Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

Luciano Elias

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE NITRETAÇÃO POR DESCARGAS ELÉTRICAS EM FERRO FUNDIDO NODULAR AUSTEMPERADO

Belo Horizonte 2020 Luciano Elias

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE NITRETAÇÃO POR DESCARGAS ELÉTRICAS EM FERRO FUNDIDO NODULAR AUSTEMPERADO

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

Orientador: Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva

Belo Horizonte 2020



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

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO "AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE NITRETAÇÃO POR DESCARGAS ELÉTRICAS EM FERRO FUNDIDO NODULAR AUSTEMPERADO"

Autor: Luciano Elias

Orientador: Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

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

Theman and The

Prof. Dr. Leonardo Neves Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Rogério Gondim Costa Instituto Federal de Minas Gerais - IFMG

Belo Horizonte, 31 de Julho de 2020.

À minha esposa, Michelle Carvalho François Aos meus irmãos, Cristiano e Túlio Ao meu pai, Márcio Jorge Elias E em especial, minha mãe, Sueli dos Reis Brandão Elias (in memoriam), Que mesmo não presente fisicamente, sinto sua proteção todos os dias e sempre estará em meus pensamentos, dedico a você a conclusão deste projeto.

AGRADECIMENTOS

À Michelle Carvalho François, minha amada esposa, por ser compreensiva e companheira, meu "braço forte" e que me ajuda com suas palavras de incentivo e por sempre cuidar dos nossos filhos, o que eu tenho de mais precioso em minha vida.

Aos meus queridos filhos, Miguel Elias François e Mariana Elias François, um presente divino em minha existência, que amo muito e são inspiradores para que eu continue lutando a cada dia, para conseguir oferecer a eles uma base da melhor maneira possível, se tornando pessoas amáveis e profissionais exemplares.

Ao meu pai, Márcio Jorge Elias, pelo incentivo de iniciar minha carreira profissional na indústria e a minha querida mãe, Sueli dos Reis Brandão Elias (in memoriam), que sempre me ligava perguntando sobre as aulas, muito presente, apoiando, motivando, preocupada com cada acontecimento da minha carreira profissional e que mesmo distante fisicamente sei que continua me abençoando e serei eternamente grato por tudo que ela fez e ainda faz por mim.

Ao meu orientador, Professor Dr. Ernane Rodrigues da Silva, os maiores e mais sinceros agradecimentos, que desde que foi meu professor no curso técnico em mecânica no Colégio Técnico de Contagem (UT), despertou em mim uma paixão e interesse em desenvolver cada vez mais habilidades técnicas, levando-me inclusive a ser professor de curso técnico e universitário. Sua confiança e orientação foram capazes de me fazer trilhar por um crescimento profissional que julgava impossível em tão pouco tempo.

Aos meus irmãos Cristiano e Túlio, em especial ao Cristiano, por me incentivar, apoiar e orientar o meu ingresso no programa de mestrado e assim, desenvolver mais uma profissão, a de ser docente, que descobri em sala de aula, a paixão por educar! Muito obrigado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, pois me permitiu usufruir de toda sua excelência de ensino e pesquisa, com especial agradecimento a todo corpo docente.

Acima de tudo, agradeço a Deus!

RESUMO

Os ferros fundidos nodulares austemperados (FFNA) são obtidos após tratamento térmico de austêmpera. Este material destina-se a aplicações envolvendo impacto e desgaste como em suporte de mola de caminhão, componentes de transporte em mineração de carvão ou em aplicações que necessitem de resistência à fadiga e desgaste como no caso de engrenagens. A usinagem por descargas elétricas é um processo que por meio de algumas adaptações na máquina de eletroerosão, altera as propriedades da superfície de materiais metálicos. Com as adaptações realizadas é possível usinar materiais metálicos, imerso em solução aquosa contendo uréia, gerando uma superfície enriquecida com nitretos. Processo este que aumenta a dureza da peça. Neste trabalho estudou-se a viabilidade de nitretar amostras de ferro fundido nodular austemperado (ADI) e verificar a formação da camada nitretada na superfície do material. Os ensaios para avaliação do processo foram: Ensaio de dureza da zona refundida e da camada intermediária, avaliando as propriedades mecânicas; por meio da difração de raios X (DRX), determinar os nitretos formados na camada nitretada; medir a espessura de camada nitretada, a formação da zona refundida e a zona intermediária, utilizando a microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (MEV) e avaliar o desempenho dos materiais cobre e grafita por meio de quantificar o desgaste dos eletrodos ferramenta de cobre e grafita em função do material removido, calculando a taxa de remoção de material (TRM), taxa de desgaste do eletrodo de cobre e grafite ferramenta (TD) e desgaste volumétrico relativo (DVR). Os resultados mostraram formação de camada nitretada na superfície das amostras usinadas com os dois tipos de eletrodos. Observou-se aumento significativo dos valores da dureza da ordem de 100%, aproximadamente, na camada nitretada em relação ao metal base.

Palavras-chave: Nitretação por descargas elétricas, uréia, ferro fundido nodular austemperado, camada nitretada.

ABSTRACT

The ADI austempered nodular cast irons are obtained after thermal treatment of austenem. This material is intended for applications involving impact and wear as in truck spring support, coal mining transport components or in applications that require fatigue and wear resistance as in the case of gears. Electrical discharge machining (EDM) is a process that, through some adaptations in the EDM machine, changes the surface properties of metallic materials. With the adaptations made it is possible to machine metallic materials, immersed in aqueous solution containing urea, generating a surface enriched with nitrites. This process increases the hardness of the part. In this work the feasibility of nitriding samples of austempered nodular cast iron (ADI) and verify the formation of the nitrided layer on the surface of the material was studied. The tests to evaluate the process were: Hardness tests of the recast zone and the intermediate layer, evaluating the mechanical properties; by means of X-ray diffraction (DRX), determine the nitrides formed in the nitrided layer, to measure the nitrided layer thickness, the formation of the recast zone and the intermediate zone using optical microscopy and scanning electron microscopy (MEV), and to evaluate the performance of the copper and graphite materials by quantifying the wear of the copper electrode tool and (TRM), wear rate of copper electrode and graphite tool (TD) and relative volumetric wear (DVR). The results showed nitrided layer formation on the surface of the samples machined with the two types of electrodes. A significant increase in hardness values of the order of about 100% was observed in the nitrided layer relative to the base metal.

Keywords: Nitriding by electric discharges, urea, austempered nodular cast iron, nitrided layer.

LISTA DE FIGURAS

Figura	1 – Micro furos com geometria complexa obtida por micro EDM
	(imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura)
Figura	2 - Representação esquemática do processo EDM
Figura	3 - Fase da ignição em (a) e evolução da corrente e tensão em (b) 25
Figura	4 - Representação da a) formação de elétrons secundários25
Figura	5 – Representação do a) canal de plasma e b) evolução da corrente e
	da tensão26
Figura	6 – Representação esquemática da fusão de material no ânodo e no
	cátodo
Figura	7 – Representação básica de uma superfície usinada por EDM
	demonstrando os principais aspectos e seus fatores de influência 27
Figura	8 – Amostra de Ti-6AI-4V nitretada por EDM
Figura	9 – Exemplo de superfície usinada por EDM 29
Figura	10 – Seção transversal de uma superfície produzida por EDM
Figura	11 - Configurações de limpeza da cavidade na usinagem EDM 30
Figura	12 – Relação da perda de massa da superfície retificada e à superfície
	usinada por EDM33
Figura	13 – Variação da corrente elétrica na formação da (CI) e (ZR)
Figura	14 – Taxa de desgaste do aço AISI 4140 35
Figura	15 – Aspecto físico da ureia 35
Figura	16 – Reação química de síntese da ureia em escala industrial
Figura	17 – Micrografia dos ferros fundidos a) Cinzento b) Branco c) Maleável
	d) Nodular
Figura	18 – Ciclo de tratamento térmico de austêmpera
Figura	19 – Fluxograma das etapas experimentais do desenvolvimento da
	pesquisa
Figura	20 – Foto dos eletrodos peça com a marcação e eletrodo ferramenta
	(cobre)
Figura	21 – Monitoramento da condutividade elétrica da água deionizada (a) 47
Figura	22 – Máquina EDM com seus componentes principais

Figura	23 – Máquina EDM com cuba auxiliar e bomba instalados, porta
	principal aberta
Figura	24 – Fixação dos eletrodos 50
Figura	25 – Imagem do painel de controle do equipamento EDM para ajuste
	dos parâmetros operacionais 51
Figura	26 – Formação das camadas zona refundida e camada intermediária,
	via microscopia óptica, utilizando eletrodo de grafita. Nital 2%.(a)
	aumento de 100x e (b) aumento de 600x57
Figura	27 – Formação das camadas zona refundida e camada intermediária,
	via microscopia óptica, utilizando eletrodo de cobre. Nital 2%. (a)
	aumento de 100x e (b) aumento de 400x58
Figura	28 – Média da camada nitretada das amostras usinadas com
	eletrodo ferramenta de cobre e de grafita 5961
Figura	29 – Difratograma da superfície das amostras de ferro fundido nodular
	nitretadas com eletrodos de grafita e eletrodos de cobre61
Figura	30 – Imagem de topo da microscopia ótica de amostra de ferro fundido
	nodular austemperado usinada pelo processo EDM (a) 100x e (b)
	200x
Figura	31 – Imagem de MEV da superfície usinada descargas elétricas
	no ferro fundido nodular64
Figura	32 – Monitoramento da condutividade elétrica após usinagem 65
Figura	33 – Comparação entre as TRM utilizando eletrodo ferramenta de
	cobre e grafita66
Figura	34 – Comparação entre as TD utilizando eletrodo ferramenta de cobre
	e grafita67
Figura	35 – Comparação entre as DVR utilizando eletrodo ferramenta de
	cobre e grafita
Figura	36 – Desenho esquemático do canal de plasma formado no processo
	de nitretação por descargas elétricas no ferro fundido nodular 68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química da ureia encontrada no Brasil	6
Tabela 2 - Composição química do material - ferro fundido nodular	
austemperado (ADI) 46	6
Tabela 3 - Propriedades físicas dos materiais eletrodos de cobre e grafita4	•7
Tabela 4 - Parâmetros operacionais ajustados na máquina EDM, comuns a	
todos os ensaios52	22
Tabela 5 - Principais parâmetros adotados na DRX53	33
Tabela 6 - Valores médios de dureza e desvios obtidos com NDE6	30

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AISI	 American Iron and Steel Institute – Instituto Americano do Ferro e Aço;
ADI	= Austempered Ductile Iron
CEFET- MG	 Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais;
CI	= Camada intermediária;
DEMAT	= Departamento de Engenharia de Materiais;
DRX	= Difração de raios X;
DVR	= Desgaste volumétrico relativo;
EDM	= Eletrical Discharge Machining - Usinagem por Descargas Elétricas;
FFNA	 Ferro fundido nodular austemperado;
MEV	- Microscopia Eletrônica de Varredura;
NDE	= Nitretação por descargas elétricas;
NNP	<u>-</u> Nitrogenado não proteico;
TD	= Taxa de desgaste;
TDE	= Taxa de desgaste do eletrodo ferramenta;
Ton	= Tempo de onda ligado;
Toff	= Tempo de onda desligado;
TRM	= Taxa de Remoção de Material;
ZR	= Zona refundida;
ZAC	= Zona afetada pelo calor;
٨	= Comprimento de onda;
Isc	= Corrente perdida;
н	= Constante de Planck;
U	= Frequência;
°C	= Graus Celsius;
e⁻	= Elétron;

θ	= Ângulo de contato;
δ	 Peso específico do material do eletrodo;
Δm	- Variação de massa do eletrodo ferramenta;
Mi	= Massa inicial [g];
mf	= Massa final do eletrodo [g];
t	- Tempo de usinagem;
μm	= Micrômetro, 1 milionésimo de metro;

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Justificativa	15
1.2 Objetivo Geral	16
1.2.1 Objetivos Específicos	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Nitretação	18
2.1.1. Nitretação a gás ou Nitretação gasosa	19
2.1.2. lonitretação ou plasmanitretação	20
2.2 Usinagens por descargas elétricas	20
2.2.1 Fundamentos do processo de eletroerosão	22
2.2.2 Fluido dielétrico	29
2.2.3 Parâmetros do processo EDM	31
2.3 Nitretação com descargas Elétricas (NDE)	
2.3.1 Uréia (Fonte de nitrogênio)	35
2.4 Ferro Fundido	
2.4.1 Classificação dos Ferros Fundidos	
2.4.2 Ferro fundido nodulares	
2.4.3 Ferro fundidos Austemperados	
2.5 Metalografia	40
2.6 Microdureza	41
2.7 Difração de raio x	41
2.8 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV	42
2.9 Avaliação do desempenho do processo EDM	42
3. METODOLOGIA	44
3.1 Método experimental e materiais	44
3.1.1 Eletrodo peça	45
3.1.2 Eletrodo ferramenta	46
3.1.3 Fluido dielétrico	47
3.1.4 Equipamento de usinagem de EDM por penetração	48
3.1.5 Adaptações do Equipamento de usinagem de EDM por penetração	48
3.2 Metalografia	52

3.3 Microdureza	.53
3.4 Difração de raio x	.53
3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV	.54
3.6 Avaliação do desempenho do processo EDM	.54
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	.56
4.1 Caracterização das camadas	.56
4.2 Microdureza	.60
4.3 Difração de raio x	.60
4.4. Microscopias Eletrônica de Varredura	.62
4.5 Avaliação do desempenho do processo EDM	.65
5. CONCLUSÃO	.70
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	.71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	.72

1. INTRODUÇÃO

Os ferros fundidos têm diferenças de composições químicas em relação ao aço, origina-se do ferro-gusa e apresenta aplicações específicas na indústria mecânica. O ferro fundido é uma liga ternária com composição em ferro, carbono e silício com teor de 2 a 4,5% de carbono. Existem quatro tipos de ferro fundido e os elementos que entram na composição determina cada tipo, assim como seu resfriamento, ou seja, o tratamento térmico.

O ferro fundido nodular é uma liga composta de, basicamente, carbono e silício, com o carbono (grafite) livre na matriz metálica, porém, em forma esferoidal que passou a ferro fundido nodular ser empregado industrialmente a partir da década de 70, ampliando o campo de aplicação dos ferros fundidos, devido à combinação de propriedades como elevada tenacidade, resistência à tração, ductilidade, resistência ao desgaste e à fadiga, tornando-se um material de engenharia competitivo, combinando propriedades antes encontradas somente nos aços.

Por apresentar boa resistência à tração, o ferro fundido nodular é muito utilizado na indústria automobilística, cujo objetivo é a melhora da produtividade com redução de custo nas operações. Para que a dureza do ferro fundido nodular convencional alcance um nível determinado dentro de um intervalo estreito, são necessários requisitos consideráveis no processo da fundição.

A busca contínua pelas melhorias de propriedades tem levado várias indústrias e centros universitários ao desenvolvimento de várias pesquisas a fim de se manterem competitivas no mercado. A adição de elementos tais como o silício, magnésio, cromo, molibdênio e o cobre, e também a aplicação de tratamentos térmicos adequados tem contribuído muito para a melhoria das propriedades mecânicas destes materiais, como, por exemplo, a rigidez e a ductilidade, tornando o emprego destes materiais viável em certas aplicações que eram até então exclusivas dos aços médio teor de carbono.

O ferro fundido nodular austemperado (ADI), é um material que fica em evidência por se caracterizar com suas propriedades mecânicas, podendo demonstrar uma diminuição da sua vida útil, quando é submetido ao processo de tensão de compressão, e também por falha pela fadiga de contato.

E, portanto, é notório que as modificações superficiais neste material pode provocar o aumento da resistência mecânica.

A usinagem por descargas elétricas, também denominadas EDM (da sigla em inglês *Eletrical Discharge Machining*) é um processo de usinagem não convencional indicado especialmente para materiais em que métodos tradicionais de usinagem têm 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).

A técnica de enriquecimento superficial com nitrogênio no ferro fundido nodular austemperado (ADI) permite a melhoria das características superficiais da liga, aumentando a dureza do material e sua resistência ao desgaste por deslizamento (PIMENTEL, 2017), tornando o uso de fluidos dielétricos contendo nitrogênio uma das aplicações atrativas de EDM.

Estudos recentes de autores apontam para a possibilidade de se enriquecer superfícies metálicas com nitretos por meio da usinagem por descargas elétricas. Utilizando soluções de água deionizada e uréia como fluido dielétrico, no processo foi possível promover a nitretação nas camadas superficiais de ligas de titânio, aço inoxidável de baixa liga e AISI4140. (YAN et al 2005; CAMARGO et al 2006; SANTOS, 2012).

1.1 Justificativa

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 de nitretos, a resistência ao desgaste é significativamente elevada na região das superfícies tratadas (MICHEL et al.,1995).

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 (NICOLETTO et al., 1996).

Atualmente devido às necessidades impostas pelos novos motores de combustão, peças e componentes cada vez mais resistentes ao desgaste em diversas aplicações, vários tipos de materiais estão sendo desenvolvidos para atender a indústria automotiva e indústrias que necessitam de soluções em materiais contra o desgaste. Pode-se mencionar os mercados de mineração, siderurgia, cimento, pedreira, sucro energético dentre outros que possuem componentes que sofrem desgastes severos e que faz necessário um material com melhor desempenho para que a vida útil do equipamento seja prolongada.

O presente trabalho se fundamenta na busca de verificar a aplicação do ferro fundido nodular austemperado ao processo de nitretação por descargas elétricas (NDE) sendo uma proposta para promover melhorias nas propriedades da superfície metálica, e garantir resultados benéficos e impactantes, aplicados a amostras de ferro fundido nodular austemperado.

1.2 Objetivo Geral

Desenvolver um procedimento para promover o processo de nitretação por descargas elétricas (NDE), utilizando materiais cobre e grafita como eletrodo ferramenta nas superfícies de amostras fabricadas em ferro fundido nodular austemperado, em meio a um fluido dielétrico constituído de água deionizada e uréia.

1.2.1 Objetivos Específicos

- a) Nitretar por descargas elétricas amostras de ferro fundido nodular austemperado, utilizando o processo de eletroerosão em uma máquina de EDM por penetração;
- b) Medir a espessura de camada nitretada, a formação da zona refundida e camada intermediária, utilizando a microscopia ótica;
- c) Avaliar as propriedades mecânicas por meio de ensaios de microdureza dureza Vickers (HV) da zona refundida e camada intermediária;

- d) Caracterizar, por meio da difração de raios X (DRX), os nitretos formados na camada nitretada;
- e) Avaliar o desempenho dos eletrodos ferramenta de cobre e grafita em função do material removido, a taxa de remoção de material (TRM), por meio da quantificação da taxa de desgaste (TD), e desgaste volumétrico relativo (DVR);
- f) Avaliar a morfologia da superfície usinada via microscopia eletrônica de varredura (MEV).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo é apresentado por uma revisão sobre os tópicos relacionados aos materiais ferro fundidos, nodular e austemperado, processo de usinagem EDM e os principais processos de nitretação.

2.1 Nitretação

Historicamente, o desenvolvimento do processo de endurecimento superficial pela introdução de nitrogênio por difusão no estado sólido é creditado a *Adolph Machlet* que depositou a primeira patente em 1908, reconhecida em 24 de junho de 1913. Em 1921, *Adolph Fry* depositou efetivamente a primeira patente de um processo de endurecimento superficial denominado de nitretação, na qual descreve o processo de nitretação gasosa como um meio de endurecimento superficial em temperaturas próximas a 580°C, no campo monofásico da ferrita, gerando superfícies nitretadas com as características conhecidas até hoje (CHIAVERINI, 2008).

A nitretação é um tratamento de endurecimento superficial em que se introduz superficialmente no aço, até certa profundidade, nitrogênio, sob a ação de um ambiente nitrogenoso, a uma determinada temperatura. Este processo é realizado com finalidade de aumentar a dureza, redução do coeficiente de atrito e aumento da resistência à fadiga, corrosão e ao desgaste (CHIAVERINI, 2008).

A nitretação é realizada com os seguintes objetivos:

- 1. Obtenção de elevada dureza superficial;
- Aumento da resistência ao desgaste e da resistência à escoriação;
- 3. Aumento da resistência à fadiga;
- 4. Melhorar da resistência à corrosão;
- Melhorar da resistência superficial ao calor, até temperaturas correspondentes as de Nitretação.

Algumas características do processo são:

- Temperatura de tratamento inferior à crítica compreendida na faixa de 500° a 575°C;
- 2. As peças são menos suscetíveis a empenamento ou distorção;
- Não há a necessidade de qualquer tratamento térmico posterior à nitretação, o que também contribui para reduzir ao mínimo as probabilidades de empenamento ou distorção das peças.
- 4. A razão fundamental do aumento da resistência à fadiga dos aços nitretados deve-se ao fato de que o processo introduz tensões residuais de compressão na superfície do material, além da camada nitretada possuir elevada resistência mecânica.

Os processos mais utilizados industrialmente são a nitretação em banhos de sais fundidos, denominado de Nitretação Líquida, e a nitretação com atmosfera gasosa de amônia, denominado de Nitretação Gasosa. A Nitretação sob Plasma é um processo de extremo impacto tecnológico.

2.1.1. Nitretação a gás ou Nitretação gasosa

No processo de Nitretação a gás ou Nitretação gasosa é utilizada amônia que é injetada no forno aquecido a 510°C. Nesta temperatura a amônia se dissocia de acordo com a seguinte reação, equação 1:

$$2NH_3 \Leftrightarrow 2N + 3H_2 \tag{1}$$

Como pode ser observada, esta reação libera nitrogênio atômico que difunde para o aço, os tempos de tratamento variam entre 12 e 120 horas. A camada nitretada dificilmente ultrapassa 0,8mm de espessura.

Alguns inconvenientes da Nitretação gasosa são:

- O crescimento do grão devido ao tempo e a temperatura do processo, sendo necessário descontar esse acréscimo no processo de usinagem anterior a nitretação;
- Aplicada somente em aços-liga, contendo alumínio, cromo, vanádio e molibdênio, porque tais elementos formam nitretos que permanecem estáveis às temperaturas da nitretação;
- A necessidade de um tratamento térmico de têmpera e revenimento das peças a serem nitretadas. A temperatura de revenimento deve ser no mínimo 30°C superior à temperatura utilizada na nitretação para garantir estabilidade estrutural da peça.

2.1.2. lonitretação ou plasmanitretação

O processo de lonitretação ou plasmanitretação utiliza a tecnologia da descarga incandescente que introduz nitrogênio na superfície do aço, o qual consiste na formação de plasma no vácuo. Através do plasma, íons de nitrogênio são acelerados com o objetivo de bombardear a superfície do aço, ocorrendo absorção do nitrogênio e difusão em direção ao núcleo.

A composição e a espessura da camada do processo de lonitretação ou plasmanitretação são bastante controlados.

2.2 Usinagens por descargas elétricas

A erosão de metais por descargas elétricas foi inicialmente observada por Sir Joseph Priestley em 1768. Em 1943, dois russos, B.R. Lazarenko e N. I. Lazarenko, ao investigarem o desgaste de contatos de interruptores, chegaram à conclusão que as descargas por centelhas poderiam ser utilizadas para usinar metais recém-desenvolvidos, os quais ofereciam dificuldades para usinagem pelos métodos convencionais (MCGEOUGH, 1988).

A usinagem por descargas elétricas ou eletroerosão é um processo térmico de fabricação caracterizado pela remoção de material consequente a sucessões de descargas elétricas que ocorrem entre um eletrodo e uma peça, através de um líquido dielétrico conhecido pela sigla *EDM (Eletrical Discharge Machining)*.

A eletroerosão é um processo para fabricação de peças isoladas, no máximo para pequenas séries. Neste processo, a peça é submersa em um líquido, onde não existe força de corte, pois não há contato entre a ferramenta e a peça não formando as tensões comuns dos processos convencionais de usinagem.

O processo de usinagem EDM é amplamente utilizado na fabricação de cavidades para moldes e matrizes, na usinagem de sistemas mecânicos e microeletrônicos, e em aços ferramenta tratados (LEE, HSU e TAI, 2004; CHE HARON et al., 2008; AMORIM, 2002). Sua capacidade de realizar formatos complexos e usinar materiais de alta dureza a torna uma excelente opção para estes campos (LEE e TAI, 2003).

Os processos de eletroerosão podem ser aplicados a situações bem específicas como a fabricação de micro furos (faixa de 100 µm), como mostrado na figura 1 (RAJURKAR e YU, 2000).

As áreas mais clássicas de aplicação de EDM, como a fabricação de moldes e matrizes promovem o desenvolvimento da tecnologia, especialmente sua produtividade, para manter como um processo viável em função da demanda e pequeno ciclo de vida de componentes (HO e NEWMAN, 2003).



Figura 1 – Micro furos com geometria complexa obtida por micro EDM (imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura)

Fonte: RAJURKAR e YU, 2000

Embora em princípio não seja um processo caro, as pequenas taxas de remoção, em comparação com os chamados processos convencionais de usinagem, tornam o custo dos componentes produzidos elevado.

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.

Na usinagem por EDM, 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 problemas de fabricação (FULLER, 1989; AMORIM, 2002).

2.2.1 Fundamentos do processo de eletroerosão

A usinagem por eletroerosão se dá por descargas elétricas altamente controladas pelos geradores das máquinas e ocorrem em pontos previamente determinados, removendo assim micropartículas de metal da ferramenta usinada, transferindo a forma do eletrodo para a peça ou ainda recortando o perfil desejado.

As descargas elétricas de alta frequência provocam fusão e vaporização de materiais eletricamente condutores. Sendo assim, este processo é capaz de produzir furos, ranhuras, rebaixos e outras geometrias complexas que, pelos processos convencionais, seriam difíceis ou impossíveis de serem produzidos.

A eletroerosão tem sua importância também, pela capacidade de realizar usinagem em materiais de alta dureza. Temos como exemplo materiais como os carbonetos metálicos, as superligas e as cerâmicas, que geralmente são materiais muito duros, o que seria uma dificuldade de usiná-los pelos processos tradicionais.

O processo de eletroerosão consiste da aproximação de um eletrodo ferramenta e um eletrodo peça com polaridades diferentes, embora seja possível e menos interessante a utilização de corrente alternada. Entre os dois eletrodos normalmente se usam um fluido dielétrico, que pode ser água deionizada, um óleo mineral ou querosene.

É necessário que o eletrodo se aproxime de forma controlada e lenta da peça, para isso, um mecanismo é necessário. Este mecanismo mantém a distância controlada para a abertura do arco elétrico.

A figura 2 ilustra a representação esquemática do processo de usinagens por descargas elétricas.





Em nível micrométrico, a sequência do processo de usinagem pode ser explicada através de quatro fases (AMORIM, 2002):

- 1. Fase de ignição da faísca;
- 2. Formação do canal de plasma;
- 3. Fusão e evaporação de parcelas do material de peça e eletrodo;
- 4. Ejeção do material fundido;

A energia térmica gera um canal de plasma entre o cátodo e ânodo com temperaturas entre 12.000°C e 20.000°C, iniciando o aquecimento e a fusão na superfície de cada polo (SANTOS, 2012).

Na fase de ignição da faísca, uma tensão elétrica (diferença de potencial) é aplicada entre os eletrodos ferramenta e peça. Um campo elétrico é criado gerando as primeiras descargas elétricas, sendo este caracterizado pelo gradiente de tensão entre outros fatores, como o perfil de rugosidade dos

Fonte: Stevens, 1998

eletrodos, além de detritos na região da fenda de trabalho. Estas primeiras descargas elétricas ocorrem nos pontos mais próximos das superfícies do eletrodo e da peça (picos de rugosidade), provocando assim um aumento da distância entre ambos, devido à remoção de material. Esta distância é compensada pelo deslocamento de aproximação do eletrodo ferramenta, através do sistema servomecanismo da máquina EDM. (McGEOUGH, 1988; KÖNIG; KLOCKE, 1996; STEVENS, 1998).

Segundo Camargo et al. (2006) é necessário que haja uma pequena distância, denominada fenda de trabalho ou *gap* (do inglês *gap* = folga), de aproximadamente 0,05 a 1,0 mm entre o eletrodo ferramenta e a peça para que não ocorra curto-circuito entre as partes, implicando em não liberação das descargas elétricas. O *gap* depende da intensidade da corrente aplicada.

As descargas elétricas precisam ser pulsadas, pois se fossem contínuas gerariam altas temperaturas na superfície da peça fundindo a mesma, uma vez que as faíscas geradas no processo podem gerar altas temperaturas.

Um dos eletrodos é a ferramenta que geralmente fica conectado ao polo positivo, ou seja, o ânodo. O outro eletrodo é a peça que será usinada, a qual costuma ser conectada ao polo negativo, sendo esse, portanto, o cátodo. Porém, esta condição pode ser invertida dependendo do material a ser usinado.

A figura 3 ilustra a fase de ignição, onde os elétrons primários sendo emitidos pelo cátodo e iniciando o movimento em direção ao ânodo (a), e a variação de tensão e corrente durante esta fase (b). Em seu caminho através do fluido dielétrico, os elétrons primários chocam-se com moléculas do dielétrico, como consequência, os átomos do dielétrico separam-se em íons positivos e negativos ou elétrons secundários. A figura 4 ilustra a formação de elétrons e evolução da corrente e tensão (STEVENS, 1998).



Figura 3 – Fase da ignição em (a) e evolução da corrente e tensão em (b)



Figura 4 – Representação da a) formação de elétrons secundários e b) evolução da corrente e da tensão.





Existe ainda a Formação do canal de plasma, que de acordo com Amorim (2002) e Santos (2013) íons positivos originados do dielétrico chocam-se contra o cátodo e assim liberando elétrons que são atraídos para o ânodo. Esse fenômeno vai se multiplicando em altíssima velocidade dando origem a ionização por impacto, gerando assim um superaquecimento e evaporação de uma pequena quantidade do dielétrico, figura 5. Essa formação do canal de plasma também é conhecida como colapso da tensão em aberto, porque a tensão decai rapidamente para a tensão de ruptura do dielétrico, a qual depende dos materiais utilizados como eletrodo ferramenta e eletrodo peça (AMORIM, 2002; SANTOS, 2013).







A fusão e evaporação de pequena quantidade do material acontecem durante a descarga, para evitar a formação de arcos e curtos circuitos, o servomecanismo da máquina EDM controla e mantém equilibrada a amplitude da fenda de trabalho, a qual depende do nível da energia da corrente de descarga. Ao longo do tempo o plasma funde por condução térmica certa quantidade de material de ambos os eletrodos, como ilustra a figura 6 (AMORIM, 2002). A quantidade de material que é fundido depende entre outros fatores como do número de elétrons ou íons que colidem contra a superfície. O número de elétrons e íons gerados pela descarga elétrica depende da corrente e do tempo de duração da descarga (STEVENS, 1998).



Figura 6 – Representação esquemática da fusão de material no ânodo e no cátodo

Fonte: McGEOUGH, 1988.

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

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

Ao usinar qualquer componente através do processo de EDM deve-se observar dois aspectos importantes. O primeiro está relacionado com as irregularidades geométricas da superfície, e o segundo, com as alterações metalúrgicas da superfície e da camada sub-superficial, figura 7. Na usinagem de alguns produtos ou ferramentais, esses dois aspectos, relacionados à integridade superficial, devem ser definidos, medidos e mantidos dentro de limites especificados, a fim de garantir a durabilidade e qualidade desses produtos e ferramentais (LIMA e CORRÊA, 2006).





Fonte: Lima e Corrêa (p. 26-33, 2006.)

Ainda de acordo com Camargo (2006) no processo EDM ocorre a formação da camada branca, ou zona refundida (ZR), devido ao resfriamento do material fundido que se deposita na superfície da cratera após uma descarga. Também abaixo dela tem-se a camada intermediária (CI) que é parcialmente afetada pelas altas temperaturas do processo.

A técnica de enriquecer superfícies com nitretos por meio do processo EDM também foi estudada por Camargo, Costa e Raslan (2015). Os testes consistiram em usar como fluido dielétrico solução de ureia em água deionizada, concentração de 10 g.L⁻¹, sendo o eletrodo-peça amostras de liga de titânio (Ti-6AI-4V).

A camada enriquecida com nitretos é a responsável pelo aumento da dureza e, eventualmente, aumento da resistência ao desgaste do material. Os resultados mostraram a formação de uma camada enriquecida com nitretos, permitindo um ganho de 60% na dureza em relação ao substrato, mostrado na figura 8, com as respectivas impressões de microdureza nas três diferentes regiões: camada refundida, camada com nitretos e substrato (intermediária).



Figura 8 – Amostra de Ti-6Al-4V nitretada por EDM.

Fonte: Camargo, Costa e Raslan (2015).

Em cada descarga elétrica promovida pelo processo de EDM remove-se material fundido e evaporado. São formadas pequenas crateras de tamanhos diferentes nos eletrodos peça e ferramenta, como mostra a figura 9. A formação dessas crateras depende da energia da descarga elétrica. A presença delas produz um acabamento superficial de baixa qualidade. Isso ocorre, principalmente, quando se usam altas energias de descarga que, em contrapartida, fornecem altas TRMs (FULLER, 1989). Segundo McGeough (1988), o fluido dielétrico usado pode ter influência na formação das crateras.



Figura 9 - Exemplo de superfície usinada por EDM

Fonte: STEVENS, 1998.

Como a superfície da peça é aquecida pela descarga elétrica e resfriada rapidamente pela ação do fluido dielétrico, uma camada refundida forma-se nesta região. Isso induz o surgimento de tensões térmicas. Essas, por sua vez, provocam o aparecimento de poros e micro-trincas, como ilustra a figura 10. As micro-trincas reduzem a resistência do material à fadiga. Com isso, a remoção da camada refundida é imprescindível para a integridade da peça usinada (FULLER, 1989).

Figura 10 – Seção transversal de uma superfície produzida por EDM



Fonte: Adaptado de FULLER, 1989

2.2.2 Fluido dielétrico

O fluido dielétrico é muito importante para o bom desempenho do processo EDM, pois atua diretamente em vários aspectos da usinagem. Pode ser querosene (muito utilizado no passado) ou hidrocarboneto aditivado – ambos derivados do petróleo – água deionizadas e até mesmo certas soluções aquosas. Conforme Fuller (1989) o fluido dielétrico tem papel fundamental no processo controlando a potência de abertura da descarga elétrica.

O fluido dielétrico além de promover a limpeza da interface ferramenta peça arrastando para fora as partículas fundidas, auxilia no arrefecimento do sistema.

A limpeza adequada da região usinada com o arrastamento das partículas solidificadas é muito importante para o desempenho do processo, sendo grande responsável pela presença da camada refundida mais ou menos profunda.

A capacidade de arrefecimento influencia também no desempenho do processo, pois o resfriamento relativamente rápido das partículas fundidas, evita o aumento de material que volta a se solidificar e se integra ao material constitutivo da camada refundida, o que é prejudicial à integridade superficial da peça (ARANTES, 2007).

No processo EDM existem configurações de algumas formas de posicionamento do fluido dielétrico para limpeza da cavidade, esse fluxo do dielétrico pode ser no eletrodo ou na peça, dependendo do tipo de cavidade, figura 11.



Figura 11 – Configurações de limpeza da cavidade na usinagem EDM

Fonte: ARANTES, 2007

2.2.3 Parâmetros do processo EDM

A escolha dos parâmetros EDM é importante para determinar a tolerância dimensional e o acabamento da superfície usinada, bem como minimizar o desgaste da ferramenta. Os parâmetros de funcionamento como polaridade, material do eletrodo ferramenta, tensão e corrente elétrica, duração do pulso, tempo entre pulsos e regimes de trabalho são selecionados para aplicações específicas (BENEDICT, 1987).

No processo de usinagem EDM por penetração a polaridade geralmente é positiva no eletrodo ferramenta e negativa na peça, sendo os íons positivos os principais responsáveis pela usinagem da peça, diminuindo assim, o desgaste no eletrodo ferramenta e potencializando a remoção de material na peça (MCGEOUGH, 1988).

Durante a execução do processo, existem diversos parâmetros de entrada que influenciam o resultado do trabalho como:

- 1. Material da peça;
- 2. Material do eletrodo;
- 3. Área usinada;
- 4. Profundidade da usinagem (para eletroerosão de penetração);
- 5. Corrente nominal utilizada;
- 6. Tempo de onda ligado (Ton);
- 7. Tempo de onda desligado (Toff);
- 8. Frequência;
- Condição de limpeza (pressão e vazão de fluido, número e geometria da aplicação e da cavidade);
- Sistema de usinagem (com ou sem retração do eletrodo), ou no caso de eletroerosão a fio ou retificação eletroerosiva, a velocidade do fio ou rebolo;

Benedict (1987) afirmou que a duração desses períodos é da ordem de µs. No tempo ton (tempo de onda ativo), a tensão entre peça e ferramenta forma o canal de plasma. No instante em que a tensão cai, automaticamente pelo sistema de funcionamento da máquina, o canal de plasma desfaz-se e, neste instante, a corrente passa através do fluido dielétrico entre a peça e o eletrodo ferramenta e os elétrons e íons se chocam contra as superfícies. Logo, em seguida, começa o tempo toff (tempo de onda desligado ou desativo), durante o qual as micropartículas do material que foram arrancadas pela descarga elétrica são arrastadas pelo fluido dielétrico para fora da fenda de trabalho (BENEDICT, 1987).

2.3 Nitretação com descargas Elétricas (NDE)

O processo NDE (Nitretação com Descargas Elétricas) consiste em introduzir nitrogênio em superfícies metálicas, com a consequente formação de nitretos, provocando o endurecimento destas superfícies e possibilitando a utilização nas situações em que se requer o emprego de materiais nitretados como, por exemplo, resistência ao desgaste, resistência à fadiga, resistência à corrosão, etc. Para viabilizar o processo, usa-se água deionizada como fluido dielétrico na máquina de usinagem por EDM. Nesta água é diluída, como fonte de nitrogênio, ureia.

As energias geradas durante a EDM (Usinagens por Descargas Elétricas) podem ser aproveitadas para enriquecer superfícies metálicas (RASLAN, 2015). De acordo com Yan et al. (2005) investigaram o uso de EDM com solução de uréia para examinar as modificações ocorridas durante usinagem de peças metálicas de titânio puro. Na sua pesquisa o objetivo era decompor o nitrogênio na solução de ureia fosse transferido para os corpos de prova. As análises efetuadas por esse grupo de pesquisadores evidenciaram a formação de nitreto de titânio, com modificações superficiais nos corpos de prova, refletidas, principalmente, na melhoria das características de desgaste por deslizamento e atrito, sendo os resultados obtidos e condições do ensaio mostrado na figura 12.



Figura 12 – Relação da perda de massa da superfície retificada e à superfície usinada por EDM

Fonte: YAN, TSAI e HUANG, 2005

Nota-se que a resistência ao desgaste obtido na superfície nitretada por EDM é superior à da superfície apenas retificada (substrato). Isso se deve ao fato da camada de TiN formada.

Raslan, Santos e Silva (2012) concluíram que o método proposto para a nitretação por eletroerosão se baseia na inserção do nitrogênio na superfície do aço por implantação iônica, o qual justifica o fenômeno do enriquecimento superficial.

Camargo et al. (2006) realizaram a nitretação de liga de titânio, Ti6Al4V, utilizando o processo EDM com solução de ureia como fluido dielétrico e os resultados obtidos mostraram a formação de uma camada nitretada, que permitiu aumento de cerca de 60% na dureza em relação à matriz. Santos (2013) identificou modificações estruturais ocorridas em aço AISI 4140, como aumento de dureza superficial e formação de nitretos de ferro, após submeter amostras ao processo de nitretação por EDM, utilizando solução aquosa de ureia como fluido dielétrico. Nesse trabalho, Santos apresenta um modelo para o processo NDE, caracterizando a inserção do nitrogênio por implantação iônica e não por difusão.

O fenômeno denominado ionização por impacto causa ruptura do dielétrico gerando NH₃ gasosa que, por sua vez, se decompõe em N₂ e H₂, conforme as equações:

$$(NH_2)_2 CO + 2 H_2O \rightarrow NH_4OH + NH_3 + CO_2$$
(2)
$$2 NH_3 \rightarrow N_2 + 3 H_2$$
(3)

O N₂ e H₂ irão se difundir no canal de plasma na forma de íons, como N₂⁺, N⁺ e H₂⁺. Por serem positivos, eles serão impulsionados para a superfície do eletrodo peça (cátodo) e, pela alta energia cinética que adquirem, implantam-se no interior da mesma. Íons oriundos do eletrodo ferramenta (ânodo), cobre e carbono, também podem ser formados (SANTOS, 2013).

Santos (2015) avaliou a influência da corrente elétrica no processo de NDE do aço AISI H13, utilizando soluções aquosas de ureia 10g.L⁻¹, e percebeu que a corrente não influencia significativamente a espessura da ZR quando se utiliza corrente de 10, 20 ou 30A. A formação da camada intermediária foi influenciada pela corrente, sendo obtida maior espessura para esta camada, quando se utilizou corrente de 40A, conforme mostra a figura 13.



Figura 13 – Variação da corrente elétrica na formação da (CI) e (ZR)

Fonte: Adaptado de SANTOS, 2012

RASLAN (2015) avaliou o desgaste sofrido pelo aço AISI 4140, nitretado e temperado, tendo observado que as taxas de desgaste ficaram cerca de 3 vezes menor para os aços tratados se comparadas ao aço não tratado, conforme (figura 14). Também, foi observado que o desgaste do aço nitretado apresentou
taxa de desgaste 18% menor que o aço temperado, permitindo concluir que esse desempenho estaria associado à formação de nitretos de ferro.



Figura 14 – Taxa de desgaste do aço AISI 4140

2.3.1 Uréia (Fonte de nitrogênio).

A uréia é um composto orgânico cristalino, de cor branca, sabor amargo, solúvel em água e álcool, figura 15. É um composto quaternário, constituído por nitrogênio, oxigênio, carbono e hidrogênio. Quimicamente é classificada como amida e, por isso, considerada um composto nitrogenado não proteico (NNP), cuja fórmula química é CO(NH₂)₂.





Fonte: Página do Minas Gramados

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

Tabela 1 - Composição química da uréia

A tabela 1 apresenta a composição química da uréia.

Fonte: Adaptado de GUIMARÃES JR, 2016

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

Em escala industrial, a uréia é formada pela decomposição inicial do gás metano (CH4) em altas temperaturas. Esse processo disponibiliza o hidrogênio que, em reação com o nitrogênio do ar, forma a amônia (NH3). Em sequência, ocorre a síntese da amônia com o gás carbônico, em um reator, sob condições de elevada temperatura e pressão. A amônia em presença de CO2 do ar origina o carbonato de amônio, e esse produto, sob determinada pressão e temperatura, é decomposto em uréia e água, figura 16.



Fonte: GUIMARÃES JR, 2016

No processo de usinagem por EDM, utilizando uma solução aquosa de uréia como fluido dielétrico, as energias geradas durante este processo podem ser aproveitadas para enriquecer superfícies metálicas (Raslan 2015). Muitos estudos têm sido conduzidos com o uso de diferentes fluidos dielétricos visando possibilitar o enriquecimento superficial de ligas com nitrogênio, carbono, boro entre outros elementos.

2.4 Ferro Fundido

O ferro fundido pode ser definido como uma liga ferro-carbono-silício, com a concentração de carbono acima de 2% aproximadamente. Todavia, deve estar numa quantidade maior do que pode ser retida em solução sólida da austenita. Com isso, formará carbono parcialmente livre, com morfologia em veios ou lamelas de grafita (CHIAVERINI, 2012).

Os elementos que mais influenciam na estrutura são o carbono e o silício. O carbono, determina a quantidade de grafita que se pode formar e o silício é essencialmente elemento grafitizante, favorecendo a decomposição de carboneto em ferro; sua presença independentemente do teor de carbono, pode fazer um ferro fundido tender para o cinzento ou para o branco. Já o manganês, possui efeito oposto do silício, isto é, estabiliza a cementita e compensando de certo modo, a ação grafitizante do silício. Além disso, o manganês é adicionado como dessulfurante e atua como estabilizador da perlita, daí seu efeito oposto ao do silício (CHIAVERINI, 2012).

Os outros elementos, impurezas normais, fósforo e enxofre, não tem uma ação muito significativa sob o ponto de vista de tendência grafitizante. Apenas o fósforo é um estabilizador relativamente forte de carboneto de ferro (CHIAVERINI, 2012).

2.4.1 Classificação dos Ferros Fundidos

O ferro fundido é classificado em diferentes tipos de acordo com a forma da grafita e com diferenciação adicional devido à estrutura da matriz metálica que pode ser ferrítica, perlítica, ferrítica-perlítica, austenítica, martensítica (Rebouças et al., 2016). Cada matriz irá originar diferentes propriedades e classes de materiais distintas (CALLISTER, 2007).

Segundo Guesser (2009), os ferros fundidos são classificados em 4 classes e são eles: Ferro fundido branco, ferro fundido cinzento, ferro fundido maleável e ferro fundido nodular. Observa-se na figura 17, a macrografia dos 4 principais tipos de ferro fundido.

Figura 17 – Micrografia dos ferros fundidos a) Cinzento b) Branco c) Maleável d) Nodular



Fonte: Adaptada de REBOUÇAS, 2016

2.4.2 Ferro fundido nodulares

Os ferros fundidos nodulares são caracterizados pela dureza relativamente elevada com ductilidade moderada, alta resistência, além de boa usinabilidade. As melhores ductilidade e tenacidade desses materiais estão associadas à grafita na forma esferoidal que não interrompe a continuidade da matriz.

Os ferros fundidos nodulares têm estrutura com partículas arredondadas de grafita, acontece devido a adição de magnésio na massa metálica quando ainda se encontra líquida. Quando o tratamento térmico é feito adequadamente apresenta boa ductilidade, tenacidade, usinabilidade e resistência à corrosão.

A principal característica do ferro fundido nodular está relacionada especificamente ao limite de escoamento, que é maior comparado com o ferro fundido cinzento e mesmo aos aços-carbono comuns (CHIAVERINI, 2012).

Devido a vantagens, dos ferros fundidos nodulares, de boa fundibilidade, capacidade de amortecimento e propriedades mecânicas (ductilidade,

tenacidade e resistência) e usinabilidade apropriada, têm sido utilizados em muitas aplicações estruturais. Cames, virabrequins, carcaça de bombas, válvulas e articulações de direção são exemplos importantes da utilização de ferro dúctil no mercado automobilístico.

2.4.3 Ferro fundidos Austemperados

O ferro fundido nodular austemperado (FFNA) ou na Língua inglesa conhecido pela sigla ADI, denominado *Austempered Ductile Iron*, teve seus primeiros experimentos publicados nos anos 60 pela International Harvester, no entanto, resultados de pesquisas adicionais só surgiram dez anos depois; com isso fundições norte-americanas, finlandesas e chinesas iniciaram produções em série de peças manufaturadas em ferro fundido nodular austemperado, em especial engrenagens anteriormente fabricadas em ferros fundidos temperados e revenidos.

A partir dos Simpósios Internacionais ocorridos em 1984 e 1986, houve um aumento significativo na produção mundial do ferro fundido nodular austemperado (DO CARMO; DIAS, 2004).

O ferro fundido nodular austemperado é obtido a partir do ferro fundido nodular através de tratamento térmico de austêmpera como apresentado na figura 18. Esse tratamento térmico consiste de três etapas mostradas a seguir:



Figura 18 – Ciclo de tratamento térmico de austêmpera

Fonte: Sorelmetal, 1990

Primeira etapa: o material é aquecido até uma temperatura na faixa de 840 a 950°C, na qual o mesmo deve ser mantido por tempo suficiente para produzir uma matriz totalmente austenítica e homogênea, saturada em carbono.

Os nódulos de grafita representam um estoque de carbono e promovem a saturação de carbono através de um processo de difusão.

Segunda etapa: Após a austenitização, resfria-se rapidamente a peça inteira até a temperatura de austêmpera na faixa de 230 a 400°C, ou seja, abaixo da temperatura de transformação da perlita e acima da temperatura de transformação da martensita.

Terceira etapa: Manter isotermicamente na temperatura de transformação, para que seja produzida a quantidade de ausferrita (austenita de alto carbono e ferrita bainítica) desejada, ficando a austenita com um teor de carbono na faixa de 1,8 a 2,2%. Em seguida, resfriar a peça lentamente, ao ar, para evitar tensões internas (LUROSSI, 2003).

O ADI destina-se a aplicações envolvendo impacto e desgaste como em suporte de mola de caminhão, componentes de transporte em mineração de carvão; ou em aplicações que necessitem de resistência à fadiga e desgaste como no caso de engrenagens (GUESSER; GUEDES, 1993).

Ainda em aplicações no mercado ferroviário relaciona rodas para locomotivas e vagões, e acoplamentos de sapatas de freio; no mercado de agricultura, em equipamentos de terraplenagem e ferramentas para movimentação de terra como pontas de escavadeira e rodas dentadas; na indústria automotiva, peças na região do chassi e do sistema de suspensão e componentes de motores, tais como virabrequins, válvulas e bielas.

2.5 Metalografia

A definição de metalografia provoca controvérsia em relação a sua definição. Porém, utiliza-se do conceito de que é um estudo de características estruturais ou da constituição dos metais ou construção dos metais e suas ligas.

Logo, são relacionados com propriedades físicas, químicas e mecânicas. As relações estruturais destas propriedades podem ser observadas a olho nu, lupa ou microscópio, em que há procedimentos como exame metalográfico (FERNANDES, 2011).

Este exame é realizado a partir de uma análise, em que o foco da amostra é cortado, polido, lixado e atacado com reagentes químicos, de maneira que seja possível desvelar as interfaces entre os diversos constituintes que forme o metal. (FERNANDES, 2011).

2.6 Microdureza

A microdureza pode ser entendida como um método de dureza, em que consiste na ampla aplicação em pesquisas científica, e no campo industrial. O qual se torna proveitoso para medir a dureza dos materiais utilizados no trabalho industrial (CALLISTER, 2008).

O ensaio de dureza pode ser dividido em três tipos: por penetração, por choque e por risco. Os ensaios de dureza do tipo penetração, cujos métodos mais conhecidos e utilizados nos dias atuais são: Brinell (metais), Rockwell (metais), Vickers (metais e cerâmicas) e Knoop (polímeros). Estes se diferenciam pelas seguintes avaliações: material do indentador, a sua geometria e carga aplicada. A seleção do teste a utilizar dependera do material a ser avaliado (ANUSAVICE et al., 2013).

2.7 Difração de raio x

Alguns estudos têm demonstrado que conteúdos de carbonato estrutural e cristalinidade quando em processo de precipitação em baixa temperatura, possuem altos teores de carbonato e baixa cristalinidade. Ou seja, sofrendo influência estrutural nas propriedades físicas, químicas e mecânicas (FONSECA e LOPES, 2013).

O processo de difração de raios-X é uma metodologia, ou melhor, uma técnica relevante na caracterização de materiais em especial, os cristalinos. O emprego desta técnica tem utilidade sobre modelo funcional adequado para

descrever os alargamentos das linhas de difração. Sendo assim, tornando possível obter informações estruturais e microestruturais, como parâmetros de rede, coordenadas atômicas, densidade ocupacional, entre outros (AZEVEDO, 2010).

2.8 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), admite analisar e caracterizar diversos tipos de materiais, observando a superfície do tecido, de maneira que o feixe de elétrons não atravessa a amostra. Sobre a superfície da amostra é direcionado um feixe eletrônico estreito, fazendo o efeito de "varredura" de um lado para o outro, sendo possível caracterizá-lo do ponto de vista de sua morfologia e sua organização estrutural (CALLISTER, 2012).

Os elétrons secundários são emitidos quando o feixe atinge a superfície da amostra. Estes elétrons são captados por detectores, estabelece sinais elétricos, que é como uma projeção de uma tela de televisão (MONTEIRO e BUSO, 2013).

Este processo de varredura desloca-se em sintonia com o feixe que produz a imagem no monitor, atingindo a superfície. Podendo, desta maneira, refletir uma imagem tridimensional da superfície da amostra, gerando uma construção no vídeo (MONTEIRO e BUSO, 2013).

2.9 Avaliação do desempenho do processo EDM

A usinagem de materiais de elevado dureza depende e faz uso recorrente e comum do processo de Usinagem por Descargas Elétricas. Pois este processo é mais complexos e difícil de serem usinados diante os processos convencionais, outra vantagem é o fato de permitir a confecção de geometrias mais complexas e com as dimensões bem menores. A avaliação do desempenho deste processo EDM, cabe o estudo das superfícies usinadas com diferentes tipos de fluidos dielétricos (CAMARGO et al, 2009).

Há diversos fluidos dielétricos utilizados que propiciam distintas condições de usinagem. E para saber sobre qual o fluido mais indicado nas operações, são

realizadas amostras de ensaios, diferentes fluidos, ferramentas apropriadas, e análises, ou seja, através da avaliação do desempenho do processo EDM (CAMARGO et al, 2009).

3. METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida nos laboratórios do departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT) do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG). O trabalho foi dividido em cinco etapas: adaptação da máquina de EDM, preparação dos materiais, definição dos parâmetros, ensaios e análise dos resultados.

3.1 Método experimental e materiais

As amostras foram submetidas à nitretação por descargas elétricas, utilizando solução aquosa de ureia como fluido dielétrico.

Primeiramente foi realizada uma adaptação na máquina de EDM, separação e preparação dos materiais (eletrodos peça e eletrodos ferramenta), definição dos parâmetros operacionais, usinagem dos materiais, metalografia para medir a espessura da zona refundida e camada intermediária, ensaios de dureza verificando as propriedades mecânicas da zona refundida e camada intermediária, observação dos nitretos através da difração de raio x, desempenho de usinagem, cálculos da taxa de remoção de material (TRM) e desgaste dos eletrodos ferramenta de cobre e grafita em função do material removido e concluindo com a análise dos resultados. A figura 19 ilustra o fluxograma que sintetiza a sequência do trabalho.



Figura 19 – Fluxograma das etapas experimentais do desenvolvimento da pesquisa

Fonte: Autor, 2019

3.1.1 Eletrodo peça

Os eletrodos peças foram confeccionados usando como material o ferro fundido nodular austemperado. O material foi cortado com o auxílio de uma serra de fita, obtendo assim barras retangulares que foram usinadas em torno horizontal convencional, com diâmetro externo de ϕ 20 mm por 15 mm de comprimento.

A tabela 2 mostra a composição química do material usado como eletrodo peça.

%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Cu	%Mg	%Fe
3,57	2,57	0,31	0,01	0,08	0,03	0,04	Balanço

Tabela 2 - Composição química do material - ferro fundido nodular austemperado (ADI)

Fonte: FRANÇA, et al., 2015

As amostras foram identificados com numeração de 1 até 12, para seguir com os pares de cada eletrodo ferramenta, sendo 6 eletrodos de cobre eletrolítico e 6 eletrodos de grafita, como mostrado na figura 20.

Figura 20 – Foto dos eletrodos peça com a marcação e eletrodo ferramenta (cobre)



Fonte: Autor, 2019

3.1.2 Eletrodo ferramenta

Os eletrodos ferramenta foram usinados em torno convencional, realizando a usinagem de ambas as faces em cada eletrodo ferramenta ficando com medidas de diâmetro externo de ¢22 mm por 30 mm de comprimento. Foram confeccionados 6 eletrodos de cobre eletrolítico e 6 eletrodos de grafita a serem utilizados nos processos de usinagem e nitretação por EDM das amostras de eletrodo peça. A Tabela 3 refere-se às propriedades físicas dos materiais dos eletrodos de cobre eletrolítico e grafita utilizados na pesquisa.

Propriedades Físicas	Cobre	Grafita
Resistividade Elétrica (μΩ/cm)	1,96	0,12
Condutividade Elétrica Comparado com Prata (%)	92	0,11
Condutividade Térmica (W/mK)	380,7	160
Ponto de Sublimação e Fusão (°C)	1083	3500
Calor Específico (cal/gºC)	0,092	0,17 – 0,2
Peso Específico a 20°C (g/cm ³)	8,9	1,75
Coeficiente de Expansão Térmica (x10 ⁻⁶⁰ C ⁻¹)	6,6	7,8

Tabela 3. Propriedades físicas dos materiais dos eletrodos de cobre e grafita.

Fonte: CHE HARON, et al., 2008.

3.1.3 Fluido dielétrico

O fluido dielétrico foi preparado usando água potável que foi direcionada para um deionizador a base de resina, em que foram preparados 30 litros de solução aquosa, com ureia farmacológica na concentração de 33,33 g.L⁻¹

A condutividade elétrica da água após passar pelo aparelho mediu 0µS/cm, antes a condutividade da água potável era de 160µS/cm. Com a adição da ureia e adequada homogeneização, a solução final adquiriu aproximadamente valores de condutividade média na ordem de 22µS/cm.

O monitoramento da rigidez dielétrica foi acompanhado por meio de condutivímetro portátil marca PHTEK mod. CD-203 com faixa de operação de 0 a 1999 μ S/cm e incerteza de ±2%. O aparelho é mostrado na figura 21.

Figura 21 – Monitoramento da condutividade elétrica da água deionizada em (a) e a água após adicionar a solução de ureia com concentração de 33,3g.L⁻¹ em (b).



(a)



Fonte: Autor, 2019

3.1.4 Equipamento de usinagem de EDM por penetração

O equipamento EDM utilizado foi o modelo Eletroplus 540 da Servspark por penetração com potência máxima de 40A, instalada no Laboratório de Ajustagem do DEMAT.

A figura 22 apresenta o esquema do equipamento com os principais componentes antes da adaptação da cuba auxiliar.



Figura 22 – Máquina EDM com seus componentes principais

Fonte: Autor, 2019

3.1.5 Adaptações do Equipamento de usinagem de EDM por penetração

O trabalho de pesquisa foi realizado em uma máquina de usinagem por eletroerosão convencional, por penetração, adaptada para viabilizar a aplicação do processo de nitretação por descargas elétricas, as adaptações, conforme ilustra a figura 23: uma cuba auxiliar, fabricada em aço inoxidável austenítico, foi instalada no interior da cuba principal da máquina. Esta foi utilizada para que não

ocorresse contaminação do fluído dielétrico da própria máquina durante os testes com fluidos dielétricos aquosos. Uma bomba centrífuga de 120W de potência e vazão de 50L/min, instalada na cuba auxiliar, é acionada para circular o fluido dielétrico e realizar a limpeza da fenda de trabalho.

Pode-se observar na figura 23 a cuba auxiliar posicionada no interior do tanque de trabalho do equipamento EDM.

Figura 23 – Máquina EDM com cuba auxiliar e bomba instaladas, porta principal aberta



Fonte: Autor, 2019

Foram confeccionados suportes para eletrodo ferramenta e eletrodo peça, para realização da usinagem pelo processo de EDM por penetração. Os parafusos prendem os eletrodos, permitindo a troca deles de forma prática. A figura 24 ilustra o sistema de fixação.

O fluido dielétrico armazenado no reservatório do equipamento circulou normalmente durante a usinagem, porém, sem contato com o interior da cuba auxiliar em aço inox.

A máquina de eletroerosão não sofre qualquer tipo de alteração na sua configuração original, devido ao uso da cuba auxiliar adaptada à máquina,

durante a aplicação do processo de nitretação por descargas elétricas (SANTOS, et al., 2016).



Figura 24 - Fixação dos eletrodos

Foram ajustados vários parâmetros operacionais que são controlados manualmente. A figura 25 ilustra o painel de controle da máquina EDM-540 com indicação dos parâmetros utilizados.

Cada teste durou 10 minutos. Cada série de testes foi realizada cinco vezes.

Fonte: Autor, 2019



Figura 25 – Imagem do painel de controle do equipamento EDM para ajuste dos parâmetros operacionais.

Fonte: Autor, 2019

A Tabela 4 relaciona os parâmetros operacionais, ajustados na máquina de eletroerosão por penetração que, possibilitaram a aplicação do processo de nitretração por descargas elétricas, com base em trabalhos realizados por outros pesquisadores (ELIAS, et al. 2020).

Parâmetro	Especificação
Polaridade do eletrodo ferramenta	Positiva
Tensão nominal	50 V
Corrente	40 A
Tempo de pulso (T <i>on</i>)	100 µs
Tempo de pausa (T <i>off</i>)	1,5*
Fenda de trabalho (<i>gap</i>)	1,5*
Afastamento periódico da ferramenta	5,0*
Velocidade do servo	5,0*
Tempo de erosão	6,0*

Tabela 4 - Parâmetros operacionais ajustados na máquina EDM

*Parâmetros ajustados diretamente no painel de controle do EDM.

Fonte: Autor, 2019

3.2 Metalografia

As amostras foram cortadas transversalmente e embutidas com resina epóxi termo endurecível, que apresenta baixa contração e boa aderência. Em seguida ao embutimento, as amostras foram lixadas manualmente utilizando lixas 180, 220, 360, 400, 500, 600, 1200, 1500 e 2000 mesh. Foi efetuado polimento com pasta diamante 3µm e pano metalográfico utilizando politrizes manuais até que a superfície apresentasse aspecto de espelhada. Em seguida foi efetuado o ataque químico com Nital 2%.

O principal objetivo do procedimento realizado foi obter à formação das micrografias, avaliadas em microscópio óptico Fortel com sistema de aquisição de imagens Kontrol modelo M713, que permitiram as medições das espessuras da camada refundida e camada intermediária, utilizando o programa Image J. Foram realizadas sete medições, descartando-se a medida maior e a menor e determinamos a média das outras cinco medições.

3.3 Microdureza

Os resultados dos ensaios de microdureza Vickers (HV) foram realizados através do microdurômetro Shimadz modelo HMV-2T E, com microscópio ótico incorporado e software Easy Test HMV-AD para obtenção de imagens capturadas por meio de câmera digital incorporada ao equipamento, com cargas de 98,07 mN (10 gf) durante um carregamento de 15 segundos.

Foram realizadas 3 medições em cada amostra, para avaliação da dureza das camadas refundidas, camada intermediária e substrato.

3.4 Difração de raio x

A avaliação da formação de nitretos após o processo EDM, foi verificada por difração de raios x (DRX), Bragg-Brentano ou θ -2 θ . As amostras foram avaliadas em um difratômetro pertencente ao laboratório de caracterização do DEMAT, conforme os parâmetros de varredura descritos na Tabela 5.

Parâmetro	Especificação
Radiação	Cu Ka
Energia de transição	8,0 keV
Tensão	40kV
Corrente	30mA
Tipo de varredura	θ - 2θ
Ângulo inicial de varredura (2θ)	20°
Ângulo final de varredura (2θ)	120°
Modo de varredura	Tempo fixo
Passo de amostragem	0,04°
Tempo de varredura por ponto	1s

Tabela 5 - Parâmetros	adotados r	na DRX
-----------------------	------------	--------

Fonte: Autor, 2019

3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

Para a visualização da morfologia da superfície, com referência do topo da amostra, ou seja, vista de cima, para a identificação das trincas e poros foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo Superscan SSX-550 da SHIMADZU.

3.6 Avaliação do desempenho do processo EDM

Para avaliação do desempenho do processo de eletroerosão, foram calculadas a Taxa de Remoção de Material, a Taxa de Desgaste e o Desgaste Volumétrico Relativo. Durante a execução dos experimentos a amostra e o eletrodo ferramenta foram pesados três vezes antes e após cada série de usinagem. Para isso utilizou-se uma balança eletrônica com capacidade máxima para 310 gramas e resolução de resolução 0,0001g e linearidade ± 0,0003g.

A variação da massa foi determinada pela diferença entre as massas inicial (mi) e final (mf) pela equação (4).

$$\Delta m = mi - mf \tag{4}$$

Onde:

mi = massa inicial [g] mf = massa final do eletrodo [g].

O eletrodo ferramenta de grafita foi seco em forno mufla durante 3 horas à temperatura de 300°C antes de cada pesagem, pois o mesmo é umedecido pelo fluido dielétrico durante o teste, e ganha massa.

Taxa de remoção de material do corpo de prova (TRM): representa o volume de material do eletrodo peça erodido durante a usinagem, em um

determinado tempo, expressa em mm³ / min. Para quantificar a TRM foi utilizada a equação 5.

$$\mathsf{TRM} = \frac{\Delta \mathsf{m}}{(\delta).\mathsf{t}} \tag{5}$$

Onde:

∆m = variação de massa do corpo de prova

 δ = peso específico do ADI

t = tempo de usinagem

Taxa de desgaste do eletrodo ferramenta (TD): representa o volume de material do eletrodo ferramenta perdido durante a usinagem, em um determinado tempo, expressa em mm³ / min. Para quantificar a TD foi utilizada a equação 6.

$$\mathsf{TD} = \frac{\Delta \mathsf{m}}{(\delta).\mathsf{t}} \tag{6}$$

Onde:

∆m = variação de massa do eletrodo ferramenta

 δ = peso específico do material do eletrodo

t = tempo de usinagem

Desgaste volumétrico relativo (DVR): relaciona o volume de material perdido pelo eletrodo ferramenta em relação ao volume de material removido do eletrodo peça, dado pela razão entre TD e TRM, em percentual. Para determinar o DVR foi usada a equação 7.

$$DVR = \frac{TD}{TRM}.100$$
 (7)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com o procedimento descrito na metodologia. Os resultados são discutidos e analisados a partir da verificação da formação de uma camada nitretada na sub superfície de amostras processadas no ADI, por meio de descargas elétricas geradas na máquina de EDM.

4.1 Caracterização das camadas

Na figura 26, percebe-se que a zona refundida apresenta irregularidade e se desprendia do metal base, quando se utiliza eletrodo ferramenta de grafita. Imagens de microscopia ótica apresentaram a formação da zona refundida, camada superficial e de coloração mais clara, e a formação da camada intermediária, camada mais escura, logo abaixo da zona refundida, observado nas figuras 26 (a) e (b) usinadas com eletrodos de grafita e figuras 27 (a) e (b) usinadas com eletrodos de grafita e figuras 27 (a) e (b)

Figura 26 – Formação das camadas zona refundida e camada intermediária, via microscopia óptica, utilizando eletrodo de grafita. Nital 2%. (a) aumento de 600x e (b) aumento de 100x



(a)



Fonte: Autor, 2019

Figura 27 – Formação das camadas zona refundida e camada intermediária, via microscopia óptica, utilizando eletrodo de cobre. Nital 2%. (a) aumento de 400x e (b) aumento de 100x



(a)



(b)

Fonte: Autor, 2019

Notam-se a formação da zona refundida e camada intermediária, semelhante ao que foi observado por outros pesquisadores no processo de nitretação por descargas elétricas de aços (NICESIO, et al. 2016, RASLAN, 2015, SANTOS, et al. 2017).

Verifica-se, para ambos os tipos de eletrodos, zona refundida e camada intermediaria. Outra observação é o destaque dos nódulos de grafita nas camadas que também foram citados por outros autores em suas pesquisas (TSAI et al., 2000, YANG, 2012).

A Figura 28 ilustra o gráfico com os resultados das médias das camadas (zona refundida + camada intermediária).



Figura 28 - Média da camada nitretada das amostras usinadas com eletrodo ferramenta de cobre e de grafita.

Fonte: Autor, 2020

Observa-se que a amostra usinada com eletrodo de grafita obteve uma espessura, aproximadamente o dobro, se comparar com a espessura da camada de eletrodo de grafite.

4.2 Microdureza

A Tabela 6 apresenta os resultados médios e os respectivos desvios padrões obtidos com a microdureza Vickers das peças usinadas com eletrodos de cobre eletrolítico e grafita, medidas na seção transversal das amostras.

	Eletrodo Ferramenta			
Região	Cobre eletrolítico	Grafita		
Zona Refundida	767,2 ± 35,8	699,7 ± 23,7		
Camada Intermediaria	493,7 ± 42,9	$486,5\pm45,5$		
Metal base	241,0 ± 10,8			

Tabela 6 - Valores médios de dureza e desvios obtidos com NDE

Fonte: Autor, 2019

Notam-se um aumento nos valores de dureza na camada intermediaria e zona refundida para ambos os tipos de eletrodos ferramenta. O ganho no valor de microdureza ocorre com maior destaque para o valor da zona refundida, devido ao resfriamento brusco do material, que não é totalmente removido da superfície do eletrodo peça (SANTOS, et al., 2016).

4.3 Difração de raio x

A figura 29 apresenta os resultados de difração de raios-x representados em um gráfico de intensidade versus ângulo de varredura (2θ). O gráfico ilustra os difratogramas das amostras nitretadas com eletrodos ferramenta de cobre e grafita, comparando-os com o ferro fundido nodular austemperado, referência.

Notam-se os picos de nitretos de ferro FeN formados nas amostras usinadas com eletrodos de cobre eletrolítico e grafita em relação ao ADI de referência.



Figura 29 – Difratograma da superfície das amostras de ferro fundido nodular nitretadas com eletrodos de grafita e eletrodos de cobre.

Fonte: Autor, 2019

O mecanismo de colisão dos íons e elétrons causa ruptura do dielétrico e gera NH₃ e CO₂, com energia suficiente para decompor os constituintes presentes na mistura (água deionizada e ureia), em forma de vapores e gases como o NH₃ que, por sua vez, se decompõe em N₂ e H₂, que irão se difundir no canal de plasma na forma de íons, como N₂⁺, N⁺ e H₂⁺. Além destes íons, formam-se íons de cobre, oriundos do eletrodo ferramenta, no caso do cobre eletrolítico. Por serem positivos, eles serão impulsionados para a superfície da peça (cátodo) e, implantam-se no interior da mesma (SANTOS 2013).

A pequena espessura das camadas nitretadas faz com que o volume difratado seja reduzido de tal forma que eventuais reflexões provenientes das camadas nitretadas sejam fracas. O difratograma apresenta variação nas intensidades dos picos próximos dos ângulos 50° e 90°. Os dois picos referidos caracterizam constituição da camada superficial da amostra com nitretos precipitados y'-Fe⁴N em duas orientações preferenciais (a primeira <111> a maior e a segunda <200> 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.

4.4. Microscopias Eletrônica de Varredura

São apresentados nas figuras 30 e 31, o processo de usinagem por descargas elétricas (das morfologias das superfícies), de amostras do ferro fundido nodular austemperado, utilizando com o eletrodos de cobre e grafita, tendo como fluido dielétrico água deionizada e solução de água deionizada e ureia.

As imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura evidenciaram o aumento de 100, 200, 500 e 1000x da formação de micropartículas refundidas, poros e nódulos de grafite.



Figura 30 – Imagem de topo da microscopia ótica de amostra de ferro fundido nodular austemperado usinada pelo processo EDM (a) 100x e (b) 200x

(a)



(b) Fonte: Autor, 2019

As imagens de MEV das superfícies usinadas pelo processo EDM não apresentam grandes diferenças entre si quando alteramos os eletrodos de cobre e grafita. A Figura 31 (a) ilustra a superfície da cavidade usinada pelo processo de eletroerosão, utilizando cobre eletrolítico como eletrodo ferramenta. O retângulo indica um nódulo de grafite, ilustrado na figura 31 (b).



Figura 31 – Imagem de MEV da superfície usinada descargas elétricas no ferro fundido nodular.





(b) Fonte: Autor, 2019

A figura 31 (b) ilustra os nódulos de grafite, que destacam da superfície do ferro fundido nodular usinado. Esse fato exerce influência na corrente durante o processo, já que alguns nódulos, durante o processo, ficam expostos na superfície. Provavelmente alguns elétrons são atraídos pelos nódulos de grafite expostos.

4.5 Avaliação do desempenho do processo EDM

Na avaliação do desempenho do processo de EDM, a condutividade elétrica do fluido dielétrico é muito importante para o resultado, desta maneira, a medição da condutividade foi realizada sempre que concluía usinagem de uma amostra, tanto utilizando eletrodo de cobre quanto de grafita.

Pode-se verificar na figura 32 que a solução adquiriu valores de condutividade média na ordem de 36µS/cm, após a usinagem EDM.



Figura 32 – Monitoramento da condutividade elétrica após usinagem

Fonte: Autor, 2019

Para determinar os parâmetros de TD (Taxa de desgaste), TRM (Taxa de Remoção de Material) e DVR (Desgaste volumétrico relativo) pelo processo NDE (Nitretação por descargas elétricas), foram comparados o desempenho entre a utilização dos dois eletrodos ferramentas, grafita e cobre. A figura 33 apresenta a comparação da TRM.





Na usinagem EDM das amostras de ferro fundido nodular austemperado utilizando eletrodo de cobre e grafita a TRM foi encontrada de 21,19mm³/min para eletrodo de cobre e de 10,19mm³/min para as amostras usinadas com eletrodo de grafita, observa-se que uma TRM alta do eletrodo de cobre se comparar com a TRM do eletrodo de grafita, aproximadamente o dobro.

Segundo (ROY, et al., 2015), não existe padrão definido da quantidade de material removido do eletrodo peça. Diversos parâmetros operacionais podem influenciar a TRM, destacando-se a intensidade de corrente, tamanho da fenda de trabalho, sistema de limpeza da fenda, material do eletrodo ferramenta, o que dificulta o estabelecimento de padrões para comparação.

Na TD, que representa a taxa de desgaste do eletrodo ferramenta, notase que o desgaste do eletrodo grafita é maior que o eletrodo de cobre, na ordem de 54% maior, como ilustra a figura 34.

Fonte: Autor, 2019



Figura 34 – Comparação entre as TD utilizando eletrodo ferramenta de cobre e grafita.



O DVR relaciona a TD com a TRM, o menor valor de DVR caracteriza o melhor desempenho, pois a quantidade de material retirado da peça é maior com pouco desgaste do eletrodo ferramenta. O menor valor encontrado para a DVR 14,91% foi utilizando o eletrodo ferramenta de cobre e o pior foi 47,92% utilizando o eletrodo de grafita como pode-se observar na figura 35.



Figura 35 – Comparação entre as DVR utilizando eletrodo ferramenta de cobre e grafita.

Fonte: Autor, 2019

Notam-se um maior valor da taxa de remoção de material com eletrodo ferramenta de cobre, aproximadamente, o dobro em relação ao eletrodo de grafita.

O menor valor da TRM quando se utiliza eletrodo ferramenta de grafita em relação ao cobre eletrolítico na eletroerosão do ADI também foi observado por outros pesquisadores (ROY, et al., 2015).

No ferro fundido nodular a matriz e os nódulos de grafite atuam como anodo e catodo (JEONG, et al., 2002). Provavelmente, durante o processo de nitretação por descargas elétricas, a carga positiva dos nódulos de grafite contidos no eletrodo peça, irá atrair elétrons do material do eletrodo ferramenta. Os íons de cobre atuaram na matriz, promovendo uma taxa de remoção de material semelhante à que ocorre nos aços. No entanto, o eletrodo ferramenta de grafita não produziu o mesmo efeito que ocorre nos aços, pois a taxa de remoção de grafita foi inferior à do cobre. A Figura 36 ilustra um desenho esquemático, do canal de plasma, formado no processo de nitretação por descargas elétricas no ferro fundido nodular.

Figura 36 – Desenho esquemático do canal de plasma formado no processo de nitretação por descargas elétricas no ferro fundido nodular.



Fonte: Elias, 2019

O valor da taxa de desgaste para a eletrodo ferramenta de grafita foi 50% maior que o valor do cobre eletrolítico.

A combinação de baixa TRM com maior TD provocou um maior valor do desgaste volumétrico relativo do eletrodo ferramenta de grafita, aproximadamente duas vezes maior do que do eletrodo de cobre.

5. CONCLUSÃO

Após análise dos ensaios e dos resultados obtidos, pode-se concluir que: toda alteração no equipamento EDM para realização da nitretação por descargas elétricas (NDE), foi satisfatória por ter sido viável tecnicamente.

Verifica-se que surgiram zonas refundidas e camada intermediaria nas amostras de ferro fundido nodular, usinadas com eletrodos de cobre eletrolítico e grafita.

Foi possível verificar que houve a formação das camadas com espessura total (zona refundida + camada intermediaria) de aproximadamente 36µm e 75µm nas amostras usinadas com eletrodos de cobre e grafita, respectivamente, via microscopia ótica.

A dureza do material apresentou aumento em todas as amostras analisadas, uma média de 100% do metal base em relação à camada intermediária, a qual apresentou valor de dureza médio de 500 HV, e a camada refundida com valor médio de 750 HV.

Por meio das análises dos resultados de difração de raios-x foi verificada presença de nitretos precipitados y'-Fe⁴N, o que evidencia a formação da camada nitretada na superfície das amostras.

Foi possível observar a formação da zona refundida e camada intermediária na NDE, independente do eletrodo ferramenta utilizado. O nitrogênio desprendido das soluções aquosas da ureia implantou-se na superfície dos corpos de prova formando nitretos de ferro.

A taxa de remoção de material (TRM) da amostra usinada com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico foi maior que a do eletrodo de grafita, esse aumento, aproximadamente, o dobro.

A taxa de desgaste (TD) foi mais acentuada quando utilizou-se eletrodo de grafita, atingindo um desempenho de 54,4% superior, em comparação com o cobre.

A morfologia da superfície avaliada com o MEV, identificou-se a formação de micropartículas refundidas, poros e trincas. Bem como, nódulos de grafita foram observados, expostos da superfície das amostras de ferro fundido nodular nitretadas por descargas elétricas.
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar influência do tempo de processo de nitretação por NDE na espessura da camada nitretada e a variação dos parâmetros de regulagem da corrente elétrica no desempenho do processo de usinagem por descargas elétricas do ferro fundido nodular austemperado;
- Estudar a adição de elementos ao fluido dielétrico, que venha aumentar a resistência mecânica do ferro fundido nodular austemperado;
- ✓ Estudar novos materiais como eletrodo ferramenta no processo Nitretação com descargas Elétricas (NDE);
- Investigar a influência do tamanho dos nódulos de grafita no processo NDE;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

AMORIM, Fred L.; WEINGAERTNER, Walter L. The behavior of graphite and copper electrodes on the finish die-sinking electrical discharge machining (EDM) of AISI P20 tool steel. Journal of Brasilian Society of Mechanical Science & Engineering. Vol XXIX. No. 4 p 366-371. 2007.

AMORIM, F. L.; SILVA, N. H. Usinagem de furos de pequeno diâmetro na liga de titânio Ti6AI4V. Máquinas e Metais ano 46, número 531 p. 100-117. Aranda Editora. São Paulo. Abril 2010.

ANUSAVICE, K. J; SHEN, C., & RAWLS, H. R. (2013). Materiais dentários. (Elsevier Editora Ltda, Ed) 912. Ed). Rio de Janeiro.

ARANTES, L. J. Desenvolvimento e avaliação do processo híbrido de usinagem por descargas elétricas e jato de água abrasivo (AJEDM). 2007. 117f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

AZEVEDO, L. M. S. Síntese de niobato de sódio a partir do oxido de nióbio e nióbio metálico. Dissertação de Mestrado em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2010.

BENEDICT, G. F. Nontraditional manufacturing processes. Marcel Dekker. New York. 1987. p. 207-229.

BRITANNICA ACADEMIC. Urea. Novembro, 2017. Disponível em http://academic-eb-

britannica.ez107.periodicos.capes.gov.br/levels/collegiate/article/urea/74456>. Acesso em 21 abr. 2019.

CALLISTER W.D., D.G. RETHWISCH, Materials science and engineering: an introduction, vol. 7, EUA, 2007.

CALLISTER W.D., D.J. (n.d.). Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução, 7^a Ed, LTC, Rio de Janeiro, 2008.

CALLISTER W.D., D.J.Jr. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução, Livros técnicos e científicos. 7^a Ed, LTC, Rio de Janeiro, 2012.

CAMARGO, B. C.; ARANTES, L. J.; RASLAN, A. A. Estudo da viabilidade da nitretação de liga de titânio através do processo de usinagem por descargas elétricas. Uberlândia-MG, 2006. In: POSMEC, 16. FEMEC/UFU, Anais.

CAMARGO, B. C.; COSTA, H. L.; RASLAN, A. A. Endurecimento superficial de uma liga Ti6A14V por meio de Usinagem por descargas elétricas, 2009.

CARMO, D. J. ; MELO G. H. T. – Tratamento térmico de aços e ferros fundidos – Itaúna: SENAI-DR. MG, 114p. - 2004.

CHIAVERINI, VICENTE (2008) Tratamento térmico das ligas metálicas. ABM. São Paulo. 272 p.

CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos, 7° edição, São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 2012.

CHE-HARON, C. H., JAWAID, A. The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti-6% AI-4%V. Journal of Materials Processing Technology, Amsterdam, V.166, no.2, p. 188-92, Aug. 2005.

CHE HARON, C.H.; GHANI, J.A.; BURHANUDDIN, Y.; SEONG, Y.K., SWEE, C.Y. Copper and Graphite Electrodes Performance in Electrical-Discharge Machining of XW42 Steel, Journal of Materials Processing Technology, v. 201, p. 570-573. 2008.

CRUZ, C., MALAQUIAS, E. S., FERNANDES, I. A. Introdução à usinagem não tradicional. Uberlândia-MG: DEEME, UFU, 1999.

ELIAS, C.; Dissertação; Nitretação por descargas elétricas no aço ABNT 4340 com pó de carbeto de silício adicionado ao fluído dielétrico, 2019.

ELIAS,C.; ELIAS, L.; LINO, A; SILVA, E; VIANA, D; Artigo científico; Nitretação por Descargas Elétricas do Aço ABNT 4340 com adição de pó de carbeto de silício ao fluido dielétrico. Revista Perspectivas da Ciência e Tecnologia, v.12; Rio de Janeiro-RJ: IFRJ, 2020.

ELIAS,L.; ELIAS, C.; BATISTA, B. R; SILVA; Artigo científico; Nitretação por Descargas Elétricas do Ferro Fundido Nodular. Revista Perspectivas da Ciência e Tecnologia, v.11; Rio de Janeiro-RJ: IFRJ, 2019.

Faculdade de Tecnologia de Mauá - Tratamentos Termoquímico - Nitretação. Disponível em:<https://www.ebah.com.br/content/ABAAABbMoAJ/nitretaao>. Acesso em: 20 abr. 2019.

FERNANDES, P. Metalografica: O que é e para que serve...Histórico. São Paulo-SP: IFSP, 2011.

FONSECA F. H. D.; LOPES, G. A. C. Avanços em caracterização de amostras solidas cristalinas através de Difratometria de Raios-X. Macapá, v.3 n. 1, p. 31-45, jan.-jun.2013.

FRANÇA, A.B.C.; SILVA, E.R.; CARNEIRO, J.R.G. Efeito do Revenimento nas Propriedades Mecânicas do Ferro Fundido Nodular Austemperado. Anais. 8º COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Salvador, 2015.

FULLER, J. E. Electrical Discharge Machining, Metals Handbook. 9.ed. 1989. v.16, p. 557-564.

GUEDES. L.C.; GUESSER, W.L.; DURAN, P.V; SANTOS, A.B.S. - Efeitos do fósforo em ferros fundidos nodulares austemperados. Metalurgia & Materiais, v. 49, n. 420, p. 646-659, Ago., 1993.

GUESSER, W.L. Propriedades mecânicas dos ferros fundidos, 1° edição, São Paulo: Editora Blucher, 2009.

HO, K.H.; NEWMAN, S.T. State of the art electrical discharge machining (EDM). International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 p. 1287–1300. 2003.

JEONG, J.J.; JEONG, B.Y.; KIM, M. H.; LEE, C. Characterization of TiN Coatings on the Plasma Nitrided Spheroidal Graphitic Cast Iron Substrates, Surface and Coatings Technology, v. 150, p. 24–30. 2002.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F.; LENZEN, R. The electrical machining processes: what demands will they face in the future. International Journal of Electrical Machining. 1 v.1 n.1, p.3-7, 1996.

LEE, H. T.; HSU,F. C.; TAI, T. Y. Study of surface integrity using the small area EDM process with a copper- tungsten electrode. Mater ScI Eng A, St Louis, v. 346, no. 1-2, p. 346-56, Jan. 2004.

LEE, H. T.; TAI, T. Y.Relationship between EDM parameters and surfce crack formation. Journal of Materials Processing Technology, Amsterdam, v. 142,no. 3,p.676-83,Dec.2003.

LIMA, F. e CORRÊA, M., "Efeitos da eletroerosão sobre a superfície de peças usinadas", UNICAMP ,Rev. Tecnol. Fortaleza, v. 27, n. 1, Brazil, p. 26-33, 2006.

LUROSSI, R. J. – Efeito da adição de cobre e da seção da peça sobre as características microestruturais e mecânicas de ferro fundido nodular austemperado. Dissertação de Mestrado Universidade Federal de Santa Catarina, 82p. - 2003.

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

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.

MONTEIRO, WA.; BUSO, S.J. Caracterização de materiais por métodos Físicos
– Técnicas Experimentais e Aplicações Práticas. Apostila dada na disciplina:
TNM5747 – T'enicas de Microscopia Eletrônica Aplicada a Materiais realizada em 2013.

NICESIO, I.C.; ELIAS, C.; SILVA, S.P.; FREITAS F., A.; SANTOS, R.F.; SILVA, E.R. Avaliação da qualidade da ureia no processo de nitretação por descargas elétricas. Anais. 9° CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Fortaleza, 2016.

NICOLETTO, G.; TUCCI, A; ESPOSITO, L. Sliding wear behavior of nitrided and nitrocarburized cast irons. Wear, v. 197, 1996.

PIMENTEL, A.S.O.; GUESSER, W.L. revista Matéria, v.22, n.2, 2017.

Página do Minas Gramados: Disponível em: http://gramados.net/Loja/wp-content/uploads/2015/10/Ureia-3.jpg> Acesso em abr. 2019.

RAJURKAR, K. P.; YU, Z. Y. 3D Micro-EDM using CAD/CAM. CIRP Annals – Manufacturing Technology Volume 49, p. 127-130. 2000.

RASLAN, A. A. Implantação iônica em meio aquoso por EDM: resistência ao desgaste de aço AISI 4140. Salvador-BA, 2015. In: COBEF, 8. Anais.

RASLAN, A. A. Implantação Iônica em Meio Aquoso por EDM: Resistência ao Desgaste de Aço AISI 4140. Anais... 8º COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Salvador, 2015.

ROY, D.C.; MONDAL, R.; MONDAL, M. Optimization of MRR in EDM Process with Different Job Material i.e Stainless Steel and Cast Iron by Taguchi Method. Journal of Engineering Research and Applications, v. 5, n 5, p 24-31.

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

SANTOS, R.F. Nitretação por EDM no Aço AISI 4140. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Uberlandia, 2013.

SANTOS, R.F.; SILVA, E.R.; SALES, W.F.; RASLAN, A.A. Analysis of the Surface Integrity when Nitriding AISI 4140 Steel by the Sink Electrical Discharge Machining (EDM) process. Procedia CIRP, v. 45, p. 303-306. 2016.

SANTOS, R.F.; SILVA, E.R.; SALES, W.F.; RASLAN, A.A. Influence of the Electrode Material on the Nitriding of Medium Carbon Steel Using Sink Electrical Discharge Machining, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 90, p. 2002-2007. 2017.

STEVENS, L. Improvement of surface quality in die-sinking EDM. Thesis (Doctoral). 1998, 181 p. Department of Mechanical Engineering. Katholieke Universiteir Leuven. Leuven, 1998.

TSAI, D.C.; LUI, T.S.; CHEN, L.H. Effect of Graphite Nodules on the EDM Machinability of Ferrite SG Cast Irons. Materials Transactions, v. 41, n. 2, p. 293-299. 2000.

WEINGAERTNER, Walter L. Tecnologia de fabricação volume 3. Material didático da disciplina EMC 6316. POSMEC. UFSC. Florianópolis. 1993. 301p.

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, p. 194-200, 2005.