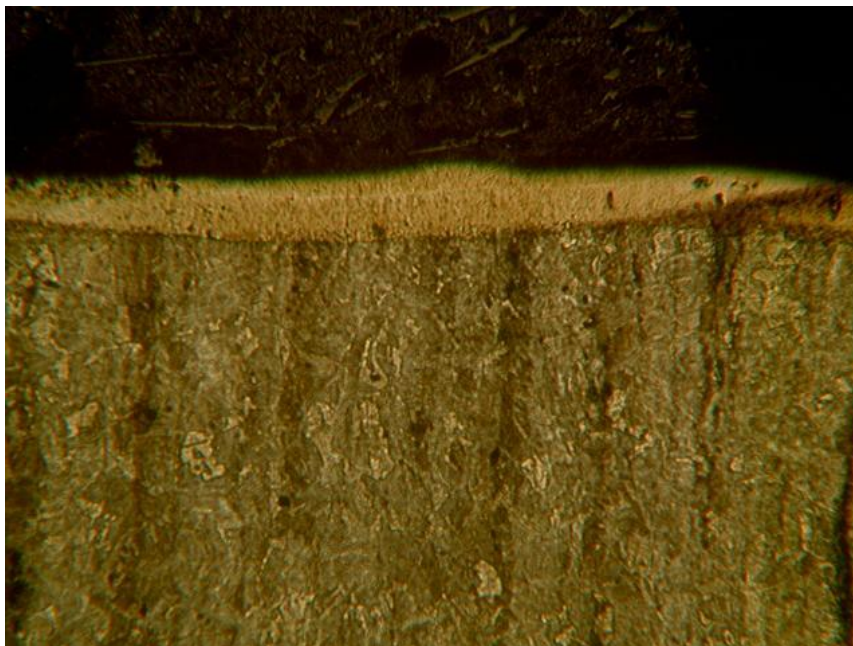
Ao se comparar os resultados obtidos com os encontrados por Santos (2013), observa-se novamente que a espessura da camada obtida em todas as amostras é maior, mais uma vez corroborando a hipótese da influência do parâmetro  $T_{on}$  no processo. Porém, proporcionalmente, a variação da espessura tanto da ZR quanto da ZAC foi maior no presente trabalho, indicando que à medida que a energia aplicada no processo é aumentada, maior é a heterogeneidade das camadas obtidas. Novamente, os resultados obtidos indicaram que não foi possível obter camadas homogêneas.

**Figura 25** - Comparação entre a espessura média das Zona Termicamente Afetada (ZAC) das Amostras.



Fonte: Autor

**Figura 26** - Imagem metalográfica de região em que a espessura da ZAC é mínima (Amostra 3).



Fonte: Autor

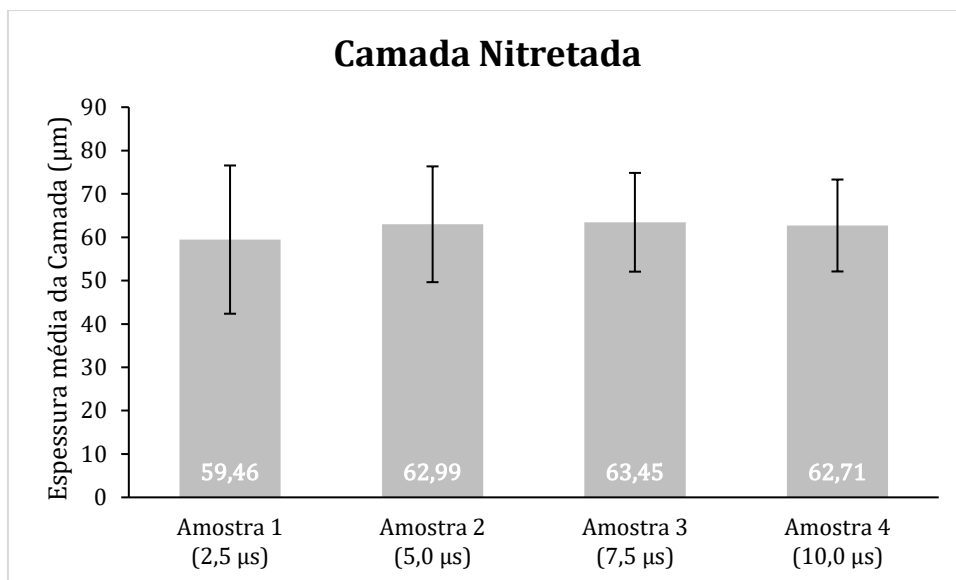
Por fim, é apresentado pela Figura 27 a comparação entre a média de espessura total da camada nitretada de todas as Amostras. Os valores encontrados para todas as Amostras são muito próximos, sendo a Amostra 3 a que apresentou o maior valor e Amostra 1 o menor.

Os resultados podem indicar que a variação do parâmetro Toff, dentro dos limites utilizados no presente estudo, possui influência muito pequena no aumento ou diminuição da espessura da camada nitretada.

Novamente, ao se comparar os resultados com os obtidos por Santos (2013), o valor encontrado neste trabalho é consideravelmente maior, com um valor médio de 60  $\mu\text{m}$ .

Com relação a homogeneidade da camada, novamente a Amostra 4 foi a que apresentou os melhores resultados, com uma variação máxima de aproximadamente 17% da média. Já a Amostra 1 foi a que apresentou o pior resultado, tendo uma variação máxima de aproximadamente 30% da média.

**Figura 27** - Comparação entre a espessura total média (ZR+ZAC) das Amostras.



Fonte: Autor

## 6 CONCLUSÕES

Após todas as análises, foi possível realizar um estudo inicial sobre a influência do parâmetro  $T_{off}$  no processo de nitretação por descargas elétricas do aço AISI 4140. Para isso, foi realizado experimentos utilizando quatro valores base para o parâmetro, 2,5  $\mu s$ , 5,0  $\mu s$ , 7,5  $\mu s$  e 10,0  $\mu s$ .

Através das análises obtidas pelo DRX e Metalografia, foi possível observar a formação das camadas ZR e ZAC para todas as amostras, independentemente do valor do parâmetro  $T_{off}$  utilizado. Através das análises por DRX, foi possível observar picos referentes as fases FeN, Fe<sub>2-3</sub>N ( $\gamma'$ ) e Fe<sub>4</sub>N ( $\epsilon$ ), comprovando que o nitrogênio despreendido das soluções aquosas de ureia se implantou na superfície dos corpos de prova.

A espessura e homogeneidade da ZR da Amostra 4 foi a que apresentou os resultados mais promissores. Em relação a ZAC a Amostra 3 apresentou a maior espessura média, porém a Amostra 2 que apresentou maior homogeneidade. O valor total encontrado para a média da camada nitretada usinada com eletrodo ferramenta de cobre foi próximo para todas os corpos de prova, sendo de aproximadamente 62,20  $\mu m$ .

Não foi possível avaliar a morfologia das superfícies usinadas pelo método NDE e a dureza das camadas nitretadas, sendo sugestão para trabalhos futuros essas análises dos materiais.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBINSKI, K.; MUSIOL, K.; MIERNIKIEWICZ, A.; LABUZ, S.; MALOTA, M. **The temperature of a plasma used in electrical discharge machining** 1996. 8f. Krakow University of Technology, Al Jana Pawla II 37, 31-864. Cracóvia, Polônia.

AMORIM, F. **Tecnologia de Eletroerosão de Penetração da Liga de Alumínio AMP 8000 e da Liga de Cobre CuBe para Ferramentas de Moldagem de Materiais Plásticos**. 2002. 156f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

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.

BRINKSMEIER, E.; HOFFMANN, F.; GLÄBE, R.; et al., **Diamond Machinable Tool Steels by Novel Nitriding Processes**. In: Fabrication of Complex Optical Components, LNPE, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 67-83, 2013.

DIEHL, L.I., DONG, J., ROCHA, A.S. **Propriedades do aço AISI 4140 nitretado a gás**. In: Matéria (Rio J.), vol.22, no.4, Rio de Janeiro, 2017.

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

GOBBI, V. J. **Influência da Nitretação a Plasma na Resistência ao Desgaste Microabrasivo do Aço Ferramenta AISI D2**. 2009. 97 f. Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília, Brasília, DF.



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

KUMAR, Sanjeev et al. **Surface modification by electrical discharge machining: A Review**. Journal Of Materials Processing Technology, [s.l.], v. 209, n. 8, p.3675-3687, abr. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.09.032>.

MITTEMEIJER, E.J. **Fundamentals of nitriding and nitrocarburizing**, In: DOSSETT, J., TOTTEN, G.E. ASM Handbook, v. 4A, Steel Heat Treating Fundamentals and Processes, ASM International, pp. 619–646, 2013.

OLINIKI, R. **Influência da Combinação entre os Parâmetros de Usinagem por Eletroerosão na Integridade Superficial do Aço AISI H13 Temperado e Revenido**. Curitiba: UTFPR, 2009. 127 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

SANTOS, R. F. **Nitretação por EDM do aço AISI 4140**. 2013. 108f, Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

SANTOS, R. F. **Influência do Material da Peça e do Tratamento Térmico na Eletroerosão dos Aços AISI H13 e AISI D6**. 2007. 132f. Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

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

SILVA, S. P.; CÂMARA, M. A; SILVA, E. R. **Influência do parâmetro  $T_{OFF}$  no Processo de Nitretação por descargas elétricas do Aço Ferramenta ABNT H13**. 2018. 8f. X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Salvador, BA.

SILVA, S. P.; FILHO, A. F.; NICESIO, I. C.; et al.; **Nitreção por Descargas Elétricas de Corpo de Prova para Ensaio de Fadiga em Aço Abnt 4140 com Matriz de Cobre.** 2016. 10f. IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Fortaleza, CE.

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

ZAGONEL, L. F. **Tratamentos de Superfícies de Uma Liga Ferrosa por Íons de Nitrogênio.** 2006. 104 f. Tese de Doutorado – Universidade Estadual de Campinas, SP.

## ANEXO A

Segue abaixo tabela com as medições da ZR e da ZAC da Amostra 1. Foram feitas 24 medições nas imagens obtidas por microscopia óptica com o auxílio do programa de imagem ImageJ.

| Amostra 1     |        |        |
|---------------|--------|--------|
|               | ZR     | ZAC    |
|               | 30,869 | 16,286 |
|               | 37,714 | 9,429  |
|               | 49,369 | 29,787 |
|               | 75,745 | 22,193 |
|               | 31,046 | 31,908 |
|               | 50,029 | 22,48  |
|               | 52,991 | 14,555 |
|               | 62,393 | 9,44   |
|               | 39,429 | 23,143 |
|               | 29,155 | 12,031 |
|               | 36,867 | 10,286 |
|               | 38,581 | 9,429  |
|               | 19,714 | 9,522  |
|               | 39,655 | 8,664  |
|               | 40,554 | 22,222 |
|               | 58,974 | 19,677 |
|               | 41,034 | 23,14  |
|               | 37,51  | 15,341 |
|               | 28,125 | 14,514 |
|               | 30,729 | 18,75  |
|               | 67,93  | 24,069 |
|               | 51,604 | 20,648 |
|               | 28,38  | 17,192 |
|               | 25,802 | 18,072 |
|               |        |        |
|               | ZR     | ZAC    |
| Média         | 41,84  | 17,62  |
| Desvio Padrão | 14,16  | 6,57   |

## ANEXO B

Segue abaixo tabela com as medições da ZR e da ZAC da Amostra 2. Foram feitas 24 medições nas imagens obtidas por microscopia óptica com o auxílio do programa de imagem ImageJ.

| Amostra 2     |        |        |
|---------------|--------|--------|
|               | ZR     | ZAC    |
|               | 54,727 | 7,74   |
|               | 29,914 | 6,838  |
|               | 50,434 | 9,44   |
|               | 40,352 | 27,481 |
|               | 25,765 | 14,617 |
|               | 16,399 | 20,619 |
|               | 50,434 | 23,077 |
|               | 73,509 | 11,996 |
|               | 62,416 | 14,53  |
|               | 57,265 | 18,803 |
|               | 64,125 | 23,093 |
|               | 59,98  | 12,82  |
|               | 44,386 | 13,82  |
|               | 41,388 | 14,655 |
|               | 43,138 | 18,124 |
|               | 34,427 | 17,278 |
|               | 59,412 | 10,315 |
|               | 48,207 | 14,613 |
|               | 40,18  | 19,677 |
|               | 49,572 | 17,115 |
|               | 41,88  | 17,115 |
|               | 51,723 | 11,049 |
|               | 61,017 | 13,586 |
|               | 42,373 | 10,31  |
|               |        |        |
|               | ZR     | ZAC    |
| Média         | 47,63  | 15,36  |
| Desvio Padrão | 13,17  | 5,12   |

### ANEXO C

Segue abaixo tabela com as medições da ZR e da ZAC da Amostra 3. Foram feitas 24 medições nas imagens obtidas por microscopia óptica com o auxílio do programa de imagem ImageJ.

| Amostra 3     |        |        |
|---------------|--------|--------|
|               | ZR     | ZAC    |
|               | 24,73  | 16,193 |
|               | 45,178 | 14,154 |
|               | 50,284 | 11,08  |
|               | 52,698 | 31,456 |
|               | 33,994 | 33,994 |
|               | 39,952 | 29,757 |
|               | 37,003 | 9,456  |
|               | 48,138 | 15,473 |
|               | 58,453 | 6,877  |
|               | 64,125 | 10,292 |
|               | 49,602 | 11,996 |
|               | 47,016 | 10,292 |
|               | 38,352 | 33,238 |
|               | 46,03  | 23,027 |
|               | 30,681 | 21,324 |
|               | 53,019 | 23,077 |
|               | 35,938 | 29,927 |
|               | 25,698 | 12,821 |
|               | 45,042 | 23,796 |
|               | 35,704 | 13,264 |
|               | 54,417 | 10,198 |
|               | 59,963 | 17,152 |
|               | 62,533 | 8,565  |
|               | 58,269 | 8,608  |
|               | ZR     | ZAC    |
| Média         | 45,70  | 17,75  |
| Desvio Padrão | 11,29  | 8,74   |

## ANEXO D

Segue abaixo tabela com as medições da ZR e da ZAC da Amostra 4. Foram feitas 24 medições nas imagens obtidas por microscopia óptica com o auxílio do programa de imagem ImageJ.

| Amostra 4     |        |        |
|---------------|--------|--------|
|               | ZR     | ZAC    |
|               | 52,691 | 10,198 |
|               | 56,097 | 8,499  |
|               | 59,514 | 6,852  |
|               | 48,718 | 13,675 |
|               | 44,477 | 15,408 |
|               | 40,171 | 13,702 |
|               | 66,189 | 28,419 |
|               | 46,49  | 20,648 |
|               | 51,64  | 13,754 |
|               | 64,263 | 10,42  |
|               | 54,022 | 7,063  |
|               | 57,387 | 13,704 |
|               | 48,822 | 12,848 |
|               | 46,284 | 9,422  |
|               | 58,244 | 11,168 |
|               | 40,802 | 13,598 |
|               | 55,241 | 8,541  |
|               | 45,042 | 5,099  |
|               | 33,405 | 14,661 |
|               | 17,987 | 20,575 |
|               | 41,122 | 20,575 |
|               | 53,644 | 17,893 |
|               | 56,228 | 10,213 |
|               | 51,915 | 7,66   |
|               | ZR     | ZAC    |
| Média         | 49,60  | 13,11  |
| Desvio Padrão | 10,35  | 5,47   |