

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

Mateus Horta Silva

**NITRETAÇÃO POR DESCARGAS ELÉTRICAS DO AÇO AISI 4340**

BELO HORIZONTE  
2017

MATEUS HORTA SILVA

**NITRETAÇÃO POR DESCARGAS ELÉTRICAS DO AÇO AISI 4340**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no 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  
Co-orientador: Victor Souza Esteves Lima

BELO HORIZONTE  
2017

MATEUS HORTA SILVA

**NITRETAÇÃO POR DESCARGAS ELÉTRICAS DO AÇO AISI 4340**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no 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 12/12/2017

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva

---

Prof. Dr. Odilon Soares da Silva

---

Prof. Victor Souza Esteves Lima

---

Prof<sup>a</sup>. Roberta Nunes Nery dos Santos

## **RESUMO**

O presente trabalho visa avaliar a formação de camadas nitretadas e sua relação com variações nos valores de dureza do aço AISI 4340 após processo de nitretação por descargas elétricas. Para análise foram realizados ensaios de difratograma de raios-X, microdureza Vickers e microscopia ótica e utilizou-se dois tipos distintos de eletrodos, sendo, respectivamente, cobre e grafita. Os resultados mostraram que é possível realizar a NDE no aço AISI 4340 e foram obtidos valores de dureza superficial superiores aos do metal base e há formação das camadas nitretadas esperadas.

Palavras-chave: Aço 4340; EDM; Nitretação por descargas elétricas

## **ABSTRACT**

The present work aims at evaluating a formation of nitrided layers and their relation with variations in the values of AISI 4340 steel after the nitriding process by electric discharges. For analysis, X-ray diffraction, Vickers microhardness and optical microscopy tests were performed, and two different types of electrodes were used, being copper and graphite respectively. The results showed that it is possible to perform a NDM with AISI 4340 steel and to obtain higher values of surface hardness than the base metal and the formation of the expected nitrided layers occurs.

Keywords: Steel 4340; EDM; Nitration by electric discharges

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Ferramental e peça obtida via processo EDM.....	10
Figura 2- Diagrama de fase Fe – N.....	13
Figura 3-Representação das camadas obtidas na Nitretação .....	14
Figura 4 – Diagrama de Lehrer .....	15
Figura 5 – Representação esquemática da movimentação de íons e elétrons durante processo de nitretação a plasma .....	15
Figura 6- Efeito dos elementos de liga na variação da profundidade da camada, após 8 horas de nitretação gasosa a 520 °C em aço SAE 1035.....	16
Figura 7- Representação esquemática de uma máquina de EDM.....	18
Figura 8 – As quatro fases de uma descarga elétrica no processo EDM: 1) Ignição; 2) Formação do canal de plasma; 3) Fusão e evaporação de parcelas do material de peça e eletrodo; 4) Limpeza dos resíduos produzidos no processo .....	19
Figura 9 – Modelo proposto, em 3D, para o canal de plasma do processo de nitretação por descargas elétricas (NDE).....	22
Figura 10– Amostra de Ti6Al4V nitretada por EDM .....	23
Figura 11 - Etapas do procedimento experimental.....	24
Figura 12– Componentes da máquina EDM .....	25
Figura 13– Direcionamento do fluido dielétrico no canal de plasma .....	26
Figura 14– Principais parâmetros no equipamento EDM .....	27
Figura 15- Difratoograma de Raios-x referência do aço AISI 4340.....	31
Figura 16- Difratoograma de Raios-x utilizando eletrodo de grafita do aço AISI 4340 ...	32
Figura 17- Difratoograma de Raios-x utilizando eletrodo de cobre do aço AISI 4340 .....	32
Figura 18– Variação da massa dos componentes antes e pós processo NDM .....	33
Figura 19– Taxas de TD obtida em relação aos eletrodos e TRM obtida em relação as peças (mm <sup>3</sup> /min) .....	33
Figura 20– Desgaste volumétrico médio nas peças usinadas com diferentes tipos de eletrodos .....	34
Figura 21– Microscopia ótica demonstrativa do ensaio de microdureza Vickers realizado no metal base .....	36
Figura 22- Microscopia ótica demonstrativa do ensaio de microdureza Vickers realizado na ZAC com eletrodo de grafita .....	37
Figura 23- Microscopia ótica demonstrativa do ensaio de microdureza Vickers realizado na ZAC com eletrodo de cobre .....	37

<b>Figura 24 - Microscopia ótica demonstrativa do ensaio de microdureza Vickers realizado na camada refundida com eletrodo de grafita.....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 25- Microscopia ótica demonstrativa do ensaio de microdureza Vickers realizado na camada refundida com eletrodo de cobre.....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 26- Microscopia ótica demonstrativa da amostra após NDE utilizando eletrodo de grafita – ampliação.....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 27- Microscopia ótica demonstrativa da amostra após NDE utilizando eletrodo de cobre - ampliação .....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 28- Microscopia ótica demonstrativa do ensaio de microdureza Vickers realizado nas duas camadas refundida e nitretada com eletrodo de grafita com as indentações próximas da superfície.....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 29- Microscopia ótica demonstrativa do ensaio de microdureza Vickers realizado nas duas camadas refundida e nitretada com eletrodo de cobre com as indentações próximas da superfície.....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 30- Microscopia ótica demonstrativa da amostra após NDE utilizando eletrodo de grafita .....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 31- Microscopia ótica demonstrativa da amostra após NDE utilizando eletrodo de cobre .....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 32 - Comparação da espessura das camadas ZR e ZAC para cada tipo de eletrodo utilizado.....</b>	<b>42</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 – Composição Química do aço AISI 4340 .....</b>	<b>24</b>
<b>Tabela 2- Especificações da bomba de recirculação de água.....</b>	<b>26</b>
<b>Tabela 3 – Parâmetros utilizados na usinagem por EDM.....</b>	<b>27</b>
<b>Tabela 4 – Peso Específico dos materiais utilizados.....</b>	<b>28</b>
<b>Tabela 5- Principais parâmetros adotados no ensaio de DRX.....</b>	<b>30</b>
<b>Tabela 6 – Resultados encontrados para avaliação do processo EDM .....</b>	<b>34</b>
<b>Tabela 7– Microdureza Vickers antes e pós processo EDM.....</b>	<b>35</b>

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>12</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>13</b>
<b>3.1 Nitretação.....</b>	<b>13</b>
<b>3.1.2 Nitretação Iônica ou a Plasma .....</b>	<b>15</b>
<b>3.2 Processo EDM .....</b>	<b>17</b>
<b>3.3 Nitretação através de EDM.....</b>	<b>22</b>
<b>4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>24</b>
<b>4.1 Materiais dos eletrodos peça e ferramenta .....</b>	<b>24</b>
<b>4.2 Fluido Dielétrico .....</b>	<b>25</b>
<b>4.3 Máquina utilizada na usinagem EDM .....</b>	<b>25</b>
<b>4.4 Desempenho da usinagem por EDM .....</b>	<b>28</b>
<b>4.5 Microdureza Vickers .....</b>	<b>29</b>
<b>4.6 Difração de raios X .....</b>	<b>30</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>31</b>
<b>5.1 Difração de Raios-X.....</b>	<b>31</b>
<b>5.2 Avaliação do desempenho do processo de EDM .....</b>	<b>32</b>
<b>5.2.1 Variação do material do eletrodo-peça .....</b>	<b>32</b>
<b>5.3 Microdureza Vickers .....</b>	<b>35</b>
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>43</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>44</b>

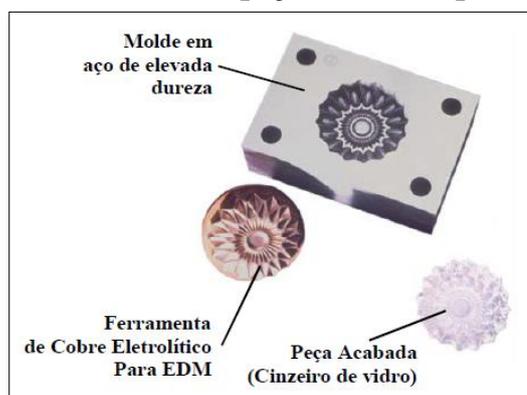
## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente são exploradas uma vasta gama de processos industriais com objetivo de obter melhores propriedades, reduzir custo, aumentar a produtividade e otimizar o tempo de produção. Essas são apenas algumas das características que movem a indústria, que por sua vez sempre investiu no estudo, pesquisa e desenvolvimento de novos materiais de modo a atender suas necessidades e promover o desenvolvimento da humanidade. Imersa nesse contexto a engenharia de materiais visa compreender os processos e propriedades físicas, químicas e metalúrgicas a fim de propor novos mecanismos para otimizar o seu desempenho. Sendo assim, quando se pensa em materiais metálicos há muitos desafios a serem superados e um dos principais, devido principalmente à grande circulação monetária gasta a fim de evitá-lo, é relativo ao desgaste. Um dos meios de se evitar o desgaste sem modificar todo o material é investir em técnicas que promovam uma modificação superficial, como ocorre na aplicação de revestimentos, tais como nitretação, cianetação, cementação, boretação e outros. (CHIAVERINI, 1990)

Nesse intuito o presente trabalho visa explorar e avaliar a possibilidade de um dos métodos não-tradicionais de usinagem, com uma via alternativa e de baixo custo para modificar a camada superficial do aço AISI 4340.

O processo escolhido é a usinagem por descargas elétricas (EDM), pois é uma tecnologia que permite realizar usinagem em materiais condutores de elevada dureza e pode promover nessas diferentes geometrias e com pequenas dimensões, como a usinagem de furos e ranhuras. Nesse processo a usinagem ocorre através de descargas elétricas no material, que irá fundir, e que está imerso em um fluido dielétrico. (SANTOS, 2010 e Arantes, 2001). Durante a presente dissertação o tema EDM será melhor abordado em suas particularidades. A figura 1 ilustra eletrodo-ferramenta e peça obtida pelo processo EDM.

**Figura 1- Ferramental e peça obtida via processo EDM**



Fonte: ARANTES, 2001

O estudo proposto consiste na incorporação de átomos de nitrogênio presente na ureia que permanece dispersa no fluido dielétrico e que tende a promover a formação de uma camada de nitretos na superfície e subsuperfície dos aços, conforme proposto nos estudos de Yan et al. (2005) e Camargo et al. (2009). Confirmando-se a viabilidade e eficácia do processo será possível expandir a aplicabilidade do ambiente de estudo atual, uma vez que o estudo tribológico tem se tornado cada vez mais importante, sendo possível obter melhoras significativas no desempenho do material em uma aplicação de interesse. Nesse caso espera-se alcançar um aumento na dureza superficial do aço AISI 4340.

Este, por sua vez, é objeto de estudo devido a sua grande aplicação industrial, sendo empregado inclusive pelas indústrias aeronáutica e espacial. Segundo Souza (1998) esses aços são classificados como de ultra-resistência, além de, a depender da microestrutura e tratamento térmico, possuírem elevado limite de escoamento e resistência e possui boa conformabilidade, sendo possível forjar e usinar. Adicionalmente, segundo Scheid et al (2009), a nitretação pode melhorar a resistência a corrosão e ao desgaste nesses aços.

## 2. OBJETIVOS

A seguir são apresentados os objetivos geral e específico e que serão base de estudo nessa dissertação.

Objetivo Geral:

- Avaliar a viabilidade de realizar NDM no aço AISI 4340

Objetivos Específicos:

- Verificar se há aumento no valor de dureza nas camadas nitretadas formadas
- Verificar a espessura das camadas nitretadas formadas
- Avaliar a influência dos eletrodos

### 3.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

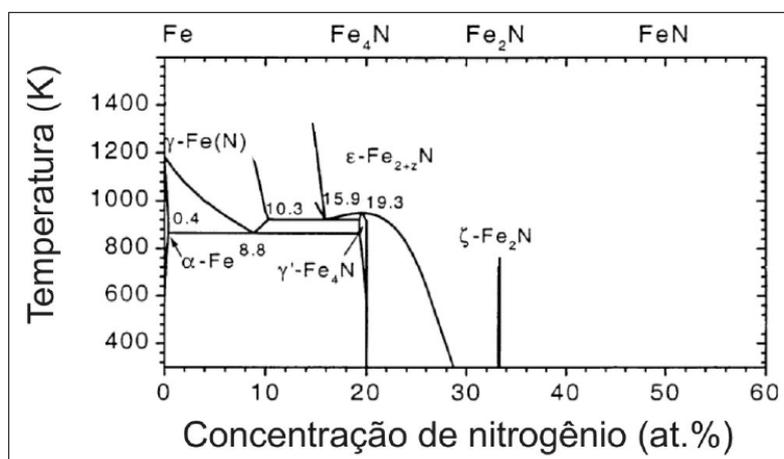
#### 3.1 Nitretação

Processos de endurecimento de superfície são largamente empregados na indústria afim de melhorar a qualidade superficial de determinado material, ou grupo de materiais, para uma aplicação e podem ser realizadas de formas distintas. Nessa seção, entretanto, será abordado apenas o processo de nitretação e suas particularidades.

A nitretação é um processo termoquímico, que envolve fornecimento de calor e modificação química na superfície, podendo atingir camadas mais internas. Como é realizado a temperaturas inferiores da zona crítica, não é possível observar transformação de fase que não esteja relacionada a precipitação de nitretos ou carbonitretos, caso o carbono esteja presente na liga ou no meio nitretante. Além disso, pelo fato de ser realizado a tais temperaturas observa-se a pouca ou nenhuma alteração dimensional ou surgimento de distorções e a camada superficial resultante possui boas propriedades mecânicas. Dentre os principais objetivos da nitretação estão o aumento da dureza, maior resistência ao desgaste, à corrosão, à fadiga e maior estabilidade térmica. Com relação ao aumento da resistência à fadiga foi observado uma maior força compressiva, gerando tensões superficiais compressivas que auxiliam na redução de microtrincas superficiais, reduzindo o risco de fratura por fadiga. (VENDRAMIM, 2017; SANTOS, 2013)

Para compreender melhor o efeito do processo de nitretação será preciso analisar o diagrama de equilíbrio Ferro-Nitrogênio, descrito na figura 2.

**Figura 2- Diagrama de fase Fe – N**

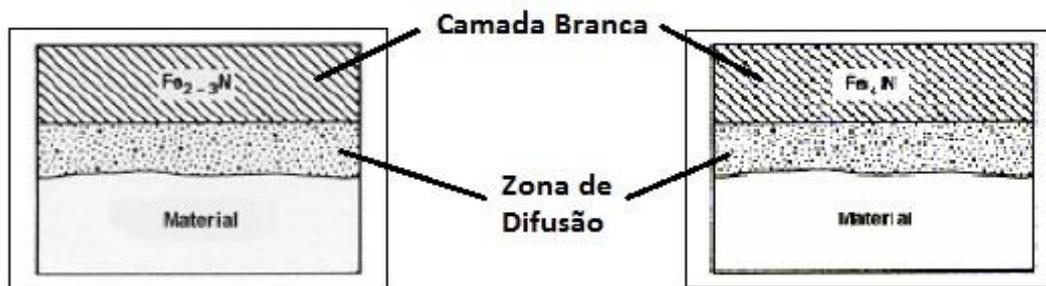


Fonte: ZAGONEL (2006)

O átomo de nitrogênio é menor do que o átomo de ferro, impossibilitando que este seja alocado na rede cristalina do ferro em um sítio substitucional, em que o nitrogênio teria de ocupar o lugar do ferro, e o nitrogênio não ocupa sítios intersticiais uma vez que ele não é pequeno o suficiente. Assim, pode-se dizer que apenas uma porção do nitrogênio é capaz de se diluir na rede cristalina do ferro e as fases formadas nitreto-ferro somente irão ser perceptíveis para concentrações superiores ao limite de solubilidade, que é de 0,1% em massa. Caso isso ocorra, a rede formada se assemelha a uma rede cúbica de face centrada (CFC), com distorções que propiciam concomitantemente a fase cúbica de corpo centrado (CCC), com estequiometria  $\text{Fe}_4\text{N}$ , denominado  $\gamma'$  e concentração de nitrogênio de 5,9% em massa, ou em concentrações superiores a 6,1% em massa, a fase hexagonal compacta, com estequiometria  $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ , denominado  $\epsilon$ . Segundo Santos (2013), os nitretos podem se precipitar na camada de compostos, mais externa, e na zona de difusão, sendo este na forma intergranular.

Durante o processo de nitretação são formadas duas camadas principais: a camada branca ou camada de compostos e a camada de difusão ou zona de difusão. A camada branca é assim chamada pois ao entrar em contato com o reagente químico, normalmente nital, durante a preparação metalográfica, os compostos nela presentes não reagem com esse reagente, enquanto o restante do material reage. Nela podem ser identificados os nitretos  $\epsilon$  e  $\gamma'$ . (VENDRAMIM, 2017)

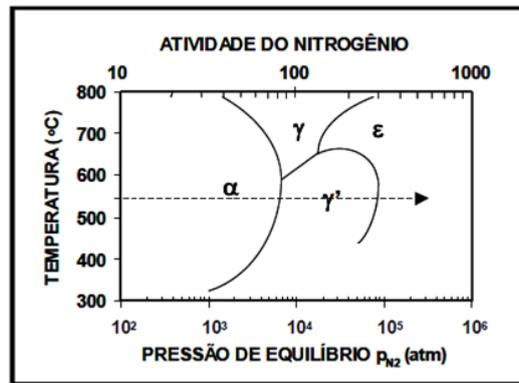
**Figura 3-Representação das camadas obtidas na Nitretação**



Fonte: adaptada de ASM COMITTEE ON NITRING (2003)

Com a finalidade de analisar o efeito do processo de nitretação a figura 3 não é suficiente, sendo necessário avaliar o potencial de nitretação, devido ao equilíbrio sólido/gás coexistindo no processo. O diagrama de Lehrer, figura 4, é apresentado com o intuito de avaliar a metalurgia da superfície nitretada.

Figura 4 – Diagrama de Lehrer



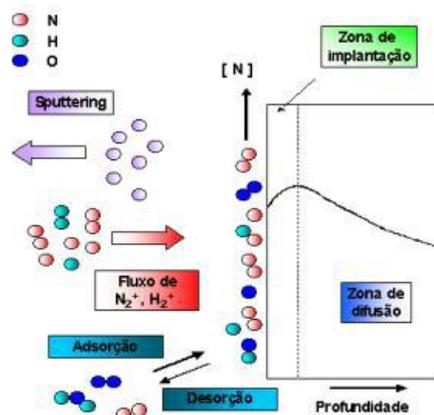
Fonte: PINEDO (1995)

De acordo com a figura 4, nas temperaturas usuais em que a nitretação ocorre, linha tracejada em destaque, o aumento da pressão parcial de nitrogênio desloca o equilíbrio no sentido de formação do nitreto  $\epsilon$ .

### 3.1.2 Nitretação Iônica ou a Plasma

Esse tipo de nitretação consiste no bombardeamento de íons de nitrogênio, mediante a ação de campo elétrico, direcionado à peça polarizada negativamente (catodo). A neutralidade do sistema é mantida durante todo o tempo, uma vez que os íons e elétrons permanecem em equilíbrio dinâmico. Além disso o plasma é criado em meio a vácuo. Através desse método há o aquecimento e limpeza da superfície. É observado ainda que há maior controle da uniformidade e da composição química da camada e menor distorções nas peças ao comparar com a técnica de nitretação gasosa. (SANTOS,2013)

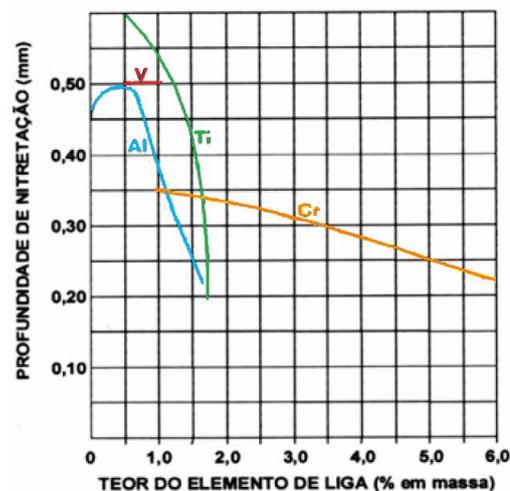
Figura 5 – Representação esquemática da movimentação de íons e elétrons durante processo de nitretação a plasma



Fonte: ECHEVERRIGARAY (2006)

Existem muitos fatores que influenciam a formação dessas regiões e conseqüentemente que irão alterar as propriedades mecânicas da peça. Na região branca por exemplo, não é afetada pela presença de elementos de liga formadora de carbonetos (Al, Ti, V, Cr, Mo, etc), uma vez que essa é composta por nitretos de ferro  $\epsilon$ -Fe<sub>2-3</sub>N e  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N, que possuem caráter cerâmico e que normalmente são indesejados. Entretanto, estudos comprovam que a fase  $\epsilon$ -Fe<sub>2-3</sub>N melhora a resistência ao desgaste e a fadiga, desde que não haja choque mecânico. Por outro lado, a fase  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N possui maior tenacidade, sendo aplicada em peças susceptíveis a choques ou cargas severas. Com relação a presença de elementos de liga, Gobbi (2009) afirma que quando em maior quantidade, mais difícil é a difusão do nitrogênio e menor será a espessura da camada, conforme figura 6. A exceção é o alumínio, que em pequenas quantidades aumenta a difusividade do nitrogênio.

**Figura 6- Efeito dos elementos de liga na variação da profundidade da camada, após 8 horas de nitretação gasosa a 520 °C em aço SAE 1035**



Fonte: GOBBI (2009)

Na região branca também foi observado redução do coeficiente de atrito e maior resistência a fadiga quando em ambientes corrosivos. A camada de difusão formada sob a camada branca possui menor dureza e está relacionada a difusão do nitrogênio nos interstícios de ferrita, ocasionando o endurecimento por solução sólida e outra parte irá formar nitretos de ferro e elementos de liga, ocasionando em endurecimento por precipitação. A espessura dessa camada depende do estado inicial do material, dos elementos presentes e da composição do gás, conforme citado anteriormente. Todos esses fatores estão relacionados a facilidade do nitrogênio se difundir no material. (SANTOS, 2013)

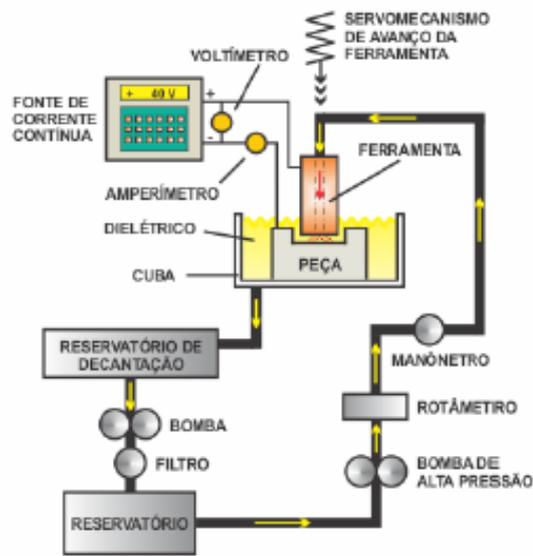
### 3.2 Processo EDM

A usinagem por eletroerosão ou *Electrical Discharge Machining* (EDM) é considerado um processo não convencional que se iniciou na década de 40 na universidade de Moscou. A partir dessa data o processo vem sendo aperfeiçoado e melhor estudado, embora não haja modelos precisos que sejam capazes de descrever a influência de cada parâmetro no canal de plasma, dada a sua complexidade e interdependência. O surgimento da tecnologia de Controle Numérico Computadorizado ou CNC na década de 80 foi importante na sua difusão, pois permitiu a confecção de máquinas mais simples e autônomas (SANTOS, 2010).

O processo consiste na aplicação de uma corrente elétrica com formação de um canal de plasma, normalmente imerso em fluido dielétrico, em que há retirada de material conforme formato do eletrodo. Essas características permitem uma vasta gama de aplicação em peças com geometria complexa e de difícil usinabilidade, como moldes e matrizes, produção de matrizes para estampagem, forjamento, fieiras para trefilação, extrusão, moldes plásticos, etc. Além disso, pode ser aplicado em diversas áreas, tais como automotivo, aeroespacial, ferramentas, prototipagem e outros (ARANTES, 2003; SANTOS, 2010). O desenvolvimento de novos materiais e a crescente demanda por melhor qualidade destes abre um campo de pesquisa também para a usinagem via EDM para materiais cerâmicos, compósitos e superligas.

A principal diferença em relação aos processos convencionais se evidencia pelo fato de que a retirada de material não é realizada, principalmente, por um processo mecânico em que uma ferramenta com dureza superior entra em contato com a peça e retira material. Nesse caso a retirada de material se deve a um inicialmente processo térmico, em que a peça é fundida e/ou sublimada e o material restante é então removido na maior parte dos casos por um jato do fluido dielétrico. Assim, essa ausência de contato evita o surgimento de tensões de usinagem e vibrações na superfície, viabilizando trabalhar com materiais de pequeno porte, eventualmente reduzir custos de manutenção e não há necessidade de realizar tratamentos térmicos posteriores (SANTOS, 2010). A figura 7 mostra uma representação da máquina utilizada.

**Figura 7- Representação esquemática de uma máquina de EDM**



Fonte: CAMARGO et al., 2006

Além das vantagens citadas anteriormente do processo EDM, há também um maior controle de temperatura, pois ocorre imerso em fluido dielétrico. Além disso, não é gerado cavaco, em razão do material removido estar disperso nesse fluido. Destaca-se ainda a viabilidade de ser realizado em peças previamente tratadas, diminuindo riscos de defeitos ocasionados por tratamento térmico, como empenos e diminuindo a quantidade de processos necessários. Isso ocorre devido a geração de calor ser localizada em pontos específicos e com profundidade restrita, como aponta de Santos (2007). Outro aspecto positivo é a ausência de forças de corte na peça, uma vez que não há contato entre o eletrodo e a peça, evitando a geração de tensões residuais e risco de fratura. (ARANTES, 2001). Uma questão posterior a ser analisada é como descartar corretamente esse fluido de modo a minimizar o impacto ambiental, tendo em vista que a depender do material diferentes elementos químicos serão retirados da peça.

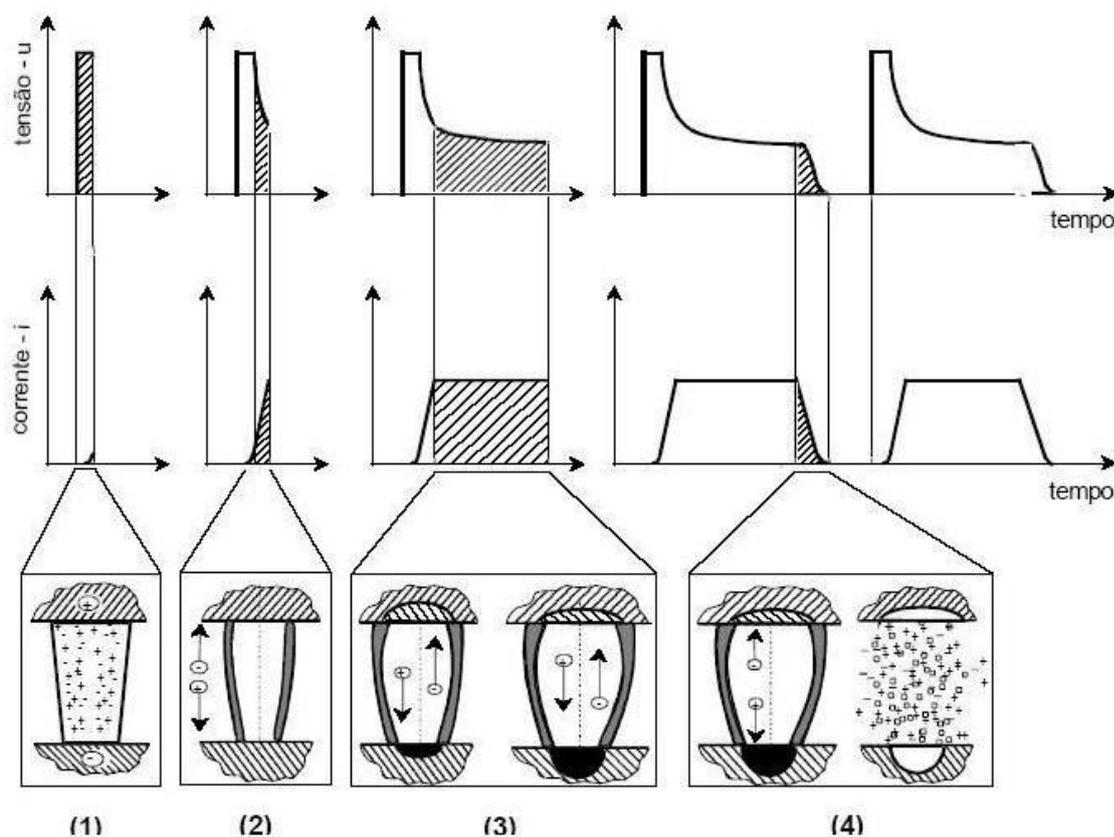
Dentre as desvantagens do processo há a necessidade de ser aplicado em superfícies condutoras, o desgaste elevado dos eletrodos e a menor taxa de remoção se comparado aos processos de usinagem convencional. (ARANTES, 2003)

A usinagem EDM é realizada em fluido dielétrico, conforme dito anteriormente, em que a peça, ou eletrodo peça, atua como anodo e o eletrodo, ou eletrodo ferramenta, atua como catodo, gerando um cordão de plasma devido aplicação de uma diferença de potencial, em que ocorrem sucessivas descargas elétricas em intervalos regulares de tempo, capaz de romper a rigidez desse fluido e remover uma quantidade localizada e direcionada de matéria da peça por

ação térmica. Em nenhum momento ocorre contato direto entre a peça e o eletrodo. A representação esquemática do processo pode ser observada na figura 8. De modo geral pode dizer que há quatro fases (SANTOS, 2010):

1. Fase de ignição
2. Formação do canal de plasma
3. Fusão e evaporação de parcelas do material de peça e eletrodo
4. Lavagem dos resíduos

**Figura 8 – As quatro fases de uma descarga elétrica no processo EDM: 1) Ignição; 2) Formação do canal de plasma; 3) Fusão e evaporação de parcelas do material de peça e eletrodo; 4) Limpeza dos resíduos produzidos no processo**



Fonte: KÖNIG; KLOCKE, (1996)

Para explicar o a usinagem via EDM a teoria mais utilizada é a termoeletrica. De acordo com essa teoria são definidas quatro etapas distintas e que ocorrem em sequência: ignição,

criação do canal de plasma, fusão e sublimação dos materiais da peça e eletrodo, limpeza dos materiais que se fundiram. (KAHNG, 1977). Todas as etapas são apresentadas na figura 9 para dois condutores imersos em fluido dielétrico sob ação de descarga elétrica.

A primeira fase é caracterizada pelo deslocamento do eletrodo em direção a peça até que se atinja um gap ou intervalo de abertura entre duas superfícies de aproximadamente 0,05 a 1,00 mm. O equipamento é então ligado e inicia a passagem de corrente elétrica e há aumento do campo elétrico com consequente aceleração de elétrons em direção a peça (anodo). Essa movimentação provoca a colisão de elétrons com moléculas do dielétrico e formação de partículas positivas, sendo, então, uma reação em cadeia denominada ionização por impacto (SANTOS, 2010).

Na segunda etapa, atingida a distância de equilíbrio a rigidez dielétrica diminui com a aproximação entre eletrodo e peça, favorecendo a ocorrência da descarga elétrica. Esse fenômeno consiste na continuação da etapa anterior, em que moléculas são aceleradas, provocando o aumento da temperatura e aumento da corrente elétrica a medida que a resistência do dielétrico é quebrada. A movimentação de elétrons formará tuneis transportadores de energia elétrica (*streamers*), que atuam no catodo e no anodo, iniciando o canal de plasma. O nível de energia da corrente de descarga ( $i_e$ ) é controlado pela máquina, evitando que haja curto-circuito e o plasma, através de transferência de energia térmica, é capaz de fundir certa quantidade de material do eletrodo e da peça (SANTOS, 2013).

Na terceira fase há passagem de corrente e movimentação iônica no canal, provocando o aquecimento na região, levando a fusão de partes do material e do eletrodo. Por fim a energia elétrica é desligada e o canal de plasma interrompido. Ao mesmo tempo o bombardeamento de elétrons e íons positivos aumenta a energia cinética transferida e consequentemente provocam a fusão dos materiais envolvidos. Ressalta-se ainda que parte do fluido é evaporado e sofre alguma dissociação, que está diretamente relacionada a pressão gerada pelo canal de plasma. Além disso, a energia térmica é dissipada em partes para outras regiões do material, podendo provocar alterações na estrutura e composição química da peça. No catodo, esse sistema irá fazer com a cavidade fique mais profunda, enquanto que no anodo, devido à queda de pressão e da temperatura, haverá solidificação devido a essa expansão e diminuição do fluxo de energia nessa região (SANTOS, 2013).

Na última etapa, denominada como limpeza dos resíduos produzidos no processo a corrente elétrica é interrompida durante um intervalo de tempo pré-estabelecido pelo operador até que o ciclo se reinicie. O canal de plasma é interrompido, o eletrodo se afasta da peça e há diminuição da temperatura. O fluido ajuda então a retirar o material parcialmente líquido ou

sólido disperso no meio para longe do processo. No sistema são observadas partículas do material dispersos no meio e algumas na cratera, que são retiradas devido a circulação do fluido (SANTOS, 2013).

Relevante para essa dissertação é verificar que conforme Santos (2013), haverá uma parcela de material fundido que não é retirado da cavidade formada durante essa etapa de lavagem, sendo então solidificado na própria peça. Essa região é conhecida como “zona refundida” e apresenta alterações químicas e estruturais devido a interação com partículas do próprio fluido dielétrico utilizado e do eletrodo ferramenta, sendo afetadas de acordo com a energia de descarga gerada. Com isso as propriedades mecânicas encontradas nessa região são distintas daquelas do material.

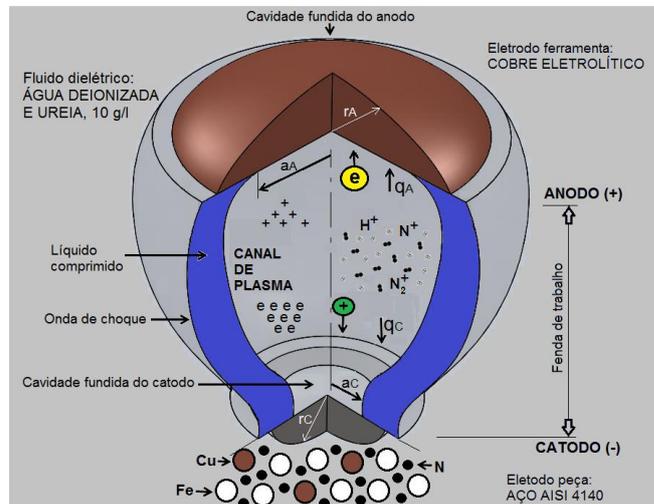
Nesse contexto, cada um dos parâmetros descritos pode também ser compreendido como variáveis. Há na literatura diversos autores que estudaram o processo e verificaram mudanças no resultado obtido ao modificar a intensidade da corrente elétrica, o tempo de pulsação, o material do eletrodo e da peça, o fluido dielétrico, o modo de circulação desse fluido para facilitar a retirada de material e etc. Algumas dessas variáveis são encontradas no Manual de Operação Servspark Eletroplus EDM-540 / 340 e nos estudos apresentados nas referências bibliográficas dessa dissertação.

Arantes (2001), Nicesio (2017) e Lima et al (2007) evidenciaram, por exemplo, a influência de diferentes tipos de fluidos dielétricos tem nas propriedades finais, principalmente dureza, do material usinado. Por exemplo, em Arantes (2001) foram testados os óleos ELETRO ER 5000 da Iorga, SIGNAL TEX300 da Texaco, microcorte 102A da Microquímica, ARCLEAN ELETRON da Archem e querosene da Maxsolv. Nicesio (2017) realizou estudos com soluções aquosas diluídas em ureias distintas e Lima et al (2007) verificou os resultados empregando, entre outros, óleo vegetal. Em todos os casos houve variação do resultado final.

Buscando analisar a “Resistência à fadiga da camada nitretada pelo processo de eletroerosão no aço AISI 4140”, Silva (2016) conclui que a ureia em meio aquoso (fluido dielétrico) promove formação da camada nitretada, e que sua resistência a fadiga é superior a encontrada no processo EDM utilizando apenas com água deionizada, entretanto não é superior à do material como recebido.

Santos (2013), em sua tese de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, intitulada “NITRETAÇÃO POR EDM DO AÇO AISI 4140”, ele conclui que foi formada uma camada de nitretos na superfície na ordem de até 25µm com ganho de microdureza e sem alterações topográficas relevantes na superfície em comparação ao método tradicional com água deionizada. Na figura 10 é apresentado um esquema 3D proposto para a técnica:

**Figura 9 – Modelo proposto, em 3D, para o canal de plasma do processo de nitretação por descargas elétricas (NDE)**



Fonte: SANTOS, 2013

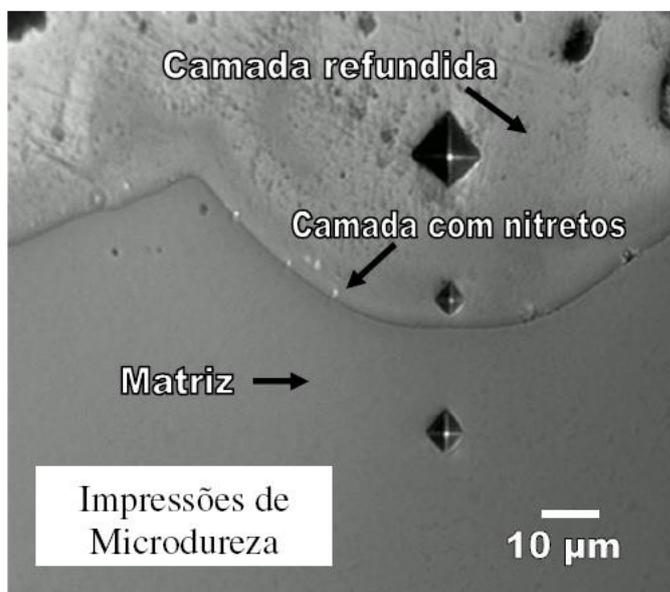
### 3.3 Nitretação através de EDM

O processo de nitretação simultaneamente a eletroerosão é considerado recente e ainda exige estudo quanto as variáveis da técnica, da viabilidade em escala industrial, das limitações e dos reais ganhos obtidos, além da economia de tempo.

Yan et al. (2005) realizou um estudo em peças de  $Ti_6Al_4V$  para verificar a possibilidade de enriquecer superfícies com nitrogênio utilizando como fluido dielétrico uma solução com ureia na usinagem por EDM. O autor destaca que foi observada a formação de uma camada endurecida de  $TiN$  e que apresenta melhora nas propriedades mecânicas na superfície, como quanto a resistência ao desgaste.

Segundo Camargo et al. (2009) esse método aplicado a mesma liga de titânio permitiu obter um ganho de 60% na dureza em relação à matriz, conforme figura 11, onde é possível verificar as impressões de microdureza na camada refundida, camada com nitretos e matriz.

Figura 10– Amostra de Ti6Al4V nitretada por EDM

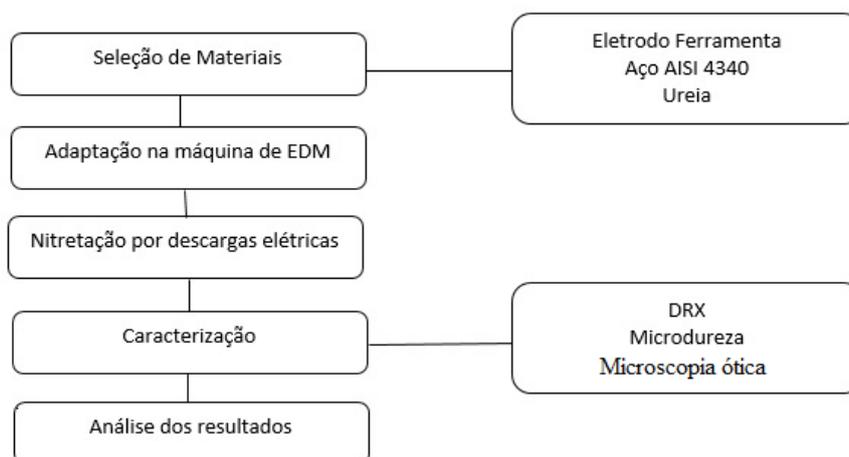


Fonte: CAMARGO et al. (2009)

#### 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O presente estudo foi desenvolvido conforme apresentado na figura 12, que ilustra todas as etapas utilizadas.

**Figura 11 - Etapas do procedimento experimental**



Fonte: Autor

##### 4.1 Materiais dos eletrodos peça e ferramenta

O eletrodo peça utilizado foi o aço AISI 4340 e que apresenta composição química conforme apresentado na tabela 1. As amostras foram fabricadas com 15 mm de diâmetro e 19 mm de comprimento.

**Tabela 1 – Composição Química do aço AISI 4340**

Elemento	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	P	S
% em peso	0,39	0,24	0,61	1,46	0,67	0,17	0,021	0,006

Fonte: Lee; Su, (1997)

Os testes foram realizados em dois conjuntos de amostras, seis amostras foram usinadas com o eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico e seis amostras foram usinadas com o eletrodo ferramenta de grafita.

Visando avaliar a influência do eletrodo ferramenta foram empregados eletrodos de cobre e grafita. Os parâmetros mais relevantes a serem analisados, tendo em vista que estes

possuem mesmo tamanho e diâmetro, é a condutividade elétrica de cada um. Foi utilizado formato cilíndrico, com 22 mm de diâmetro e 30 mm de comprimento.

O cobre possui maior condutibilidade elétrica e por esse fator é mais comumente utilizado. O grafita, por outro lado, apesar de possuir elevado ponto de fusão, o que pode aumentar a eficiência de processo, é um material que se contamina com mais facilidade, apresenta diferentes porosidades e é um material frágil, podendo diminuir assim sua eficiência global. (ARANTES, 2001)

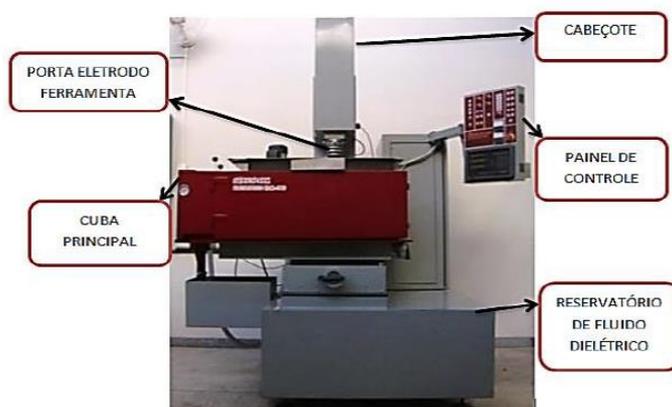
#### 4.2 Fluido Dielétrico

O fluido dielétrico utilizado é uma solução aquosa, aproximadamente 80 litros, com um quilo ureia farmacológica fabricado pela Petrobras – Brasil. A água deionizada foi obtida via empresa de abastecimento da região metropolitana de Belo Horizonte e que foi deionizada em deionizador portátil a base de resina.

#### 4.3 Máquina utilizada na usinagem EDM

Durante a realização da usinagem por EDM foi utilizado o equipamento SERVSPARK ELETROPLUS 540, com algumas adaptações, conforme figura 13. O equipamento encontra-se no laboratório de ajustagem do CEFET-MG.

**Figura 12– Componentes da máquina EDM**



Fonte: SILVA (2016)

O presente estudo utilizou soluções aquosas a base de ureia, que por sua vez apresenta potencial corrosivo. Portanto, a usinagem foi realizada em uma cuba auxiliar de aço AISI 304 a fim de preservar os componentes do equipamento, conforme defendido por NICESIO (2017).

Nesse processo havia uma bomba acoplado a cuba auxiliar, modelo CD 30002 que promovia a circulação de água e era direcionada através de uma mangueira para a peça que estava sendo usinada, conforme figura 14. Na tabela 2 são apresentadas as especificações da bomba de recirculação. Esse procedimento visa aumentar a eficiência de retirada de detritos ou impurezas decorrentes do processo de usinagem e que poderiam afetar a deposição de camada de nitreto esperada (SANTOS, 2013). Nas figuras abaixo observa-se ainda que a usinagem foi realizada com o eletrodo e a peça totalmente imersos no fluido dielétrico.

**Figura 13– Direcionamento do fluido dielétrico no canal de plasma**



Fonte: Autor

**Tabela 2- Especificações da bomba de recirculação de água**

Fabricante	ASTEN
Vazão	51 litros/min
Pressão	2 metros de coluna d'água (0,2 bar)
Motor elétrico	corrente alternada
Rotação do Motor	3100 RPM
Potência	120 Watts (0,16 CV)
Frequência	60 Hz

Fonte: SILVA (2016)

A figura 15 visa ilustrar alguns parâmetros do equipamento que podem ser regulados. Na tabela 3 são indicados os valores utilizados para cada um desses.

**Figura 14– Principais parâmetros no equipamento EDM**



Fonte: SILVA (2016)

**Tabela 3 – Parâmetros utilizados na usinagem por EDM**

Polaridade do eletrodo ferramenta	Positiva
Tensão (V)	200
Corrente de trabalho (A)	40
Controle de avanço do servo no eixo Z, gap	A1=1*
Controle de velocidade do servo, cabeçote	A2=3*
Tempo de afastamento periódico da ferramenta	A3=4*
Tempo de erosão	A4=5*
Tempo de nível alto (pulso), $T_{on}$	A5=100
Tempo de nível baixo, $T_{off}$	A6=10

\*Posição da chave

Fonte: Autor

#### 4.4 Desempenho da usinagem por EDM

As avaliações do desempenho de usinagem foram baseadas nos trabalhos de NICESIO (2017) e SANTOS (2013), em que ambos utilizaram os parâmetros abaixo para análise:

- ✓ TD: taxa de desgaste do eletrodo ferramenta;
- ✓ TRM: taxa de remoção de material do corpo de prova;
- ✓ DVR: desgaste volumétrico relativo.

O intuito é avaliar as variações de massa nos eletrodos-ferramenta e eletrodos-peça antes e após o processo de usinagem. A medição foi feita em balança digital BEL, localizada no laboratório de biomateriais do CEFET-MG. Nesse processo a medição de massa do eletrodo de grafita pós-usinagem foi realizada após secagem em forno por 24 horas para que absorção de água durante a usinagem fosse evaporada e assim não afetasse os resultados.

A tabela 4 apresenta os pesos específicos empregados para cada material.

**Tabela 4 – Peso Específico dos materiais utilizados**

Material	Peso Específico $\delta$ (g/mm <sup>3</sup> )
Aço AISI 4340	0,00785
Cobre	0,00892
Grafita	0,00167

Fonte: AZO Materials

Primeiramente é avaliada a variação da massa pelos eletrodos e corpos de prova, segundo a equação 1.

$$\Delta m = m_i - m_f \quad (\text{equação 1})$$

De modo que:  $m_i$  = massa inicial (antes da usinagem)

$m_f$  = massa final (após a usinagem)

Para calcular a quantidade de material desgastado no eletrodo ferramenta foi utilizada a equação 2, conforme segue-se:

$$TD = \frac{\Delta m}{\delta \cdot t} \quad (\text{equação 2})$$

De modo que:

$\Delta m$  = variação de massa do eletrodo ferramenta

$\delta$  = peso específico do material do eletrodo

t = tempo de usinagem

Para avaliar a TRM é utilizada a equação 3, que visa quantificar a eficiência de remoção de material durante a usinagem.

$$TRM = \frac{\Delta m}{\delta \cdot t} \quad (\text{equação 3})$$

De modo que:

$\Delta m$  = variação de massa do corpo de prova

$\delta$  = peso específico do aço AISI 4340

t = tempo de usinagem

Por fim, o DVR caracteriza o desempenho do processo de EDM, sendo geralmente expresso em porcentagem e calculado pela relação entre TD e TRM, conforme a equação 4.

$$DVR = \left( \frac{TD}{TRM} \right) \times 100 \quad (\text{equação 4})$$

Todos os cálculos foram baseados em um tempo de usinagem de 10 minutos e os ensaios foram repetidos três vezes.

#### 4.5 Microdureza Vickers

Foi utilizado Microdurômetro Vickers Shimadzu HMV 2T-E, para avaliação da dureza conforme os diferentes tipos de eletrodos utilizados e o padrão como recebido e para avaliar a diferença de dureza entre as camadas formadas durante a EDM. Durante o ensaio empregou-se

uma carga de 10 gf (98,07 mN) por 20 segundos, com realização de 3 medições por região e utilizado o valor médio. Todos os ensaios foram realizados na seção transversal da peça submetida a EDM.

#### 4.6 Difração de raios X

Foi escolhida aleatoriamente uma amostra de cada condição para análise de difração de raios no intuito de identificar as fases formadas. O equipamento é Shimadzu XRD – 7000 X – “Ray Diffractometer”, localizado no laboratório de caracterização do DEMAT/CEFET-MG e foram adotados os parâmetros conforme tabela 5.

**Tabela 5- Principais parâmetros adotados no ensaio de DRX**

Radiação	CuK $\alpha$
Tensão	40,0 Kv
Corrente	30,0 mA
Velocidade de varredura	2°/min
Modo de varredura	Tempo fixo
Faixa de varredura	30° a 120°
Passo da amostragem	0,02°

Fonte: Autor

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

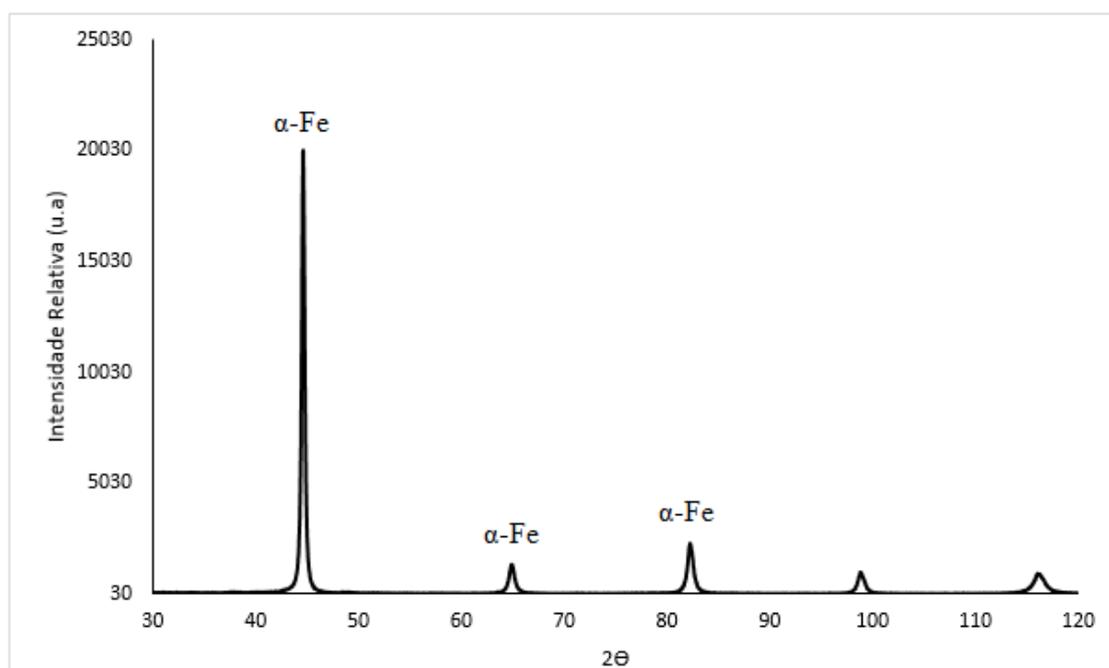
Neste capítulo serão apresentados os resultados relevantes ao trabalho, como variação da massa dos eletrodos e peças, avaliação do processo por EDM, avaliação da dureza e identificação de fases segundo difratograma de raios-X.

### 5.1 Difração de Raios-X

Nos difratograma obtidos é possível observar a formação de novas fases como FeN e Fe<sub>4</sub>N em relação a amostra de referência. A fase presente em todos os resultados é o Fe- $\alpha$  (cúbico de corpo centrado) com orientação cristalográfica (110).

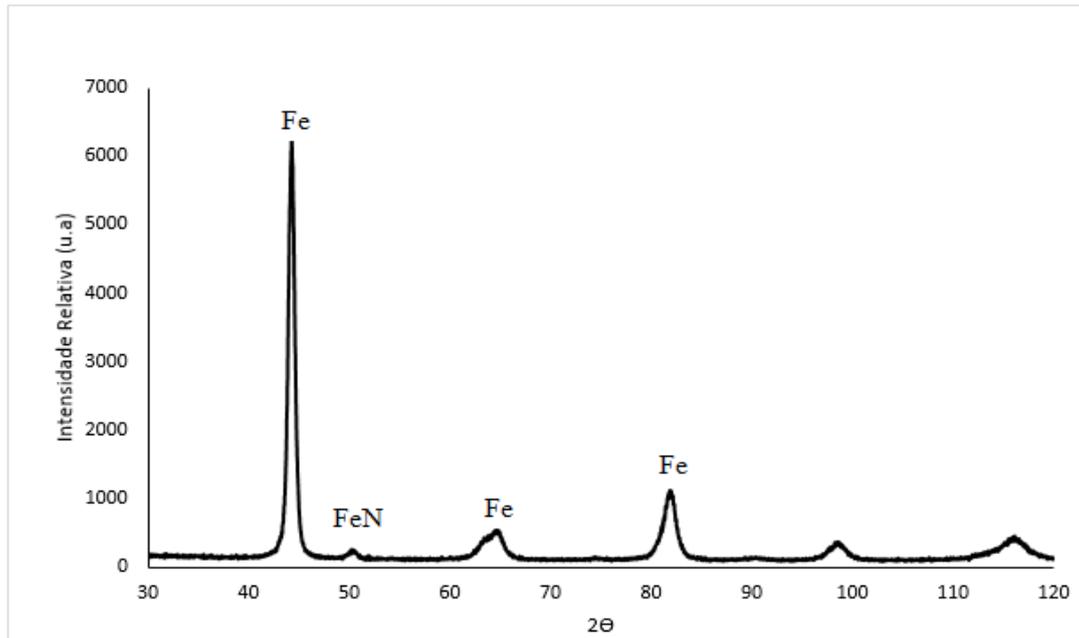
Comparando-se o difratograma da amostra de referência acima com os difratograma das peças usinadas é possível perceber a formação de nitretos, conforme dito anteriormente, perceptível através dos picos nos ângulos de aproximadamente 50°, 65° e 90°. Além disso na peça usinada com eletrodo de cobre verifica-se a formação de nitreto  $\epsilon$ , que só se forma quando há mais nitrogênio dissolvido no meio. Essa pode ser uma indicação que o eletrodo de cobre seja capaz de promover maior incorporação de átomos de nitrogênio nesse aço.

**Figura 15- Difratograma de Raios-x referência do aço AISI 4340**



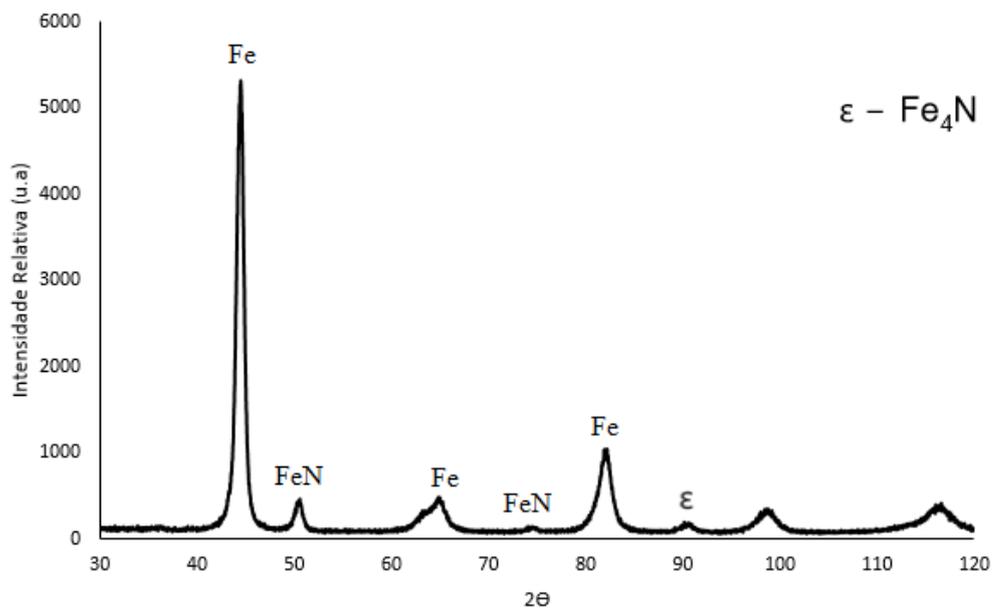
Fonte: Autor

**Figura 16- Difratoograma de Raios-x utilizando eletrodo de grafita do aço AISI 4340**



Fonte: Autor

**Figura 17- Difratoograma de Raios-x utilizando eletrodo de cobre do aço AISI 4340**



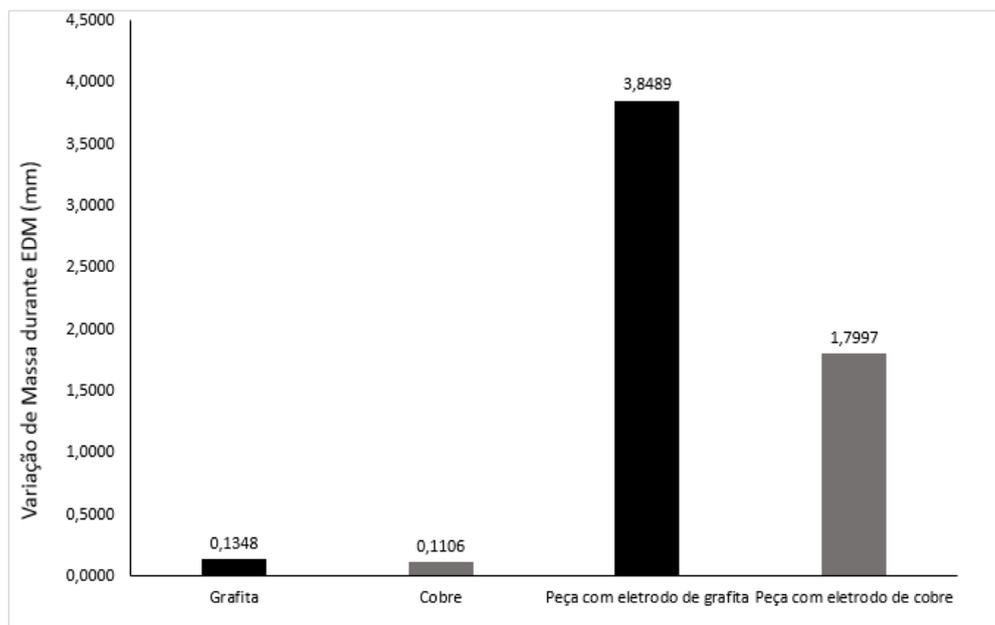
Fonte: Autor

## 5.2 Avaliação do desempenho do processo de EDM

### 5.2.1 Variação do material do eletrodo-peça

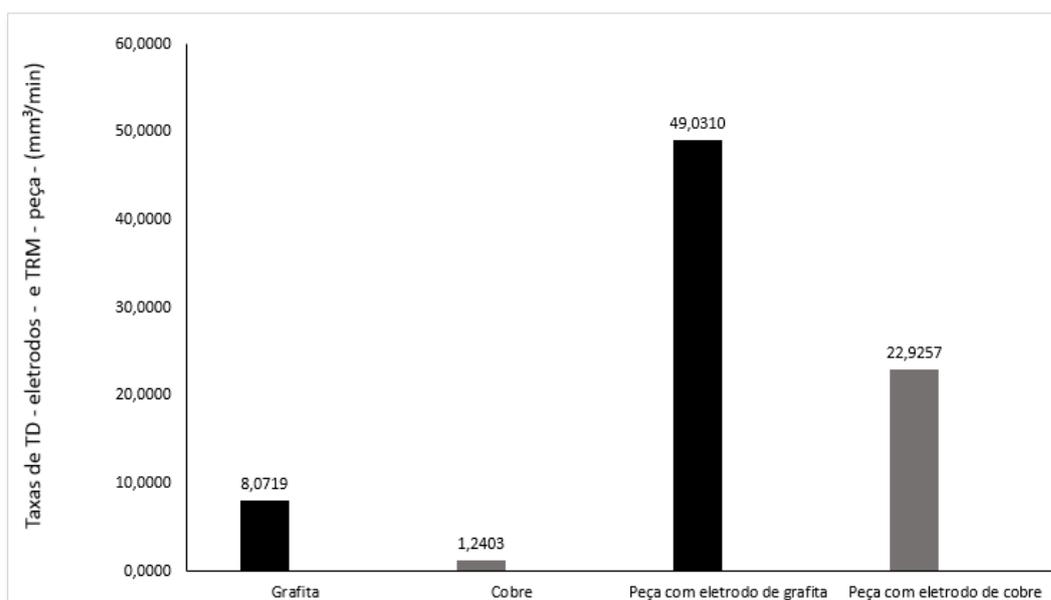
A seguir são apresentados os resultados de massa antes e pós usinagem do aço AISI 4340 utilizando eletrodos de cobre e grafita.

**Figura 18– Variação da massa dos componentes antes e pós processo NDM**



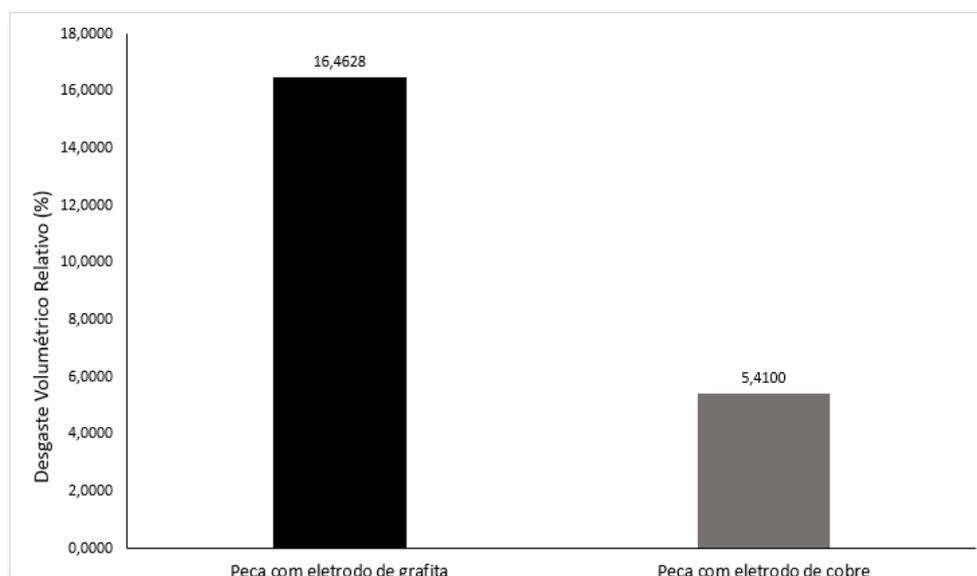
Fonte: Autor

**Figura 19– Taxas de TD obtida em relação aos eletrodos e TRM obtida em relação as peças (mm<sup>3</sup>/min)**



Fonte: Autor

**Figura 20– Desgaste volumétrico médio nas peças usinadas com diferentes tipos de eletrodos**



Fonte: Autor

**Tabela 6 – Resultados encontrados para avaliação do processo EDM**

	Variação de massa (min)	TD (mm <sup>3</sup> /min)	TRM (mm <sup>3</sup> /min)	DVR (%)
Grafita	0,1348 *	8,0719	-	16,4628
Cobre	0,1106 *	1,2403	-	5,4100
Peça com eletrodo de grafita	3,8489 *	-	49,0310	-
Peça com eletrodo de cobre	1,7997 *	-	22,9257	-

\* Valores absolutos

Fonte: Autor

Analisando os resultados obtidos percebe-se que a maior variação média de massa ocorreu na peça, conforme esperado, tendo em vista as características de transferência de elétrons envolvidos no processo. A TD se comparada a TRM permaneceu com valores baixos. Esse fator já foi explicado por Santos (2013) e Nicesio (2017), em que afirmam ser idealmente o desgaste dos eletrodos-ferramenta igual a zero, ou seja, nulo. Entretanto eles se desgastam naturalmente no processo de EDM devido ao bombardeamento de elétrons. Ainda segundo esses autores há diversos fatores que podem influenciar no valor de TRM, tais como intensidade da corrente, tamanho da fenda de trabalho, sistema de limpeza da fenda e material do eletrodo. As diferentes propriedades dos materiais empregados e suas influências no processo também podem ser destacadas, tais como a maior condutividade elétrica do cobre e o maior ponto de

fusão da grafita (3550°C) em relação ao cobre (1080°C), que podem, aproximadamente, se equilibrar de certo modo em termos de resultados gerados.

Comparando aos resultados que Nicesio (2017) encontrou para o aço AISI 4140 tem-se um resultado satisfatório, em que a TRM encontrada pela autora variou entre 32,65 e 38,09 mm<sup>3</sup>/min e TD entre 2,52 e 4,92 para o eletrodo de cobre e TRM variou entre 27,1 e 46,34 e TD entre 6,36 e 9,02 para o eletrodo de grafita e a depender do tipo de ureia empregada, tem-se que a eficiência média dos processos de usinagem são semelhantes.

Com relação aos resultados de DVR obtidos conclui-se que o eletrodo de grafita teve um desgaste superior ao eletrodo de cobre para que possa ser retirada a mesma quantidade de material da peça, ou seja, o eletrodo de cobre provou ser mais eficiente nesse critério, abrindo uma suspeita de que possa ser vantajoso financeiramente em processos de larga escala. Fica evidente também que o menor valor de DVR caracteriza melhor eficiência no processo, segundo NICESIO (2017).

### 5.3 Microdureza Vickers

Afim de verificar o efeito de se adicionar ureia em água deionizada e esperando resultado semelhante aos trabalhos de Santos (2007 e 2013), Silva (2016) e Nicesio (2017), em que há aumento de dureza devido incorporação do nitrogênio e formação de camada nitretada, foram realizados testes de microdureza Vickers em três amostras distintas. Analisou-se o metal base (MB) como adquirido, a camada refundida (ZR) e a camada nitretada em que se tem a zona termicamente afetada ou ZAC para cada eletrodo, conforme tabela 7.

**Tabela 7– Microdureza Vickers antes e pós processo EDM**

Região	Dureza HV (+-*)		
	Eletrodo de Cobre	Eletrodo de Grafita	Conforme obtido**
ZAC	475 +- 8*	425 +- 42*	-
Zona refundida	598 +- 23*	495 +-125*	-
Aço AISI 4340	-	-	240 +- 18*

\*Desvio padrão

\*\*Anterior ao processo EDM

Fonte: Autor

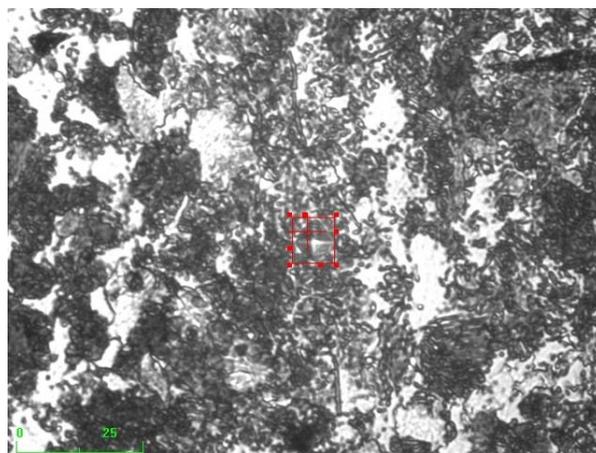
A partir da tabela 7 infere-se que o processo EDM utilizando ureia diluída em água deionizada apresenta valores de dureza superiores ao metal base, confirmando a viabilidade de

realizar NDM no aço AISI 4340. Devido ao elevado valor de desvio padrão obtido para os resultados conclui-se que o valor de dureza da zona refundida é inconclusivo. Contudo, os valores de microdureza da camada nitretada são maiores para o eletrodo de cobre ou aproximadamente iguais aos valores utilizando eletrodo de grafita.

Com o intuito de avaliar o processo foi realizado também a análise via microscopia ótica para cada caso, metal base, NDE com eletrodo de grafita e NDE com eletrodo de cobre.

A figura 18 mostra o ensaio de microdureza Vickers realizado no metal base. Nessa figura também é possível a diferença visual entre o metal base e as ZR e ZAC demonstradas na figuras subsequentes. As figuras 21 a 25 abaixo têm o objetivo de evidenciar o local em que foram realizadas as medições do ensaio de microdureza Vickers. A região mais externa é chamada zona refundida e a camada mais interna é chamada Zona afetada termicamente pelo calor.

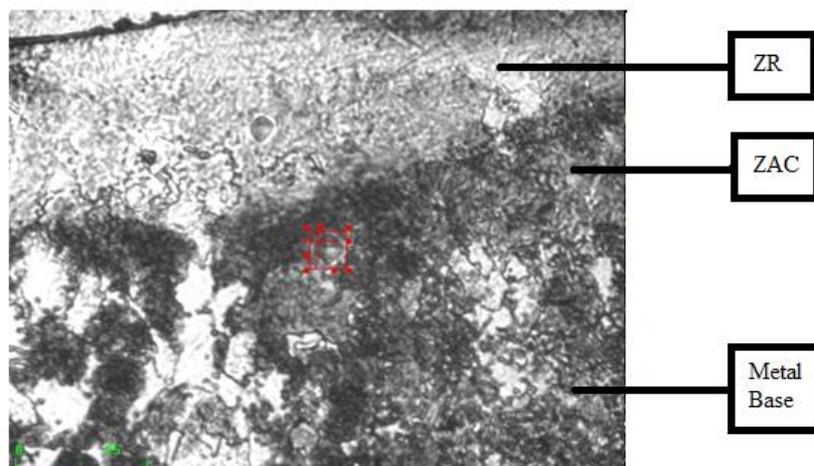
**Figura 21– Microscopia ótica demonstrativa do ensaio de microdureza Vickers realizado no metal base**



Fonte: Autor

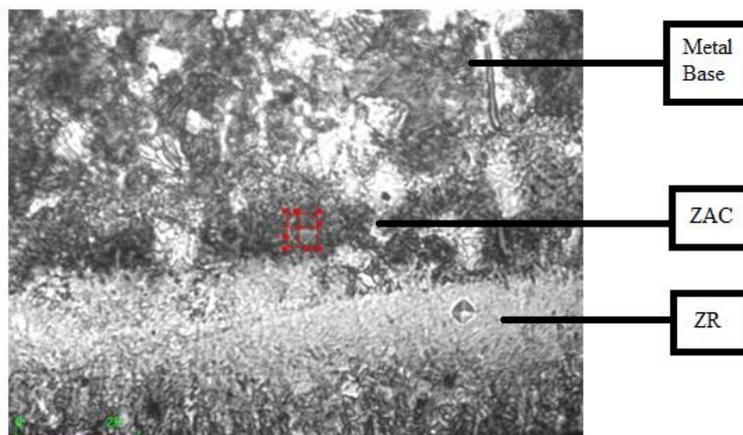
As figuras 22 e 23 abaixo identificam o local de realização do ensaio de microdureza Vickers na ZAC para as peças usinadas com eletrodo de grafita e de cobre, respectivamente. A ZAC é caracterizada pela sombra formada na subsuperfície, conforme Santos (2013).

**Figura 22- Microscopia ótica demonstrativa do ensaio de microdureza Vickers realizado na ZAC com eletrodo de grafita**



Fonte: Autor

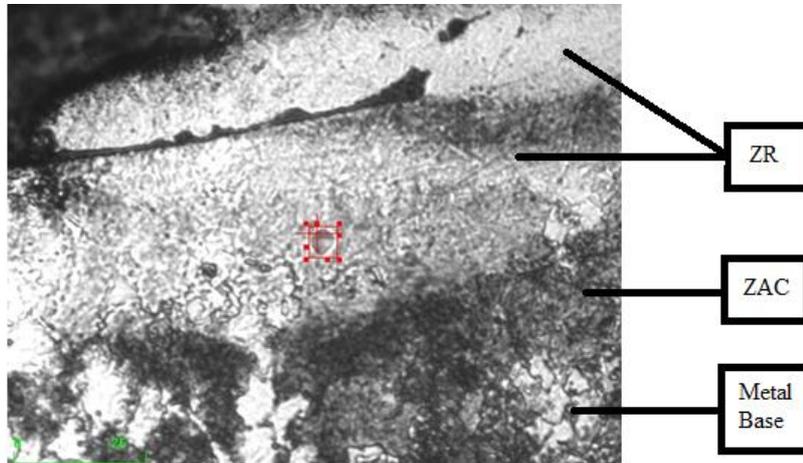
**Figura 23- Microscopia ótica demonstrativa do ensaio de microdureza Vickers realizado na ZAC com eletrodo de cobre**



Fonte: Autor

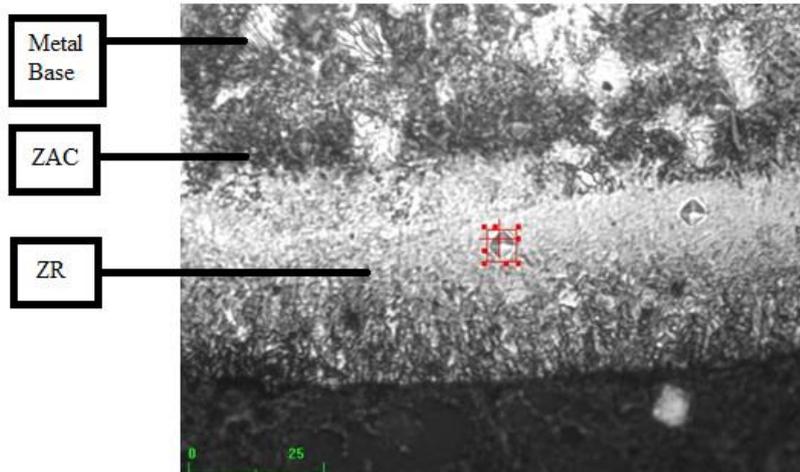
As figuras 24 e 25 abaixo representam o ensaio de microdureza Vickers realizado na ZR da peça usinada com eletrodo de grafita e cobre, respectivamente.

**Figura 24 - Microscopia ótica demonstrativa do ensaio de microdureza Vickers realizado na camada refundida com eletrodo de grafita**



Fonte: Autor

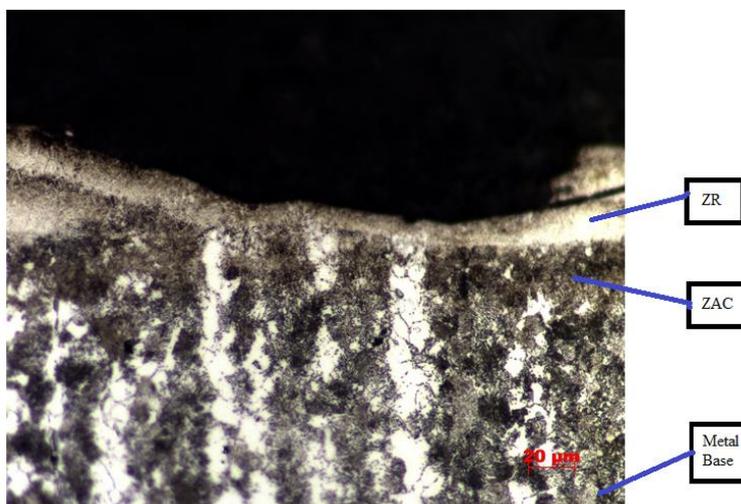
**Figura 25- Microscopia ótica demonstrativa do ensaio de microdureza Vickers realizado na camada refundida com eletrodo de cobre**



Fonte: Autor

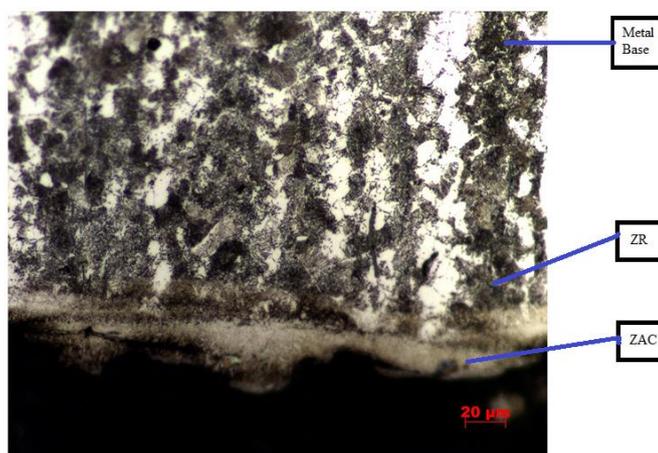
As figuras 26 e 27 abaixo mostram a formação das camadas nitretadas em ambos os casos, utilizando eletrodo de grafita e de cobre, e que em alguns pontos é possível obter uma camada nitretadas homogênea, embora o mesmo não ocorra em toda a extensão da peça, conforme figuras 30 e 31 abaixo.

**Figura 26- Microscopia ótica demonstrativa da amostra após NDE utilizando eletrodo de grafita – ampliação**



Fonte: Autor

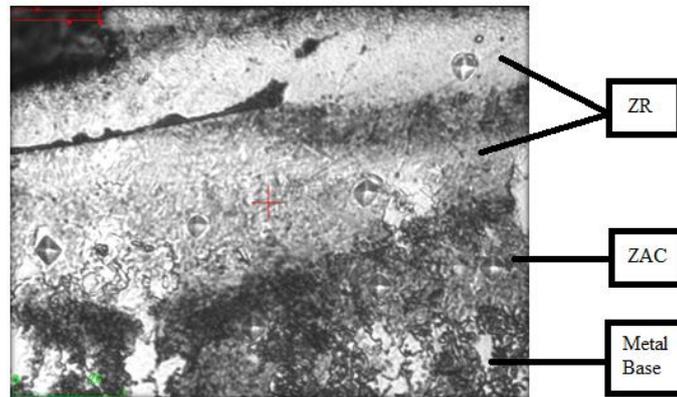
**Figura 27- Microscopia ótica demonstrativa da amostra após NDE utilizando eletrodo de cobre - ampliação**



Fonte: Autor

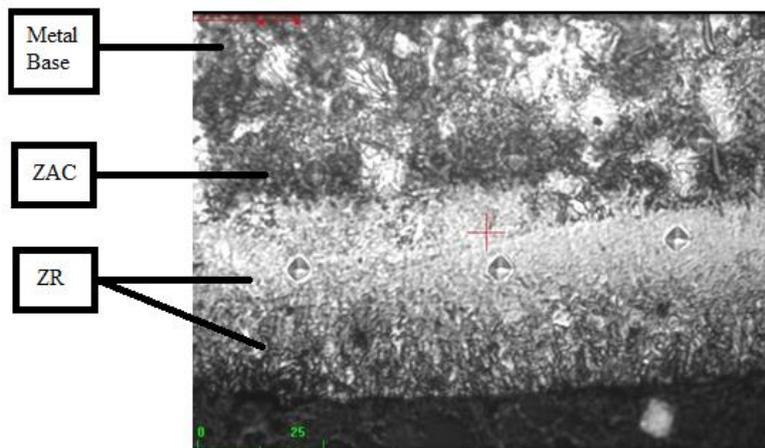
Comparando as figuras 28 e 29 é possível perceber que a zona refundida da peça usinada com o eletrodo de cobre apresentou maior uniformidade, enquanto que na peça usinada com eletrodo de grafita há duas zonas refundidas sobrepostas e com menor uniformidade.

**Figura 28- Microscopia ótica demonstrativa do ensaio de microdureza Vickers realizado nas duas camadas refundida e nitretada com eletrodo de grafita com as indentações próximas da superfície**



Fonte: Autor

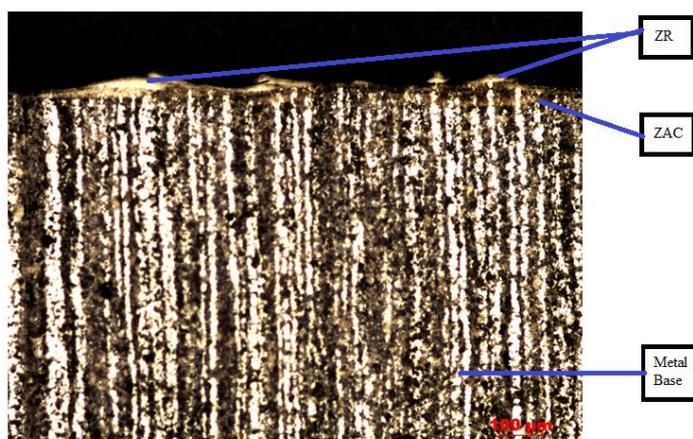
**Figura 29- Microscopia ótica demonstrativa do ensaio de microdureza Vickers realizado nas duas camadas refundida e nitretada com eletrodo de cobre com as indentações próximas da superfície**



Fonte: Autor

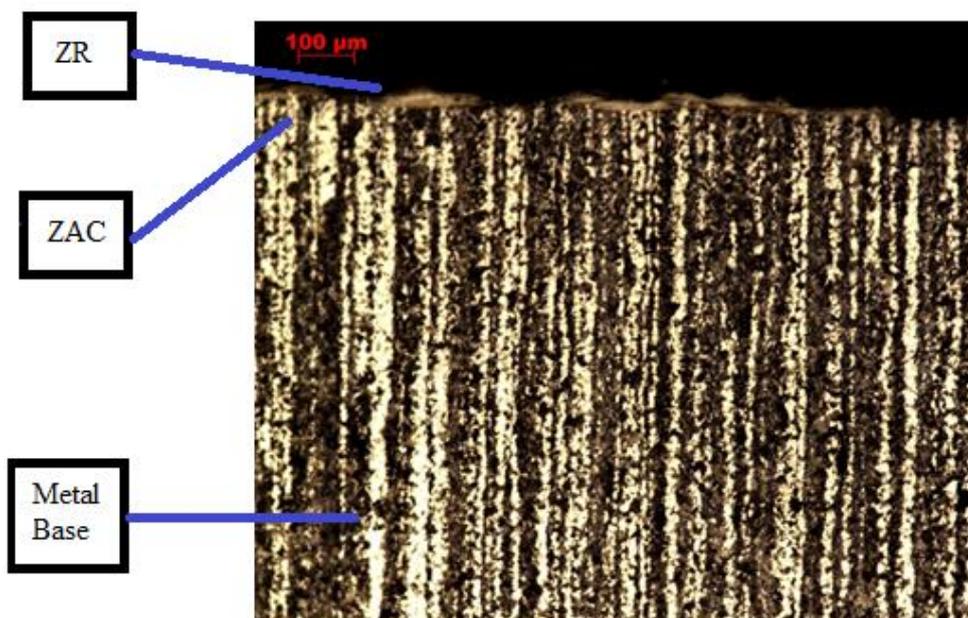
Nas figuras 30 e 31 observa-se que em ambos os casos a camada formada pela zona refundida não é uniforme ao longo da superfície da peça, sendo, portanto, um dos desafios a serem analisados em estudos futuros.

**Figura 30- Microscopia ótica demonstrativa da amostra após NDE utilizando eletrodo de grafita**



Fonte: Autor

**Figura 31- Microscopia ótica demonstrativa da amostra após NDE utilizando eletrodo de cobre**

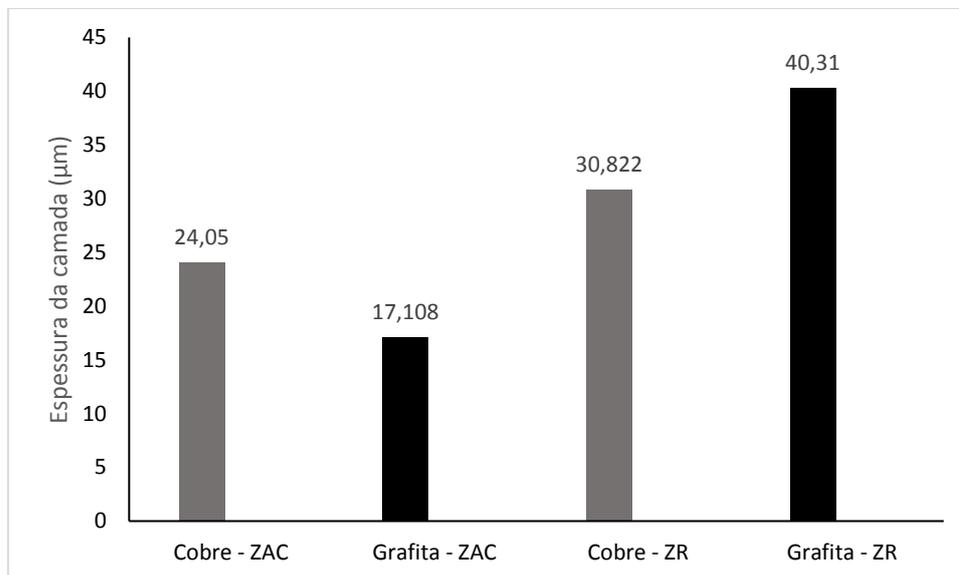


Fonte: Autor

#### **5.4 Avaliação da espessura das camadas nitretadas formadas**

Foi realizada a medição de espessura das camadas formadas para melhor avaliar o efeito dos dois eletrodos, conforme figura 29. Os dados obtidos revelam que a espessura da ZR foi maior para o eletrodo de grafita e ZAC foi maior para o eletrodo de cobre.

**Figura 32 - Comparação da espessura das camadas ZR e ZAC para cada tipo de eletrodo utilizado**



Fonte: Autor

## 6. CONCLUSÃO

Foram avaliados os efeitos da nitretação do aço AISI 4340 usinadas pelo processo de eletroerosão por penetração utilizando ureia como fluido dielétrico e foram obtidos os seguintes resultados:

- ✓ Foi comprovada a viabilidade de realizar NDE no aço AISI 4340
- ✓ Para ambos os eletrodos (cobre e grafita) foram observados aumento de dureza de no mínimo 77% em relação aos valores médios encontrados para as camadas nitretadas formadas. Contudo, devido ao elevado desvio padrão não é possível concluir aquele que apresentou maior valor de dureza. Apesar disso, os valores médios do eletrodo de cobre são superiores aos do eletrodo de grafita.
- ✓ O valor de dureza encontrado para a camada refundida é maior que para as camadas nitretadas mais profundas.
- ✓ Sob mesmas condições de operação o eletrodo de grafita se mostrou mais eficiente, com maiores valores de TRM e DVR. Entretanto, houve também maior desgaste em relação ao eletrodo de cobre.
- ✓ Ambos os eletrodos geraram camadas heterogêneas
- ✓ NDE com eletrodo de cobre apresentou ZAC com maior espessura e eletrodo de grafita apresentou ZR com maior espessura

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arantes, L. J., **Avaliação do Desempenho de Fluidos Dielétricos no Processo de Usinagem por Descargas Elétricas**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, MG. 2001

Arantes, L. J., **Estudo da Influência da Geometria e Material da Ferramenta na Taxa de Remoção de Material no Processo de Usinagem por Descargas Elétricas**. Revista Máquinas e Metais, São Paulo, v. 448, n. Maio, p. 57-52. 2003

ASM Handbook, **Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing**, ASM International (American Society for Metals), Ohio, USA, 2003.

CAMARGO, B. C.; COSTA, H. L.; RASLAN, A. A. **Endurecimento superficial de uma liga Ti6Al4V por meio de usinagem por descargas elétricas**. In: COBEF Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Belo Horizonte, MG, v.5, 2009.

CHIAVERINI, V.; **Aços e ferros fundidos**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 1990.

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.

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

Lee, Woei-Shyan; Su, Tzay-Tian. **Mechanical properties and microstructural features of AISI 4340 high-strength alloy steel under quenched and tempered conditions**. Department of Mechanical Engineering, National Cheng Kung University, Tainan 701, Taiwan Received 29 August 1997

LIMA, R. M.; Raslan, A. A. **UTILIZAÇÃO DE FLUÍDOS DIELÉTRICOS À BASE DE ÓLEOS VEGETAIS NA USINAGEM POR DESCARGAS ELÉTRICAS POR PENETRAÇÃO**. 17º Simpósio do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica Universidade Federal de Uberlândia Faculdade de Engenharia Mecânica. 2007

NICESIO, Isa Carla. **Nitretação por descargas elétricas do aço AISI 4140 utilizando diferentes categorias de ureia**. Dissertação (Mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2017

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

Pye, David. **Practical NITRIDING and Ferritic Nitrocarburizing**. ASM International. 2003

SANTOS, Carlos Eduardo dos; SILVA, Ernane Rodrigues da; SANTOS, Rogério Felício dos. **AVALIAÇÃO DA CORRENTE ELÉTRICA NO PROCESSO DE NITRETAÇÃO POR EDM NO AÇO AISI H13**. 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. 18 a 22 de maio de 2015, Salvador, Bahia, Brasil

SANTOS, Irapuan, **Análise dos parâmetros de entrada na eletroerosão de penetração da liga de titânio Ti-6Al-4V**. 2010, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 126 f.

SANTOS, Rogério Felício dos. **Nitretação por EDM do aço AISI 4140**. 2013. 129 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

SANTOS, Rogério Felício dos; SILVA, Ernane Rodrigues da; TELES, Vinicius Carvalho. **Enriquecimento de superfícies através da usinagem por descargas elétricas com jato de fluido dielétrico FJEDM**. 20º POSMEC simpósio do programa de pós-graduação em engenharia mecânica. Universidade federal de Uberlândia. 2010

SCHEID, V.H.B., ABDALLA, A.J., VASCONCELO S, G., **Plasma Nitrocarburizing and Laser Hardening Duplex Treatment of AISI 4340 Steel**, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat, 21 a 25 de novembro de 2010, Campos do Jordão, SP, Brasil. METALLURGICAL COATING AND THIN FILMS, Anais do CMCOTF-2009, San Diego, EUA, 2009.

SILVA, Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. 3ª edição revista. Villares Metals

SILVA, Herbert Eustáquio da Silva Júnior. **AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA DA CAMADA NITRETADA PELO PROCESSO DE ELETROEROSÃO NO AÇO AISI 4140**. 2016. Tese (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2016.

SOUZA, R. C., **Estudo do comportamento em fadiga do aço ABNT 4340 revestido com carbeto de tungstênio pelo sistema HVOF/HP**. 1998, 158p. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, FEG/UNESP, Guaratinguetá.

SOUZA, G.A., LUCENTE, A.B.F., ABDALLA, A.J., HASHIMOTO, T.M., PEREIRA, M.S., **Microstructural characterization of hard bainite in a medium - carbon and low-alloy steel**. SAE Technical Paper Series, S.Paulo, pg.01-06, 2008.

STEVENS, I. **Improvement of surface quality in die-sinking EDM**. Doctoralthesis.1998, 181 p. Department of Mechanical Engineering. Katholieke Universiteit Leuven. Leuven, 1998.

VENDRAMIM, J.C. **SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA NITRETAÇÃO**. ISOFLAMA Indústria e Comercio de Equipamentos Ltda. Disponível em: <[http://assets.cimm.com.br/uploads/cimm/publicacao/arquivo/383/InTec\\_028\\_SeleoAosNit.pdf](http://assets.cimm.com.br/uploads/cimm/publicacao/arquivo/383/InTec_028_SeleoAosNit.pdf)>. Acessado em 12/12/2017

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, 194-200, 2005.

ZAGONEL, Luiz Fernando. **Tratamentos de superfícies de uma liga ferrosa por íons de nitrogênio**. Campinas, SP:[s.n.], 2006.