

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

DANIEL DE MORAES LIMA

AVALIAÇÃO DA CAMADA NITRETADA POR DESCARGAS ELÉTRICAS EM  
FERRO FUNDIDO NODULAR AUSTEMPERADO

BELO HORIZONTE

2016

DANIEL DE MORAES LIMA

AVALIAÇÃO DA CAMADA NITRETADA POR DESCARGAS ELÉTRICAS EM  
FERRO FUNDIDO NODULAR AUSTEMPERADO

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

BELO HORIZONTE

2016

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, por tudo. Cada oportunidade que me foi proporcionada, cada desafio superado. Toda a ajuda que encontrei nas pessoas e toda força que busquei dentro de mim, tudo provém d'Ele, de Seu amor infinito. As minhas conquistas são e serão sempre graças a Ele.

Ao professor Ernane Rodrigues da Silva, pela confiança, apoio e parceria na elaboração desde trabalho.

Aos professores Guilherme da Silva Veloso e Rogério Felício dos Santos, pela disponibilidade em participar como membros da banca examinadora e por suas valiosas contribuições.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, em especial o Departamento de Engenharia de Materiais e sua comunidade – corpo docente, funcionários, direção, alunos – onde dediquei tantos anos de minha vida e com quem dividi tantos momentos de aprendizado.

À minha família e amigos, pelo amor, paciência e compreensão a mim dedicados em todos os momentos. Em especial, à minha mãe Maria Aparecida de São Geraldo Moraes, pela dedicação incondicional de sempre, e ao meu amor Marianna Sorrah, pela parceria e cumplicidade.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação e que me ajudaram a alcançar meus objetivos, muito obrigado.

*“...and in the end  
the love you take  
is equal to the love  
you make”  
(Paul McCartney)*

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi realizar a nitretação por descargas elétricas em amostras de ferro fundido nodular austemperado (ADI) e verificar a formação da camada nitretada na superfície do material. Os testes foram executados em uma máquina de EDM por penetração convencional. Foram utilizados eletrodos de cobre eletrolítico e grafita. Como fluido dielétrico utilizou-se uma solução de água deionizada e ureia. Os ensaios para avaliação do processo foram: análise micrográfica, difração de raios-x e avaliação de desempenho dos eletrodos. Os resultados mostraram formação de camada nitretada na superfície das amostras usinadas com os dois tipos de eletrodos. A espessura da camada nitretada observada foi de aproximadamente 30  $\mu\text{m}$  em amostras utilizando eletrodo de cobre e 80  $\mu\text{m}$  com eletrodo de grafita. Os eletrodos apresentaram nível de desgaste menor do que em processos de eletroerosão com fluidos tradicionais.

Palavras-chave: EDM; ADI; Cobre; Grafita; Nitretação.

## **ABSTRACT**

The purpose of this work was to perform the nitriding by electrical discharge into austempered ductile iron samples and verify the formation of the nitrated layer on the material's surface. The tests were executed on a die sinking EDM machine. As electrode tools were used electrolytic copper and graphite. As dielectric fluid, it was used a deionized water and urea solution. The tests for evaluation of the process were: micrographic analysis, x-ray diffraction and electrode's performance analysis. The results showed the formation of nitride layer right beneath the surface of the samples machined by both types of electrodes. The observed thickness of the nitrated layer was approximately 30 micrometers on samples using copper electrode and 80 nm with graphite electrode. The electrodes presented lower level of wear than in electrical discharge machining using traditional fluids.

Keywords: EDM; ADI; Copper; Graphite; Nitriding.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
1.1 Objetivos .....	9
1.1.1 <i>Objetivos gerais</i> .....	9
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	9
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>10</b>
2.1 Ferro Fundido Nodular Austemperado – ADI ( <i>Austempered Ductil Iron</i> ) .....	10
2.1.1 <i>Ferros Fundidos</i> .....	10
2.1.2 <i>Austêmpera</i> .....	11
2.1.3 <i>Ferros Fundidos Nodulares Austemperados</i> .....	12
2.2 Nitretação .....	12
2.3 EDM.....	13
2.3.1. <i>Componentes: eletrodos-ferramenta e fluidos dielétricos</i> .....	15
2.3.2 <i>Tipos de Fluidos Dielétricos</i> .....	15
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>17</b>
3.1 Materiais dos eletrodos-peça e eletrodos-ferramenta .....	17
3.2 Fluido dielétrico .....	17
3.3 Usinagem por descarga elétrica por penetração .....	18
3.4 Avaliação do desempenho.....	22
3.5 Ensaio de Caracterização .....	23
3.5.1 <i>Metalografia</i> .....	23
3.5.2 <i>Difração de Raios X</i> .....	24
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>25</b>
4.1 Caracterização microestrutural.....	25
4.2 Difração de raios X .....	28
4.3 Avaliação do desempenho do processo EDM.....	29
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>32</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>33</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O ferro fundido nodular é uma liga metálica cujo teor de carbono é alto o bastante para exceder sua solubilidade máxima no ferro, resultando na presença de carbono livre - grafita - disperso na matriz ferrosa. Sua nomenclatura deriva do formato esferoidal (nodular) assumido pela grafita nesse tipo de liga (KEOGH; HAYRYEN, 2010).

As propriedades do ferro fundido nodular estão intrinsecamente relacionadas com a quantidade relativa de ferrita e perlita presentes em sua matriz microestrutural. A resistência mecânica da liga diminui na medida em que se aumenta a quantidade deste microconstituente. Também o número e formato dos nódulos de grafita influenciam nas suas características. A nodularidade (medida de quão circular é a forma de um nódulo) está especialmente relacionada à resistência à deformação, enquanto a quantidade de nódulos deve ser suficientemente alta para minimizar a presença de porosidades e garantir satisfatória resistência à tensão (GUESSER *et al.* 2012). A aplicação de tratamento térmico de austêmpera proporciona surgimento de microestrutura ausferrítica (ferrita acicular e austenita estável de alto carbono) resultando no ferro fundido nodular austemperado, caracterizado por apresentar concomitantemente elevados níveis de resistência à tração e tenacidade (BALZER, 2003).

O estudo de propriedades tribológicas das superfícies dos materiais tem se tornado cada vez mais fundamental em diversas aplicações na indústria. São diversas as técnicas de tratamento superficial cujo objetivo final é melhorar as propriedades superficiais dos materiais (MANFRINATO, 2006). Mesmo o ferro fundido nodular austemperado, que se destaca por suas notáveis propriedades mecânicas, pode apresentar diminuição de sua vida útil quando submetido a tensões de compressão e falha por fadiga de contato. Verifica-se então a oportunidade de melhorar a vida em fadiga e aumentar resistência mecânica deste material por meio de tratamentos de modificação superficiais (WOLLMANN; NEVES, 2010).

Processos de nitretação são utilizados no endurecimento superficial de metais ferrosos e não ferroso (como ligas de titânio e alumínio). Por meio da formação de uma camada rica nitretos, a resistência ao desgaste é significativamente elevada na região das superfícies tratadas (MICHEL *et al.* 1995; NICOLETTO *et al.* 1996).



A camada de nitretos formada durante o processo confere tais características ao material devido principalmente ao aumento da resistência mecânica superficial. O endurecimento da superfície retarda a nucleação de trincas por meio da introdução de tensões residuais compressivas durante o processo (HWANG *et al.* 2003).

Todos os diversos tipos de processos de nitretação podem ser descritos de maneira geral como constituídos em três etapas. A primeira delas é a formação de nitrogênio atômico no meio reacional. Em seguida, ocorre a adsorção desses átomos na superfície da peça. A etapa final é a difusão dos átomos nitrogênio, migrando em direção ao interior da peça e interagindo química e mecanicamente com a microestrutura matriz do material (CRUZ *et al.* 1999).

Existem diversos processos para modificação de superfícies aplicáveis para a nitretação de materiais metálicos, dentre os quais tem se destacado aqueles que fazem uso de feixes de íons ou elétrons – em detrimento de técnicas tradicionais como a nitretação gasosa (MANFRINATO, 2006).

A usinagem por descargas elétricas, também denominada EDM (da sigla em inglês *Electrical Discharge Machining*) é um processo de usinagem não-convencional indicado especialmente para materiais em que métodos tradicionais de usinagem tem aplicação limitada. É um processo de remoção de material superficial por meio da aplicação de descargas elétricas (corrente contínua pulsada de alta frequência) que desencadeiam fenômenos termoelétricos que fundem e vaporizam o material, possibilitando sua transformação superficial (CRUZ *et al.* 1999).

Também referenciada informalmente no meio industrial como eletroerosão, esse processo possibilita efetuar usinagem em materiais de elevada dureza e forma complexa, desde que sejam condutores elétricos. Tem aplicação no setor de ferramentaria em geral, a se destacar: fabricação de matrizes para estampagem, forjamento, feiras para trefilação, extrusão, moldes de plástico. Além disso, é crescente o estudo desta técnica aplicada na transformação de superfícies a partir de modificações nos parâmetros de operação – especialmente a composição do fluido dielétrico, que pode ser à base de hidrocarbonetos ou soluções aquosa, por exemplo. O tipo de fluido utilizado interfere diretamente na composição química da camada fundida depositada na superfície do material usinado (FULLER, 1989).

Diversos estudos recentes (YAN *et al.* 2005; CAMARGO *et al.* 2009; SANTOS, 2012) apontam para a possibilidade de se enriquecer superfícies com nitretos por meio da usinagem por descargas elétricas. Utilizando soluções de água deionizada e ureia como fluido dielétrico no processo foi possível promover a nitretação nas camadas superficiais de ligas de titânio e aço inoxidável de baixa liga AISI4140. O presente trabalho se fundamenta na busca de verificar os mesmos resultados desta vez aplicados a amostras de ferro fundido nodular.

## **1.1 Objetivos**

### *1.1.1 Objetivos gerais*

O objetivo principal desse trabalho consiste na verificação da formação da camada nitretada na superfície de amostras constituídas de ferro fundido nodular austemperado.

### *1.1.2 Objetivos específicos*

- a) Realizar a nitretação por descargas elétricas de amostras de ferro fundido nodular austemperado utilizando o processo de eletroerosão em uma máquina de EDM por penetração;
- b) Verificar a formação da camada nitretada nas superfícies das amostras via microscopia óptica e eletrônica de varredura.
- c) Caracterizar os nitretos formados na camada nitretada por meio de análise de difração de raios-x.
- d) Avaliar o desempenho do processo a partir de cálculos com a variação das massas dos eletrodos-peça e eletrodos-ferramenta de cobre e grafite.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Ferro Fundido Nodular Austemperado – ADI (*Austempered Ductil Iron*)

O Ferro Fundido Nodular Austemperado, também aqui referenciado por ADI (da sigla em inglês *Austempered Ductil Iron*) é um tipo de material produzido a partir do tratamento térmico de Austêmpera, estabelecido nas Normas ASTM 897M e EN1564, aplicado em ferros fundidos nodulares brutos (KRYWICKYK, 2004).

#### 2.1.1 Ferros Fundidos

Os ferros fundidos compõe uma classe de ligas metálicas compostas basicamente de ferro, silício (entre 1% e 3%) e carbono (a partir de 2,11%). Tal classe se divide em três famílias principais de ferro fundido: cinzento, branco e nodular (HUNNICUTT, 1981).

Entre os ferros fundidos, o mais comum é o cinzento. Os principais elementos de liga são carbono e silício. Sua composição microestrutural apresenta carbono combinado em cementita ( $Fe_3C$ ) e também livre, como grafita em forma lamelar. Geralmente fabricado a partir de fundição de sucatas, apresenta elevada usinabilidade (devido principalmente a presença de grafita), e é empregado majoritariamente como matéria prima de máquinas e equipamentos na indústria ferroviária, naval e automobilística. Seu nome usual decorre do aspecto de sua superfície de fratura, que apresenta coloração cinzenta (COPAERT, 1974).

Os ferros fundidos brancos apresentam superfície de fratura com coloração clara e brilhante. São empregados em peças em que se exige maior resistência a abrasão, como equipamentos para moagem e mineração. A microestrutura deste tipo de liga caracteriza-se por apresentar o carbono predominantemente combinado, devido ao baixo teor de silício e presença de outros elementos de liga - que atuam como estabilizadores da cementita. Tal estrutura é o que confere ao material elevada dureza e maior resistência ao desgaste (CHIAVERINE, 1996).

Nos ferros fundidos nodulares o carbono permanece livre na matriz metálica assim como no ferro fundido cinzento. A estrutura morfológica da grafita, porém, é particular, apresentando-se de forma esferoidal (ou *nodular* – o que confere o nome

usual a esse tipo de liga). Tais nódulos de grafita conferem ao material características mecânicas superiores às dos ferros fundidos cinzentos comuns, como maior ductilidade, resiliência e resistência mecânica à tração. Combina-se a isso uma diminuição na massa específica do material quando comparado aos aços de resistência mecânica similar. Desta forma, a utilização de ferros fundidos nodulares na indústria se aplica à confecção de peças que necessitem de maior resistência ao impacto, à tração e ao escoamento, bem como entre aplicações cuja demanda principal é a redução do peso de peças e equipamentos, como indústria automotiva e de geração de energia eólica (SENAI, 1987).

### *2.1.2 Austêmpera*

A microestrutura denominada ausferrita consiste na mistura dos microconstituintes ferrita acicular e austenita estável com alto teor de carbono. O processo de Austêmpera é o tratamento térmico empregado para se obter tal estrutura (ROTHERY, 1978). Desenvolvido nos anos 1930, este processo tem como principal finalidade a melhora das propriedades mecânicas de materiais metálicos. Considerado um tratamento isotérmico, aplica-se a materiais ferrosos e requer um estrito e preciso controle de tempo e temperatura, produzindo uma microestrutura resultante de alta ductilidade, tenacidade, com uma resistência a abração e fadiga duas vezes maior que um tratamento tradicional de têmpera. A partir dos anos de 1960 este processo passou a ser empregado também aos ferros fundidos (COPAERT, 1974; ROTHERY, 1978). Ocorre mediante a seguinte sequência de operações e transformações:

- a) Aquecimento a uma temperatura dentro da faixa de austenitização, geralmente 785°C à 870°C;
- b) Resfriamento em banho mantido a temperatura constante geralmente entre 260°C e 400°C;
- c) Permanência no banho para transformação isotérmica da austenita;
- d) Resfriamento até temperatura ambiente, geralmente em ar tranquilo.

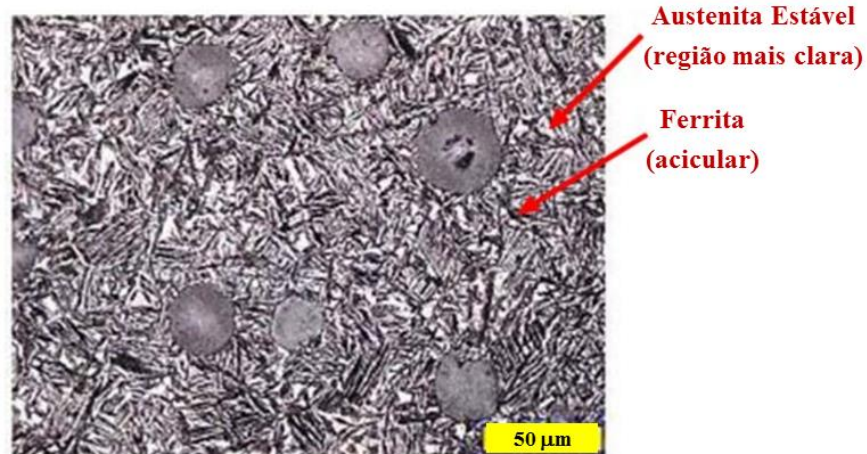
Durante o tempo que as peças são mantidas à temperatura de austenitização ocorre uma formação acicular de ferrita, austenita de alto teor de carbono estável e nódulos de grafita, formando assim uma estrutura denominada ausferrita, que confere uma maior resistência para um mesmo nível de ductilidade se comparado com uma

estrutura de perlita, ferrita ou martensita formada por meios convencionais de tratamento térmico (ROTHERY, 1978).

### 2.1.3 Ferros Fundidos Nodulares Austemperados

A aplicação de tratamentos térmicos de austêmpera nos ferros fundidos nodulares brutos de solidificação resulta na formação dos ferros fundidos nodulares austemperados (ADI). Esse tipo de liga metálica caracteriza-se principalmente por apresentar ótimas relações entre ductilidade, resistência mecânica e ao impacto além de boa resistência ao desgaste (SAHIN; DURAK, 2008). Uma característica que se destaca e caracteriza particularmente os ADIs é a microestrutura formada por agulhas de ferrita e placas de austenita estável de alto teor de carbono, denominada ausferrita. A Figura 1 (SOUZA, 2015) apresenta uma fotomicrografia que ilustra bem a estrutura descrita.

**Figura 1. Microestrutura típica do ADI.**



Fonte: SOUZA, 2015.

Os ferros fundidos nodulares austemperados têm sido utilizados como matéria prima para peças com as mais variadas aplicações (ASM-HANDBOOK, 1990), como em engrenagens, virabrequins de motores automotivos ou de refrigeração, bem como substituto para ligas de alumínio.

## 2.2 Nitretação

A nitretação é definida como o aumento no teor de nitrogênio nas camadas superficiais de um material por processos de tratamento termoquímico (DE MELLO *et*

*al.* 2010). Está relacionada com a introdução de átomos de nitrogênio no interior do reticulado cristalino de ligas ferrosas por meio de difusão.

A nitretação é um processo utilizado no endurecimento de superfícies metálicas de matrizes e moldes com o intuito de aumentar sua resistência ao desgaste por deslizamento e à fadiga. Existem diversos tipos de nitretação e aquele que tem sido largamente mais utilizado é o processo de nitretação a plasma. Neste processo a reação ocorre não somente na superfície, mas também na subsuperfície do material, devido à difusão de átomos de nitrogênio em direção à matriz. Desta forma, uma fina camada de nitretos é produzida na superfície juntamente com uma zona de difusão logo abaixo, onde o material apresenta significativo aumento não somente de sua resistência à fadiga e ao desgaste por deslizamento, mas também de sua capacidade de carga (SANTOS, 2012).

O processo de nitretação, ao alterar a constituição química e a microestrutura das camadas mais superficiais do material, por consequência transforma também suas propriedades mecânicas. De maneira geral, materiais nitretados apresentam significativo aumento nos valores de dureza superficial, resistência ao desgaste por deslizamento, resistência à corrosão, resistência térmica e à cavitação (YAN *et al.* 2005; SANTOS, 2012).

### **2.3 EDM**

O processo de EDM é um mecanismo que utiliza descargas elétricas para remover camadas superficiais de um dado material. A energia elétrica dispendida por meio da diferença de potencial criada é convertida em energia térmica quando um canal de plasma é formado entre os eletrodos. Uma vez que as descargas elétricas são causadas pela diferença de potencial pulsada, o canal de plasma se colapsa entre uma pulsação e outra, permitindo a circulação do dielétrico para retirar e transportar o material fundido da superfície em forma de partículas microscópicas (CRUZ *et al.* 1999).

O mecanismo de remoção de material no processo de EDM se dá por meio de fenômenos envolvendo transformações superficiais devido à energia elétrica atuando juntamente com transformações mais interiores no material causadas pela transferência

de energia térmica. Pode-se descrever o processo dividindo-o em estágios: ignição; criação do canal de plasma; fusão e sublimação de material superficial; e limpeza dos resíduos que se fundiram (FULLER, 1989).

Cada pulso elétrico gerado pela máquina produz uma diferença de potencial entre os eletrodos em que se estabelece um arco-elétrico. Uma vez estabelecido o arco, a temperatura do plasma entre os eletrodos peça e ferramenta varia de 8000 a 10000 K. Tais temperaturas são suficientes para que ocorra a fusão e vaporização do material superficial da peça a ser usinada. No intervalo entre pulsos elétricos o canal de plasma entra em colapso. Com isso a temperatura e a pressão no microambiente entre os eletrodos cai drasticamente, possibilitando a circulação do líquido dielétrico, que transporta o material fundido suspenso na forma de partículas microscópicas. No espaço entre os eletrodos (fenda de trabalho) se abre o canal de plasma. Nesta fase do pulso elétrico, devido à alta pressão exercida pelo arco elétrico, pouco material se evapora. Uma vez que a pulsação suspende a descarga elétrica, ocorre uma queda instantânea da pressão, juntamente com a extinção do canal de plasma. Parte do material fundido solidifica-se nas poças de fusão; a outra parte em suspensão é removida pelo turbilhão do fluido dielétrico. Com isso, observa-se a formação de crateras nas superfícies dos eletrodos peça e ferramenta (AMORIM, 2002).

Quando comparada a processos de usinagem convencional, a usinagem por eletroerosão tem baixa taxa de remoção de material, uma vez que 85% a 90% do material fundido/vaporizado durante a descarga voltam a ser depositados na superfície da peça. Além disso, sabe-se que para a usinagem tradicional a ferramenta de corte deve possuir valores de dureza mais elevada do que a peça a ser usinada. No processo por EDM, porém, não se verifica tal intrínseca condição. A remoção de material é um processo termoelétrico, associado principalmente ao superaquecimento do metal fundido nas cavidades do eletrodo peça. Por meio da ionização por impacto, elétrons liberados no cátodo são acelerados e colidem com as moléculas do fluido dielétrico, desencadeando a libertação de mais elétrons e íons que dão continuidade a reação em cadeia altamente energética. A aplicação e desenvolvimento desta tecnologia como alternativa a processos usuais de usinagem, a exemplo do que ocorre em muitas outras áreas técnicas, ganhou destaque devido a necessidades práticas do ambiente industrial, bem como a busca por solucionar alguns dos seus intrínsecos problemas de fabricação (FULLER, 1989; AMORIM, 2002).

### *2.3.1. Componentes: eletrodos-ferramenta e fluidos dielétricos*

A seleção dos materiais dos eletrodos ferramenta e da composição química dos fluidos dielétricos é determinante no resultado do processo de usinagem por eletroerosão. As principais variáveis a serem consideradas como critérios de seleção de um eletrodo ferramenta são: alta condutividade elétrica, alto ponto de fusão, desgaste, disponibilidade do material, facilidade de fabricação e custo. Os materiais mais comumente empregados como eletrodos ferramenta são grafite e cobre eletrolítico. A função principal dos fluidos dielétricos é propiciar um ambiente adequado para melhorar o rendimento das reações químicas e mecânicas que resultam no processo de usinagem. O líquido deve ser capaz de se ionizar rapidamente após descarga elétrica e possuir alta força dielétrica para permanecer como isolante até que ocorra a tensão de desequilíbrio e formação do canal de plasma. Além de controlar a potência de abertura do arco, sua atuação também passa por refrigerar os eletrodos peça e ferramenta, remover as partículas sublimadas e proteger os materiais contra oxidação e contaminação (CRUZ *et al.* 1999; AMORIM, 2002).

### *2.3.2 Tipos de Fluidos Dielétricos*

A usinagem por EDM pode ocorrer com diversos tipos de fluidos dielétricos. Existe na literatura estudos realizados a cerca da utilização de hidrocarbonetos aditivados, querosene, água deionizada e algumas soluções aquosas. A correta escolha do fluido dielétrico se faz essencial no processo uma vez que a atuação deste componente está diretamente relacionada a vários aspectos da usinagem, como, por exemplo, controlar a potência de abertura de descarga e influenciar na composição química do material fundido depositado na superfície da peça. Além disso, os fluidos dielétricos promovem a lavagem da fenda de trabalho, arrastando para fora as partículas erodidas e atuando no arrefecimento do sistema, o que implica na profundidade da camada refundida (FULLER, 1989).

A composição química dos fluidos dielétricos influencia diretamente nas propriedades observadas na camada superficial de materiais usinados. Peças de aço usinadas por EDM na presença de fluidos a base de hidrocarbonetos apresentam camada da zona refundida com valores de dureza e fragilidade superiores aos encontrados no material base da liga. Tal comportamento se deve a incorporação do carbono presente no fluido que são se difundem em meio à poça de fusão e acabam por interagir



quimicamente com o ferro do metal-base, dando origem a formação cementita e outros microconstituintes que fragilizam e endurecem superficialmente o material. A utilização de água como dielétrico comprovadamente diminui a quantidade de carbono depositado na camada superficial da peça. Ainda sim, verifica-se endurecimento superficial – devido basicamente a transformações termodinâmicas de microconstituintes em meio a rápida solidificação do material refundido. O principal problema da utilização de água deionizada é a baixa resistividade elétrica, comparada aos óleos minerais. Como consequência, a taxa de remoção de material é menor (FULLER, 1989; SANTOS, 2012).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais dos eletrodos-peça e eletrodos-ferramenta

Para realização do procedimento foram obtidas amostras para o eletrodo-peça constituídas de ferro fundido nodular austemperado (ADI) com formato cilíndrico nas dimensões de 18 mm de diâmetro e 12 mm de espessura. A composição química do material utilizado é demonstrada na Tabela 1.

**Tabela 1 – Composição química**

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	Ni (%)
4,05	2,1	0,19	0,01	1,14

Fonte: Korich e Priestner, 1995.

Antes de iniciar o processo de usinagem por descargas elétricas, duas amostras foram seccionadas ao meio (no sentido da espessura) para facilitar a preparação metalográfica.

Os dois tipos de eletrodos ferramenta usados no processo eram constituídos por cobre eletrolítico e grafita no formato cilíndrico, com 22 mm de diâmetro e 30 mm de comprimento.

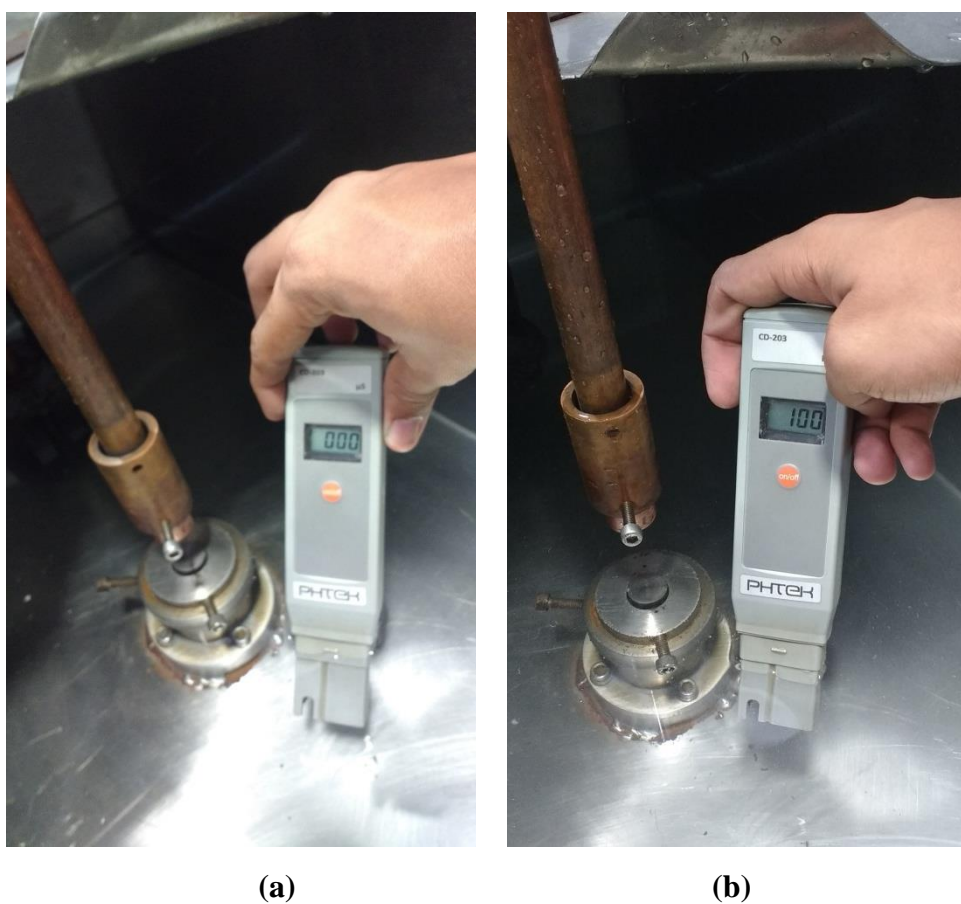
#### 3.2 Fluido dielétrico

O fluido dielétrico usado neste trabalho foi uma solução de ureia fertilizante em água deionizada com concentração de 30 g/l.

A preparação água deionizada foi feita a partir de água potável que, após passar por um elemento filtrante de 25  $\mu\text{m}$  e por um aparelho deionizador, teve sua condutividade elétrica reduzida à zero. Com a adição da ureia e adequada homogeneização, a solução final adquiriu valores de condutividade média na ordem de 100  $\mu\text{S/cm}$ .

A Figura 2 ilustra o monitoramento da condutividade elétrica dos fluidos, feita por meio de um condutivímetro portátil PHTEK com faixa de operação de 0 a 1999  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e incerteza de  $\pm 2\%$ .

**Figura 2. Monitoramento da condutividade elétrica da água deionizada (a) e da solução com uréia 30g/l (b).**



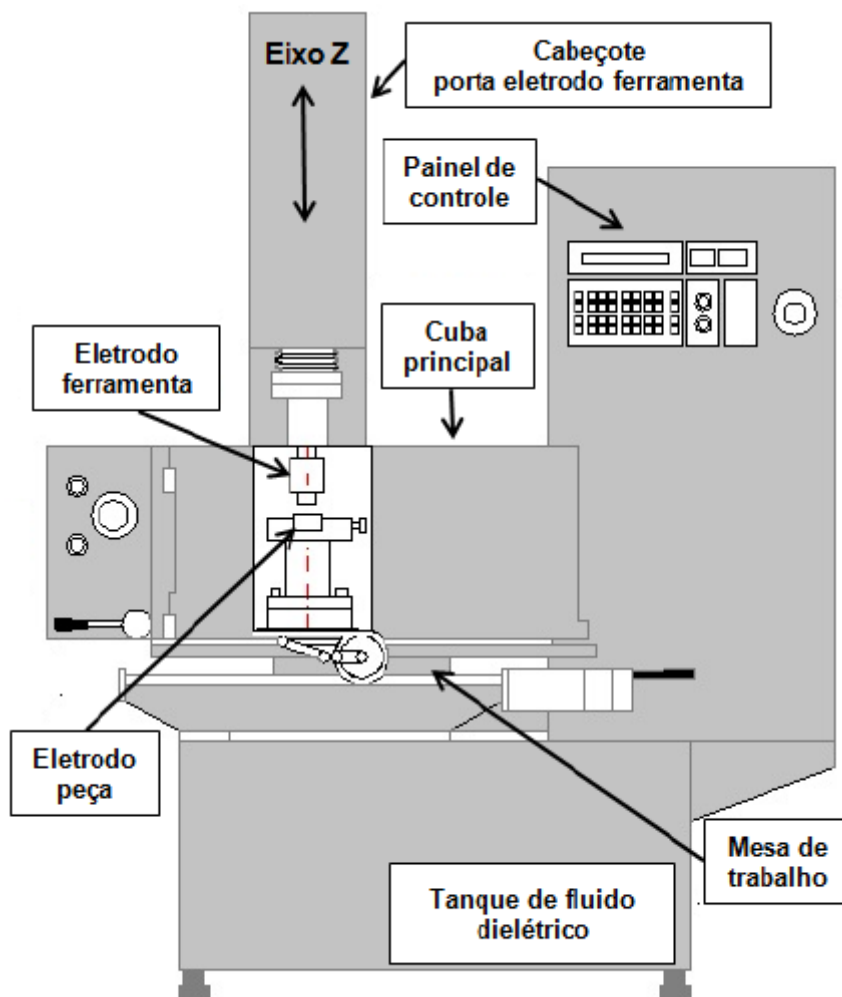
Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.3 Usinagem por descarga elétrica por penetração

Os testes foram executados em uma máquina de EDM por penetração: Servspark Eletroplus EDM-540, do laboratório de Ajustagem no Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET/MG.

A Figura 3 apresenta um desenho esquemático deste tipo de equipamento.

**Figura 3. Representação esquemática de uma máquina de eletroerosão por penetração - EDM.**



Fonte: SANTOS (2012)

A máquina possui cabeçote porta eletrodo ferramenta, com movimento no eixo Z, através de guias lineares e fuso de esferas recirculantes, acionado por motor de passo e capacidade para eletrodos ferramenta de até 60 kg.

A programação da operação é feita no painel por meio de microprocessador, controlado pelo teclado de membrana, possui teclas individuais, *display* de cristal líquido e *display* de parâmetros para visualização. As mesas são apoiadas em rolamentos lineares sobre guias temperadas e retificadas para garantir a durabilidade e a precisão dos movimentos.

A bandeja de trabalho, também denominada de cuba principal, tem abertura lateral e frontal, com capacidade de 180 litros. A potência total, descrita no manual da máquina, é de 6,5 KVA.

A Figura 4 apresenta uma fotografia do painel de controle da máquina Servspark Eletroplus EDM-540 juntamente com a indicação dos parâmetros operacionais aplicados. O tempo de duração de cada teste foi de 10 minutos.

**Figura 4. Fotografia do painel de controle da máquina de eletroerosão Servspark Eletroplus EDM-540.**



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros operacionais selecionados que possibilitaram a aplicação do processo de eletroerosão na máquina Servspark Eletroplus EDM-540.

**Tabela 1 – Parâmetros operacionais ajustados na máquina EDM.**

Parâmetros	
Polaridade do eletrodo-ferramenta	Positiva
Tensão	110V
Corrente	40A
Tempo de pulso ( $T_{on}$ )	4,5*
Tempo de pausa ( $T_{off}$ )	1,5*
Fenda de trabalho ( <i>gap</i> )	1,0*
Velocidade do servo	2,0*
Afastamento periódico da ferramenta	3,0*
Tempo de erosão	1*

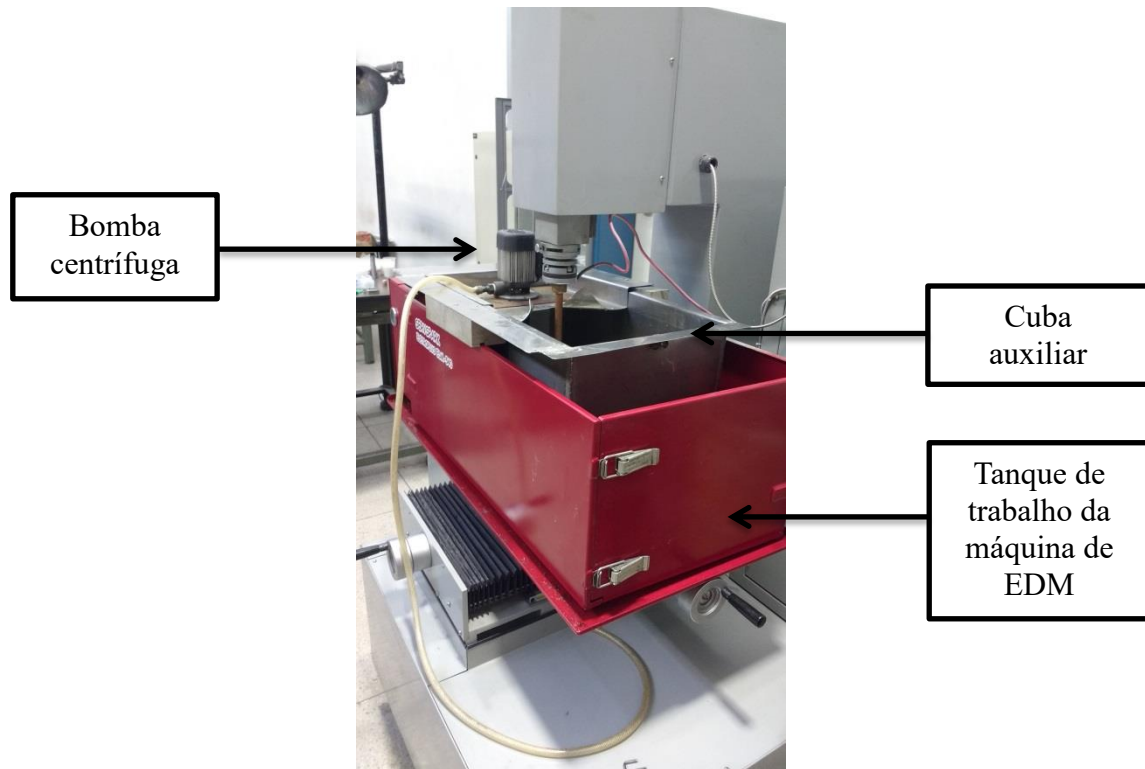
Fonte: Elaborada pelo autor.

\*Parâmetros ajustados diretamente no painel de controle da EDM Servspark.

Uma vez descartado o uso de fluidos a base de hidrocarbonetos, devido a necessidade de se diluir a ureia em solução aquosa, se fez necessária a utilização de uma cuba auxiliar inserida dentro da cuba principal da máquina, como pode se observar na Figura 5. Desta forma, evita-se a contaminação do óleo mineral do reservatório original bem como também dos fluidos aquosos dentro deste dispositivo de adaptação.

A instalação de uma bomba centrífuga também fez parte da montagem de adaptação, proporcionando maior circulação do fluido e, assim, favorecendo a limpeza da fenda de trabalho.

**Figura 5. Fotografia do conjunto de adaptação e Cuba Auxiliar**



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.4 Avaliação do desempenho

Os eletrodos peça e ferramenta foram todos pesados em balança analítica de precisão de  $10^{-3}$  g, antes e depois da usinagem por descargas elétricas, para avaliação de desempenho do processo EDM, juntamente com o enriquecimento de superfícies das amostras por nitretos. As pesagens foram repetidas em triplicata e a variação da massa foi determinada pela diferença entre as massas inicial ( $m_i$ ) e final ( $m_f$ ) dadas pela equação Eq.(1):

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

A partir da variação da massa, puderam ser avaliados:

**Taxa de Remoção de Material (TRM):** caracteriza o volume de material removido do eletrodo peça durante um determinado tempo, expressa em  $\text{mm}^3/\text{min}$ . Para quantificar a TRM, foi utilizada a equação Eq. (2):

$$TRM = \frac{\Delta m}{(0,00715) \times t} \quad \text{Eq.(2)}$$

Onde:  $\Delta m$  = variação da massa da amostra [g],  $t$  = tempo de usinagem [min] e a constante  $p = 0,00715 \text{ g/mm}^3$  corresponde ao peso específico do ferro fundido nodular.

**Taxa de desgaste (TD):** representa o volume de material perdido pelo eletrodo ferramenta durante sua operação em um determinado tempo, expressa em  $\text{mm}^3/\text{min}$ . Para quantificar a TD do eletrodo ferramenta foi utilizada a equação Eq.(3):

$$TD = \frac{\Delta m}{p \times t} \quad \text{Eq.(3)}$$

Onde:  $\Delta m$  = variação da massa da amostra [g],  $t$  = tempo de usinagem [min] e a constante  $p$  = peso específicos dos eletrodos-ferramenta de grafite ( $p = 0,0089 \text{ g/mm}^3$ ) e cobre eletrolítico ( $p = 0,0089 \text{ g/mm}^3$ ).

**Desgaste Volumétrico Relativo (DRV):** relaciona o volume de material perdido pelo eletrodo ferramenta em relação ao volume de material removido do eletrodo peça, dado pela razão entre TD e TRM, normalmente expresso em valores percentuais. A equação Eq.(4) foi usada para determinar o DVR:

$$DVR = \frac{TD}{TRM} \times 100 \quad \text{Eq.(4)}$$

### 3.5 Ensaios de Caracterização

#### 3.5.1 Metalografia

Após os testes de usinagem por descargas elétricas as amostras foram preparadas para análise metalográfica. Nesta fase, foi feito o embutimento utilizando resina epóxi termoendurecível. As amostras previamente seccionadas transversalmente à superfície foram selecionadas para serem embutidas.

A etapa de lixamento manual foi feita usando lixas de carbetto de silício com granulometria na seguinte sequência: 220, 400, 600 e 1000 mesh. O polimento foi realizado em politriz automática com pasta de diamante de granulometrias 15, 9, 3 e 1  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Finalmente, foi feito ataque químico com Nital 2%.



As micrografias e as medições das espessuras das zonas refundidas (ZR) e zonas afetadas pelo calor (ZAC) foram realizadas em microscópio óptico e MEV. As imagens foram capturadas por meio de câmera digital incorporada aos equipamentos.

### 3.5.2 Difração de Raios X

A presença de nitretos foi verificada por difração de raios x convencional, Bragg-Bretano ou  $\theta$ - $2\theta$ . As especificações técnicas do difratômetro e os parâmetros de varredura estão descritos na Tabela 2.

**Tabela 2 – Especificações e parâmetros usados na DRX.**

Parâmetros		Unidade
Radiação	CuK $\alpha$	
Voltagem do tubo	40	kV
Corrente	30	mA
Modo de varredura	Tempo fixo	
Espaçamento	0,02°; 0,03°;0,05°	
Velocidade de varredura	2,00	grau/minuto
Tempo de varredura por ponto	5	S
Ângulo inicial ( $2\theta$ )	20°	
Ângulo final ( $2\theta$ )	120°	

Fonte: Elaborada pelo autor.

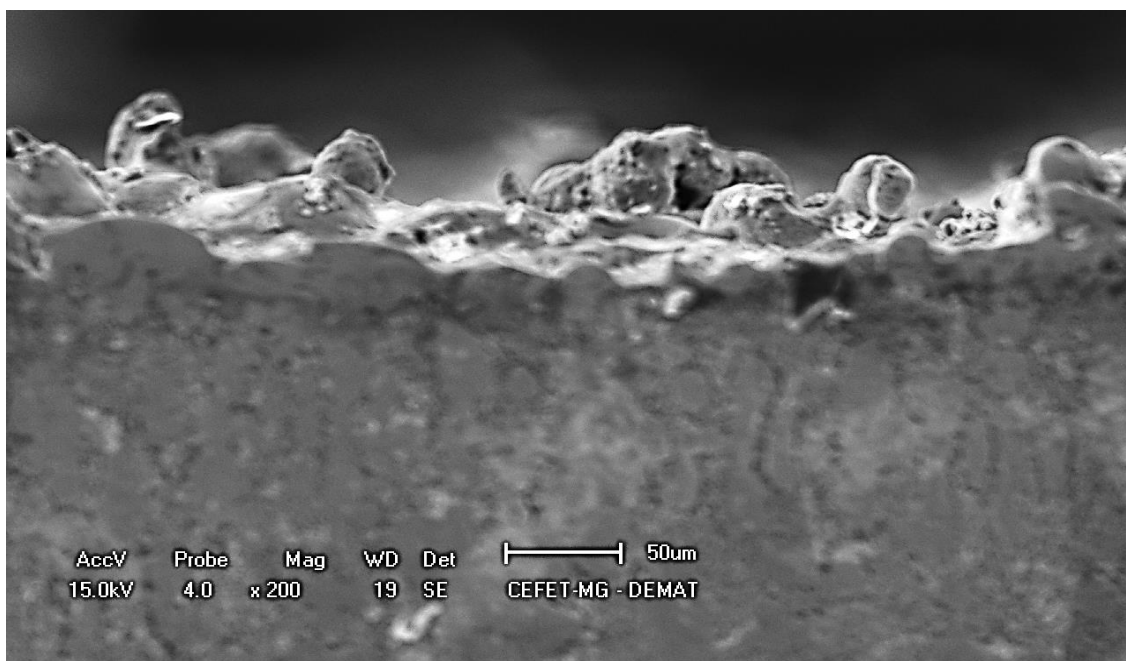
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta sessão são apresentados os resultados obtidos com o procedimento descrito na sessão anterior. Concomitantemente, na medida em que são apresentados, os resultados são discutidos e analisados a partir do objetivo central da proposta do trabalho: a verificação da formação de uma camada nitretada na superfície de amostras processadas.

### 4.1 Caracterização microestrutural

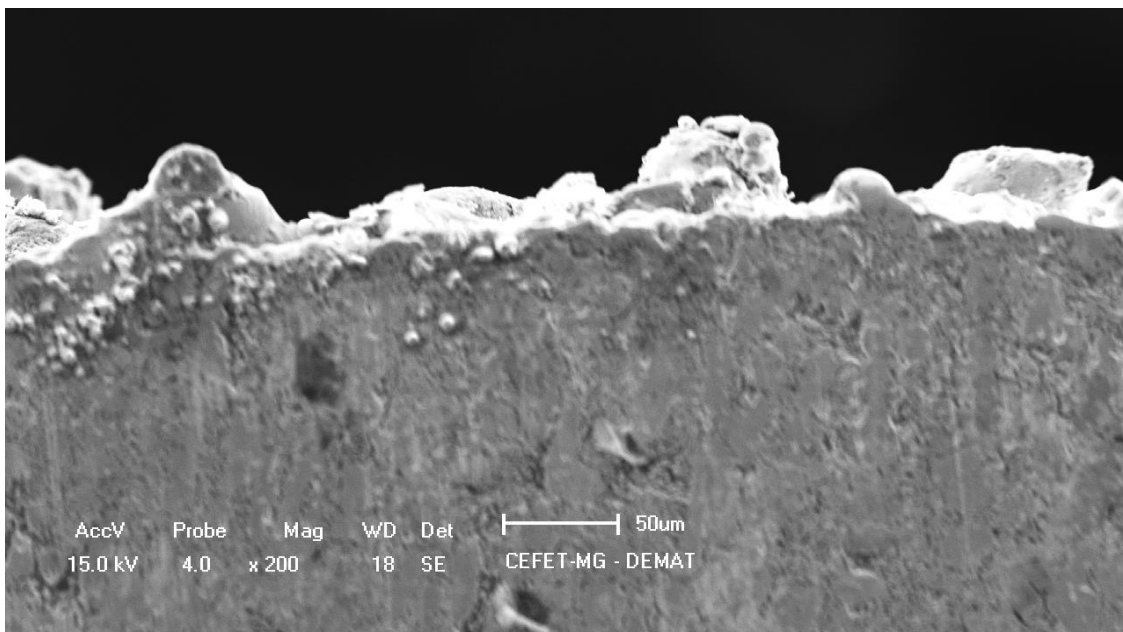
As Figuras 6 e 7 são os resultados das imagens de MEV aplicados à seção transversal das amostras nitretadas por EDM com eletrodos ferramenta de cobre e grafita, respectivamente.

**Figura 6. Imagem de MEV da seção transversal de uma amostra nitretada com eletrodo de cobre.**



Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 7. Imagem de MEV da seção transversal de uma amostra nitretada com eletrodo de grafita**



Fonte: Elaborada pelo autor.

Por meio das imagens apresentadas observa-se que ambas as superfícies submetidas ao processo de nitretação por eletroerosão apresentam perfil semelhante, com notável presença de crateras, poros e micropartículas refundidas na superfície. Desta maneira, as peças apresentam características tipicamente observadas em superfícies usinadas por EDM (SANTOS, 2012).

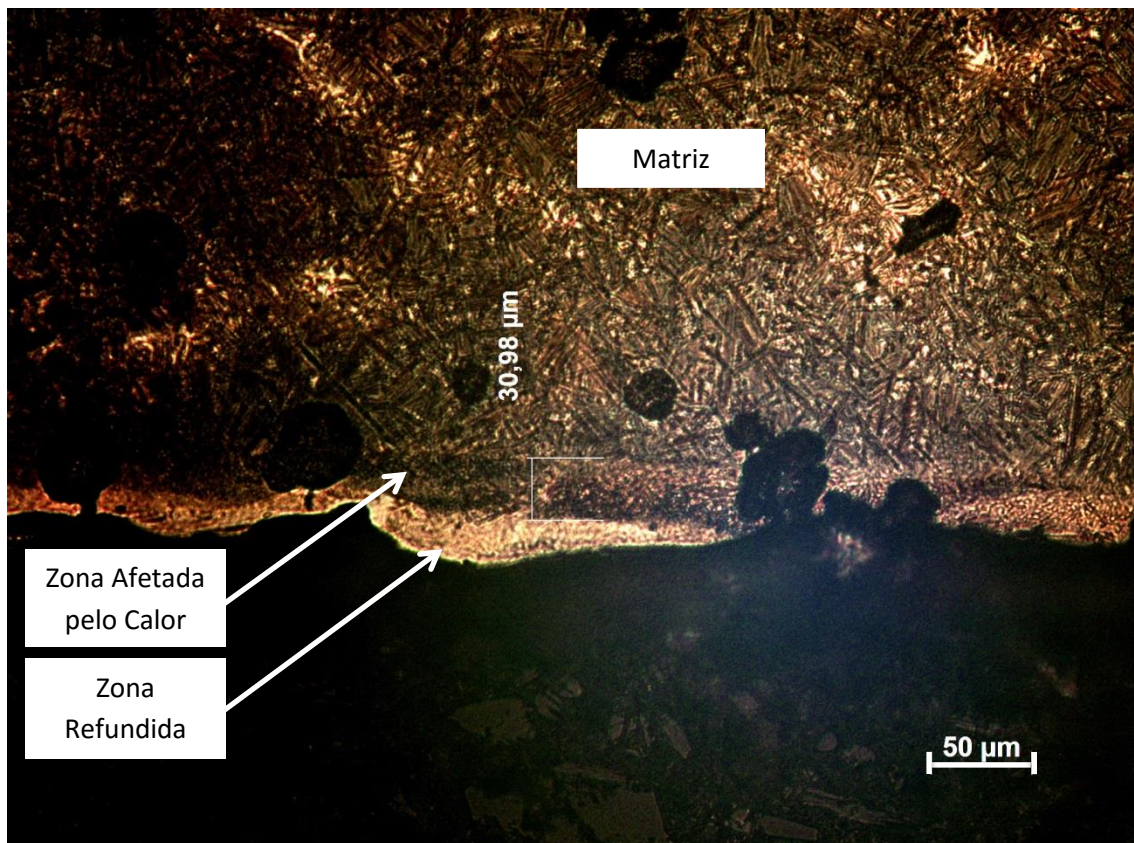
As micrografias apresentadas nas Figuras 8 e 9 correspondem a imagens das seções transversais das amostras usinadas por eletroerosão com eletrodos ferramenta de cobre e grafita, respectivamente. A partir dessas imagens a identificação das diferentes fases geradas no processo de nitretação é mais nítida.

Mais externamente está camada ressolidificada, de coloração mais clara, constituída pela zona refundida (ZR). Logo abaixo destacam-se a significativa presença de poros e crateras causadas pelo turbilhão do material refundido que se precipita na superfície da amostra.

Seguindo em direção ao interior da amostra, logo abaixo nota-se uma faixa de coloração um pouco mais escura, com aparente diferença em sua microestrutura. Esta região é uma zona afetada pelo calor (ZAC) onde a mudança na conformação dos

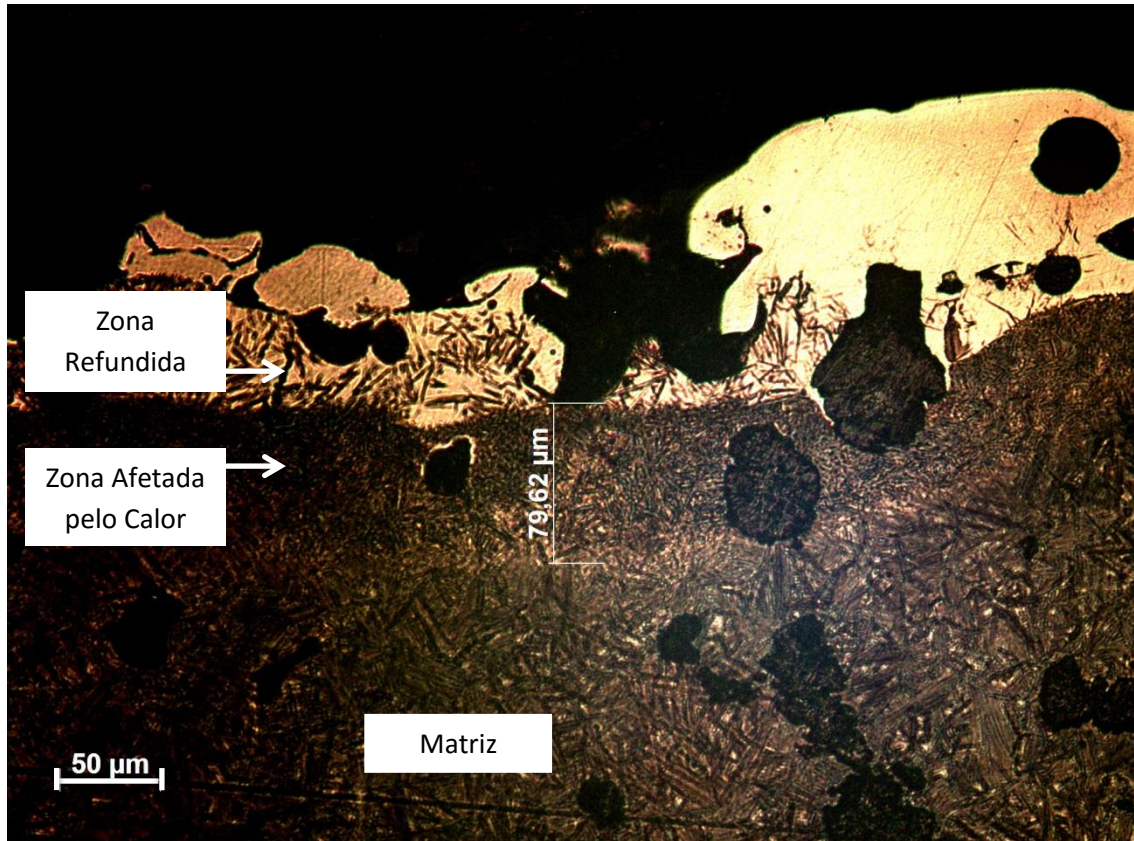
microconstituintes é um indicativo de que houve precipitação de nitretos na região (DE MELLO *et al*, 2010).

**Figura 8. Imagem de microscopia ótica da seção transversal de amostra de ferro fundido nodular austemperado usinada pelo processo EDM com eletrodo de cobre em solução de água deionizada e ureia.**



Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 9. Imagem de microscopia ótica da seção transversal de amostra de ferro fundido nodular austemperado usinada pelo processo EDM com eletrodo de grafita em solução de água deionizada e ureia.**



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.2 Difração de raios X

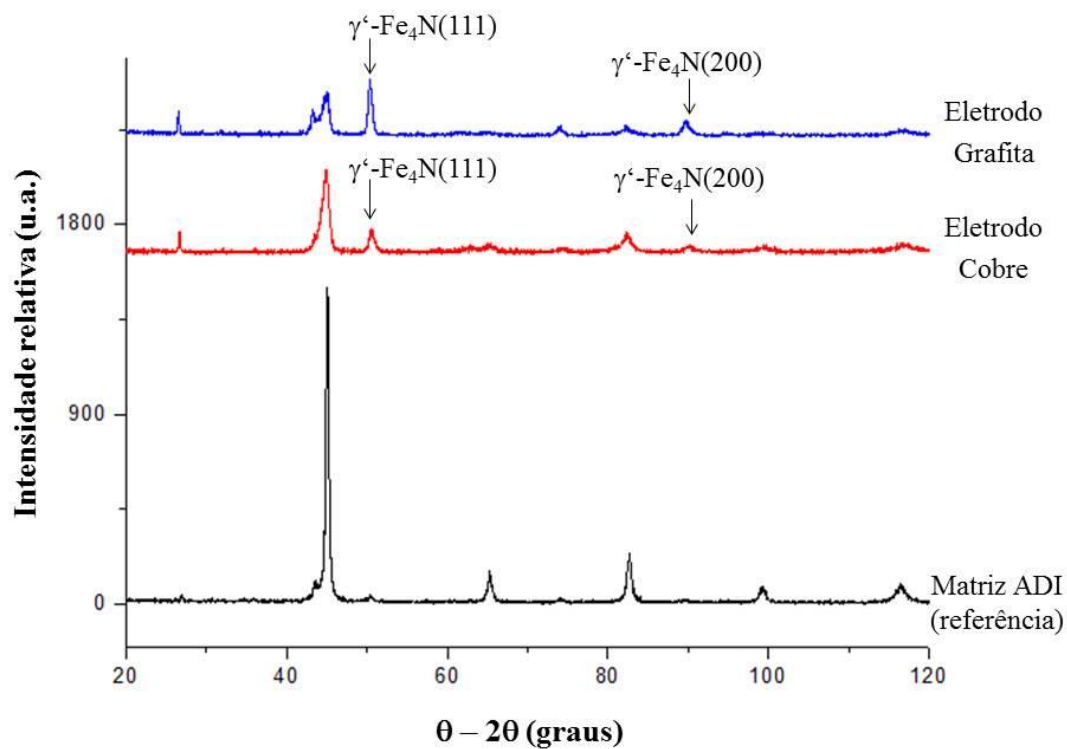
A Figura 10 apresenta os resultados de difração de raios-x representados em um gráfico de intensidade versus ângulo de varredura ( $2\theta$ ). O gráfico ilustra os difratogramas das amostras nitretadas com eletrodos ferramenta de cobre e grafita, comparando-os com uma liga de ferro fundido nodular ADI de referência.

O difratograma apresenta variação nas intensidades dos picos à aproximadamente  $50^\circ$  e  $90^\circ$ . Resultados semelhantes foram encontrados no trabalho de SANTOS (2012). Os dois picos referidos caracterizam constituição da camada superficial da amostra com nitretos precipitados  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N em duas orientações preferenciais (a primeira  $\langle 111 \rangle$  a maior e a segunda  $\langle 200 \rangle$  a menor). Observa-se

também que os valores foram semelhantes para ambos os eletrodos de grafita e cobre eletrolítico.

Os resultados, portanto, indicam que por meio do processo de eletroerosão por EDM aplicado ao ferro fundido nodular austemperado foi possível verificar a nitretação das camadas superficiais das amostras.

**Figura 12. Difratoograma da superfície das amostras de ferro fundido nodular nitretadas com eletrodos de grafita e cobre.**



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 4.3 Avaliação do desempenho do processo EDM

Foram calculados a taxa de remoção de material (TRM), a taxa de desgaste do eletrodo ferramenta (TD) e o desgaste volumétrico relativo (DVR) respectivamente ao processo de nitretação por descargas elétricas do ferro fundido nodular austemperado com eletrodos-ferramenta de cobre e grafite. Os resultados, com média e desvio padrão, são mostrados na Tabela 3.

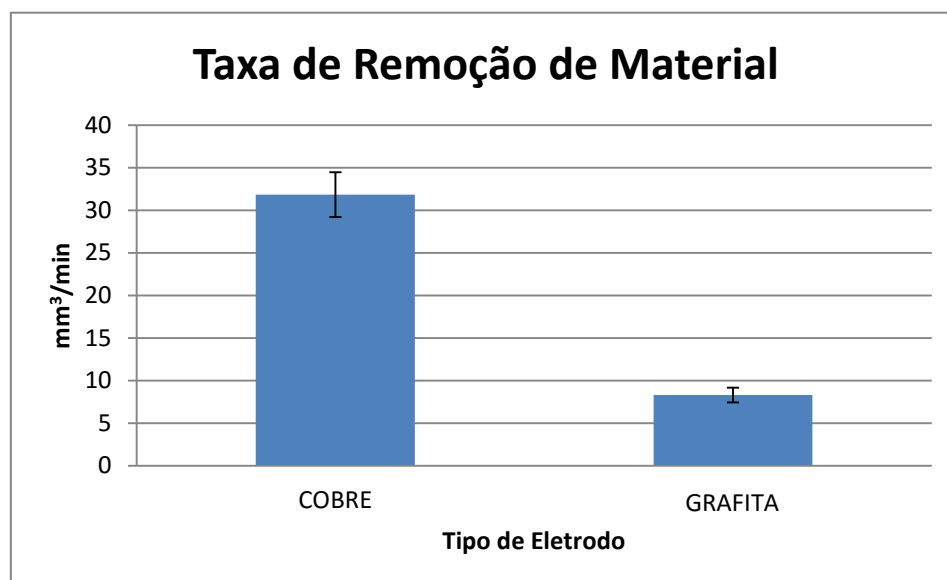
**Tabela 3 – TRM, TD E DVR do processo de nitretação por EDM.**

Parâmetros	Eletrodo de Cobre	Eletrodo de Grafita
TRM (mm <sup>3</sup> /min.)	31,81 +/- 2,63	8,29 +/- 0,88
TD (mm <sup>3</sup> /min.)	5,74 +/- 0,18	3,83 +/- 0,09
DVR (%)	18,09 +/- 0,94	46,54 +/- 5,75

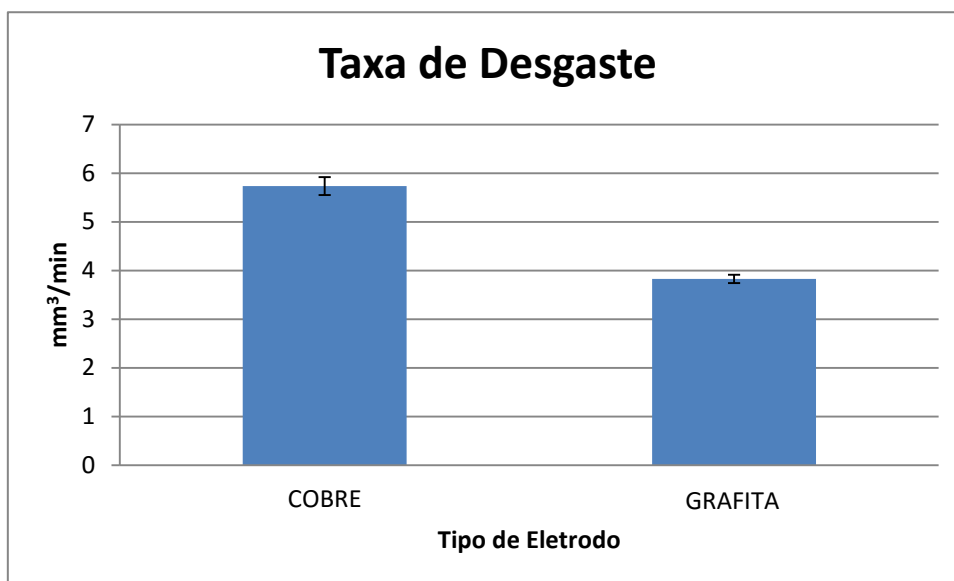
Fonte: Elaborada pelo autor.

Comparando os valores apresentados, que mostram o resultado do processo de nitretação por eletroerosão realizado utilizando eletrodos-ferramenta de cobre e grafita, verifica-se que a utilização do cobre como eletrodo-ferramenta resultou em maiores valores de TRM e TD. Percebe-se assim que este tipo de eletrodo causou maior remoção de material da superfície das peças e apresentou maior perda de volume durante o processo. Já o eletrodo de grafita apresenta maior DVR, indicando maior perda de volume de material do eletrodo em relação à quantidade de material removido das peças.

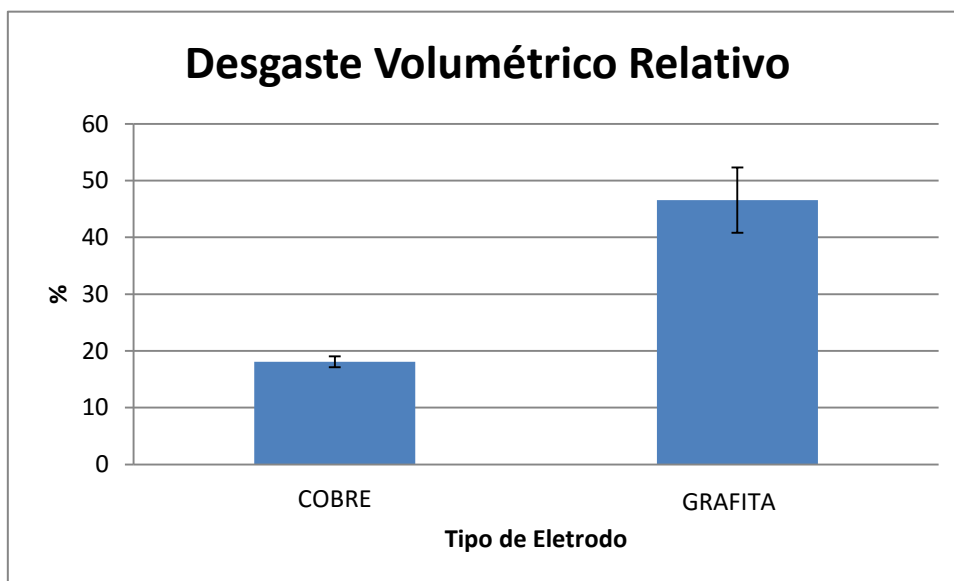
As Figuras 13, 14 e 15 apresentam os gráficos comparativos que ilustram os resultados apresentados na Tabela 3.

**Figura 13 - Gráfico: Taxa de Remoção de Material (TRM)**

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 14 - Gráfico: Taxa de Desgaste (TD)**

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 15 - Gráfico: Desgaste Volumétrico Relativo (DVR)**

Fonte: Elaborada pelo autor.



## 5. CONCLUSÃO

Após a realização dos procedimentos e análise dos resultados, foi possível verificar que houve a nitretação por descargas elétricas das amostras de ferro fundido nodular austemperado por meio de eletroerosão por penetração.

Foi observada a camada nitretada com espessuras de aproximadamente 30  $\mu\text{m}$  e 80  $\mu\text{m}$  nas amostras usinadas com eletrodos de cobre e grafita, respectivamente, via microscopia óptica.

Através das análises dos resultados de difração de raios-x foi verificada presença de nitretos precipitados  $\gamma'$ - $\text{Fe}_4\text{N}$ , o que evidencia a formação da camada nitretada na superfície das amostras.

Os processos de nitretação utilizando solução de ureia como fluido dielétrico apresentou resultados satisfatórios com ambos os eletrodos – de grafita e cobre eletrolítico. Foi observado que as taxas de remoção de material (TRM) e de desgaste (TD) são mais acentuadas quando se utilizou eletrodos de cobre.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- KEOGH, J. K.; HAYRYEN, K. L.; **Designing with Austempered Ductile Iron (ADI)**. AFS Proceedings 2010. American Foundry Society, IL, USA.
- GUESSER, W. L.; KODA, F.; MARTINEZ, J. A. B.; SILVA, C. H.; **Austempered Ductile Iron for Gears**. SAE International. 2012.
- BALZER, M. E.; **Determinação da “Janela de Processo” de Austêmpera de um ADI Sem Adição de Elementos de Liga Através de Ensaios Mecânicos e Metalográficos**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Brasil. 2003.
- MANFRINATO, M. D.; **Influência da Nitretação a Plasma no Comportamento em Fadiga dos Aços Inoxidáveis Austeníticos AISI 403 e 316**. Universidade de São Paulo. São Carlos, SP – Brasil. 2006.
- WOLLMANN, D.; NEVES, J. C. K. **Fadiga de Contato de Ferro Fundido Nodular Nitretado por Plasma**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, PR – Brasil. 2010.
- MICHEL, H.; CZERWIEC, T.; GANTOIS, M.; ABLITZER, D.; RICARD, A. **Progress in the Analysis of the Mechanisms of Ion Nitriding**. Surface and coatings technology, 1995.
- NICOLETTO, G.; TUCCI, A; ESPOSITO, L. **Sliding wear behavior of nitrided and nitrocarburized cast irons**. Wear, v. 197, 1996.
- NOVIKOV, I. **Teoria dos tratamentos térmicos dos metais**. Rio de Janeiro, Ed. UFRJ, 1994.
- B. W. HWANG, C. M. SUH, H. K. JANG. **Effects of surface hardening and residual stress on the fatigue characteristics of nitred steel**. International Journal of Modern Physics B. volume 17, 2003.
- CRUZ, C., MALAQUIAS, E. S., FERNANDES, I. A. **Introdução à usinagem não tradicional**. Uberlândia-MG: DEEME, UFU, 1999.
- FULLER, J. E. **Electrical discharge machining**. Metals handbook, 9ª ed. v. 16, machining, 1989.
- YAN, B. H; TSAI, H. C.; HUANG, F. Y. **The Effect in EDM of a Dielectric of a Urea Solution in Water on Modifying the Surface of Titanium**. International Journal of Machine Tools & Manufacture. N 45. 2005
- CAMARGO, B. C.; COSTA, H. L; RASLAN, A. A. **Endurecimento Superficial de Uma Liga Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V por meio de Usinagem por Descargas Elétricas**. In: COBEF Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 5, 2009, Belo Horizonte, MG.

SANTOS, R. F. **Nitretação por EDM do aço AISI 4140**, 2012. 128f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.

KRYWICKYJ, W. – **Ferro Fundido Nodular** – tese de livre docência 09/74.

HUNNICUTT, H.A. – **Fundição – ABM** – 12a edição, 1981 .

COPAERT, H. – **Metalurgia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**, 3a edição, Cp 5, 1974.

CHIAVERINE, V. – **Aços de Ferros Fundidos**, 7a edição, 1996

SENAI – DEPARTAMENTO REGIONAL DE MG – **Solidificação das Ligas Metálicas** – 2a edição, 1987.

ROTHERY, W. H. – **Estrutura das Ligas de Ferro** – 2a edição – 1978.

SAHIN Y.; DURAK O. **Abrasive wear behaviour of austempered ductile iron**. Materials and Design 28 (2008) pg. 1844 – 1890.

SOUZA, BRUNO. **Desenvolvimento de Ferro Fundido Nodular Austemperado (ADI) em Banho de Zinco-Alumínio Fundido**. Porto Alegre. 2015. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica Do Rio Grande Do Sul.

ASM Handbook (Revised vol. 1) Metals Handbook. ASM International Handbook Committee. v. 1. Properties and Selection; Iron, Steels and High Performance Alloys, 1990

Cast Metals. Austempered Ductile-Iron Cast: Advantages, Production, Properties and Specifications. Materials and Design 13 (5) 285-297 (1992).

DE MELLO, J. D.; BINDER, C.; BINDER, R. KLEIN, A. N. **Effect of Nature of Nitride Phases on Microabrasion of Plasma Nitrided Sintered Iron**. Tribology. V. 4, 2010.

AMORIM, F. L. **Tecnologia de eletroerosão por penetração da liga de alumínio AMP 8000 e da liga de cobre CuBe para ferramentas de moldagem de materiais plásticos**, 2002. 1 v. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

FRANÇA, A. B. C. **Avaliação dos efeitos do revenimento nas propriedades mecânicas e microestruturais do ferro fundido nodular austemperado**. Dissertação. Mestrado em Engenharia de Materiais. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2015.

KORICHI, S.; PRIESTNER, R. **High temperature decomposition of Austempered microstructures in spheroidal graphite cast iron**. Materials Science and Technology, v. 11, p. 901-907, 1995