

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

SINVAL PEDROSO DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA AXIAL DO AÇO ABNT 4140
NITRETADO POR DESCARGAS ELÉTRICAS**

Belo Horizonte

2016

Sinval Pedroso da Silva

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA AXIAL DO AÇO ABNT 4140
NITRETADO POR DESCARGAS ELÉTRICAS**

Dissertação 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 integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva

Coorientador: Prof. Dr. José Rubens Gonçalves Carneiro

Belo Horizonte

2016

Silva, Sinval Pedroso da
S586a Avaliação da resistência à fadiga axial do aço ABNT 4140
nitretado por descargas elétricas / Sinval Pedroso da Silva. - 2016.
130 f.: il.; tabs. ; grafs ; fotos. -
Orientador: Ernane Rodrigues da Silva.
Coorientador: José Rubens Gonçalves Carneiro.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2016.
Bibliografia.

1. Aço de alta resistência. 2. Aço - Fadiga. 3. Caracterização de
materiais. 4. Dureza. 5. Usinagem por eletroerosão. I. Silva, Ernane
Rodrigues da. II. Carneiro, José Rubens Gonçalves. III. Título.

CDD: 620.17



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 DA RESISTÊNCIA À FADIGA AXIAL DO
AÇO ABNT 4140 NITRETADO POR DESCARGAS
ELÉTRICAS”

Autor: Sinval Pedroso da Silva

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

Prof. Dr. José Rubens Gonçalves Carneiro (COORIENTADOR)
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC MINAS

Prof. Dr. Leonardo Roberto da Silva
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Hermans Nascimento Júnior
FCA – Fiat Chrysler Automóveis

Belo Horizonte, 25 de Novembro de 2016.

A Deus criador e mestre de todas as coisas.

À minha esposa Fernanda Palladino Pedroso, pela inspiração, incentivo, companheirismo, compreensão e apoio nesse desafio.

À Maria Isabel da Silva, mãe excepcional, exemplo de vida e dedicação e que mesmo de longe parece estar tão presente, dedico a você a conclusão deste projeto.

AGRADECIMENTOS

A DEUS pela vida, força, bênçãos, saúde e luz para continuar sempre.

Ao Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva, pela orientação, oportunidade, confiança, inestimável dedicação ao ensino e que despertou ainda mais meu interesse para o fascinante universo das pesquisas. Meu muito obrigado.

Ao Prof. Dr. José Rubens Gonçalves Carneiro (PUC Minas), pela coorientação, apoio e confiança desde o início deste projeto.

Ao corpo técnico e gestores da PUC Minas, especialmente aos funcionários Ítalo Bruno dos Santos, Lucas Wilker de Moraes, Edilene Braga Carvalho, Marceliny Nardi Torrecília, Thaís Roberta Campos, Erberte Marcio Costa e Ernane Vinícius Silva.

Ao CEFET-MG e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, professores, colegas de Mestrado e funcionários do DEMAT, agradeço pela boa convivência, apoio, compartilhamento de conhecimento e amizades conquistadas em especial ao professor Leonardo Roberto da Silva pelas contribuições na defesa.

Aos professores Aderci de Freitas Filho, Carlos Eduardo dos Santos e Rogério Felício dos Santos obrigado pelas ricas discussões e apoio.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro.

À FCA Fiat Chrysler Automóveis Brasil Ltda, pela colaboração na realização dos experimentos de tração e fadiga e pelas ricas discussões que elevaram a qualidade deste trabalho, em especial aos Srs. Hermano Nascimento Junior, Leonardo J. Dutra Silva, Fabiano Ferreira Silva (Laboratório de Materiais da Engenharia Experimental).

Enfim, obrigado a todos, que embora não citados, mas que se fizeram presentes por meio de palavras e ações para a concretização deste projeto, minha sincera e humilde gratidão.

*“Você nunca sabe que resultados virão da sua ação.
Mas se você não fizer nada, não existirão resultados.”
(Mahatma Gandhi)*

RESUMO

A maioria das falhas em componentes mecânicos durante serviço ocorre por carregamentos alternados que variam com o tempo, causando fadiga, e não por esforços estáticos. Uma alternativa para minimizar este fenômeno da fadiga é o tratamento termoquímico de nitretação. Este possibilita melhora de propriedades mecânicas, como dureza, resistência à fadiga e desgaste, devido a tensões compressivas induzidas na superfície. A Nitretação por Descargas Elétricas (NDE) é um processo de remoção de material não convencional pelo princípio termoelétrico, utilizando solução aquosa de ureia em água deionizada como fluido dielétrico e fonte de nitrogênio. O NDE emergiu como alternativa para tratar termoquimicamente materiais metálicos e usiná-los simultaneamente. O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a resistência à fadiga axial de corpos de prova fabricados em aço ABNT 4140 e submetido à nitretação por descargas elétricas. Os testes NDE foram realizados em máquina EDM por penetração, com algumas adaptações. Para obtenção da resistência à fadiga, foi utilizado o método tensão-número de ciclos (S-N) juntamente com o domínio de fadiga de alto ciclo, para três grupos de corpos de prova ABNT 4140 (laminado e usinado por CNC; nitretado por NDE; e, usinado por EDM). Os ensaios de fadiga axial foram realizados nos corpos de prova submetidos a cargas cíclicas de tração-tração, em temperatura ambiente e razão de tensão $R = 0,1$. Para minimizar o efeito de concentração de tensões superficiais nos resultados dos testes de fadiga, todas as amostras foram polidas. As técnicas de caracterização utilizadas foram análise química, microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV), ensaios de tração e microdureza para avaliar resistência mecânica. Os resultados obtidos mostraram ganho nos valores de dureza na superfície e subsuperfície de amostras nitretadas por NDE e usinadas por EDM em relação ao substrato. Os ensaios de fadiga mostraram aumento de resistência do material nitretado por NDE em relação ao usinado por EDM, e redução da resistência à fadiga destes em relação ao material laminado e usinado por CNC.

Palavras chave: Aço ABNT 4140, Caracterização de materiais, Cavidade matriz EDM, Fadiga, Nitretação por Descargas Elétricas (NDE)

ABSTRACT

Most failures in mechanical components during service occurs by alternating loads that vary over time, causing fatigue, and not by static loads. An alternative to minimize this phenomenon of fatigue is the thermochemical nitriding treatment. It enables improvement of mechanical properties such as toughness, fatigue strength and wear, due to the induced compressive stresses in the surface. The Nitriding by Electrical Discharge (NED) is a non-conventional material removal process by thermoelectric principle, using aqueous urea solution in deionized water as dielectric fluid and nitrogen source. The NED has emerged as an alternative to treat thermochemically metal and machine them simultaneously. The main purpose of this study was to evaluate the axial fatigue strength for three groups of ABNT 4140 steel specimens (laminated and machined by CNC; nitrided by NED, and, machined by EDM) subjected to nitriding by electrical discharge. The NED tests were performed on sinking EDM, with some adjustments. To obtain the fatigue strength, the stress against the number of cycles to failure method (S-N) together with the high cycle fatigue domain were performed on specimens subjected to uniaxial tensile cyclic loads at room temperature and stress ratio of $R = 0.1$. To minimize the effect of surface stress concentrations in the fatigue tests results, all samples were polished. Chemical analysis, optical microscopy, Scanning Electron Microscopy (SEM), tensile and hardness to assess mechanical resistance were used as characterization techniques. The results showed hardness gain in surface and subsurface of nitrided by NED and machined by EDM specimens in comparison to the substrate. Fatigue tests showed fatigue strength increase of nitrided by NED specimens in comparison to the ones machined by EDM, and a reduction thereof in relation to the specimens only machined by CNC.

Keywords: ABNT 4140 steel, Materials characterization, EDM matrix cavity, Fatigue, Nitriding by Electrical Discharge (NED)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aspecto micrográfico do aço AISI 4140 (MEV).	33
Figura 2 - Micrografia do aço ABNT 4140 em amostra virgem (laminada).....	33
Figura 3 - O processo de fadiga a partir de bandas de deslizamento.	38
Figura 4 - Aspecto da superfície fraturada por fadiga e etapas do processo.	39
Figura 5 - Curvas senoidais representando tensões variantes no tempo.....	40
Figura 6 - Curvas S-N para materiais ferrosos (A) e não ferrosos (B).....	43
Figura 7 - Curva S-N de testes de fadiga axial completamente inversa	45
Figura 8 - Desenhos esquemáticos de alguns corpos de prova de fadiga.	47
Figura 9 - Superfícies de fratura por fadiga - tensão 60% do limite de escoamento .	48
Figura 10 - Superfícies de fratura por fadiga - tensão de 70% e 80% do LE.....	48
Figura 11 - Fratura por fadiga causada por inclusão em mola de válvula (MEV)	49
Figura 12 - Fractografia de micromecanismo de fratura por clivagem (MEV)	50
Figura 13 - Fractografia de clivagem em aço A508 classe 3 (MEV).....	50
Figura 14 - Fase da ignição em (a) e evolução da corrente e tensão em (b)	52
Figura 15 - Formação de elétrons secundários (a); evolução corrente e tensão (b) .	53
Figura 16 - Formação do canal de plasma (a) e evolução da corrente e tensão (b) .	54
Figura 17 - Ruptura do canal de plasma (a), evolução da corrente e tensão (b).....	55
Figura 18 - Variações da frequência de pulso em EDM x modificações superficiais.	57
Figura 19 - Influência da energia de descarga na espessura da camada ZR	58
Figura 20 - Influência do tempo de pulso (t_e) sobre a espessura da camada ZAC, do aço AISI 4140 normalizado, temperado e revenido.....	59
Figura 21 - Perda de massa acumulada da superfície retificada em relação à superfície usinada por descargas elétricas.	62
Figura 22 - Variação da microdureza na seção transversal de superfície usinada utilizando diferentes dielétricos.	63
Figura 23 - Amostra de Ti-6Al-4V nitretada por EDM.	64
Figura 24 - Fórmula estrutural da ureia.	67
Figura 25 - Fluxograma das etapas do procedimento experimental realizado.	69
Figura 26 - Geometria dos corpos de prova para ensaios de fadiga.....	71
Figura 27 - Microdurômetro Vickers.	75
Figura 28 - Desenho esquemático das indentações Vickers.....	75
Figura 29 - Geometria dos corpos de prova para ensaios de tração.....	76

Figura 30 - Projeto e fabricação do eletrodo ferramenta (CAD/CAM/CNC).....	80
Figura 31 - Montagem virtual eletrodo ferramenta e corpo de prova de fadiga.	81
Figura 32 - Máquina de eletroerosão por penetração utilizada no processo EDM	82
Figura 33 - Painel de controle da máquina EDM e parâmetros ajustados.....	83
Figura 34 - Eletrodo peça e matriz EDM montados dentro da cuba auxiliar.....	86
Figura 35 - Micrografias de amostra ABNT 4140 no estado conforme recebido.	96
Figura 36 - Micrografias de amostras ABNT 4140 nos estados indicados.	97
Figura 37 - Espectros das microanálises efetuadas em amostras ABNT 4140.	98
Figura 38 - Condutividade elétrica inicial para os processos EDM e NDE.	100
Figura 39 - Corpo de prova ABNT 4140, nitretado por NDE com matriz de cobre. .	101
Figura 40 - Curvas S-N dos corpos de prova ABNT 4140.....	104
Figura 41 - Imagem MEV da superfície de amostras sem polir do ABNT 4140 usinado por EDM ($I=40$ A, T_{ON} 100 μ s, T_{OFF} 10 μ s): (a) Ampliação 100x; (b) 400x.	106
Figura 42 - Morfologia da superfície de amostras ABNT 4140 nitretadas por NDE ($I=40$ A, T_{ON} 100 μ s e T_{OFF} 10 μ s) - MEV: (a) e (b) Sem polir, ampliação 100x e 500x; (c) e (d) polidas 100x e 500x, respectivamente.....	107
Figura 43 - Micrografia MEV da seção transversal da amostra A1 usinada por EDM e polida, com dielétrico água deionizada: Ampliação de 100x (a) e 500x (b).....	108
Figura 44 - Micrografia MEV da seção transversal de amostra polida N13, nitretada por EDM com solução água deionizada e ureia: Ampliação 100x (a) e 500x (b). ...	109
Figura 45 - Micrografia MEV da seção transversal da amostra P15 em ABNT 4140 usinada por CNC, lixada e polida: Ampliação de 100x (a) e 500x (b).	110
Figura 46 - Micrografia com impressões de microdureza Vickers (10 gf, 20 s) em substrato de amostra (A0X) ABNT 4140 usinada por EDM.....	111
Figura 47 - Micrografia com perfil de microdureza Vickers (10 gf, 20 s) na seção transversal de amostra (A0X) ABNT 4140 usinada por EDM.....	111
Figura 48 - Perfil de microdureza Vickers (10 gf, 20 s) na seção transversal de amostra ABNT 4140 usinada por EDM.	112
Figura 49 - Microdureza Vickers (10 gf, 20 s) em substrato e ZR de seção transversal de amostra ABNT 4140 usinada por EDM.	113
Figura 50 - Micrografia com impressões de microdureza Vickers (10 gf, 20 s) na seção transversal de substrato de amostra ABNT 4140 nitretada por NDE.....	113
Figura 51 - Micrografia com impressões de microdureza Vickers (10 gf, 20 s) em seção transversal de amostra ABNT 4140 nitretada por NDE.	114

Figura 52 - Perfil de microdureza Vickers (10 gf, 20 s) na seção transversal de amostra ABNT 4140 nitretada por NDE.	115
Figura 53 - Microdureza Vickers (10 gf, 20 s) em amostra nitretada por NDE.	116
Figura 54 - Fractografias da amostra A1 em aço ABNT 4140 usinada por EDM em diferentes ampliações da região de início da fratura por fadiga.	117
Figura 55 - Fractografias da amostra A1 aço ABNT 4140 usinada por EDM, com ampliação dos estágios II e III de propagação estável e instável da trinca.	117
Figura 56 - Fractografias da amostra N13 em aço ABNT 4140 nitretada por NDE em diferentes ampliações da região de início da fratura por fadiga.	118
Figura 57 - Fractografias da amostra N13 aço ABNT 4140 nitretada por NDE, com ampliação dos estágios II e III de propagação estável e instável da trinca.	118
Figura 58 - Fractografias da amostra P15 em aço ABNT 4140 laminada e usinada por CNC em diferentes ampliações da região de início da fratura por fadiga.	119
Figura 59 - Fractografias da amostra P15 aço ABNT 4140 laminada e usinada por CNC, com ampliação dos estágios II e III de propagação estável e instável da trinca.	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Teores e efeitos dos elementos de liga dos aços <i>Nitralloy</i>	27
Tabela 2 - Efeito de elementos de liga em relação à formação de nitretos.....	28
Tabela 3 - Composição química (% em peso) do aço ABNT/SAE 4140	29
Tabela 4 - Efeitos dos elementos de liga principais no aço ABNT 4140	30
Tabela 5 - Classificação de dureza e usinabilidade do aço AISI/SAE 4140	34
Tabela 6 - Dureza mínima limite esperada para barras 4140 laminadas a quente. ..	34
Tabela 7 - Propriedades mecânicas do ABNT 4140 normalizado e recozido.....	34
Tabela 8 - Propriedades mecânicas do aço ABNT 4140 beneficiado.	35
Tabela 9 - Dureza (HB) do aço ABNT 4140 - construção mecânica.	35
Tabela 10 - Amostras do aço ABNT 4140 para caracterização metalográfica.	72
Tabela 11 - Parâmetros utilizados na usinagem CNC da matriz de cobre	80
Tabela 12 - Dados principais e parâmetros operacionais do processo EDM.	84
Tabela 13 - Propriedades físicas e químicas da ureia Reforce N.....	85
Tabela 14 - Composição e informação sobre os ingredientes da ureia utilizada.....	85
Tabela 15 - Especificação dos corpos de prova de fadiga após usinagem CNC	87
Tabela 16 - Grupos de ensaios de fadiga realizados em amostras ABNT 4140.	89
Tabela 17 - Corpos de prova de fadiga do grupo 1.1 - laminado e usinado CNC.	90
Tabela 18 - Corpos de prova de fadiga do grupo 1.2 - laminado e usinado CNC.	90
Tabela 19 - Corpos de prova de fadiga do grupo 2.1 - nitretado por NDE.	90
Tabela 20 - Corpos de prova de fadiga do grupo 2.2 - nitretado por NDE.	91
Tabela 21 - Corpos de prova de fadiga do grupo 3 - usinado por EDM.	91
Tabela 22 - Análise química (% em peso) do aço ABNT 4140.....	95
Tabela 23 - Microdureza Vickers em amostras do aço ABNT 4140.	99
Tabela 24 - Valores dos ensaios de tração (aço ABNT 4140 laminado).	100
Tabela 25 - Condutividade elétrica média dos dielétricos EDM e NDE.....	101
Tabela 26 - Corpos de prova de fadiga do grupo 1.1 - laminado e usinado CNC. ...	102
Tabela 27 - Corpos de prova de fadiga do grupo 1.1 - laminado e usinado CNC. ...	103
Tabela 28 - Corpos de prova de fadiga do grupo 2.1 - nitretado por NDE.	103
Tabela 29 - Corpos de prova de fadiga do grupo 2.2 - nitretado por NDE.	103
Tabela 30 - Corpos de prova de fadiga do grupo 3 - usinado por EDM.	104
Tabela 31 - Composição química do ABNT 4140 fornecida pelo espectrômetro	129

LISTA DE SÍMBOLOS

"	Polegada
A	Ampere (unidade de corrente elétrica)
A	Área instantânea da seção transversal
A_f	Área final da seção transversal do corpo de prova
A_0	Área original da seção transversal do corpo de prova
Al	Alumínio
Al_2O_3	Óxido de alumínio
°C	Grau centígrado
C	Carbono
cP	Centipoise
Cr	Cromo
Cu	Cobre
D	Diâmetro
E	Módulo de elasticidade
F	Força
Fe	Ferro
Fe_3C	Cementita
g	Gramas
g/l	Gramas por litro
H_2O	Água
HV	Dureza Vickers
I_e	Corrente de descarga elétrica
kgf	Quilograma força
Kgf/cm^2	Quilograma força por centímetro quadrado
L_f	Comprimento de medida final do corpo de prova, após ruptura
L_0	Comprimento de medida original, antes da aplicação da força
MPa	Mega Pascal
mmHg	Milímetro de mercúrio (unidade de pressão)
m/min	Metro por minuto
mm	Milímetro
mm^3	Milímetro cúbico
mm^3/min	Milímetro cúbico por minuto

mm/min	Milímetro por minuto
min	Minuto
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
N	Nitrogênio
O	Oxigênio
P	Fósforo
ppm	Partes por milhão
R	Raio
R	Razão de tensão
S	Enxofre
Si	Silício
SiC	Carboneto, carbureto ou carbeta de silício
s	Segundo
S	Amplitude de tensão de fadiga
S' _f	Limite de resistência à fadiga
S _f	Resistência à fadiga
t	Tempo de usinagem
t _d	Tempo de atraso da ignição [μs]
TD	Taxa de desgaste do eletrodo
t _e	Tempo de duração da descarga elétrica [μs]
TiN	Nitreto de titânio
Ti	Titânio
t _o	Intervalo de tempo
T _{OFF}	Tempo de intervalo do pulso [μs]
T _{ON}	Tempo de duração do pulso [μs]
TRM	Taxa de remoção de material fundido
Ti-6Al-4V	Liga de titânio
U	Tensão do circuito aberto [V]
u _e	Tensão de trabalho média [V]
u _i	Tensão da descarga [V]
U _i	Tensão em aberto
V	Volt

e	Deformação convencional de engenharia
ε	Deformação real
Δl	Alongamento após ruptura (variação de comprimento: $L_f - L_0$)
$\Delta\sigma$	Intervalo de tensão [MPa]
σ	Tensão real do ensaio de tração
σ_a	Amplitude da tensão alternada [MPa]
σ_m	Tensão média cíclica [MPa]
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima na seção ou no ciclo de carga [MPa]
$\sigma_{m\acute{i}n}$	Tensão mínima na seção ou no ciclo de carga [MPa]
μm	Micrômetro
$\mu\text{S/cm}$	Condutividade elétrica (micro Siemens por centímetro) ($1\text{S} = 1/\Omega$)
μs	Microsegundo
Ω	Resistência elétrica

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

3D	Modelagem tridimensional
A	Razão de amplitude
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> (Instituto Americano do Ferro e Aço)
ASM	<i>American Society for Metals</i> (Sociedade Americana de Metais)
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana de Testes e Materiais)
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Projeto auxiliado por computador)
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i> (Manufatura auxiliada por computador)
CAS	<i>Chemical Abstracts Service</i> (Instituto para registro de produto químico)
CN	Camada nitretada
CNC	Controle Numérico Computadorizado
DEMAT	Departamento de Engenharia de Materiais
DIN	<i>Deutsche Institut für Normung</i> (Instituto Alemão para Normatização)
EDM	<i>Electrical Discharge Machining</i> (Usinagem por Descargas Elétricas)
EDS	<i>Energy Dispersive X-ray Spectroscopy</i> (Espectroscopia de raios-X por dispersão de Energia)
f.	Folha
IHM	Interface Homem Máquina
LE	Limite de Escoamento [MPa]
LRT	Limite de Resistência à Tração [MPa]
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MFLE	Mecânica da fratura linear elástica
N	Vida em fadiga (número de ciclos para a falha)
NDE	Nitretação por Descargas Elétricas
p.	Página
PIB	Produto Interno Bruto
RPM	Rotações por minuto
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> (Sociedade dos Engenheiros Automotivos)
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
ZR	Zona Refundida

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
1.1. Aspectos gerais	21
1.2. Justificativa e relevância.....	24
2. OBJETIVOS.....	26
2.1 Objetivo geral	26
2.2 Objetivos específicos.....	26
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
3.1. Aços para nitretação.....	27
3.2 Aço ABNT 4140.....	28
3.2.1 Classificação e composição química do aço ABNT 4140.....	29
3.2.2 Processos de aprimoramento de propriedades do aço ABNT 4140.....	30
3.2.3 Microestrutura e propriedades mecânicas do aço ABNT 4140	32
3.3 Fadiga em aços.....	36
3.4 Processo de usinagem por descargas elétricas (EDM).....	51
3.5 Nitretação	59
3.5.1 Nitretação por NDE	61
3.5.1.1 Ureia.....	66
4. METODOLOGIA	68
4.1 Caracterização do material ABNT 4140 para eletrodo peça	69
4.1.1. Eletrodo peça em aço ABNT 4140	70
4.1.2. Caracterização do ABNT 4140 conforme recebido	71
4.1.2.1. Análise Química	72
4.1.2.2. Metalografia.....	72
4.1.2.3. Microdureza Vickers	74
4.1.2.4 Ensaio de tração.....	76
4.2. Eletrodo ferramenta.....	79

4.3. Fabricação dos eletrodos ferramenta e peça (CAD/CAM/CNC).....	79
4.4. Usinagem e nitretação por descargas elétricas (EDM / NDE)	81
4.4.1. Equipamento EDM e parâmetros operacionais utilizados	81
4.4.2. Testes preliminares de usinagem por EDM e nitretação por NDE	86
4.5. Análise de rugosidade	87
4.6 Ensaio de fadiga axial em corpos de prova ABNT 4140.....	88
4.7 Caracterização microestrutural e ensaios de dureza em amostras ABNT 4140 ...	92
4.7.1 Morfologia das superfícies usinadas por EDM e nitretadas por NDE	92
4.7.2 Micrografia em amostras de aço ABNT 4140	92
4.7.3 Microdureza Vickers em amostras ABNT 4140	93
4.7.4 Superfícies fraturadas por fadiga axial	94
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	95
5.1. Caracterização inicial do aço ABNT 4140	95
5.1.1. Análise química do aço ABNT 4140	95
5.1.2. Microestrutura do aço ABNT 4140	96
5.1.3. Microdureza do aço ABNT 4140.....	99
5.1.4. Ensaio de tração do aço ABNT 4140.....	100
5.2 Condutividade elétrica dos flúidos dielétricos	100
5.3 Eletrodo peça usinado e nitretado por NDE	101
5.4. Ensaio de fadiga axial em corpos de prova ABNT 4140.....	102
5.5 Caracterização microestrutural e ensaios de dureza em amostras 4140	105
5.5.1. Morfologia das superfícies usinadas por EDM e nitretadas por NDE	105
5.5.2. Microestrutura de amostras ABNT 4140 usinadas por EDM e nitretadas por NDE.....	108
5.5.3. Microdureza Vickers em amostras ABNT 4140	110
5.5.4. Fractografias das superfícies fraturadas por fadiga axial (MEV)	116
5.6 Considerações gerais sobre os resultados do trabalho.....	120

6. CONCLUSÕES	122
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	123
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124
ANEXO A – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO ABNT 4140.....	129

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo aborda introdução, justificativa e relevância deste trabalho.

1.1. Aspectos gerais

A maioria das falhas em componentes e equipamentos mecânicos acontece devido a cargas cíclicas ou variáveis no tempo, e não a cargas estáticas. Essas falhas ocorrem, tipicamente, em níveis de carga inferiores aos valores da resistência ao escoamento dos materiais (NORTON, 2004; SHIGLEY, MISCHKE e BUDYNAS, 2005). A característica mais distinguível dessas falhas é que os valores de tensões repetem muitas vezes, sendo denominado de falha por fadiga.

Segundo Norton (2004) e Collins (2014), foi reconhecido que o processo de falha por fadiga envolve três estágios: Primeiramente ocorre o estágio de iniciação da trinca, em seguida a propagação da trinca e, finalmente, o estágio terminal ou ruptura repentina devido ao crescimento rápido e instável da trinca. O primeiro estágio pode ter uma pequena duração, o segundo envolve o maior tempo da vida da peça e o terceiro e último estágio é instantâneo. Tradicionalmente, os modelos para análise e predição de falha por fadiga englobam todos os três estágios juntos em uma relação tensão-número de ciclos (S-N).

De acordo com Norton (2004), Shigley e Mischke e Budynas (2005), existem três modelos fundamentais da vida sob fadiga em uso em projeto e análise e, cada um possui uma área de aplicação e um propósito. As abordagens são: o modelo tensão-número de ciclos (S-N), o modelo deformação-número de ciclos (ϵ -N) e o modelo de mecânica da fratura linear-elástica (MFLE). Tais métodos tentam prever a vida de uma peça, em números de ciclos (N) até a ocorrência de falha, para um nível de carregamento especificado.

Collins (2014) afirma que dois domínios de carregamento cíclico foram definidos, considerando-se as deformações cíclicas induzidas predominantemente elásticas ou plásticas. Quando as cargas cíclicas são relativamente baixas, os ciclos de deformação são restritos ao limite elástico e vida longa ou elevado número de ciclos é observado. Neste caso, o domínio é chamado de fadiga de alto ciclo. Quando as cargas cíclicas são relativamente elevadas, níveis significativos de deformação plástica são induzidos durante cada ciclo, e vida curta ou baixo número

de ciclos é observado, o domínio é chamado fadiga de baixo ciclo. A fadiga de alto ciclo predomina na maioria dos meios de projeto.

A resistência à fadiga é considerada propriedade dinâmica importante, sendo influenciada pela condição da superfície. É medida em termos do número de ciclos para falha do corpo de prova sob determinada carga (MACHADO *et al.*, 2009).

Diante do exposto, percebe-se que o entendimento do comportamento dos materiais frente a solicitações de fadiga é de relevância para o contínuo aprimoramento da indústria moderna. A resposta do material frente a solicitações de fadiga esta relacionada às características e condições de processamento deste.

Um dos métodos para aumentar o desempenho em fadiga consiste em impor tensões residuais de compressão em fina camada da superfície do material. Uma tensão de tração de origem externa atuando na superfície do material será parcialmente anulada e reduzida em magnitude pela tensão residual de compressão. O efeito resultante que se tem é a redução da probabilidade de formação de uma trinca e conseqüentemente falha por fadiga (CALLISTER Jr. e RETHWISCH, 2012).

O processo de Usinagem por Descargas Elétricas (EDM – *Electrical Discharge Machining*), também conhecido como eletroerosão, é baseado no princípio da remoção de material por erosão térmica causada por descargas elétricas. Apesar do princípio ser conhecido desde a descoberta da eletricidade, somente em 1940 foi construída a primeira máquina que o utiliza este processo. A máquina EDM é composta basicamente de eletrodo ferramenta, peça, fonte de corrente contínua e fluido dielétrico. A descarga elétrica ocorre através do fluido dielétrico quando a diferença de potencial entre a peça e o eletrodo é suficientemente elevada, removendo pequena quantidade de metal da superfície da peça. O fluido dielétrico atua como isolante até que a diferença de potencial seja suficientemente alta, retira partículas erodidas de metal da região usinada e resfria eletrodos ferramenta e peça. Os fluidos dielétricos mais comuns são hidrocarbonetos de origem mineral e água deionizada.

Este processo é usual na fabricação de peças compostas por materiais que apresentam difícil usinabilidade pelos processos convencionais e na obtenção de formas complexas com elevada precisão dimensional. Isso se deve ao fato da eliminação do material por faiscamento exige o movimento de penetração do eletrodo que assegura a continuidade da remoção do material (SOUZA, 2013). A aplicação mais usual deste processo está nas ferramentarias na produção de

moldes e matrizes para estampagem e na indústria aeroespacial no que tange a fabricação de componentes em ligas de latão resistentes como os aços inoxidáveis e superligas de titânio e a base de níquel (AMORIM, 2002).

Uma alternativa para minimizar este fenômeno da fadiga é o tratamento termoquímico de nitretação. Este consiste no endurecimento da superfície exterior (ou “casca”) de um componente de aço com o objetivo de melhorar a resistência ao desgaste e a fadiga (CALLISTER Jr. e RETHWISCH, 2012).

O processo de Nitretação por Descargas Elétricas (NDE) surgiu como alternativa de tratar termicamente e usinar simultaneamente. Yan, Tsai e Huang (2005) e Camargo, Costa e Raslan (2009) investigaram o uso de EDM com solução de água deionizada e ureia como fluido dielétrico para avaliar modificações ocorridas durante a usinagem de titânio. Os resultados evidenciaram formação de camada de nitreto de titânio (TiN), com modificações superficiais nos corpos de prova, refletidas na melhoria da resistência ao desgaste e atrito. Camargo, Costa e Raslan (2009), identificaram camada enriquecida por TiN com espessura e microdureza respectivamente da ordem de 7 μm e 60% superior em relação à matriz.

Esta técnica de enriquecer superfícies com nitretos por meio de descargas elétricas geradas em EDM foi também pesquisada por Santos (2013), Silva (2012); Raslan, Santos e Silva (2012), os quais realizaram o pedido de depósito de patente.

Segundo McGeough (1988), o processo EDM é definido como o bombardeamento de íons e elétrons contra a superfície da peça, promovendo a retirada de material por sublimação, deixando uma cavidade com o formato do negativo do eletrodo ferramenta. Esse processo, considerado como processo não convencional de usinagem, tem se destacado como um dos mais utilizados na fabricação de matrizes e moldes metálicos, devido à complexidade geométrica e de fabricação desses componentes. A indústria de moldes para transformação de plásticos emprega amplamente as técnicas de Desenho Auxiliado por Computador (CAD) e Manufatura Auxiliada por Computador (CAM) para atender a esta demanda de fabricação. Operações de usinagem por eletroerosão são necessárias em regiões de difícil acesso às ferramentas de corte convencionais, como usinagem de cavidades contendo cantos, na usinagem de materiais endurecidos e em superfícies com acabamento diferenciado. O processo EDM com cavidade emprega eletrodo com a cópia fiel do produto a ser usinado. Este eletrodo pode ser fabricado de cobre ou grafita (Souza, 2013).

A modelagem tridimensional (3D) dos eletrodos ferramenta e peça utilizados neste trabalho foram realizados utilizando sistema CAD, e a fabricação dos mesmos com o uso de sistemas CAM e máquinas de Comando Numérico Computadorizado (CNC).

1.2. Justificativa e relevância

A necessidade de novos e eficientes meios de desenvolvimento de produtos e fabricação industrial capazes de aumentar a vida de componentes e aperfeiçoar a produtividade cresce a cada ano. Mitchell (1996) afirma que, fadiga representa a maioria das falhas de serviço de veículos em terra, ar e mar, e em muitos componentes eletrônicos. Dowling (2007) relata que o custo envolvido em evitar falhas por fratura e em pagar por suas consequências em todos os setores da economia dos EUA era por volta de U\$119 bilhões em 1982, correspondendo a cerca de 4% do Produto Interno Bruto (PIB) daquele país. Estudo de fratura na Europa, relatados em 1991, também produziu custo global de 4% do PIB, e valor semelhante é provável que se aplique a todas as nações industriais, afirma Dowling.

Segundo Machado *et al.* (2009), durante a usinagem, o processo de remoção de cavaco cria superfície com camada diferente da existente anteriormente ao corte e, invariavelmente, com alterações subsuperficiais. As principais alterações observadas em operações de usinagem são agrupadas de acordo com sua origem, podendo ser de natureza mecânica ou metalúrgica.

Garcia, Spim e Santos (2012), afirmam que estudos têm mostrado à medida que o desenvolvimento tecnológico vem incorporando novos componentes e equipamentos submetidos continuamente a esforços dinâmicos e vibrações, fadiga passou a representar a causa de mais de 90% das falhas em serviço de componentes de materiais metálicos. Collins (2014) afirma que falhas por fadiga tem sido reconhecidas há cerca de 150 anos, mas somente com o advento dos maquinários de alta velocidade, alto desempenho e com o desenvolvimento da indústria aeroespacial, a atenção foi direcionada para tentar compreender melhor o processo de fadiga. Todavia, apesar de todo este conhecimento e esforço, fadiga inesperada continua a ocorrer, sendo ainda fenômeno apenas parcialmente

entendido, o qual exige dos engenheiros e pesquisadores a busca contínua de conhecimento para tratar o assunto.

O desgaste e a fadiga são os dois principais fatores limitantes da vida útil de matrizes de forjamento, sendo o material da matriz geralmente tratado termicamente. Eventualmente, em adição a esse tratamento, a nitretação, é exemplo de tratamento superficial que protege a superfície da matriz e prolonga sua vida útil. Santos (2013) concluiu que o processo de nitretação por descargas elétricas ocorre simultaneamente à usinagem por EDM e que alguns nitretos de ferro são formados, os quais contribuem para ganho de dureza da superfície nitretada.

Diante das considerações expostas, a avaliação da resistência à fadiga axial do aço ABNT 4140 nitretado por descargas elétricas apresenta-se como tema relevante. Desta forma, este trabalho visa responder às seguintes questões: Primeiramente, investigar sobre a usinagem e nitretação simultânea de cavidades, como corpos de prova para ensaios de fadiga, por meio de EDM. Segundo, avaliar a resistência à fadiga axial do aço ABNT 4140 nitretado por NDE utilizando como fluido dielétrico uma solução aquosa de ureia em água deionizada e comparar os resultados com os de amostras ABNT 4140 usinadas por EDM com água deionizada e usinadas pelo processo de torneamento CNC.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a resistência à fadiga axial do aço ABNT 4140 nitretado por descargas elétricas (NDE), com fluido dielétrico solução aquosa de ureia em água deionizada e comparar os resultados com os de amostras do ABNT 4140 usinadas por EDM com água deionizada e ainda usinadas pelo processo de torneamento CNC.

2.2 Objetivos específicos

- ✓ Caracterizar o aço ABNT 4140, material conforme recebido.
- ✓ Preparar três grupos de corpos de prova, eletrodos peça, fabricados com o aço ABNT 4140 em três condições de processamento:
 - Material no estado laminado, conforme recebido (CR), submetido ao processo de usinagem convencional de torneamento CNC;
 - Material nitretado por NDE, com fluido dielétrico e fonte de nitrogênio uma solução aquosa de ureia em água deionizada;
 - Material usinado por EDM com fluido dielétrico água deionizada.
- ✓ Realizar ensaios de fadiga axial de alto ciclo, sob carregamento cíclico de tração-tração, para os três grupos de corpos de prova.
- ✓ Gerar curvas tensão-número de ciclos (S-N) para ambos corpos de prova.
- ✓ Realizar caracterização microestrutural e ensaios de microdureza.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico estão descritos os principais temas estruturais deste trabalho.

3.1. Aços para nitretação

Os processos atuais de nitretação permitem que grande variedade de aços possa ser submetida a essa prática de tratamento superficial, desde aços simplesmente ao carbono até os ligados. Os aços para nitretação trazem em sua composição adições de alumínio que tem afinidade com o nitrogênio, favorecendo a penetração e difusão deste. Quando o processo mais comum de nitretação era o processo a gás, foram desenvolvidos alguns tipos de aços contendo como elementos de liga fundamentais o alumínio, o cromo e o molibdênio, por que os mesmos, nas condições de nitretação gasosa, facilitavam a formação de nitretos estáveis à temperatura ambiente. Esses aços foram designados “*Nitralloy*” e são utilizados atualmente. Os teores e os efeitos desses elementos de liga, além do carbono, são apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 - Teores e efeitos dos elementos de liga dos aços *Nitralloy*.

Elemento	Teor (%)	Efeito do elemento de liga
C	0,30 a 0,45	Confere ao aço temperabilidade e suporte adequado à camada nitretada (dura e fina)
Al	0,85 a 1,20	Formam prontamente nitretos; quanto maior o % destes, mais fácil a difusão do nitrogênio e tanto mais espessa a camada nitretada
Cr	0,90 a 1,80	
Mo	0,15 a 0,45	Diminui a fragilidade e confere resistência ao revenido às temperaturas da nitretação (1)
Ni	Normalmente ausente. (adição de 3,25 a 3,75)	Quando se deseja um núcleo de dureza mais elevada

Fonte: Chiaverini, 2012 (adaptado pelo autor, 2016).

(1) Não há revenido na nitretação; mas devido às temperaturas usadas no processo, poderia ocorrer o fenômeno da fragilidade de revenido, evitado pela presença do molibdênio.

A Tabela 2 indica o efeito desses e de outros elementos de liga sob o ponto de vista formação de nitretos e ação de endurecimento superficial.

Tabela 2 - Efeito de elementos de liga em relação à formação de nitretos

Elemento	Nitretos que se formam (com amônia)	Efeito do elemento de liga sobre o endurecimento superficial
Al	Al_3N_3	Muito forte
Cr	Cr_2N , CrN	Forte
Mo	-	Medíocre; entretanto, junto com o cromo é mais forte (aumenta a penetração)
Ni	-	Sozinho, nulo
Ti	TiN	Bastante forte (máximo com o Cr)
V	VN	Medíocre ou fraco; entretanto, é notável nos aços contendo Cr e Al.

Fonte: Chiaverini, 2012 (adaptado pelo autor, 2016)

Em alguns processos de nitretação, os tempos de tratamento são longos, o que encarece o processo, exige equipamento especializado e pode provocar aumento dimensional das peças de aço na nitretação (CHIAVERINI, 2012).

3.2 Aço ABNT 4140

Segundo a ASM (1990), o AISI ou SAE 4140 é utilizado em aplicações que requerem combinação de endurecimento moderado, boa resistência e tenacidade, sendo as condições de serviço moderadamente severas. Este material pode ser prontamente nitretado. Como outros aços martensíticos e ferríticos, o 4140 sofre uma transição de comportamento dúctil para frágil a baixas temperaturas. Esta temperatura de transição varia com o tratamento térmico e concentração de tensão. O aço 4140 está disponível em forma de barras, hastes, peças forjadas, chapas, placas, tiras e peças fundidas. Ele é usado em muitas peças de máquinas de alta resistência (algumas delas nitretadas), tais como bielas, virabrequins, juntas de direção, eixos, brocas de perfuração de poços de petróleo, hastes de pistão, componentes de bombas, tubos de alta pressão, grandes engrenagens industriais,

flanges, pinças, peças de máquinas-ferramenta, chaves, mandíbulas de pinças, rodas dentadas e parafusos.

3.2.1 Classificação e composição química do aço ABNT 4140

Uma das classificações mais generalizadas dos aços, de acordo com Chiaverini (2012) é a que considera a composição química e, dentre os sistemas de classificação, são muito usados os da AISI e SAE, os quais serviram de base para o sistema adotado no Brasil pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) por intermédio das normas NBR 6006: 1994 (atual ABNT NBR NM 87: 2000 - Aço carbono e ligados para construção mecânica - designação e composição química). Esta norma ABNT NBR NM 87 (2000) define a designação dos aços carbono e aços ligados, segundo sua composição química, com número de quatro (4) dígitos. Os dois primeiros dígitos indicam a classificação do tipo de aço. Os dois últimos indicam o valor médio dos limites do teor de carbono, expresso em centésimos por cento.

O ABNT 4140 que corresponde ao AISI 4140 ou SAE 4140 é classificado como aço ligado ao cromo-molibdênio (CrMo) com valor médio de 0,4% de carbono (C). Este aço possui médio teor de carbono, baixa liga de cromo molibdênio (CrMo) e possui limite de resistência a tração, limite de escoamento e resistência à fadiga superiores em comparação com aços carbono comum como o ABNT 1045.

A faixa de composição química deste aço, conforme dados da literatura e catálogos de fabricantes, esta apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química (% em peso) do aço ABNT/SAE 4140

C	Mn	P máx.	S máx.	Si	Cr	Mo
0,38-0,43	0,75-1,00	0,030	0,040	0,15-0,35	0,80-1,10	0,15-0,25

Fonte: SAE, 2000; Gerdau, 2011; ArcelorMittal, 2013.

A Tabela 4, adaptada do “*Metals Handbook*” e de Chiaverini (2012) resume os principais efeitos dos elementos de liga no aço 4140.

Tabela 4 - Efeitos dos elementos de liga principais no aço ABNT 4140

Elemento	Influência sobre a ferrita	Influência sobre a austenita (endurecibilidade)	Tendência formadora de carbonetos	Principais funções
Cr	Endurece ligeiramente; aumenta a resistência a corrosão	Aumenta a endurecibilidade moderadamente	Maior que o Mn	<ul style="list-style-type: none"> - Aumenta a resistência à corrosão e à oxidação; - Aumenta a endurecibilidade; - Melhora a resistência a altas temperaturas; - Resiste ao desgaste (com alto C)
Mn	Endurece acentuadamente – reduz um tanto a plasticidade	Aumenta a endurecibilidade moderadamente	Maior que o Fe; Menor que o Cr	<ul style="list-style-type: none"> - Contrabalança a fragilidade devida ao S - Aumenta a endurecibilidade economicamente
Mo	Produz o sistema endurecível por precipitação nas ligas Fe-Mo	Aumenta a endurecibilidade fortemente (Mo>Cr)	Forte: maior que o Cr	<ul style="list-style-type: none"> - Produz maior profundidade de endurecimento; - Contrabalança a tendência à fragilidade de revenido; - Eleva a dureza a quente, a resistência a quente e a fluência; - Melhora a resistência à corrosão - Forma partículas resistentes à abrasão
Si	Endurece com perda de plasticidade	Aumenta a endurecibilidade moderadamente	Negativa (grafitiza)	<ul style="list-style-type: none"> - Desoxidante; - Aumenta a resistência à oxidação e resistência de aços de baixo teor em liga; - Aumenta a endurecibilidade de aços contendo elementos não grafitizantes

Fonte: Chiaverini, 2012 (adaptado pelo autor, 2016).

3.2.2 Processos de aprimoramento de propriedades do aço ABNT 4140

Os tratamentos térmicos usuais para os aços são: normalização, recozimento, têmpera, revenido, coalescimento e os tratamentos isotérmicos (CHIAVERINI, 2012). A seguir estão descritos os tratamentos térmicos usuais aplicados ao ABNT 4140:

- Normalização: Consiste no aquecimento do aço a temperatura acima da zona crítica (entre 845 a 900 °C), durante tempo necessário para a homogeneização e solução dos carbonetos e elementos de liga no ferro gama, seguido de resfriamento ao ar calmo.

- Recozimento: Aquecimento do aço à temperatura acima da zona crítica, normalmente 845 a 870 °C, durante tempo necessário para solução dos carbonetos ou elementos de liga no ferro, seguido de resfriamento em forno. Tempo este que depende da espessura da parede do forno; retirar a peça com forno frio.

- Esferoidização: É um tipo de recozimento, consiste no aquecimento do aço a temperatura de 760 a 775 °C durante 6 a 12 hs; resfriar lentamente, dentro do forno.

- Têmpera: Aquecimento do aço até sua temperatura de austenitização - entre 815 e 870 °C – seguido de resfriamento rápido. Manter pelo menos 1 a 2 horas na temperatura de 175-230 °C ou 370-675 °C; resfriamento em ar frio ou em água.

- Revenimento: Tratamento térmico que normalmente acompanha a têmpera, pois elimina os inconvenientes produzidos por esta; além de aliviar ou remover as tensões internas, corrige as excessivas dureza e fragilidade do material, aumentando sua ductilidade e resistência ao choque.

De acordo com Chiaverini (2012) o tratamento térmico de normalização visa refinar e uniformizar a granulação grosseira de peças de aço fundido ou peças depois de laminadas ou forjadas. Os constituintes que se obtém após a normalização são ferrita e perlita fina, ou cementita (Fe_3C) e perlita fina. Eventualmente, dependendo do tipo de aço, pode-se obter a bainita, porém, os aços hipoeutetóides (aqueles com teor de carbono até 0,77%) são constituídos estruturalmente, à temperatura ambiente, de ferrita e perlita. Este tratamento desfaz os efeitos de quaisquer tratamentos termofísicos ou mecânicos anteriores, melhora as características de usinagem, modifica e refina estruturas dendríticas e confere ao aço melhores condições para têmpera posterior.

O tratamento térmico de recozimento é realizado com o fim de:

- remover tensões devidas aos tratamentos mecânicos a frio ou a quente;
- diminuir a dureza para melhorar a usinabilidade do aço;
- alterar as propriedades mecânicas como resistência, ductilidade, etc.;
- modificar características elétricas e magnéticas;
- ajustar o tamanho de grão;
- regularizar a textura bruta de fusão;

- produzir microestrutura definida;
- eliminar enfim os efeitos de quaisquer tratamentos térmicos ou mecânicos a que o aço tiver sido anteriormente submetido.

O tratamento genérico recozimento abrange dentre outros tratamentos específicos o recozimento total ou pleno, que consiste no aquecimento do aço acima da zona crítica durante tempo necessário e suficiente para ter-se a solução do carbono ou dos elementos de liga no ferro gama, seguido de resfriamento lento, o qual pode significar manter a peça no interior do forno e controlar a velocidade de resfriamento do mesmo ou desligar o forno com a peça dentro, após o ciclo de aquecimento e deixar que a peça de aço esfrie ao mesmo tempo que o forno. Nessas condições, obtém-se a perlita grosseira que é a microestrutura ideal para melhorar a usinabilidade dos aços de baixo e médio teor de carbono. Os microconstituintes estruturais que resultam do recozimento pleno dos aços hipoeutetóides, como o caso do ABNT 4140, são a perlita e ferrita.

Objetivos do recozimento total ou pleno:

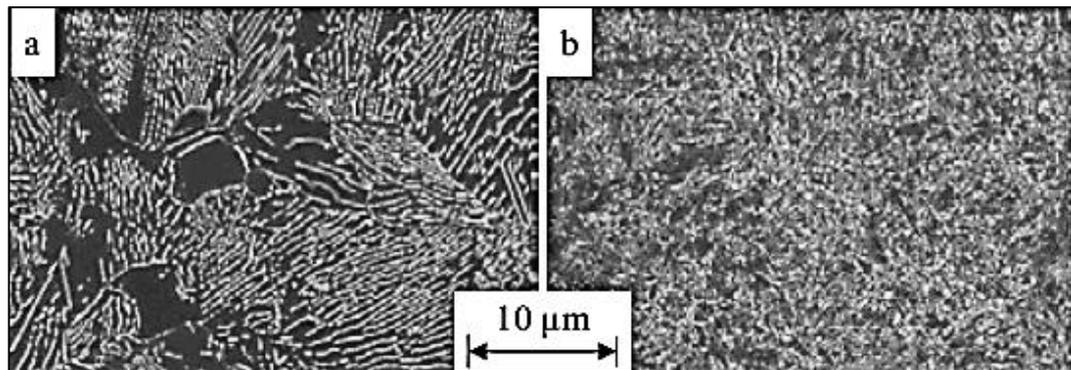
- aliviar tensões;
- reduzir dureza;
- melhorar usinabilidade;
- desfazer o efeito de tratamentos termofísicos ou mecânicos anteriores.

Tempo de encharque é o tempo de manutenção em determinada temperatura após equalização da mesma em todos os pontos da peça. Este tempo é basicamente 30 (trinta) minutos para cada 25 mm de seção e mais 15 minutos para cada 25 mm de seção a mais.

3.2.3 Microestrutura e propriedades mecânicas do aço ABNT 4140

Klocke *et al.*, (2016) investigaram o aço AISI 4140 em dois estados de microestrutura: normalizado e temperado e revenido. A microestrutura dos materiais base está apresentada na Figura 1, sendo: microestruruta (a) ferrita e perlita. A perlita é caracterizada pela disposição lamelar de ferrita e cementita. Ao passo que a microestrutura temperada e revenida (b) possui ferrita como matriz e Fe_3C (cementita) como partículas finas.

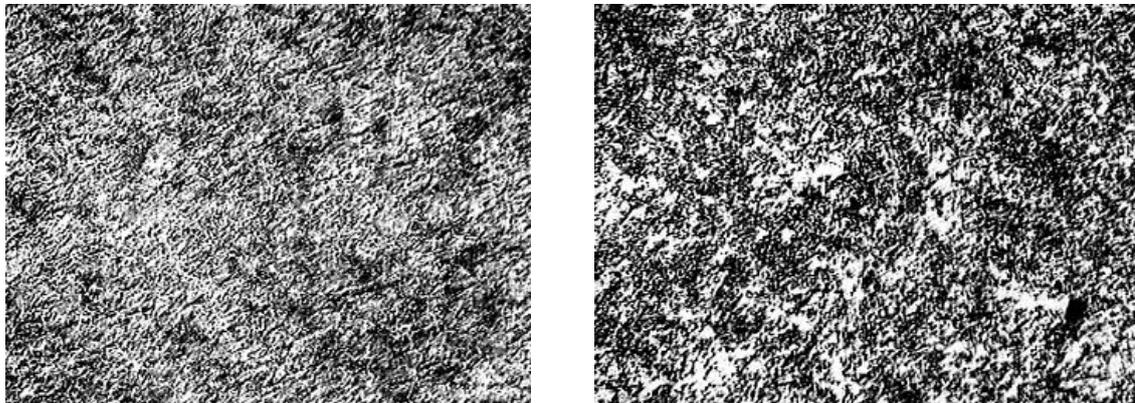
Figura 1 - Aspecto micrográfico do aço AISI 4140 (MEV).



Fonte: Klocke *et al.*, 2016.

Lopes, Sales e Palma (2008) conduziram investigação sobre o ABNT 4140, material recebido no estado laminado em forma de barra redonda com diâmetro de 15,88 mm (5/8"). Os autores afirmam que a microestrutura deste aço é composta de ferrita e perlita. A micrografia de amostra laminada esta apresentada na Figura 2 com as respectivas ampliações: 200x e 500x.

Figura 2 - Micrografia do aço ABNT 4140 em amostra virgem (laminada).



Fonte: Lopes, Sales e Palma, 2008.

Segundo a ASM (1990), não é prática, definir limitações sobre resistência à tração ou dureza para barras de aço carbono ou de liga na condição de laminadas. Para barras de aço recozidas, existe uma tensão de tração máxima, ou uma dureza máxima que pode ser esperada para cada tipo de aço. Para barras de aço normalizadas e temperadas e barras temperadas e revenidas, é especificado a dureza máxima e mínima ou a tensão máxima e mínima de tração. Para qualquer propriedade mecânica, a faixa especificada varia com a resistência à tração.

A Tabela 5 apresenta a classificação de dureza e usinabilidade do aço ABNT/AISI/SAE 4140 no estado recozido e trefilado a frio.

Tabela 5 - Classificação de dureza e usinabilidade do aço AISI/SAE 4140

Designação AISI/SAE	Usinabilidade (%)	Condição	Faixa de dureza típica (HB)	Microestrutura
4140	65 (1)	Recozido e trefilado a frio	187 a 229	Predominantemente perlita lamelar e ferrita

Fonte: ASM, 1990.

(1) Usinagem com ferramentas de aço e usinabilidade de 100% para o aço 1212.

A dureza mínima limite esperada para barras de aço laminadas a quente, tarugos e placas recozidas em siderurgias comuns, do aço 4140 esta apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Dureza mínima limite esperada para barras 4140 laminadas a quente.

Designação	Dureza (HB)	
	Placa	Tarugo
AISI 4140	207	197

Fonte: ASM, 1990.

A Tabela 7 apresenta propriedades mecânicas principais do ABNT 4140.

Tabela 7 - Propriedades mecânicas do ABNT 4140 normalizado e recozido.

Designação AISI-SAE / Condição (1)	LRT (MPa)	LE (MPa)	Alongamento (%) (2)	Redução de área (%)	Dureza (HB)
4140 / Normalizado à 870°C	1020	655	17,7	47	302
4140 / Recozido à 815°C	655	420	25,7	57	197

Fonte: ASM, 1998.

(1) Granulação fina.

(2) Em 50 mm (2")

As principais propriedades mecânicas do aço ABNT 4140 beneficiado estão apresentadas na Tabela 8, conforme Gerdau (2011).

Tabela 8 - Propriedades mecânicas do aço ABNT 4140 beneficiado.

Designação	LRT (MPa)	LE (MPa)	Alongamento (%)	Redução de área (%)	Dureza (HB)
ABNT 4140 (1)	1000-1200	750	mín. 11	mín. 45	300 - 340

Fonte: Gerdau, 2011.

(1) Temperado e revenido (bitolas \leq 40 mm)

A dureza do aço ABNT 4140 laminado/normalizado e recozido estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Dureza (HB) do aço ABNT 4140 - construção mecânica.

Designação	Laminado/normalizado (HB)	Recozido (HB)
ABNT 4140 (1)	229 - 350	máx. 228

Fonte: Gerdau, 2011.

(1) Bitolas \leq 40 mm

As barras laminadas para construção mecânica são obtidas por laminação a quente de tarugo proveniente do lingotamento contínuo, sendo aptas para emprego em aplicações, como trefilação, forjarias, agroindústria e metal mecânica (ARCELORMITTAL, 2010).

Chiaverini (2012) afirma que nos aços recozidos, os dois microconstituintes essenciais são:

- ferrita – isto é, ferro alfa contendo elementos dissolvidos;
- carboneto – essencialmente a cementita (650 HB) ou carboneto de ferro contendo elementos dissolvidos ou carbonetos essenciais contendo ferro e elementos de liga.

A tendência geral de elementos químicos formadores de carbonetos manifestam-se, geralmente, na ordem crescente: Mn, Cr, Mo, W, Ta, V, Nb e Ti.

3.3 Fadiga em aços

Fadiga é um termo geral aplicado à separação repentina e catastrófica de um componente de máquina em duas ou mais partes, como resultado da aplicação de cargas ou deformações variáveis por um período de tempo. A falha ocorre por meio da iniciação e propagação estável de trinca, até que esta torne instável e propague repentinamente até a falha. Períodos de repouso, com a tensão de fadiga removida, não levam a melhora alguma ou recuperação dos efeitos da solitação cíclica anterior. Portanto, o dano produzido durante o processo de fadiga é cumulativo. Os carregamentos e as deformações que causam a falha por fadiga são tipicamente muito inferiores aqueles da falha por carregamento estático (COLLINS, 2014).

Este fenômeno da fadiga foi observado pela primeira vez por volta de 1800, quando eixos de um vagão ferroviário começaram a falhar após pequeno período em serviço. Apesar de serem feitos de aço dúctil, exibiam características de fratura frágil. Os eixos haviam sido projetados com toda perícia e engenharia disponíveis na época, as quais, segundo Norton (2004), baseavam-se em experiências decorrentes de estudos com estruturas carregadas estaticamente. Cargas dinâmicas era um fenômeno novo, resultantes da introdução das máquinas movidas a vapor. Esses eixos estavam fixos às rodas e giravam solidários a elas. Desse modo, a tensão de flexão em qualquer ponto da superfície do eixo varia ciclicamente entre valores positivos e negativos, denominado de carregamento alternado.

Conforme Shigley, Mischke e Budynas, (2005), as falhas por fadiga têm aparência similar à de fratura frágil, uma vez que superfícies de fratura são planas e perpendiculares ao eixo de tensão, com ausência de estrição. As características de fratura de falha por fadiga, contudo, são diferentes daquelas de fratura frágil estática, surgindo de três estágios de desenvolvimento. O *estágio I* corresponde ao início de uma ou mais microtrincas, causadas por deformação plástica cíclica seguida de propagação cristalográfica estendendo-se por dois a cinco grãos relativamente à origem. As trincas do estágio I não são normalmente discerníveis a olho nu. O *estágio II* compreende a progressão de micro a macrotrincas, formando superfícies de fratura com platôs paralelos, separados por sulcos também paralelos. Tais platôs são normalmente lisos e normais na direção da máxima tensão de tração. Essas superfícies podem ser onduladas e escuras e ter bandas leves conhecidas como *marcas de praia* ou *marcas de concha de ostra*. Durante o carregamento cíclico, tais

superfícies fissuradas abrem e fecham, roçando-se umas nas outras, e a aparência das marcas de praia depende das mudanças no nível e na frequência do carregamento, bem como da natureza corrosiva do meio. O *estágio III* ocorre no ciclo de carga final, quando o material remanescente da seção transversal da peça não pode mais suportar as cargas, resultando em fratura rápida e repentina. Uma falha de estágio III pode ser frágil, dúctil ou uma combinação de ambas. Com bastante frequência, as marcas de praia, caso existentes, e os padrões possíveis na fratura de estágio III, denominados *linhas de divisa*, apontam para a origem das trincas iniciais. “A falha por fadiga deve-se à formação de trinca e propagação. Trinca de fadiga terá início, tipicamente, em descontinuidade no material em que a tensão cíclica é máxima”.

De acordo com Dieter (1981) os estudos relacionados com as variações estruturais básicas experimentadas por metal sujeito a tensões cíclicas levaram à divisão do processo de fadiga nos seguintes estágios:

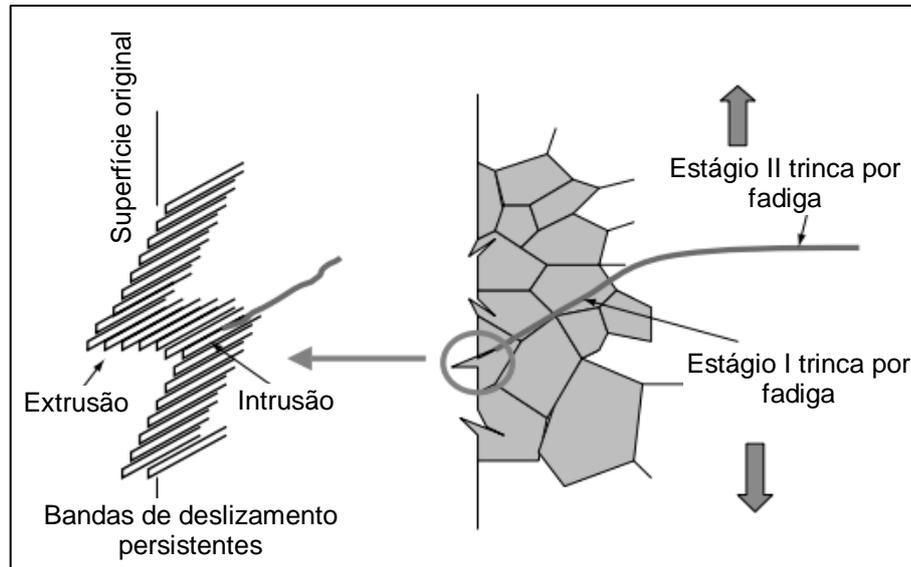
1. Iniciação da trinca - inclui o desenvolvimento inicial dos danos causados por fadiga, os quais podem ser removidos por meio de tratamento térmico adequado.
2. Crescimento da trinca em banda de deslizamento - relativo ao aprofundamento da trinca inicial nos planos de alta tensão cisalhante. Este estágio é frequentemente chamado estágio I de crescimento de trinca.
3. Crescimento de trinca nos planos de alta tensão de tração - envolve o crescimento de uma trinca bem definida em direção normal à tensão de tração máxima. Este estágio é geralmente chamado estágio II de crescimento de trinca.
4. Ruptura final estática - ocorre quando a trinca atinge um tamanho tal que a seção transversal resistente não pode mais suportar a carga.

A nucleação de trincas é normalmente encontrada em regiões conhecidas como bandas de deslizamentos. No entanto, as ocorrências destas não são os únicos meios de nucleação de trincas de fadiga. Segundo Lee *et al.* (2005), quaisquer regiões de concentração de tensões como bandas de deslizamento, inclusões, partículas de segunda fase, contornos de grãos, poros, pites de corrosão ou descontinuidades geométricas atuam como fontes de nucleação de trincas. A trinca inicia no plano de cisalhamento próximo a um concentrador de tensões. Uma vez que a trinca é nucleada, os próximos passos são os estágios de propagação (estágio I e II de crescimento da trinca). No estágio I a trinca propaga-se ao longo dos planos de cisalhamento máximos até atingir alguns diâmetros de grãos, quando

então a trinca passa a se propagar na direção normal à máxima tensão de tração (estágio II de crescimento) até atingir a ruptura final.

A Figura 3 ilustra o processo de fadiga com disposição das bandas de deslizamento e a influência destas na nucleação de trincas por fadiga.

Figura 3 - O processo de fadiga a partir de bandas de deslizamento.

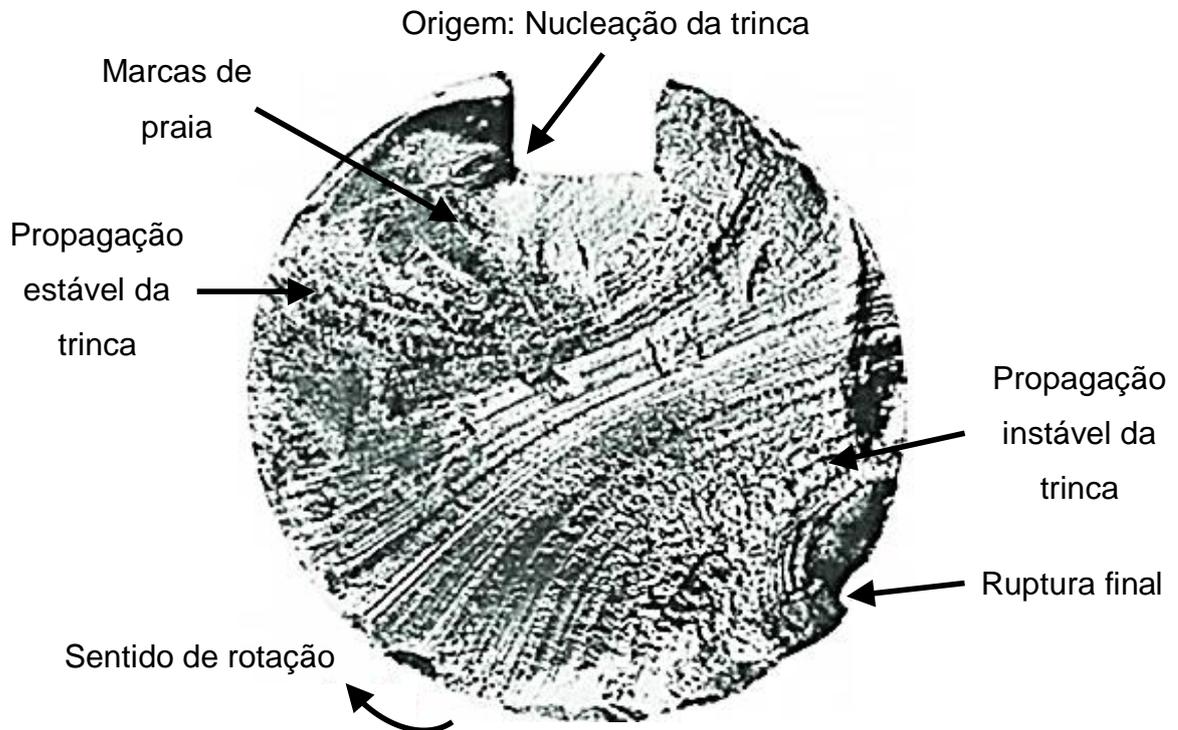


Fonte: Lee *et al.*, 2005.

Norton (2004) afirma que o exame a olho nu de peças que falharam devido à fadiga exibe padrão típico. Existe uma região proveniente do local da microtrinca original de aparência polida e outra região que tem aparência áspera, semelhante a fratura frágil. A região de aparência polida em torno da trinca frequentemente exibe *marcas de praia*, assim chamadas porque as mesmas se assemelham às ondulações deixadas na areia, com o movimento cíclico das ondas da orla marítima. As marcas de praia surgem devido aos ciclos de início e parada do crescimento da trinca e circundam a origem da trinca, usualmente em um entalhe da peça ou em outro intensificador de tensão interna. A região de fratura frágil corresponde à porção que apresentou ruptura repentina quando a trinca atingiu o seu tamanho limite. Esta zona de fratura frágil pode estar representada, geralmente, por pequena área que restou da seção transversal original da peça.

A Figura 4 apresenta fractografia de eixo circular de aço 1040 com rasgo de chaveta que falhou após carregamento cíclico de flexão rotativa e as etapas do processo de fratura.

Figura 4 - Aspecto da superfície fraturada por fadiga e etapas do processo.



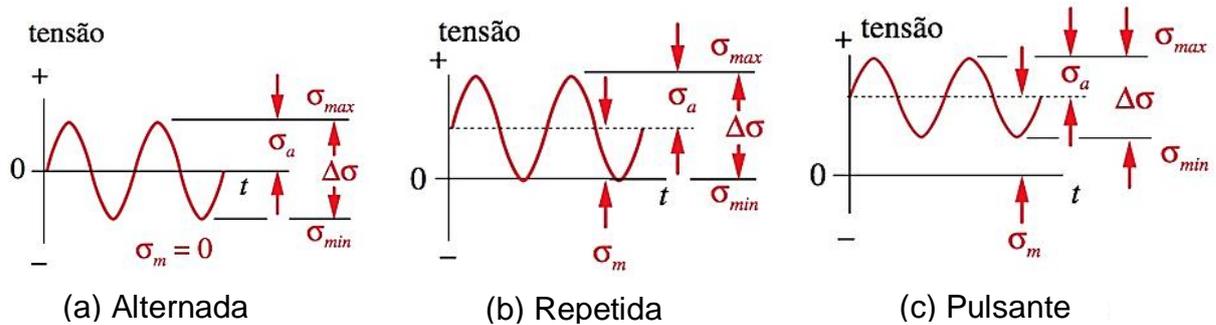
Fonte: Norton, 2004 (Adaptado pelo autor, 2016).

Observa-se que a trinca formou no rasgo de chaveta (nucleação da trinca). A região próxima ao início da trinca corresponde à área na qual a trinca propagou lentamente (propagação cíclica e estável). A falha repentina ou catastrófica ocorreu na região que possui uma textura opaca e fibrosa.

Conforme Callister Jr. e Rethwisch (2012) a tensão aplicada pode ser de natureza axial (tração, compressão), de flexão (dobramento) ou de torção. Em geral, três diferentes tipos de tensão variável *versus* tempo são possíveis. Uma está representada esquematicamente na Figura 5(a) como dependência regular e senoidal em relação ao tempo, em que a amplitude é simétrica em relação a um nível médio de tensão igual a zero, por exemplo, alternando entre tensão de tração máxima ($\sigma_{\text{máx.}}$) e tensão de compressão mínima ($\sigma_{\text{mín.}}$) de igual magnitude. Isso é denominado *ciclo de tensão alternada*. Outro tipo, conhecido como *ciclo de tensão repetida*, está ilustrado na Figura 5(b); na qual a forma da onda varia de zero a máximo, com valor médio igual à componente alternada. O terceiro caso, apresentado na Figura 5(c), ilustra versão do caso mais geral (denominado de *ciclo de tensão pulsante*) no qual todas as componentes tem valor diferente de zero.

(Observe que qualquer parcela da onda, para este caso (5c), poderia estar também no regime de tensão de compressão). Qualquer dos tipos de onda citados pode ser caracterizado por meio de dois parâmetros: componentes média e alternada, valores máximo e mínimo ou através da razão desses valores (NORTON, 2004).

Figura 5 - Curvas senoidais representando tensões variantes no tempo.



Fonte: Norton, 2004.

Os termos e símbolos apresentados na Figura 5 estão definidos conforme Equações de (1) a (5) (NORTON, 2004; CALLISTER Jr. e RETHWISCH, 2012; COLLINS, 2014):

$$\Delta\sigma = \sigma_{\text{máx.}} - \sigma_{\text{mín.}} \quad (1)$$

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{\text{máx.}} - \sigma_{\text{mín.}}}{2} \quad (2)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\text{máx.}} + \sigma_{\text{mín.}}}{2} \quad (3)$$

Duas razões podem ser definidas:

$$R = \frac{\sigma_{\text{mín.}}}{\sigma_{\text{máx.}}} \quad (4)$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (5)$$

No qual:

$\Delta\sigma$ Intervalo de tensões;

σ_a Amplitude da variação de tensão (ou componente alternada);

σ_m	Tensão média cíclica;
$\sigma_{m\acute{a}x.}$	Tensão máxima no ciclo;
$\sigma_{m\acute{i}n.}$	Tensão mínima no ciclo;
R	Razão de tensão;
A	Razão de amplitude.

Por convenção, as tensões de tração são positivas e tensões de compressão negativas. Quando a tensão é alternada (Figura 5(a)), $R=-1$ e $A=\infty$. Quando a tensão é repetida (Figura 5(b)), $R=0$ e $A=1$. Quando as tensões máxima e mínima tem o mesmo sinal (Figura 5(c)), tanto R quanto A são positivos e $0 \leq R \leq 1$. Esses padrões de variação da carga podem resultar aplicação de tensões de flexão, de torção, normais (axial) ou combinação desses tipos de solicitação (NORTON, 2004). Esta variação de carga com o tempo é responsável por falhas por fadiga.

Este método resultou na abordagem do diagrama tensão-número de ciclos (curva S-N, ou diagrama de Wöhler) e do modelo de teste de componentes para o projeto de fadiga. A resistência à fadiga de metais foi investigada por Wöhler, com realização de experimentos de flexão rotativa. Os resultados foram relatados como a curva familiar de S-log N (tensão-log número de ciclos para a falha), da qual o conceito de "limite de resistência" (um limite de tensão abaixo do qual a falha por fadiga não deverá ocorrer) encontra sua origem. Mitchell (1996) afirma que as falhas de metais devido a cargas repetidas foram primeiramente documentadas pelo alemão Wilhelm August Julius Albert (cerca de 1838). Desde aquela época, atenção considerável vem sendo dada para compreender o comportamento de deformação de metais sobre uma variedade de condições de carregamento, incluindo a fadiga.

Ficou esclarecido que fadiga é o resultado de cargas repetidas e cíclicas em um período de tempo que causa o escorregamento, ou deformação plástica do material, particularmente a nível local. Falhas de metais devido a cargas repetidas tornaram-se problema de engenharia reconhecido com o advento de girar ou alternar máquinas durante a revolução industrial no início dos anos 1800. Metais que eram conhecidos por serem dúcteis, foram observados por falharem com aspecto superficial de fratura frágil, pelo que foi considerado ser níveis de cargas "seguras". Desde aquela época, o problema da fadiga tem atormentado engenheiros. Fadiga representa a grande maioria das falhas de serviço de veículos em terra, ar e mar, e em muitos componentes eletrônicos (MITCHELL, 1996).

Esforço considerável tem sido despendido para determinar a natureza do problema de danos por fadiga e encontrar métodos para lidar com isso em projetos. Segundo Mitchell (1996), muitos pesquisadores fizeram contribuições pioneiras para a nossa atual compreensão do processo de fadiga. Bannantine, Comer e Handrock (1990) defendem que 95% dos casos de fadiga iniciam-se na superfície dos componentes. Estas trincas são aceleradas pela existência de tensões residuais de tração na superfície do componente. Componentes mecânicos com superfícies ásperas e irregulares apresentam limite de resistência à fadiga inferior aos com superfícies lisas (COLLINS, 1993; NORTON, 2004).

Os tratamentos térmicos e ou mecânicos produzem tensões internas (residuais), mudanças microestruturais e permanentes de forma e dimensões (distorções), que modificam o limite de resistência à fadiga do material. As tensões residuais de compressão aumentam o limite de resistência à fadiga, enquanto as de tração reduzem este limite (COLLINS, 1993).

Outro fator de influência na resistência a fadiga é o meio. Como exemplo, pode-se citar a influência dos processos corrosivos que causam de forma direta ou indireta o surgimento de trincas superficiais por onde se inicia o processo de fadiga. A associação dos dois efeitos, corrosão e fadiga, causam a falha do material em número de ciclos inferior ao estimado para cada situação específica isoladamente (BANNANTINE, COMER e HANDROCK, 1990; COLLINS, 1993; NORTON, 2004).

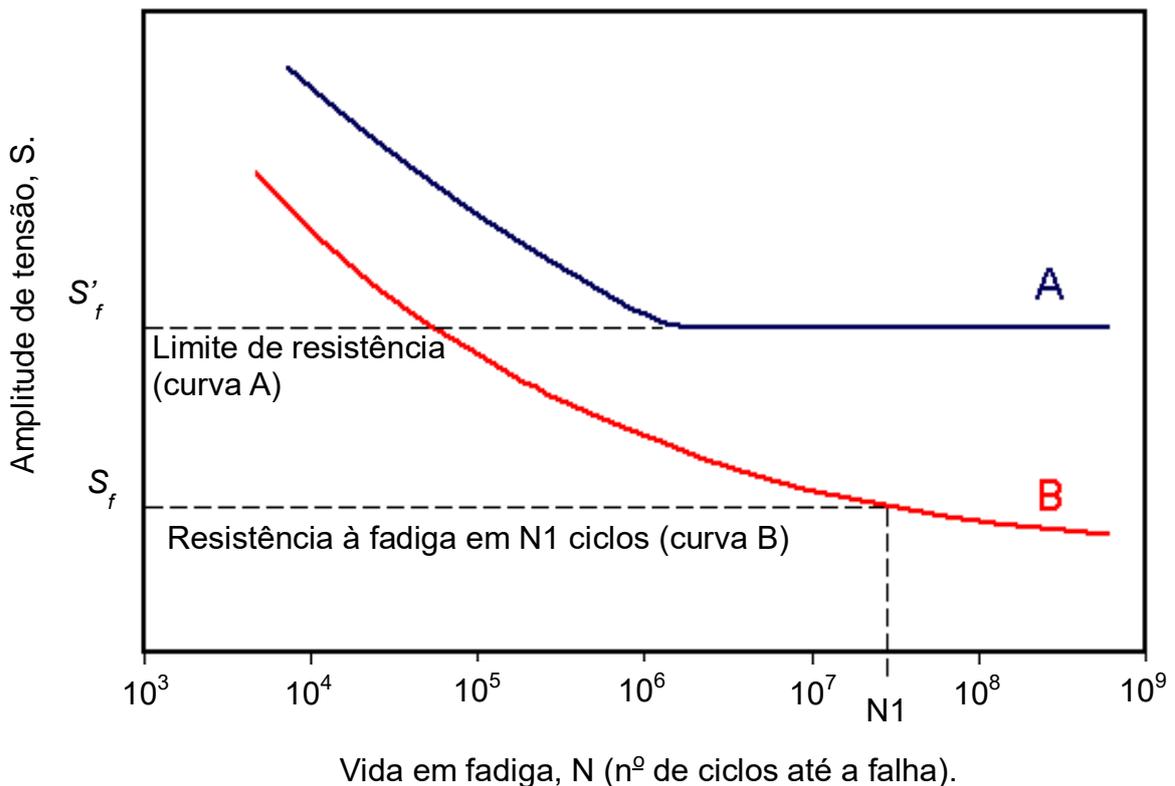
O projeto de peças de máquinas ou estruturas sujeitas à solicitação em fadiga é normalmente realizado com base nos resultados de ensaios realizados em laboratório com corpos de prova polidos do material de interesse. Dados básicos de fadiga na região de vida de ciclo são normalmente apresentados na forma de gráficos, tensão cíclica *versus* número de ciclos. Estes gráficos, denominados curvas S-N (tensão-vida em fadiga) ou diagrama de Wöhler, constituem informação de projeto de importância fundamental para peças de máquinas sujeitas a carregamento cíclico ou repetitivo.

De acordo com Garcia, Spim e Santos (2012) ensaio de fadiga consiste na aplicação de carga cíclica em corpo de prova apropriado e padronizado segundo o tipo de ensaio a ser realizado. É extensamente utilizado nas indústrias automobilísticas e aeronáuticas. Este ensaio é capaz de fornecer dados quantitativos relativos às características de um material ou componente ao suportar, por longos períodos, sem se romper, cargas repetidas e/ou cíclicas. Os dados do

teste de fadiga são geralmente indicados em gráfico log-log, com linha S-N real representando a média aritmética a partir dos dados de vários ensaios. Quando a curva é plotada na escala log-log, esta se torna linear a partir de um determinado número de ciclos. A porção da curva com inclinação negativa se chama região de vida finita e a assíntota horizontal é a região de vida infinita. O ponto de transição entre região de vida finita e infinita representa o limite de resistência à fadiga, abaixo do qual se supõe que não ocorre a nucleação de trinca de fadiga (LEE *et al.*, 2005).

A Figura 6 apresenta o diagrama de Wöhler, representado esquematicamente por dois materiais. Este plota a amplitude de tensão nominal (S) *versus* o número de ciclos até a falha (N) e representa os principais resultados de ensaio de fadiga que são: limite de resistência à fadiga (S'_f), resistência à fadiga (S_f) e vida em fadiga ou ciclos até a falha (N).

Figura 6 - Curvas S-N para materiais ferrosos (A) e não ferrosos (B)



Fonte: ETBX Engrasp, 2005; Callister Jr. e Rethwisch, 2012 (adaptado pelo autor, 2016).

Observa-se que para aços e ferros (curva A), o diagrama (S-N) apresenta um ponto de inflexão e a curva torna-se horizontal a partir deste. A resistência correspondente a este ponto é denominada limite de resistência à fadiga, " S'_f ", ou

limite de fadiga e ocorre em algum ponto entre 10^6 e 10^7 ciclos para materiais ferrosos (SHIGLEY, MISCHKE e BUDYNAS, 2005). Segundo Leser (2013), talvez a mais importante conquista de Wöhler seja a descoberta deste ponto de inflexão, o qual representa o limite de resistência à fadiga. Significa se as tensões ficarem abaixo deste limite, o material não falhará em fadiga, por não haver carga suficiente para causar nucleação e crescimento de trincas. Materiais não ferrosos não exibem limite de resistência à fadiga, conforme ilustrado na Figura 6 (curva B), a linha jamais torna horizontal. Para estes materiais, a ordenada do diagrama S-N é denominada resistência à fadiga S_f , e declaração dessa resistência deve sempre ser acompanhada do número de ciclos N ao qual ela corresponde.

Para estabelecer a resistência à fadiga de um material, muitos testes fazem necessários em decorrência à natureza estatística da fadiga. Para o ensaio de viga rotativa, uma carga de flexão constante é aplicada, e o número de revoluções (inversões de tensão) dessa viga requerido até a falha é registrado. O primeiro ensaio é realizado a tensão pouco inferior ao limite de resistência à tração do material. O segundo é feito a tensão menor que aquela utilizada no primeiro teste. O processo é continuado, e os resultados são traçados em diagrama S-N. Esse diagrama pode ser feito em papel semilog ou log-log. Para materiais ferrosos e ligas, o gráfico torna-se horizontal após o ponto que o material foi carregado durante certo número de ciclos. Traçar o diagrama utilizando função log enfatiza a flexão na curva, que poderia não ser aparente se traçados utilizando coordenadas cartesianas.

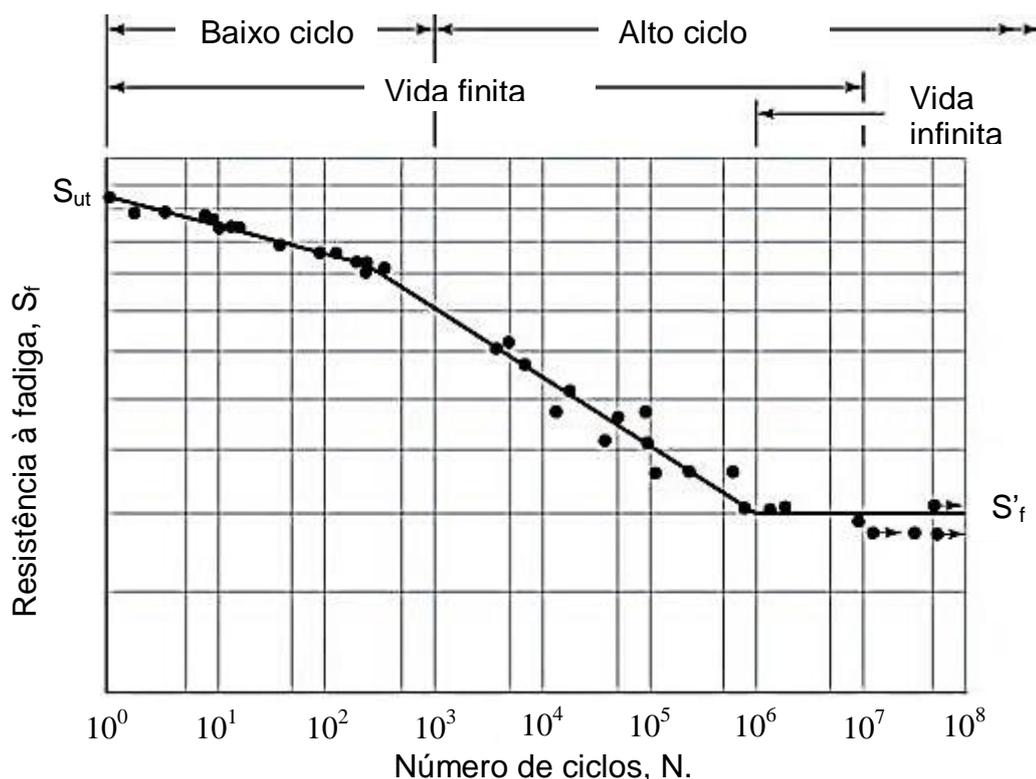
Com base nos três modelos de falha por fadiga introduzidos no capítulo 1, o método da vida sob tensão, baseado em níveis de tensão apenas, é o método mais tradicional, haja visto ser o mais simples de implementar para várias aplicações de projeto, além de ter muitos dados de suporte e representa de forma adequada aplicações envolvendo alta ciclagem. O método da vida sob deformação é especialmente eficaz em aplicações que envolvem fadiga de baixo ciclo. O método da mecânica de fratura assume que uma trinca já esteja presente e tenha sido detectada, sendo empregado para prever o crescimento dessa em relação à intensidade de tensão. Entretanto, é mais prático quando aplicado a estruturas grandes, com códigos computacionais e programa de inspeção periódico.

Com base no número de ciclos de tensão ou deformação, ao qual se espera que a peça seja submetida durante sua vida em operação, pode definir regime de fadiga de baixo ciclo ou de alto ciclo. Norton (2004) afirma que não existe uma linha

divisória bem definida entre os dois regimes e vários estudiosos sugerem uma ligeira distinção entre os mesmos. Dowling (2007) define a fadiga de alto ciclo como a que tem início por volta de 10^2 até 10^4 ciclos de tensão-deformação, com esse número variando de acordo com o tipo de material. De acordo com Norton (2004) e Shigley, Mischke e Budynas (2005), a vida de $1 \leq N \leq 10^3$ ciclos é geralmente classificada como fadiga de baixo ciclo, enquanto a de alto ciclo ocorre para $N > 10^3$ ciclos.

A Figura 7 distingue a fadiga de baixo ciclo e de alto ciclo, sendo a de alto ciclo relacionada à falha correspondente a ciclos de tensão maiores que 10^3 . Distingue ainda região de vida finita e infinita. A fronteira entre essas regiões pode não ser claramente definida, exceto para um material específico. No entanto, observa-se que esta fronteira se situa em algum ponto entre 10^6 e 10^7 ciclos para aços e ferros.

Figura 7 - Curva S-N de testes de fadiga axial completamente inversa



Fonte: Shigley, Mischke e Budynas, 2005 (adaptado pelo autor, 2016).

Observa-se que para a fadiga de baixo ciclo o nível de tensão é alto e conseqüentemente, espera-se vida curta ou pequeno número de ciclos para a falha. Enquanto fadiga de alto ciclo o nível de tensão é menor e longa vida ou alto número de ciclos para a falha é esperado.

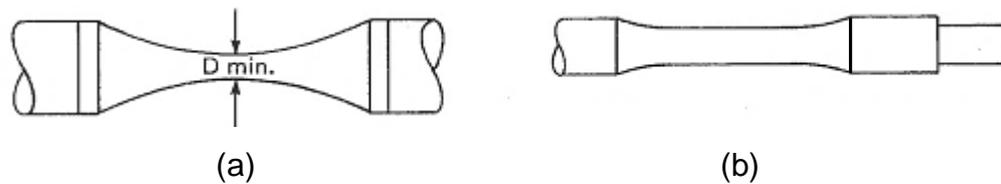
Conforme descrito anteriormente e afirmado por Shigley, Mischke e Budynas (2005) o método da vida sob tensão é o procedimento mais tradicional de fadiga utilizado em projeto e análise, com muitos dados publicados e disponíveis. É também o de mais fácil implementação para muitas aplicações de projeto e representa adequadamente aplicações de alta ciclagem. Além disso, o teste de fadiga de alto ciclo é especificado na norma ASTM E-466 (Prática padrão para a condução de ensaios de fadiga axial em materiais metálicos com amplitude constante e força controlada), cuja carga aplicada é cíclica entre dois níveis de tensão (mínima e máxima) especificados pelo pesquisador ou engenheiro de testes. A razão entre tensão mínima (vale) e tensão máxima (pico) é definido como R. Razão R com valor igual à menos um ($R = -1$), corresponde à carga completamente alternada encontrada nas experiências de Wöhler, e é geralmente utilizado para construir o diagrama S-N. Pesquisadores ou engenheiros de testes poderão também escolher diferentes razões de R, visando documentar os efeitos da média de tensão, ou atingir resultados mais próximos das condições reais de serviço.

Existem vários dispositivos e configurações para ensaios de fadiga de corpos de prova. Segundo Shigley, Mischke e Budynas (2005), para o método da vida sob tensão, para determinar a resistência de materiais sob a ação de cargas de fadiga, corpos de prova são sujeitos a forças repetidas ou variáveis de magnitudes especificadas, ao passo que ciclos ou inversões de tensão são contados até sua fratura. Collins (2014) afirma que na prática moderna, o método de teste utiliza máquinas de ensaio de fadiga axial, com malha fechada controlada por computador, que aplicam carga cíclica de forma uniforme a pequenos corpos de prova polidos.

A forma do corpo de prova varia de acordo com o tipo de solicitação e com as diversas normas propostas para o ensaio de fadiga. Em geral, os corpos de prova são de seção circular ou retangular, dependendo do produto, tendo na parte útil uma biconicidade ao longo do seu comprimento, com raio grande e contínuo, ficando o centro dessa parte útil com dimensão mínima (diâmetro ou os lados do retângulo). O grande raio usado evita a concentração de tensões pela ausência de mudança brusca de seção. A tensão aplicada ao corpo de prova deve sempre ser calculada pela dimensão mínima.

A Figura 8 apresenta desenhos esquemáticos de alguns tipos de corpos de prova para ensaios de fadiga: (a) para ensaio fadiga por flexão rotativa ou qualquer carregamento axial; (b) tipo paralelo, para fadiga por flexão rotativa ou torção.

Figura 8 - Desenhos esquemáticos de alguns corpos de prova de fadiga.



Fonte: Souza, 1982.

Os corpos de prova devem ser cuidadosamente usinados e polidos, com polimento final em direção axial, de modo a evitar riscos circunferentes (SHIGLEY, MISCHKE e BUDYNAS, 2005; ASTM E466-15).

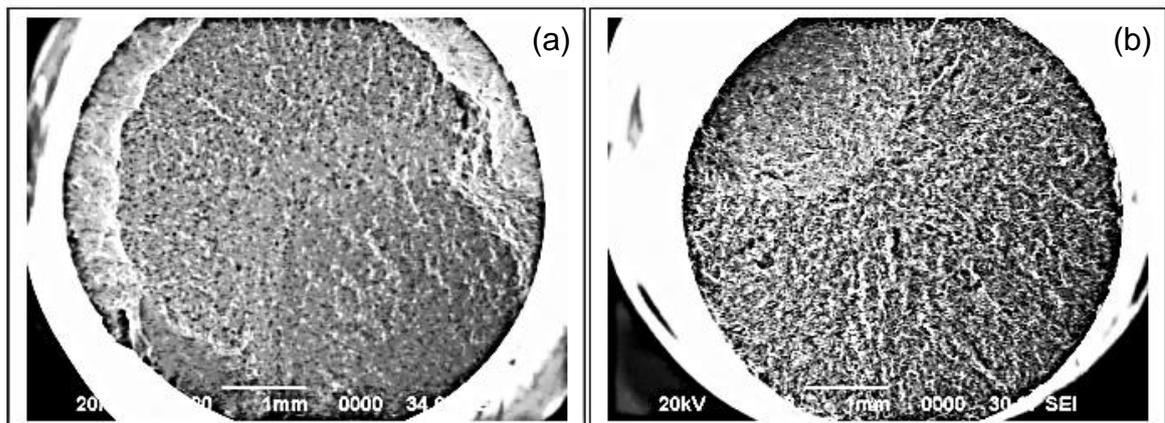
Segundo Souza (1982), fratura por fadiga sempre é acompanhada de deformação plástica localizada. Essa localização pode acontecer em um ponto de concentração de tensões como cantos vivos, entalhes, inclusões, trincas preexistentes, *pits* de corrosão, contornos de grão, contornos de macla, onde a trinca se inicia, sendo geralmente originada na superfície dos metais.

Martins (2010) pesquisou sobre a fadiga do aço para molas de válvulas SAE 9258 produzido industrialmente por lingotamento convencional e contínuo. O autor realizou ensaios de fadiga axial em equipamento INSTRON modelo 8801 (100 kN), razão de tensão ($R = 0,1$), corpos de prova confeccionados conforme norma ASTM E466, níveis de tensão de 80%, 70%, 60% e 50% da tensão de escoamento obtida no ensaio de tração dos materiais pesquisados, sendo realizados três ensaios de fadiga axial para cada nível de tensão especificado. Os resultados das análises fractográficas obtidas por meio de MEV das superfícies dos corpos de prova fraturados por fadiga axial, constatou que para todos os casos analisados, as fraturas tiveram início em pontos da superfície dos corpos de prova. Bathias, C.; Drouillac, L.; Le François, P (2001) *apud* Martins (2010) afirmam que essa característica das fraturas é típica dos ensaios de fadiga realizados entre baixo e alto ciclo (10^4 a 10^6 ciclos). Os aspectos de iniciação das trincas de fadiga obtidos pelos autores apresentaram-se morfologicamente similares em ambas pesquisas, de Bathias, C.; Drouillac, L.; Le François, P (2001) e de Martins (2010). Os pesquisadores afirmam ainda que há um consenso geral de trincas iniciadas a partir de 10^9 ciclos (giga ciclos) têm origem geralmente por defeitos internos do material, sendo esses defeitos ou variações de tamanhos de grãos, competem com defeitos superficiais para serem os causadores de fraturas por fadiga. Se a densidade de

defeitos for mais alta na superfície, uma competição pode ocorrer entre esta e o interior do material, e a iniciação da fratura poderá ocorrer pela superfície, fato este observado no trabalho de Martins (2010).

A Figura 9 apresenta superfícies de fratura por fadiga de corpos de prova produzidos por: (a) lingotamento contínuo; (b) lingotamento convencional, solicitados com nível de tensão de 60% da tensão de escoamento. Ampliação de 20x (MEV).

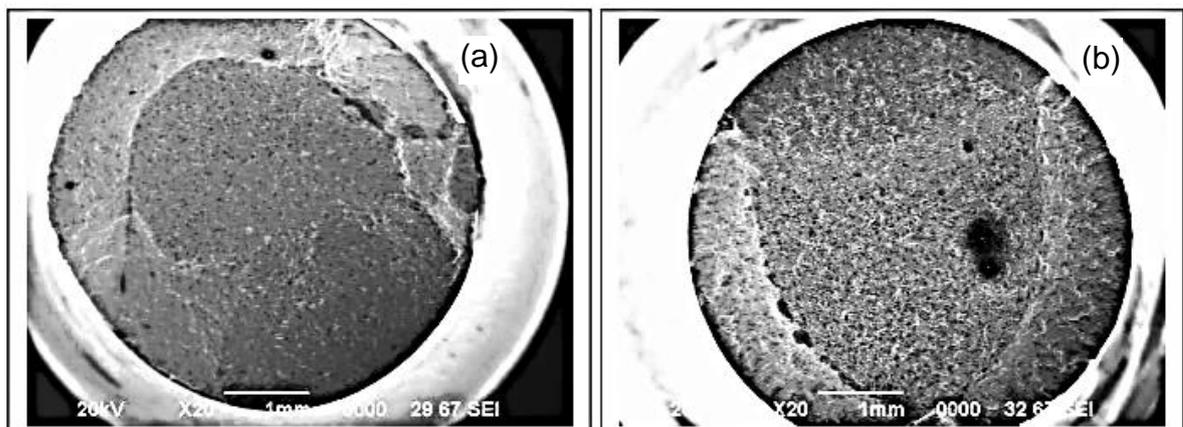
Figura 9 - Superfícies de fratura por fadiga - tensão 60% do limite de escoamento



Fonte: Martins, 2010.

A Figura 10 apresenta superfícies de fratura por fadiga de corpos de prova produzidos por: (a) lingotamento contínuo e (b) lingotamento convencional, solicitados com níveis de tensão respectivamente de 70% e 80% da tensão de escoamento. Ampliação de 20x (MEV).

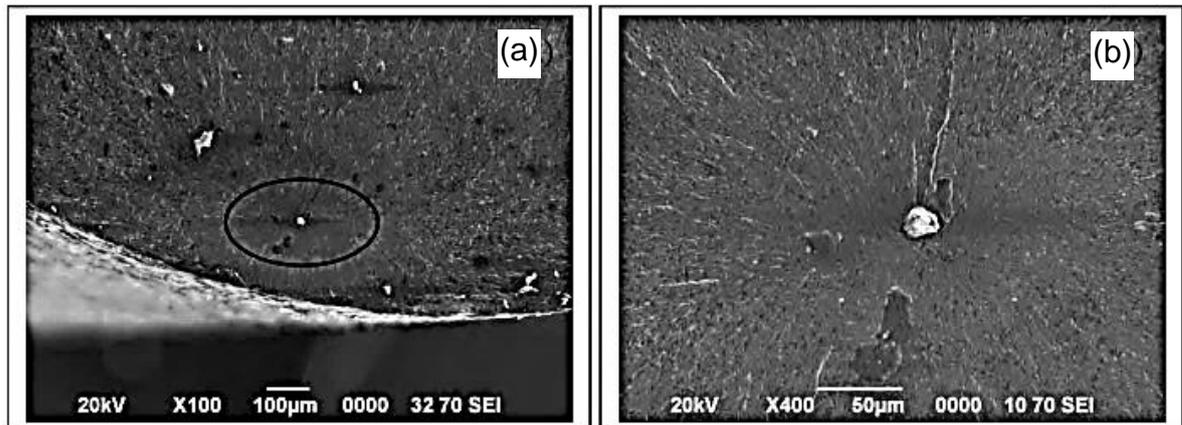
Figura 10 - Superfícies de fratura por fadiga - tensão de 70% e 80% do LE



Fonte: Martins, 2010.

A Figura 11 apresenta o aspecto da fratura por fadiga causada por inclusão numa mola de válvula produzida por lingotamento convencional: (a) Início da fratura (linhas radiais a partir da inclusão); (b) Inclusão maior que a permitida pelo método de controle Max-T ($> 10 \mu\text{m}$)

Figura 11 - Fratura por fadiga causada por inclusão em mola de válvula (MEV)

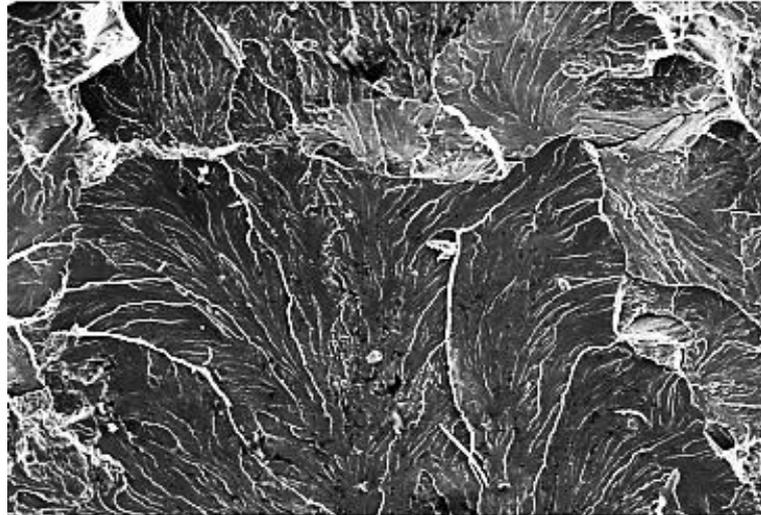


Fonte: Martins, 2010.

O pesquisador afirma que neste caso, de acordo com os resultados realizados por meio de EDS (*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*) na inclusão da Figura 11, onde se observou as quantidades relativas dos principais elementos químicos da inclusão, que possivelmente esta foi originada a partir de um descontrole na quantidade de fluxantes adicionados durante o processo de lingotamento convencional, juntamente com um descarte de material insuficiente (descarte da cabeça e pé após a laminação do lingote), ou seja, problemas ocasionados durante o processamento do material, sendo especificado pelo método de controle Max-T ausência de inclusões maiores que $10 \mu\text{m}$.

Um dos modos de fratura que ocorre em materiais metálicos é a clivagem, a qual corresponde à separação de planos cristalinos, com pouca deformação, com aspecto característico conforme pode ser visto nas Figuras 12 e 13. Observa-se aspecto das facetas de clivagem com marcas de "rios" característicos que indicam o sentido de propagação da fratura.

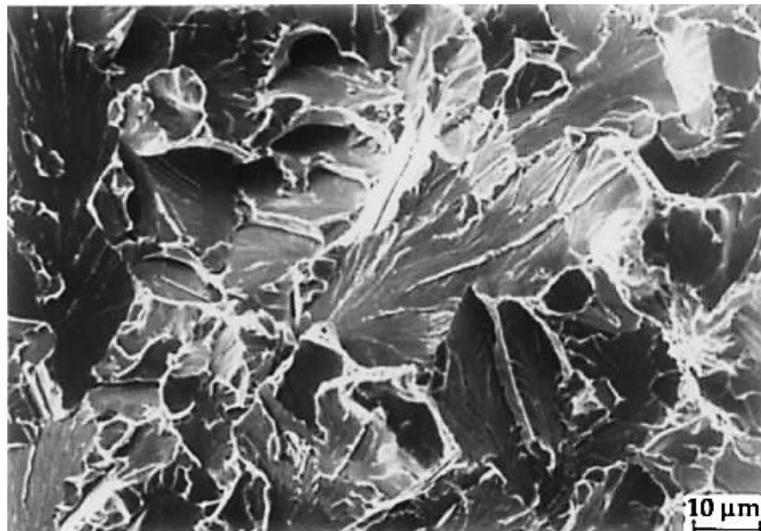
Figura 12 - Fractografia de micromecanismo de fratura por clivagem (MEV)



Fonte: ASM, 1980.

Nota: Ampliação e escala não informadas.

Figura 13 - Fractografia de clivagem em aço A508 classe 3 (MEV)



Fonte: Anderson, 2005.

Este aspecto frágil de fratura é incentivado pelo aumento do teor de carbono, presença de entalhes, aumento da taxa de carregamento, aumento do tamanho de grão e pela diminuição da temperatura de trabalho. O aspecto é de "conchas", com facetas lisas de fratura (ASM, 1980).

3.4 Processo de usinagem por descargas elétricas (EDM)

O processo de usinagem por descargas elétricas (EDM – *Electrical Discharge Machining*) é um processo não convencional de usinagem onde não existe contato mecânico entre a ferramenta e a peça a ser fabricada, sendo a retirada de material decorrente principalmente de fenômenos termoelétricos produzidos por sucessivas descargas elétricas entre o eletrodo ferramenta e peça, ambos materiais condutores. Este processo, também denominado de eletroerosão, é amplamente utilizado na indústria de ferramentaria durante a confecção de peças que apresentam difícil usinabilidade pelos processos convencionais, como os aços temperados e ligas de alta dureza, assim como para obtenção de formas geométricas complexas com elevada exatidão dimensional como, por exemplo, cavidades estreitas e profundas e pequenos raios de canto. Características estas que fazem parte do cotidiando dos processos de fabricação de matrizes de estampagem e moldes de injeção de componentes plásticos para as indústrias: automobilística, de lazer e de produtos de engenharia elétrica, eletrônica e eletrodomésticos (AMORIM, 2002).

Algumas teorias foram desenvolvidas para explicar o fenômeno que ocorre durante o processo de EDM. Contudo, a teoria mais aceita no meio científico é a termoelétrica. Neste processo o calor gerado pela descarga elétrica na região da superfície próxima ao canal de plasma funde o material, que é removido e ejetado da poça fundida pela evaporação. A descarga elétrica entre eletrodos ferramenta e peça, distingue em quatro fases consecutivas durante a ocorrência de uma descarga elétrica (DIBITONTO *et al.*, 1989; KLOCKE, KÖNIG, 2007):

Fase 1 – Ignição.

Fase 2 – Formação do canal de plasma.

Fase 3 – Fusão e evaporação de material de ambos os eletrodos.

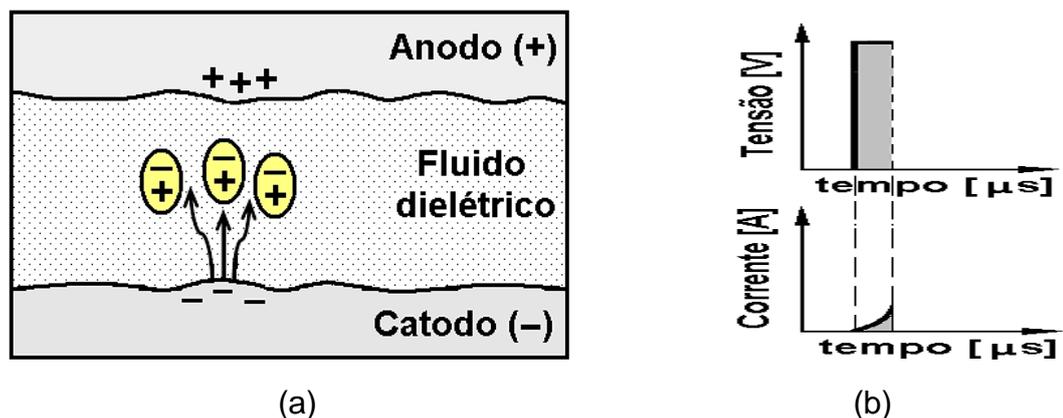
Fase 4 – Ejeção do material fundido causando a formação de microcratera.

Na fase de ignição, 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 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). De acordo com Kumar *et al.* (2009), mesmo durante o avanço na direção da superfície da peça o eletrodo ferramenta não entra em contato com a peça, trabalhando sempre afastado, para evitar curto circuito e o não funcionamento do processo. Esta distância, denominada fenda de trabalho (*gap*), é da ordem de 0,05 a 1,00 mm, e o controle desta é fundamental para o sucesso do processo. Nos locais onde o gradiente de tensão é máximo, normalmente nos pontos mais altos da superfície ou picos, os elétrons primários são emitidos pelo cátodo. A teoria da ionização por impacto explica que os elétrons liberados no catodo se aceleram e colidem com moléculas do dielétrico, favorecendo a liberação de mais elétrons e íons positivos, iniciando uma reação de alta energia. Esses elétrons primários são atraídos pelo anodo e começam a se mover em sua direção.

A Figura 14 ilustra essa fase de ignição com os elétrons primários sendo emitidos pelo catodo e iniciando o movimento em direção ao anodo (a), bem como mostra também a variação de tensão e corrente durante esta fase (b).

Figura 14 - Fase da ignição em (a) e evolução da corrente e tensão em (b)



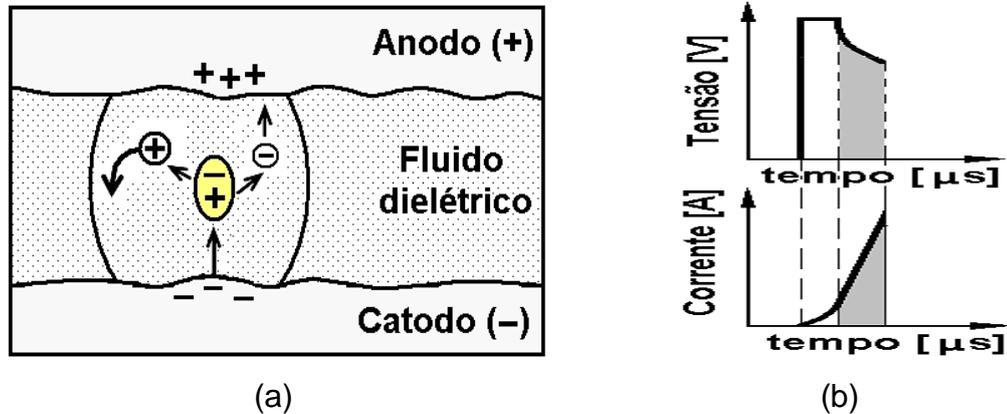
Fonte: Stevens, 1998 (a); König & Klocke, 1996 (b).

Em seu caminho através do fluido dielétrico, os elétrons primários colidem com átomos neutros do dielétrico e como consequência, estes últimos separam-se em íons positivos e negativos ou elétrons secundários (STEVENS, 1998).

A Figura 15 ilustra a formação de elétrons secundários e íons positivos quando os elétrons primários colidem com átomos neutros do fluido dielétrico (a), e a

evolução da corrente e tensão durante esta etapa (b).

Figura 15 - Formação de elétrons secundários (a); evolução corrente e tensão (b)

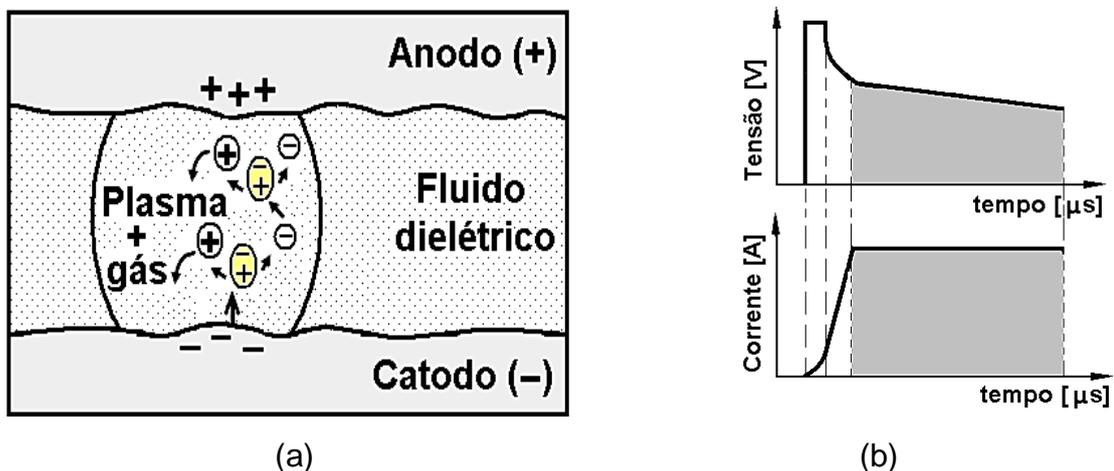


Fonte: Stevens, 1998 (a); König & Klocke, 1996 (b).

A Figura 16 mostra a formação do canal de plasma, que é decorrente da energia provocada pela colisão dos elétrons em alta velocidade. Conforme Stevens (1998) inicia-se a ionização por impacto, tendo na sequência a multiplicação em alta velocidade desse fenômeno, gerando um superaquecimento seguido de evaporação de uma pequena quantidade do dielétrico. Dessa maneira, é provocado, simultaneamente, um aumento da corrente elétrica e um decréscimo da resistência do dielétrico. Podem ser observadas nesse instante a formação e a intensificação de túneis transportadores de energia elétrica “*streamers*”, tanto para o anodo quanto para o catodo, resultando na queda da tensão em aberto (U_i) para a tensão de ruptura do dielétrico, havendo na sequência, um grande aumento da corrente elétrica (i_e), até atingir o nível especificado pelo operador. Esse canal fica contornado por uma bolha de vapor e pelo dielétrico que faz com que a energia da descarga fique concentrada em um pequeno volume. A formação do canal de plasma é conhecida como colapso da tensão em aberto (U_i) ou ruptura da resistência dielétrica, pois, quando ele é criado, nesse instante a tensão U_i decai rapidamente para tensão de ruptura do dielétrico, que depende da combinação do material utilizado no eletrodo e na peça. O intervalo de tempo entre a aplicação da tensão U_i e a formação do canal de plasma é conhecido como tempo de atraso de ignição (t_d) o qual pode ser usado para análise da abertura da fenda de trabalho. O canal de plasma formado é mantido por um período de tempo (t_e) conforme regulagem do operador. Durante a aplicação da descarga, o sistema de controle do

servomecanismo da máquina EDM controla e mantém em equilíbrio a amplitude da fenda de trabalho, a qual depende do nível de energia da corrente de descarga (i_e). Assim, evita-se a formação de curtos circuitos. De acordo com o tempo de duração da descarga elétrica (t_e), o plasma de alta energia funde continuamente, por condução térmica, certa quantidade de material da ferramenta e da peça. O tempo que decorre entre a aplicação da tensão e o início da descarga denomina-se tempo de atraso da ignição. Quando a distância entre os eletrodos ferramenta e peça é maior, tem-se um aumento no tempo de atraso de ignição. O valor deste tempo de atraso de ignição pode ser usado para controlar o movimento de aproximação do eletrodo ferramenta (STEVENS, 1998; KUMAR *et al.*, 2009).

Figura 16 - Formação do canal de plasma (a) e evolução da corrente e tensão (b)



Fonte: Stevens, 1998 (a); König & Klocke, 1996 (b).

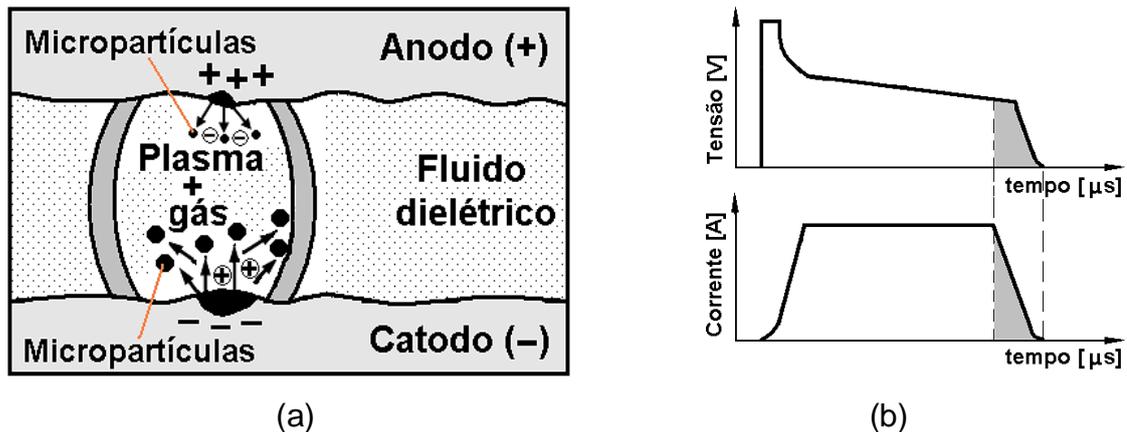
Caso a polaridade seja invertida, como ocorre na EDM a fio (WEDM), a condição dos eletrodos também é invertida.

Quando um elétron ou um íon colide com a superfície, sua energia cinética é transformada em calor, conforme ilustrado na Figura 17, induzindo a fusão e a evaporação parcial do material da superfície, pois as faíscas elétricas produzem intenso calor com temperatura da ordem de 12000°C. A quantidade de material que é fundido depende entre outros fatores, 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).

As fases de fusão e evaporação dos materiais estão representadas na Figura 17. O calor gerado pela energia cinética dos elétrons e íons é transformado em

energia térmica, gerando fusão e evaporação de micropartículas do catodo e anodo. Nesta fase, o canal de plasma é mantido durante o tempo ajustado pelo operador na máquina EDM, e as superfícies do anodo (eletrodo ferramenta) e cátodo (eletrodo peça) são bombardeadas, respectivamente por elétrons e íons durante este tempo.

Figura 17 - Ruptura do canal de plasma (a), evolução da corrente e tensão (b)



Fonte: Stevens, 1998 (a); König & Klocke, 1996 (b).

A diferença de massa entre elétrons e íons exerce influencia no processo. Os íons metálicos são mais pesados que os elétrons e, portanto sua energia cinética é maior, quando tem a mesma velocidade do elétron. Mas, devido à inércia maior, os íons levam mais tempo para alcançarem velocidade suficiente para aquecer e provocar fusão do material. Portanto, quando são aplicadas descargas curtas, com menos de um (1) μs , os elétrons geram mais calor na superfície, já que apenas quantidade limitada de íons colide contra o catodo. Devido à velocidade inicial baixa dos íons, em relação aos elétrons, eles precisam de mais tempo para percorrer a mesma distância. É necessário um tempo maior que dez (10) μs para que os íons possam atingir a superfície do cátodo em alta velocidade. Com isso, sua energia cinética pode gerar calor suficiente para provocar a fusão da superfície do cátodo (STEVENS, 1998).

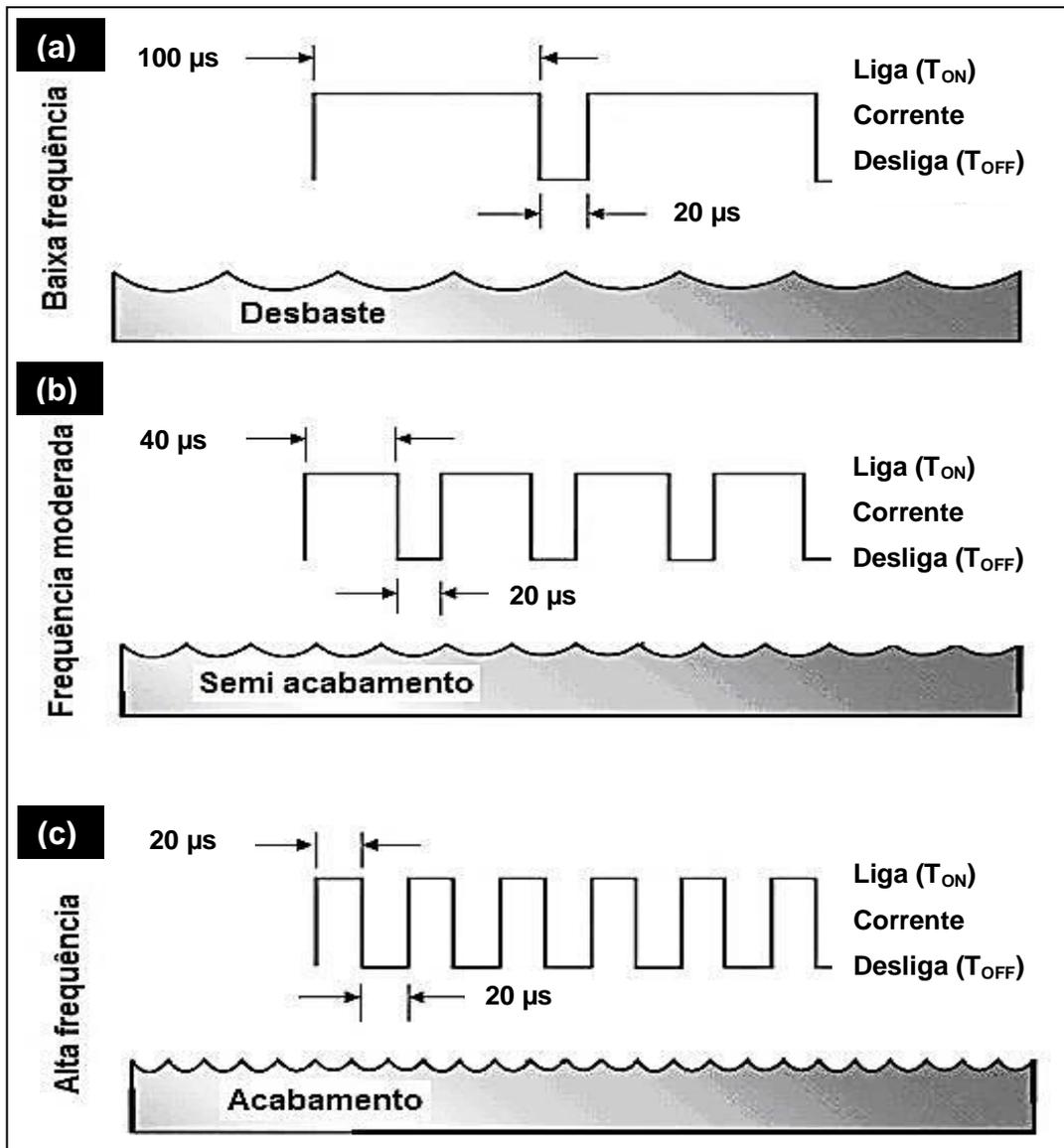
Na fase de ejeção do material líquido, após atingir o tempo de descarga ajustado na máquina de EDM para o regime de trabalho, o sistema de controle do gerador de pulsos interrompe instantaneamente a corrente elétrica, estabelecendo um intervalo de tempo (t_0) até o início de um novo ciclo. Como consequência, o canal de plasma se desfaz e a pressão, da ordem de 200 bar, cai bruscamente (McGEOUGH, 1988). Isso faz com que o material fundido nos eletrodos peça e

ferramenta evaporem intensamente e pequenas gotas líquidas são ejetadas da poça fundida. O material é removido pela circulação do fluido dielétrico (STEVENS, 1998).

A duração de pulso, intervalo de pulso e corrente de pico são as configurações básicas da máquina EDM, além da polaridade. Estes primeiros parâmetros podem ser expressos, também, respectivamente como fator de serviço (DT), frequência de pulso e corrente média. Fator de serviço é um percentual da duração do pulso (T_{ON}) sobre o ciclo total ($T_{ON} + T_{OFF}$). Geralmente, um maior fator de serviço significa maior eficiência de corte. A frequência de pulso é definida como o número de ciclos produzidos ao longo do *gap* em um segundo. Quanto maior a frequência, mais suave é o acabamento superficial a ser obtido. Com um aumento do número de ciclos por segundo, o valor de T_{ON} diminui. Curtos T_{ON} removem pouco material e cria pequenas crateras. Isso produz um acabamento superficial mais suave com menos dano térmico para a peça de trabalho. A frequência de pulso (kHz) é calculada dividindo o valor de 1000 pelo tempo total de ciclo ($T_{ON} + T_{OFF}$) em microsegundos. A corrente média (A) fornecida pela fonte de alimentação, é a máxima corrente disponível para cada pulso. Corrente média é a amperagem média na abertura da faísca medida ao longo de um ciclo completo. Ela é calculada pela multiplicação da corrente de pico pelo fator de serviço (KUMAR *et al.*, 2009).

A Figura 18 (GUITRAL, 1997) apresenta um esquema representativo das modificações e formas das superfícies usinadas por EDM, em diferentes frequências e os efeitos representativos na seção transversal da superfície. Observa-se que o acabamento superficial com tempo de duração da descarga longo (t_e) é bem grosseiro (Figura 18(a)), devido ao fato da longa duração da descarga ser suficiente para fundir uma cratera. Na Figura 18(b) verifica-se que o tempo de duração da descarga é reduzido, produzindo crateras menores e menos material fundido. O acabamento melhora, mas a velocidade de usinagem diminui e aumenta o desgaste do eletrodo. A Figura 18(c) mostra a superfície do material em operações de acabamento. O perfil da descarga é mais denso, com uma intensidade de descargas maior pela mesma unidade de tempo. As descargas de curta duração produzem pouco material erodido, gerando pequenas crateras.

Figura 18 - Variações da frequência de pulso em EDM x modificações superficiais.



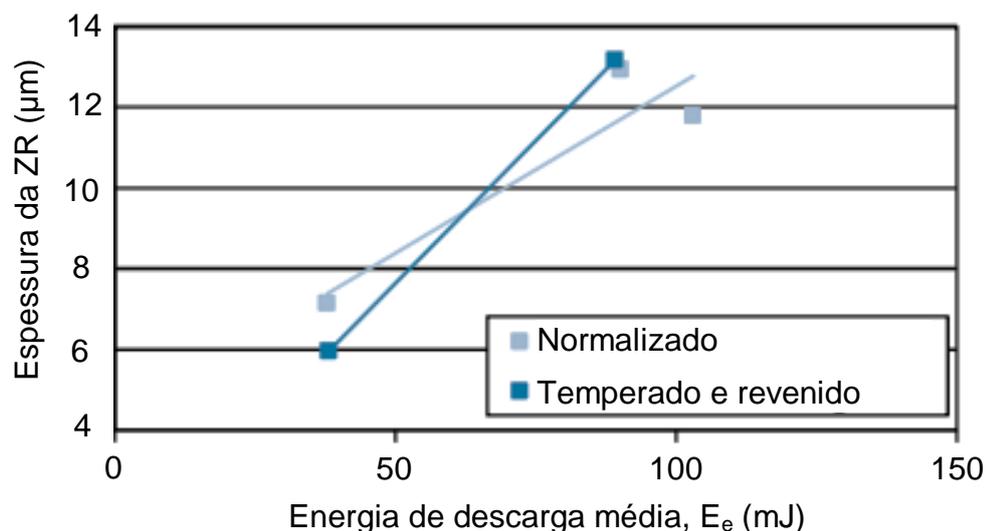
Fonte: Guitral, 1997 (Adaptado pelo autor, 2016).

A frequência de descarga ou a energia por descarga controlam a velocidade de remoção de material. Segundo Kalpakjian e Schmid (2009), o processo EDM ocorre na frequência entre 50 kHz e 500 kHz, com tensão entre 50 a 380 V, corrente de 0,1 a 500 A e taxa de remoção de material (TRM) típica de $300 \text{ mm}^3/\text{min}$. O ponto de fusão e o calor latente de fusão são importantes para determinar a quantidade de material removido por descarga, sendo tipicamente removido por descarga elétrica o volume de material da ordem de 10^{-6} a 10^{-4} mm^3 .

Na peça eletroerodida ocorrem algumas transformações superficiais no metal base decorrentes da formação de uma zona afetada pelo calor (ZAC) produzida durante as descargas elétricas e de camada de material ressolidificado denominada

de zona refundida (ZR) ou “camada branca”, formada durante o resfriamento brusco que o fluido dielétrico proporciona no fim da descarga. Esta região ZR é típica de superfícies usinadas por EDM a qual é o resultado de metal fundido e solidificado novamente na superfície da peça. Esta região é suscetível à microfissuras devido ao resfriamento brusco do material fundido e, conseqüentemente são produzidas tensões térmicas. Estas microfissuras influenciam o ciclo de vida da peça obtida no processo EDM. Outros pesquisadores também identificaram que a ZR é mais propícia à ocorrência de defeitos e falhas que podem comprometer a aplicação do produto final (SANTOS, 2007; KUMAR, 2009), uma vez que a ZR é dura e frágil. Por conseguinte, o objetivo de bom ajuste no processo EDM é minimizar a espessura da ZR. Klocke *et al.* (2016) observaram que quanto mais elevada é a energia de descarga, resulta em camadas mais espessas da ZR. Isso é causado por maior quantidade de metal que funde e solidifica sobre a superfície. Eles afirmam que isso foi também observado por outros pesquisadores tais como Rebelo *et al.* (1998) e Guu *et al.* (2003). A relação entre a energia de descarga e a espessura da camada ZR é mostrada na Figura 19. As espessuras foram avaliadas por diferentes imagens MEV e uma média foi obtida posteriormente (KLOCKE *et al.*, 2016).

Figura 19 - Influência da energia de descarga na espessura da camada ZR

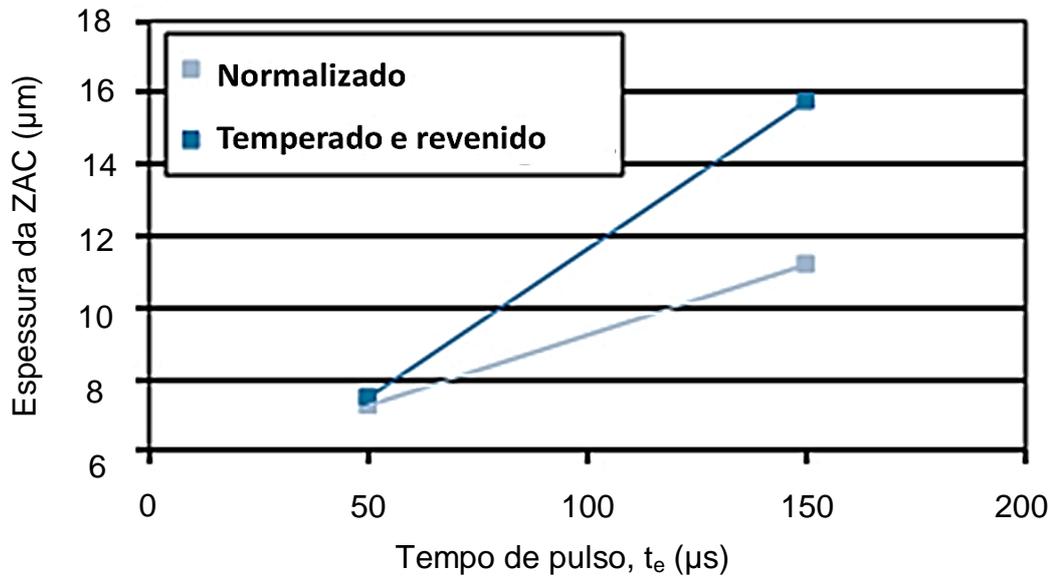


Fonte: Klocke *et al.*, 2016 (adaptado pelo autor, 2016).

Ainda, segundo Klocke *et al.* (2016), a energia de descarga pode ser dividida em pulso de corrente e pulso de tempo, assumindo tensão de descarga constante. Determinando assim, o efeito principal sobre a profundidade de penetração ou

espessuras das referidas camadas (ZR e ZAC). A relação entre espessura de camada ZAC e tempo de pulso é diretamente proporcional, ou seja, quanto maior a relação, maior a espessura da camada ZAC (Figura 20).

Figura 20 - Influência do tempo de pulso (t_e) sobre a espessura da camada ZAC, do aço AISI 4140 normalizado, temperado e revenido.



Fonte: Klocke *et al.*, 2016 (adaptado pelo autor, 2016).

3.5 Nitretação

A nitretação, ou formação de nitretos, é um tratamento termoquímico de endurecimento superficial em que se introduz superficialmente no aço, até certa profundidade, nitrogênio, sob a ação de ambiente nitrogenoso, a temperatura determinada (CHIAVERINI, 2012).

Os objetivos de realizar a nitretação, segundo o autor são:

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

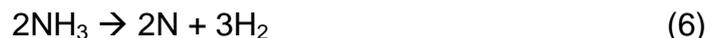
Alguns dos característicos do processo de nitretação são:

- temperatura de tratamento na faixa de 500 a 575 °C (inferior à crítica);
- não há necessidade de qualquer tratamento térmico posterior a este.

Chiaverini (2012) afirma que esta faixa relativamente baixa de temperatura aliado a ausência de qualquer tratamento térmico posterior, reduz ao mínimo a probabilidade de empenamento ou distorção das peças, resultando em grande vantagem da nitretação sobre outros processos termoquímicos de endurecimento superficial. A razão fundamental do aumento da resistência à fadiga dos aços nitretados deve-se ao fato do processo introduzir tensões residuais de compressão na superfície, além da camada nitretada possuir elevada resistência mecânica.

A nitretação pode ser realizada por três processos:

- Nitretação a gás: Este é o processo clássico, consistindo em submeter as peças a serem nitretadas à ação de meio gasoso contendo nitrogênio, geralmente a amônia (2NH_3), à temperatura determinada. Neste processo, a difusão de nitrogênio é lenta, gerando operação demorada, na faixa de 48 a 72 horas, obtendo camadas nitretadas que dificilmente ultrapassam 0,8 mm, sendo a dureza superficial na ordem de 1000 a 1100 HV (10 kgf). A amônia, no processo, decompõe-se parcialmente em nitrogênio de acordo com a seguinte reação (Equação 6):



O nitrogênio ativo produzido combina-se parcialmente com os elementos de liga do aço formando nitretos complexos de elevada dureza.

- Nitretação líquida ou em banho de sal: Trata-se de processo de nitretação desenvolvido relativamente recente, que permite, em tempo mais curto que a nitretação convencional ou clássica, obter superfícies resistentes ao desgaste, sem tendência ao engripamento, de alto limite de fadiga e elevada resistência à corrosão atmosférica. O tempo normal de operação varia na faixa de uma (1) a duas (2) horas, sendo formado duas camadas: camada de compostos que pode atingir espessura de 0,005 a 0,015 mm, conforme o tempo de operação e, uma segunda camada denominada zona de difusão.

- Ionitretação ou plasmanitretação: Este processo 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.

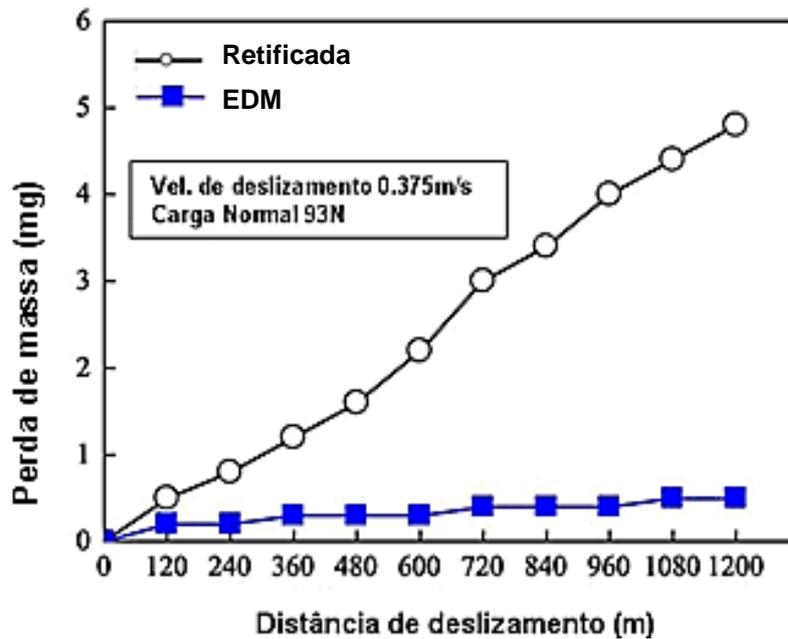
Callister Jr. e Rethwisch (2012), afirmam que o endurecimento da camada superficial é uma técnica, pela qual, tanto a dureza superficial quanto a vida em fadiga de aços são aumentadas. Isso é obtido por processo de carbonetação ou de nitretação, em que um componente é exposto a atmosfera rica em carbono ou em nitrogênio em temperatura elevada. Uma camada superficial (ou “casca”) rica em carbono ou em nitrogênio é introduzida pela difusão atômica a partir da fase gasosa. Essa camada superficial endurecida possui normalmente profundidade da ordem de 1 mm e é mais dura que o núcleo do material. A melhoria das propriedades em fadiga resulta do aumento da dureza nessa camada superficial endurecida, assim como das desejadas tensões residuais de compressão, cuja formação acompanha o processo de carbonetação ou nitretação.

Várias técnicas vêm sendo utilizadas com o objetivo de melhorar as características superficiais dos aços, dentre elas, a nitretação a plasma (BORGIOI *et al.*, 2005), sendo aquela que desperta maior interesse nas indústrias (SOUZA, 2006) e o processo de usinagem por descargas elétricas, que vem sendo destacado como um dos mais utilizados na confecção de matrizes e moldes metálicos (SANTOS, 2007; SOUZA, 2013).

3.5.1 Nitretação por NDE

O enriquecimento de superfícies por nitrogênio em amostras de titânio (Ti-6Al-4V) foi estudado por Yan, Tsai e Huang (2005) no qual foram verificados os efeitos de solução de ureia dissolvida em água deionizada no processo EDM por penetração. Os resultados experimentais indicaram que o nitrogênio decomposto no fluido dielétrico migrou para a superfície e subsuperfície da peça formando camada endurecida de nitreto de titânio (TiN) com espessura média de 60 µm. Os pesquisadores realizaram também ensaios de desgaste por deslizamento, sendo os resultados obtidos e condições do ensaio mostrados na Figura 21.

Figura 21 - Perda de massa acumulada da superfície retificada em relação à superfície usinada por descargas elétricas.

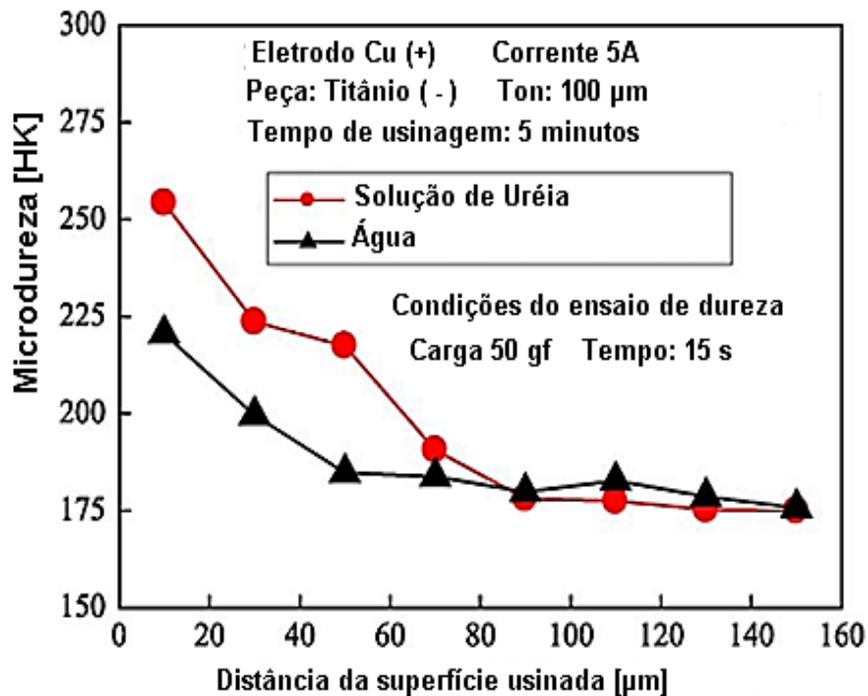


Fonte: Yan, Tsai e Huang (2005).

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. A ressolidificação no processo EDM é rápida e produz modificações microestruturais na camada da superfície usinada. Os autores concluíram que adicionando ureia no dielétrico, a taxa de remoção de material fundido (TRM) e a taxa de desgaste do eletrodo (TD) aumentam com aumento na corrente de pico. Além disso, TRM e TD declinaram com a elevação da duração do pulso. Isto foi devido ao aumento da corrente de pico, elevando a energia de descarga. Verificaram também que quando a ureia foi adicionada ao fluido dielétrico, a rugosidade deteriorou-se com um aumento na corrente de pico. Uma vez que aumento na corrente de pico aumentou a energia de descarga e a força impulsiva, TRM gerou crateras mais profundas. Por isso, tornou-se a rugosidade mais grosseira. Em condições adequadas de usinagem por EDM, a modificação da superfície de metais de titânio puro, exibiu melhoria nas características de atrito e desgaste. A modificação da superfície de metais de titânio puro por EDM se mostrou muito simples e não necessita de equipamento especial, em contraste com outros métodos tradicionais, afirmaram Yan, Tsai e Huang (2005).

A Figura 22 mostra a distribuição da microdureza na seção transversal de superfície usinada por EDM utilizando diferentes fluidos dielétricos, sendo os maiores valores de dureza obtidos quando se usinou utilizando a solução de ureia diluída em água.

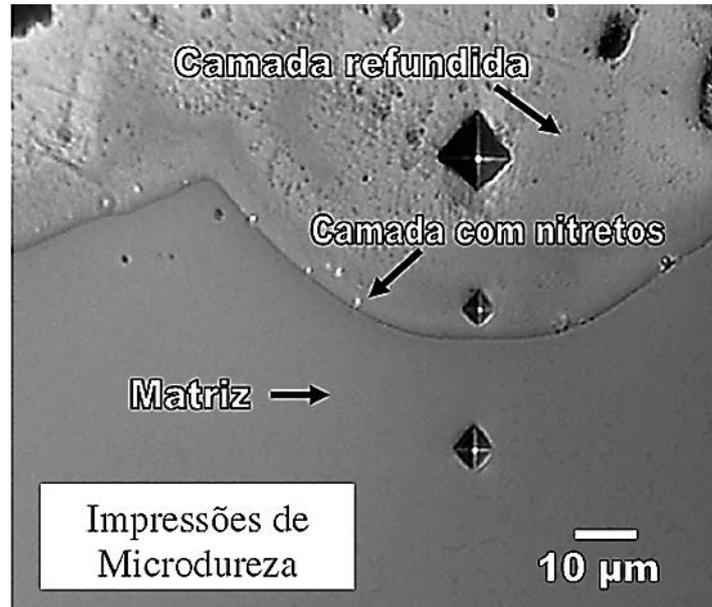
Figura 22 - Variação da microdureza na seção transversal de superfície usinada utilizando diferentes dielétricos.



Fonte: Yan, Tsai e Huang (2005).

A técnica de enriquecer superfícies com nitretos por meio do processo EDM também foi estudada por Camargo, Costa e Raslan (2009). Os testes consistiram em usar como fluido dielétrico solução de ureia em água deionizada, concentração de 10 g/l, sendo o eletrodo-peça amostras de liga de titânio (Ti-6Al-4V). Ao sofrer o superaquecimento devido à faísca liberada pelo eletrodo ferramenta, a ureia torna-se gasosa, e com isto libera nitrogênio no meio. Este nitrogênio irá combinar-se com o titânio existente na peça, e com isto ocorrerá formação de nitretos na superfície da peça. Esta 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 23, com as respectivas impressões de microdureza nas três diferentes regiões: camada refundida, camada com nitretos e substrato (matriz).

Figura 23 - Amostra de Ti-6Al-4V nitretada por EDM.



Fonte: Camargo, Costa e Raslan (2009).

Os autores afirmam que as descargas elétricas produzidas em EDM, possibilitaram a formação de camada enriquecida com nitretos, com espessura da ordem de 7 μm , na superfície da liga de titânio; houve aumento na microdureza da camada enriquecida em relação à matriz. Comprovaram a viabilidade técnica de enriquecer e elevar a dureza de superfícies, pela formação de nitretos em ligas Ti-6Al-4V, por meio de processos EDM por penetração.

Raslan, Santos e Silva (2012); Silva (2012); Santos (2013) pesquisaram também sobre a técnica de enriquecer superfícies com nitretos por meio de descargas elétricas geradas no processo EDM, onde se destaca o pedido de depósito de patente feito por Raslan, Santos e Silva (2012). Os autores desenvolveram um método de nitretação por descargas elétricas (NDE). A pesquisa supracitada refere-se a processo de nitretação com o emprego de equipamentos de usinagem com descargas elétricas por penetração (EDM), a fio (WEDM - *Wire EDM*), por jato de fluido (FJEDM - *Fluid Jet EDM*) e jato de fluido abrasivo (AJEDM - *Abrasive Jet EDM*). O processo consiste na utilização de solução de água deionizada e ureia como fluido dielétrico. Ao passar a corrente elétrica entre os eletrodos ferramenta e peça, forma-se um canal de plasma enriquecido com nitrogênio proveniente da ureia. Ao ocorrer descarga, o nitrogênio é incorporado à superfície da peça, formando nitretos e, conseqüentemente, o endurecimento desta superfície. O processo alia a nitretação à usinagem. Além disso, os autores

concluíram que o processo é rápido e pouco oneroso, se comparado a métodos tradicionais de nitretação.

Santos (2013) conduziu experimentos em amostras de aço ABNT 4140, para explicar o endurecimento ocorrido na zona refundida (ZR) e na zona nitretada (ZAC), pelo efeito da nitretação ou e não por têmpera. Inicialmente as amostras foram submetidas a tratamento térmico de têmpera em água, obtendo microdureza Vickers de 671 ± 55 (25 gf, 15 s, três resultados). Em seguida foi efetuado EDM em água deionizada em amostra temperada. Em outra amostra, aplicou-se o processo NDE. E para a outra o revenimento a $550 \text{ }^\circ\text{C}$ por uma hora em forno mufla. Após a usinagem pelo processo EDM e NDE, as amostras foram também revenidas a $550 \text{ }^\circ\text{C}$ por uma hora em forno mufla. Ao analisar a microdureza Vickers final nas três condições investigadas, obteve para as amostras apenas temperadas e revenidas valores de 312 ± 13 . Para as amostras NDE 529 ± 26 na ZR, 422 ± 27 na ZAC. E para as amostras processadas por EDM com água deionizada 236 ± 14 na ZR e 280 ± 12 na ZAC. Respectivamente médias e desvios padrões dos valores de microdureza Vickers. O pesquisador observou que houve eliminação do efeito da têmpera nas amostras NDE e que houve, de fato, uma contribuição de nitretos para o aumento de dureza das ZR e ZAC, sendo evidenciado por meio de uma análise de difração de raios-X (DR-X) Bragg-Brentano ou θ - 2θ , que os nitretos destas amostras continuaram presentes após o revenimento. Observou ainda que o mesmo não ocorreu para as amostras temperadas em água, processadas por EDM em água deionizada e revenidas a $550 \text{ }^\circ\text{C}$ por uma hora, onde houve redução significativa de dureza. Ainda, segundo o pesquisador, a hipótese de haver nitrogênio nas camadas refundidas e nitretadas é pertinente, uma vez que existe fonte do mesmo, ou seja, a ureia diluída em água deionizada, usada como fluido dielétrico.

Para medir a espessura das camadas (ZR e ZAC), o pesquisador efetuou medição por DR-X perpendicularmente à superfície de uma amostra de aço ABNT 4140 usinada por EDM tendo como fluido dielétrico água deionizada e ureia na concentração de 10 g/l, e em seguida, nessa mesma amostra, executou a retirada da camada com espessura de 5 μm , por meio de polimento com pasta de diamante de 3 μm e 1 μm em politriz semi-automática, sendo o controle dimensional feito com micrômetro digital e relógio comparador com resolução de 1 μm , montado em dispositivo de controle de retirada da camada. Ao término desta etapa, executou medições por DR-X, com os mesmos parâmetros adotados anteriormente. O autor

realizou esta operação por cinco vezes, perfazendo retirada total de 25 μm na espessura da amostra e, concluiu que, com base nos resultados obtidos, que a espessura total (ZR+ ZAC) variou entre 20 e 25 μm , em função da presença de nitretos na superfície da amostra, avaliada por meio da técnica de DR-X e que a concentração decai com a profundidade, conforme análise GDOES, sendo os picos do difratograma, após a última retirada de camada (25 μm), ficaram semelhantes ao difratograma das medições realizadas no material de referência (4140 sem EDM), ou seja, a partir dessa profundidade não se encontraram mais nitretos.

Raslan, Santos e Silva (2012) concluíram que o método proposto para a nitretação por NDE se baseia na inserção do nitrogênio na superfície do aço por implantação iônica, o qual justifica o fenômeno do enriquecimento superficial. Raslan (2015) pesquisou sobre a viabilidade de se implantar ionicamente elementos químicos tais como N, Co, P, Ca, Cr, Ni em superfícies metálicas com a utilização de soluções aquosas contendo estes elementos. O pesquisador utilizou máquina convencional de usinagem por descargas elétricas por penetração (EDM), eletrodos de cobre e de grafita, soluções aquosas ricas nos elementos químicos que foram implantados e amostras de liga de titânio (Ti-6Al-4V) e aço AISI 4140. Os resultados encontrados mostraram a formação de camadas superficiais e subsuperficiais enriquecida por elementos químicos presentes inicialmente nas soluções aquosas, além de íons provenientes dos eletrodos de cobre ou grafita. Observou-se ainda que, para as amostras usinadas com soluções de água deionizada e ureia como fluido dielétrico, a formação de camada nitretada e endurecida na liga de Ti-6Al-4V e do aço AISI 4140. Os resultados dos ensaios de desgaste por deslizamento mostraram ganho de resistência do aço AISI 4140 nitretado por NDE em comparação às amostras 4140 não nitretada e temperada.

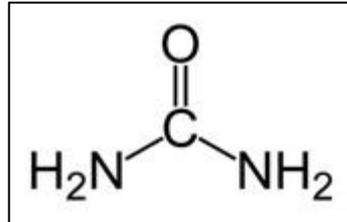
3.5.1.1 Ureia

Costa *et al.*, (2003), afirmam que o grupo funcional no qual os átomos de carbono e oxigênio se encontram unidos por uma ligação dupla (C=O) é denominado grupo carbonila. Sendo as ureias diamidas do ácido carbônico em que dois átomos de nitrogênio estão ligados ao grupo carbonila. A ureia não substituída (aquela com

dois grupos NH_2 ligados ao $\text{C}=\text{O}$) é o produto final do metabolismo de compostos nitrogenados (como excesso de proteínas) e é excretada na urina dos mamíferos.

A ureia é representada pela fórmula molecular $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ e está representada pela fórmula estrutural na Figura 24.

Figura 24 - Fórmula estrutural da ureia.



Fonte: Costa *et al.*, 2003 (Adaptado pelo autor, 2016).

Os compostos nitrogenados são utilizados na agroindústria e pecuária, especialmente, e também em aplicações industriais como: fabricação de tintas e derivados petroquímicos. A ureia é uma substância que possui peso molecular de 60,06 g/mol (Petrobrás, 2015).

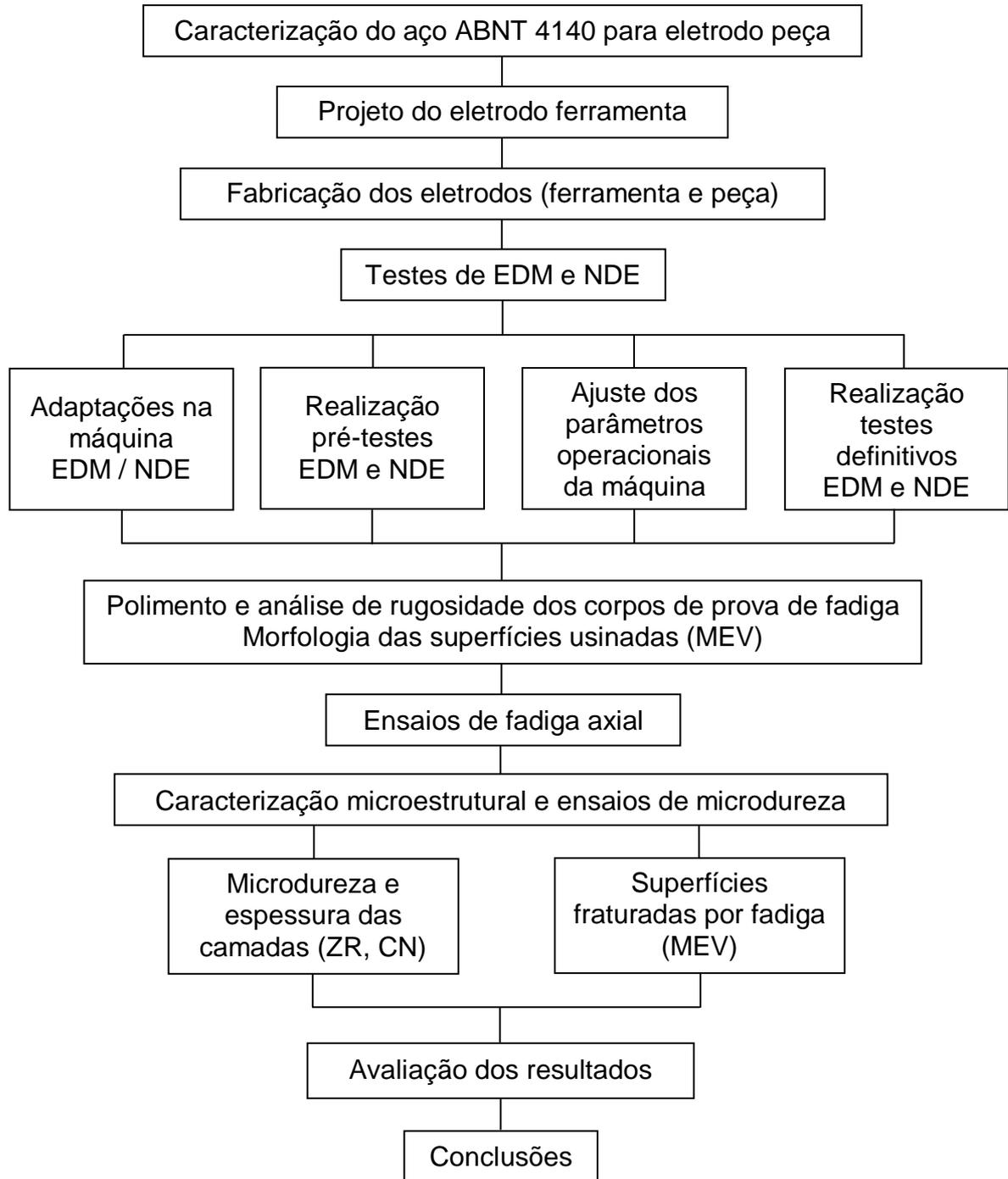
4. METODOLOGIA

O trabalho experimental foi realizado nos laboratórios de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), laboratórios de usinagem da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas) e laboratórios de materiais da Engenharia Experimental da FCA Fiat Chrysler Automóveis Brasil Ltda, planta de Betim, Minas Gerais.

A Figura 25 apresenta o fluxograma com o resumo das etapas do procedimento experimental desenvolvido e realizado neste trabalho.

Observa-se que a metodologia proposta teve por finalidade a caracterização inicial do material (eletrodo peça) em aço ABNT 4140 conforme recebido; o desenvolvimento do projeto da matriz (eletrodo ferramenta) em cobre eletrolítico e sua fabricação; adaptação da máquina de EDM e ajustado seus parâmetros operacionais; aplicação da matriz de cobre eletrolítico na execução de usinagem por descargas elétricas (EDM) e nitretação por descargas elétricas (NDE) de corpos de prova para ensaios de fadiga fabricados com o aço ABNT 4140 e na máquina adaptada e ajustada; preparação das superfícies dos corpos de prova de aço ABNT 4140 por meio de lixamento e polimento; realizado análise de rugosidade; ensaios de fadiga; caracterização microestrutural e ensaios de dureza; obtenção de imagens por meio de microscopia eletrônica de varredura e óptica; analisado as superfícies fraturadas por fadiga em função do processo utilizado (amostras laminadas e usinadas por meio de torno CNC, nitretadas por NDE e usinadas por EDM).

Figura 25 - Fluxograma das etapas do procedimento experimental realizado.



Fonte: Autor, 2016

4.1 Caracterização do material ABNT 4140 para eletrodo peça

Neste trabalho foi utilizado como eletrodo peça o aço ABNT 4140 nos estados laminado (conforme recebido), nitretado por NDE com solução aquosa de ureia e por

último, usinado por EDM com fluido dielétrico água deionizada. Este tópico aborda sobre o eletrodo peça e caracterização realizada para o material conforme recebido.

4.1.1. Eletrodo peça em aço ABNT 4140

Conforme Podgornik *et al.* (2001), o aço ABNT 4140 pode ser nitretado de forma a apresentar alta dureza superficial sem, no entanto, ter sua tenacidade prejudicada, o que o faz um material adequado para confecção de componentes de máquinas submetidos a altas cargas.

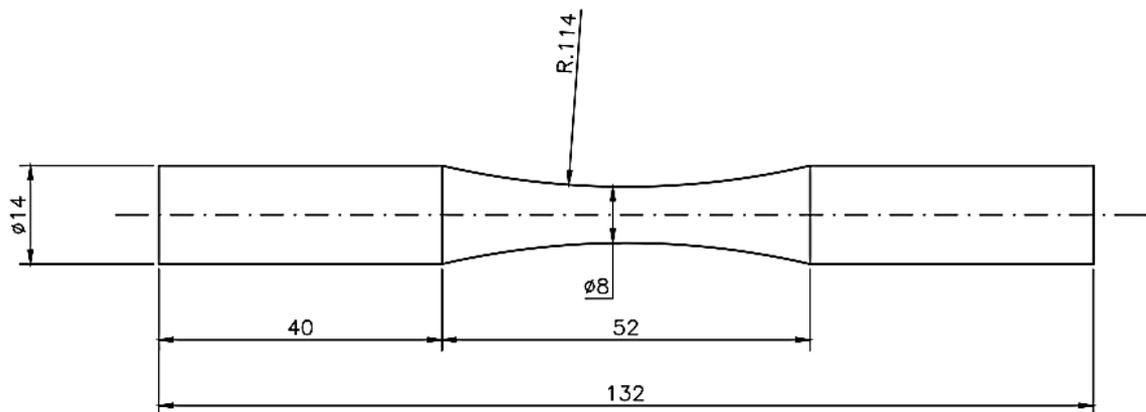
Inicialmente foi realizado corte primário da barra cilíndrica laminada de seção transversal circular de 15,88 mm (5/8"), por meio da máquina serra de fita Franho FM 1600, obtendo amostras com comprimento de 152 mm, as quais foram faceadas nas extremidades e, realizado furo de centro em uma das extremidades, com o uso de torno universal. Por meio de torno CNC ROMI modelo *Centur* 30D com CNC Siemens 802D, foi realizado a usinagem dos corpos de prova de fadiga, sendo 3 (três) amostras para realizar os ajustes dos parâmetros operacionais da máquina EDM e ensaios preliminares EDM e NDE. Estes corpos de prova foram identificados de A0X, NOX e N6X, porém estes não foram ensaiados por fadiga. Para os ensaios de fadiga foram fabricados posteriormente 40 (quarenta) corpos de prova definitivos de aço ABNT 4140, os quais estão descritos resumidamente abaixo:

- ✓ Quinze (15) corpos de prova usinados pelo processo convencional CNC;
- ✓ Quinze (15) corpos de prova nitretados por NDE;
- ✓ Dez (10) corpos de prova usinados por EDM.

A norma ASTM E466-15 define o procedimento para a condução de ensaios de fadiga controlado por força axial para obter a resistência à fadiga de materiais metálicos sujeitos a amplitude constante e temperatura ambiente. Esta norma especifica que o raio contínuo de curvatura do corpo de prova deve ser maior que oito vezes o diâmetro mínimo da seção de teste ($R > 8D$) para minimizar o fator teórico de concentração de tensão do corpo de prova. O comprimento da seção de testes deve ser maior que três vezes o diâmetro mínimo da seção de teste ($L > 3D$). Para assegurar falha na seção de teste, a área da seção transversal do corpo de prova, para fixação nas garras do equipamento, deve ser de pelo menos 1,5 vezes a área da seção de teste.

A Figura 29 apresenta o desenho com as dimensões e geometria final dos corpos de prova para ensaios de fadiga axial, os quais estão de acordo com o descrito e em conformidade com a ASTM E466-15. Este desenho corresponde ao grupo de amostras usinadas pelo processo CNC. Para os grupos de amostras usinadas por EDM e nitretadas por NDE, foram incluídos nesta geometria o sobremetal para remoção posterior por meio da usinagem por EDM.

Figura 26 - Geometria dos corpos de prova para ensaios de fadiga



Fonte: Freitas, 2010; ASTM E466-15; (Adaptado pelo autor, 2016).

Observa-se que o diâmetro mínimo e comprimento da seção de testes, medem respectivamente 8,0 mm e 52 mm, sendo o diâmetro da seção para fixação do corpo de prova nas garras do equipamento de testes de fadiga 14 mm e raio contínuo de 114 mm.

4.1.2. Caracterização do ABNT 4140 conforme recebido

Para caracterizar o aço ABNT 4140, material conforme recebido, foram realizados os procedimentos de análise química, metalografia, microdureza e ensaios de tração.

4.1.2.1. Análise Química

A análise química de três amostras do aço ABNT 4140 foi realizada no laboratório de materiais da FCA Fiat Chrysler Automóveis Brasil Ltda, utilizando espectrômetro de emissão óptica SPECTROMAXx, modelo LMXM5M-BT.

4.1.2.2. Metalografia

Os ensaios metalográficos foram realizados no laboratório de materiais da PUC Minas em Belo Horizonte-MG. Inicialmente foi realizado a preparação das amostras. Nesta etapa, utilizou-se barra de aço ABNT 4140 com 15,88 mm (5/8") de diâmetro, e obteve-se por meio de corte da seção transversal quatro amostras com 10 mm de comprimento cada. Em seguida, as quatro amostras foram preparadas pelo processo de metalografia que consistiu em: embutimento, lixamento, polimento e ataque químico com reagente Nital 2%.

A Tabela 10 apresenta a identificação e descrição dessas quatro amostras.

Tabela 10 - Amostras do aço ABNT 4140 para caracterização metalográfica.

Amostras	Descrição	Observação
4140 CR	Amostra virgem, conforme recebido (CR)	Amostra de referência
4140 NO	Normalizada a 900°C, encharque de 50 minutos, seguido de resfriamento ao ar fresco	Temperatura ambiente 23 °C
4140 R-F1	Recozimento pleno a 900°C, encharque de 30 minutos, seguido de resfriamento lento em forno 1	Desligando-se o forno e deixando que as amostras resfriem ao mesmo tempo que o forno (1)
4140 R-F2	Recozimento pleno a 900°C, encharque de 30 minutos, seguido de resfriamento lento em forno 2	

Fonte: Autor, 2016.

(1) O refratário do forno 1 é mais espesso e eficiente do que o do forno 2, conseqüentemente, o tempo para atingir a temperatura desejada do tratamento térmico no forno 1 é menor do que para o forno 2, significa que o tempo de resfriamento do forno 1 é mais lento do que o forno 2.

As etapas do processo de preparação metalográfica estão descritas a seguir:

Corte: as amostras foram cortadas inicialmente pelo método de corte a frio, de forma a não sofrer alterações de propriedades mecânicas pelo método de corte. Utilizou-se máquina de serra de fita Franho, modelo FM 1600 com controle hidráulico de avanço, para o corte primário da porção aproximada da amostra a ser analisada. Na sequência, usou-se um equipamento policorte denominado "*Cut-Off*" que faz um corte mais preciso, utilizando-se de um fino disco de corte abrasivo de uso geral em aços e ferros fundidos, com lubri-refrigeração constante, a fim de não provocar alterações por calor na amostra.

Embutimento metalográfico: foi utilizado o processo embutimento a quente no qual utilizou-se resina sintética baquelite e prensa de embutimento automática modelo PRE-40 AROTEC. Este equipamento possui sistema de aplicação de carga eletro-hidráulica, manômetro para controle de pressão (0 a 250 kgf/cm²), sistema de refrigeração automático à água, alarme sonoro no final do ciclo (amostra pronta), sistema de aquecimento e refrigeração com controle digital, controlador digital para controle de pressão hidráulica (força de compactação da amostra).

Lixamento: as amostras foram lixadas manualmente com lixas do tipo "lixa d'água" com diferentes granulometrias (# 220, 320, 400, 600, 1200, 1500 e 2000 mesh), sendo as lixas com granulometrias até 1200 fabricadas com grãos abrasivos óxido de alumínio e as lixas # 1200 e acima fabricadas com grãos abrasivos de carbeto de silício para a realização de um microacabamento superficial uniforme. Ambas as lixas com costado de papel à prova d'água. Todo o processo de lixamento foi realizado sob-refrigeração com água.

Polimento: a etapa de polimento foi executada com panos metalográficos colados a pratos giratórios das politrizes manuais, sobre os quais foram depositados pequenas quantidades de abrasivos, sendo: óxido de alumínio (Al₂O₃) com granulometrias de 9, 3 e 1 µm respectivamente e posteriormente pasta de diamante com granulometria 1/4 µm. Obtendo acabamento superficial com aspecto de espelhado.

Ataque químico: o reagente utilizado foi o Nital 2% (ácido nítrico (HNO₃) 2 ml e álcool etílico 98 ml). O ataque foi realizado por imersão da amostra, durante um período de tempo necessário para revelar a microestrutura do material.

4.1.2.3. Microdureza Vickers

O método de dureza Vickers possui ampla aplicação e aceitação em pesquisas científicas e no meio industrial, o qual foi adotado para medir a dureza dos materiais utilizados neste trabalho. Este método consiste em penetrador de diamante, sob a forma de pirâmide com base quadrada e com ângulo especificado (136°) entre faces opostas ao seu vértice. Este penetrador é forçado contra a superfície da amostra a ser ensaiada, e aguarda por um determinado período de tempo para remoção da força de ensaio. Em seguida é realizada a medição do comprimento de duas diagonais da indentação formada na superfície. A média aritmética dessas duas leituras é considerada para calcular a dureza Vickers. Para aços, a distância entre o centro de qualquer indentação e a aresta da peça de teste deve ser de pelo menos 2,5 vezes a diagonal média da indentação. A distância entre os centros de duas indentações adjacentes deve ser de pelo menos 3 vezes a diagonal média da indentação, no caso de aços. Se duas indentações adjacentes possuem diferenças de tamanho, o espaçamento deve ser baseado na diagonal média da maior indentação (ISO 6507-1, 2005).

A microdureza emprega uma carga, geralmente, menor que 1 Kgf com penetrador de diamante, produzindo uma impressão microscópica. A superfície do corpo de prova deve ser plana e polida. A microdureza Vickers foi escolhida neste trabalho devido à necessidade de determinação da dureza de baixas espessuras de camada (ZR e ZAC) resultantes do processo EDM, assim como para o levantamento de curvas de profundidade de nitretação por NDE.

Os ensaios de microdureza foram realizados no laboratório de materiais da PUC Minas em Contagem, por meio de microdurômetro automático *Shimadzu* modelo HMV-2T E, com microscópio óptico incorporado e *software Easy Test* HMV-AD versão 3.10 para obtenção de imagens capturadas por meio de câmara digital incorporada ao equipamento. Carga de 10 gf (98,07 mN) e tempo de 20 segundos foram definidos para obtenção da impressão de dureza.

A Figura 26 apresenta o equipamento utilizado neste trabalho.

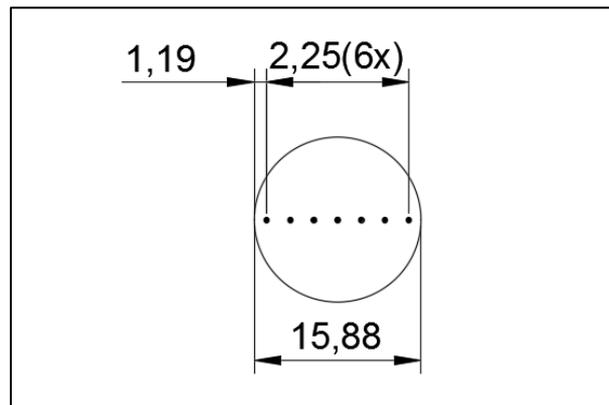
Figura 27 - Microdurômetro Vickers.



Fonte: Autor, 2016.

Para a caracterização inicial do aço ABNT 4140, foram realizadas sete medições de dureza em cada uma das quatro amostras apresentadas anteriormente (Tabela 10). A Figura 27 apresenta o desenho esquemático identificando o local onde foi realizado as indentações Vickers destas amostras.

Figura 28 - Desenho esquemático das indentações Vickers



Fonte: Autor, 2016.

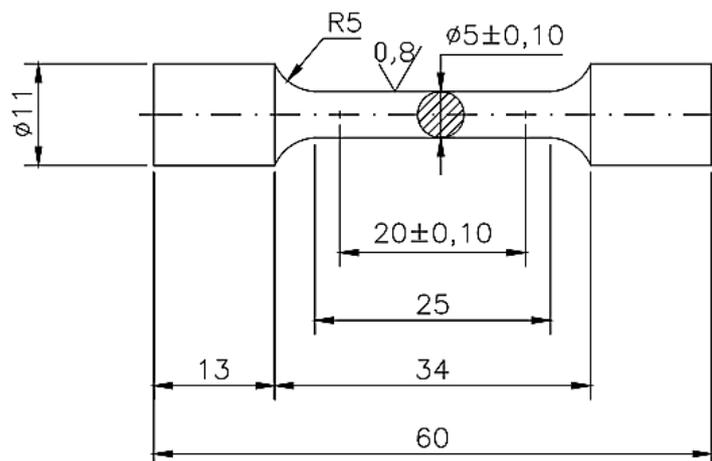
Observa-se que as indentações foram realizadas radialmente e igualmente espaçadas de 2,25 mm a partir da distância de 1,19 mm da superfície para o núcleo das amostras de diâmetro 15,88 mm.

4.1.2.4 Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Materiais da Engenharia Experimental da FCA Fiat Chrysler Automóveis Brasil Ltda, utilizando máquina de tração universal INSTRON, modelo 4467 com capacidade de carga máxima de 30 kN (3000 kgf) à máxima velocidade de 500 mm/min, velocidade mínima de 0,005 mm/min, frequência de 47 à 63 Hz e à temperatura ambiente (INSTRON, 1994). Esta máquina é acoplada a um computador com *software* de controle, recebimento e tratamento de dados.

Foram fabricados três (3) corpos de prova para ensaios de tração a partir da barra cilíndrica laminada de seção transversal circular de 15,88 mm (5/8"). Inicialmente foi realizado corte primário desta barra por meio de máquina serra de fita Franho FM 1600, obtendo amostras com comprimento de 80 mm, as quais foram faceadas nas extremidades e, realizado furo de centro em uma das extremidades, com o uso de torno universal. Por meio de torno CNC ROMI modelo *Centur 30D* com CNC Siemens 802D, foi realizado a usinagem dos corpos de prova de tração obtendo amostras com dimensões e geometria conforme apresentado (Figura 28).

Figura 29 - Geometria dos corpos de prova para ensaios de tração



Fonte: ASTM A370-15; NBR 6152 (2002) (adaptado pelo autor, 2016).

Nota-se que para atender ao equipamento de tração utilizado, estabeleceu o diâmetro inicial útil do corpo de prova (D_0) de 5 mm e comprimento original inicial

(L_0) de 20 mm, o qual esta em conformidade com a norma NBR 6152 (2002), que especifica o comprimento original L_0 não deve ser menor que 20 mm.

Os ensaios foram realizados conforme normas ASTM A370-15 e NBR 6152 (2002). Com este procedimento foi possível obter as curvas tensão *versus* deformação para o material estudado, pelas quais determinou o limite de escoamento e o limite de resistência experimental do aço ABNT 4140.

Algumas equações utilizadas nesta etapa estão apresentadas abaixo, sendo o valor do limite de escoamento obtido do gráfico, tensão *versus* deformação, a partir da deformação 0,2% (alongamento não proporcional). As curvas com o desenho das linhas paralelas à parte reta da curva, na distância (horizontal) equivalente à porcentagem não proporcional prescrita, 0,2%, foram geradas automaticamente pelo microprocessador INSTRON. O ponto de intersecção desta linha com a curva forneceu a força correspondente à tensão de escoamento. A Equação (7) representa o cálculo desta tensão de escoamento (LE), a qual é obtida dividindo esta força pela área da seção transversal original do corpo de prova (S_0). O *software* INSTRON possibilitou obter este diagrama força *versus* alongamento com exatidão. A Equação (8) é utilizada para obter a tensão limite de resistência do material, que consiste em dividir a força máxima aplicada ao corpo de prova pela área S_0 .

$$LE = \frac{F_e}{S_0} \quad (7)$$

$$LRT = \frac{F_m}{S_0} \quad (8)$$

Onde:

LE: Tensão limite de escoamento;

F_e : Força correspondente à tensão limite de escoamento;

S_0 : Área da seção transversal original (comprimento paralelo corpo de prova);

LRT: Tensão limite de resistência à tração;

F_m : Força máxima aplicada

O alongamento percentual no ensaio de tração foi obtido do equipamento INSTRON, o qual possui instalado um extensômetro de deformação axial (vídeo). Os

cálculos são obtidos de acordo com a Equação (9), sendo apresentadas as Equações complementares (10), (11), (12), (13) e (14):

$$A(\%) = \frac{(L_f - L_0)}{L_0} \times 100 \quad (9)$$

$$e = \frac{\Delta l}{L_0} \quad (10)$$

$$\Delta l = L_f - L_0 \quad (11)$$

$$\varepsilon = \ln(e + 1) \quad (12)$$

$$T = \frac{F}{S_0} \quad (13)$$

$$\sigma = T(e + 1) \quad (14)$$

Onde:

A(%): Alongamento percentual após ruptura;

L_f: Comprimento de medida final do corpo de prova, após ruptura;

L₀: Comprimento de medida original, antes da aplicação da força;

e: Deformação convencional de engenharia;

Δl: Alongamento após ruptura (L_f - L₀);

ε: Deformação real;

T: Tensão convencional;

F: Força aplicada;

σ: Tensão real.

Os ensaios de tração e as curvas tensão *versus* deformação convencionais possibilitaram a determinação das propriedades de resistência mecânica e ductilidade do material ABNT 4140, possibilitando assim calcular o limite de

resistência à tração (LR), o limite de escoamento (LE) e o alongamento percentual uniforme (Al, %), de acordo com a norma NBR 6152 (2002).

4.2. Eletrodo ferramenta

Os critérios empregados na seleção de materiais utilizados como eletrodos ferramenta na EDM são, principalmente, alta condutividade elétrica, alto ponto de fusão, baixo desgaste, custo, disponibilidade do material e facilidade de fabricação. De acordo com Silva (2012), pela alta condutividade elétrica do cobre e alto ponto de fusão da grafita, eles foram os materiais que apresentaram melhor desempenho como eletrodos ferramenta para o processo EDM.

No presente trabalho, o cobre eletrolítico foi selecionado como eletrodo ferramenta para os processos de usinagem e nitretação por NDE dos corpos de prova para ensaios de fadiga. Foi fabricado uma matriz com cavidade do formato do corpo de prova padrão de fadiga. Estes eletrodos foram definidos a partir de uma barra de cobre eletrolítico com seção transversal quadrada de 25,4 mm e 1000 mm de comprimento, material conforme recebido. Inicialmente foi retirado, por meio de corte com máquina de serra de fita Franho FM 1600, amostras com comprimento de 54 mm. Por meio do processo de fresamento, foi realizado a usinagem e esquadrejamento das faces externas de cada amostra, de forma a obter comprimento final útil de 52 mm para cada matriz.

4.3. Fabricação dos eletrodos ferramenta e peça (CAD/CAM/CNC)

O processo EDM com cavidade emprega eletrodo ferramenta com cópia fiel do produto a ser usinado. Após a modelagem 3D no CAD do produto a ser usinado, devem ser modeladas as cavidades do produto. Alguns pesquisadores como Souza (2013) denominam essas cavidades como macho e fêmea, conforme a geometria, convexo e côncavo, respectivamente. Para a modelagem e usinagem de formas geométricas mais complexas, recomenda-se utilizar os sistemas CAM e as máquinas CNC, os quais foram utilizados neste trabalho.

Eletrodos ferramenta e peça foram desenvolvidos por meio de *software SolidWorks* 3D CAD da empresa *Dassault Systèmes*. O sistema CAM utilizado foi o

edgcam versão 2013, sendo a programação NC Siemens 840D. A fabricação da matriz EDM de cobre eletrolítico, foi executada por meio de um centro de usinagem ROMI, modelo *Discovery 560 Bridgeport*, com comando numérico computadorizado (CNC), cujos parâmetros de usinagem utilizados estão resumidos na Tabela 11. Como ferramenta para a usinagem, foi utilizado fresa de topo esférica de metal duro, diâmetro de 6 mm e raio de canto 3 mm.

Tabela 11 - Parâmetros utilizados na usinagem CNC da matriz de cobre

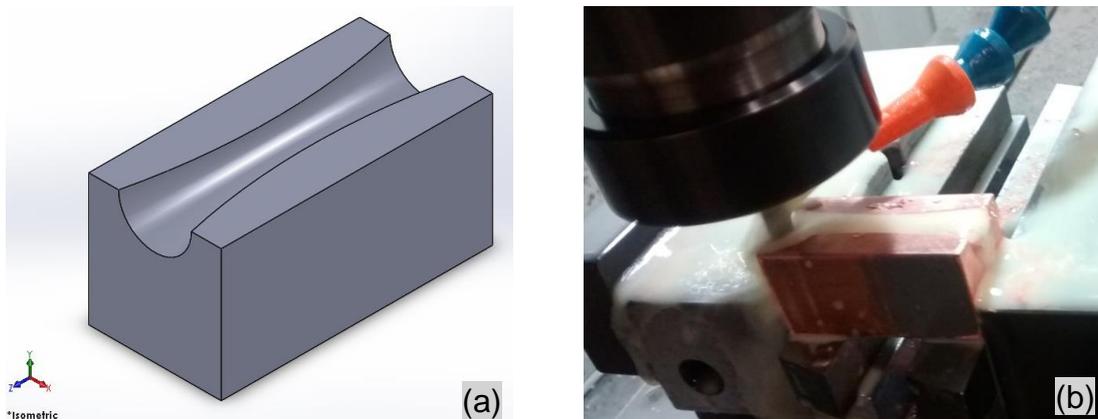
Parâmetro	Desbaste	Acabamento
Velocidade de corte, V_c [m/min]	30	56
Rotação [RPM]	1600	3000
Avanço, f [mm/min]	300	480
Incremento de corte, a_p [mm]	0,5	0,15

Fonte: Autor, 2016.

Para a fabricação do eletrodo peça em aço ABNT 4140, utilizou-se um torno da linha ROMI *Centur 30D* com CNC SIEMENS 802D, pastilha de corte *CoroTurn® 107* para torneamento, código ISO VBMT 11 03 04-PF 4215, fabricante Sandvik Coromant, fluido de corte *Synergy 905*, fabricante *Blaser Swissslube*.

A Figura 30 apresenta o modelo (a) e fabricação do eletrodo ferramenta (matriz EDM) auxiliados por sistema CAD/CAM/CNC (b).

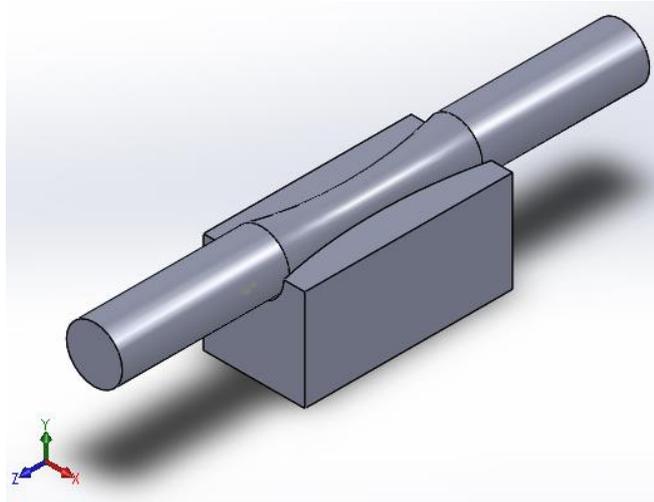
Figura 30 - Projeto e fabricação do eletrodo ferramenta (CAD/CAM/CNC).



Fonte: Autor, 2016.

A Figura 31 apresenta a montagem virtual do eletrodo peça e eletrodo ferramenta, auxiliados por sistema CAD.

Figura 31 - Montagem virtual eletrodo ferramenta e corpo de prova de fadiga.



Fonte: Autor, 2016.

4.4. Usinagem e nitretação por descargas elétricas (EDM / NDE)

Os testes de usinagem e nitretação por descargas elétricas foram realizados no laboratório de ajustagem do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT) do CEFET-MG, campus I.

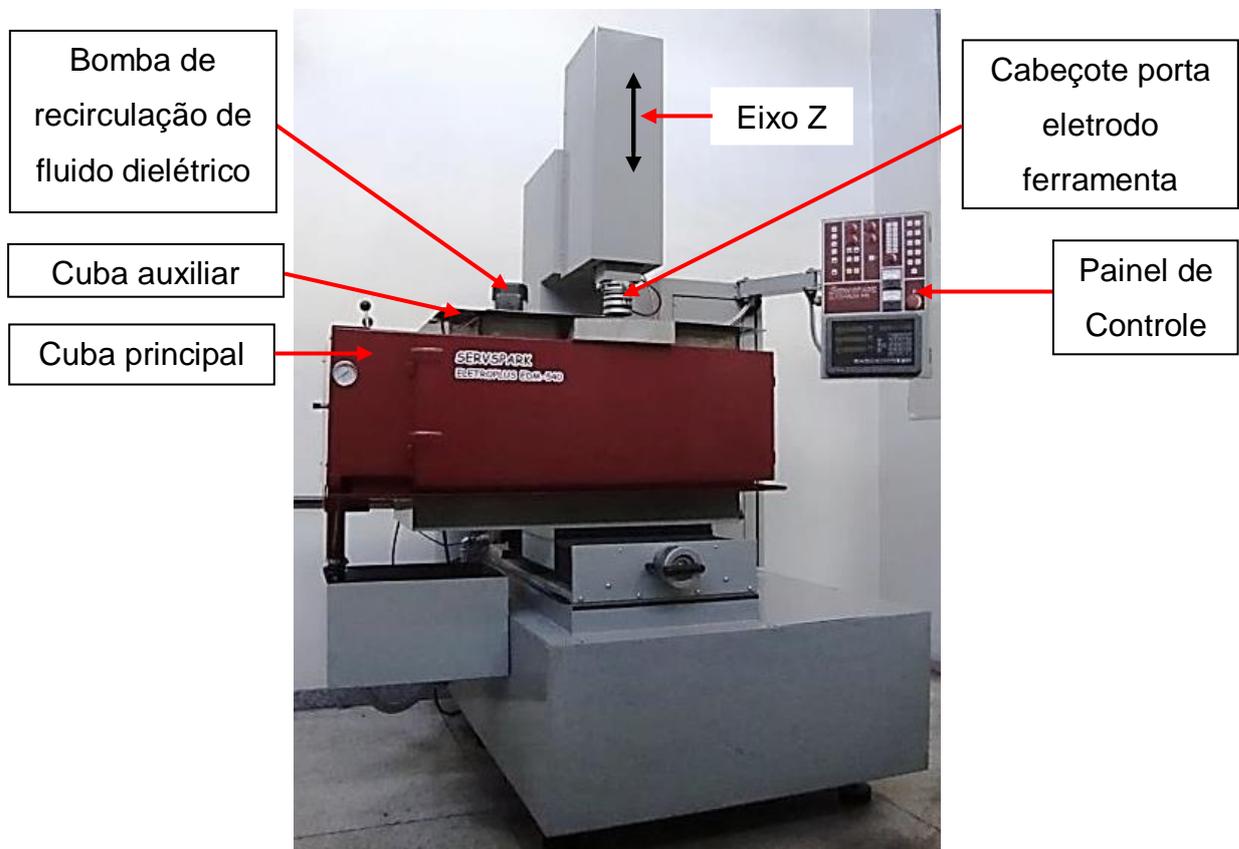
4.4.1. Equipamento EDM e parâmetros operacionais utilizados

Os testes de usinagem e nitretação por descargas elétricas foram realizados em máquina EDM convencional por penetração, modelo Servspark *Eletroplus* EDM-540, corrente elétrica nominal 40 Amperes. Este equipamento possui bandeja de trabalho, também denominada de cuba principal, com aberturas lateral e frontal.

Para realizar este trabalho e viabilizar os resultados, o equipamento original EDM necessitou de algumas adaptações, as quais já estavam implementadas na máquina EDM-540, e incluem: cuba auxiliar fabricada em aço INOX 304 e bomba de recirculação do fluido dielétrico modelo CD 30002 com capacidade de 51 litros por minuto e pressão de 2 metros de coluna d'água (0,2 bar), motor elétrico de corrente

alternada, rotação de 3100 RPM e potência de 120 Watts (0,16 CV), frequência de 60 Hz. Esta bomba tem a função de realizar o transporte do fluido dielétrico para propiciar a lavagem e limpeza de partículas erodidas na fenda de trabalho. Foi utilizado o processo de limpeza por jato lateral, direcionando o fluido dielétrico na região entre o eletrodo e a peça, garantindo assim uma abrangência da superfície de trabalho. A vantagem de utilizar o processo com jato de fluido dielétrico é a melhoria no sistema de lavagem da fenda de trabalho, contribuindo para uma remoção mais eficiente de material do eletrodo peça. Isso resulta em melhoria da taxa de remoção de material (TRM) no processo EDM. Segundo o fabricante Servspark (2014), a limpeza adequada da região de trabalho é importante para a obtenção de melhores rendimentos no processo de usinagem por EDM, uma vez que o acúmulo de quantidades de partículas em determinados pontos da zona de trabalho diminui a resistência, facilitando a formação de descargas anormais que podem formar arcos que prejudicam o desempenho do processo. A máquina EDM utilizada neste trabalho com suas devidas adaptações esta ilustrada (Figura 32).

Figura 32 - Máquina eletroerosão por penetração utilizada no processo EDM



Fonte: Autor, 2016.

Este equipamento possui gerador de controle de pulso, sem CNC, que opera automaticamente após a seleção dos parâmetros operacionais possíveis e as funções disponíveis no painel gerador (controlador). Os parâmetros operacionais são ajustados na IHM da máquina (Interface Homem Máquina) de tal modo a permitir a formação e dissipação de um canal de plasma. A Figura 33 ilustra o painel de controle da máquina EDM-540 com indicação dos parâmetros operacionais que foram ajustados no processo EDM do aço ABNT 4140.

A usinagem por EDM e nitretação por NDE dos corpos de prova para ensaios de fadiga foi estabelecida em duas etapas, que corresponde à usinagem de dois lados do corpo de prova, ambos à 180°. O tempo de duração dos testes EDM, para cada lado do corpo de prova, foi 5 (cinco) minutos.

Figura 33 - Painel de controle da máquina EDM e parâmetros ajustados.



Fonte: Autor, 2016.

Os dados principais e parâmetros operacionais ajustados na máquina EDM estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Dados principais e parâmetros operacionais do processo EDM.

Parâmetros	Seleção
Eletrodo ferramenta	Cobre eletrolítico
Eletrodo peça	Aço ABNT 4140
Fluido dielétrico	Água deionizada
Fonte de nitrogênio	Ureia
Concentração de ureia	30 [g/l]
Volume de água deionizada	55 [l]
Tempo de teste, cada lado do eletrodo peça	5 [min.]
Polaridade do eletrodo ferramenta	Positiva [+]
Tensão para abrir o arco	200 [V]
Tensão de trabalho, “erodindo”	40-50 [V]
Fonte de tensão, “para fornecer a corrente”	96 [V]
Corrente nominal de trabalho	40 [A]
Controle de avanço do servomecanismo (eixo Z), <i>gap</i>	A1 = 1*
Controle de velocidade do servomecanismo, cabeçote	A2 = 1*
Tempo de afastamento periódico da ferramenta	A3 = 2*
Tempo de erosão	A4 = 5*
Tempo de duração do pulso, T _{ON}	A5 = 100 [μs]
Tempo de intervalo do pulso, T _{OFF}	A6 = 10 [μs]
Fator de Serviço, DT	90 [%]

Fonte: Autor, 2016.

* Posição da chave ajustada diretamente no painel de controle da EDM-540, sem unidade.

Foi utilizado polaridade positiva por promover menor desgaste do eletrodo ferramenta.

Como fluido dielétrico foi utilizada solução de água deionizada misturada em ureia, na concentração de 30 g/l, sendo o volume de 55 litros para garantir a submersão completa da amostra no interior da cuba auxiliar. Utilizou-se nos testes EDM a ureia Reforce N da Petrobrás Fábrica de Fertilizantes Nitrogenados da Bahia. O Reforce N é um suplemento alimentar para ruminantes (bovinos, caprinos, ovinos e bubalinos), que se apresenta na forma de sólido granulado, na cor branca, propiciando aos criadores substancial economia nos custos de ração, uma vez que fornece nitrogênio não-protéico (Petrobrás, 2016).

A Tabela 13 apresenta as propriedades físicas e químicas principais da ureia Reforce N.

Tabela 13 - Propriedades físicas e químicas da ureia Reforce N.

Aspecto (estado físico, forma e cor):	Sólido branco em grânulos
Odor e limite de odor:	Inodoro
Ponto de fusão:	134 °C
Ponto de ebulição inicial e faixa de temperatura de ebulição:	O produto se decompõe antes do ponto de ebulição ser atingindo
Inflamabilidade (sólido, gás):	Não inflamável
Pressão de vapor:	$1,2 \times 10^{-5}$ mmHg a 25 °C
Solubilidade(s):	Levemente solúvel em éter. Solúvel em álcool (20 g/100 g a 20 °C)
Viscosidade:	1,88 cP a 20 °C (solução a 50 %)
Densidade:	1,335 a 20 °C (estado sólido)

Fonte: Petrobrás, 2015 (adaptada pelo autor, 2016).

A composição e informações sobre ingredientes da ureia utilizada esta apresentada na Tabela 14.

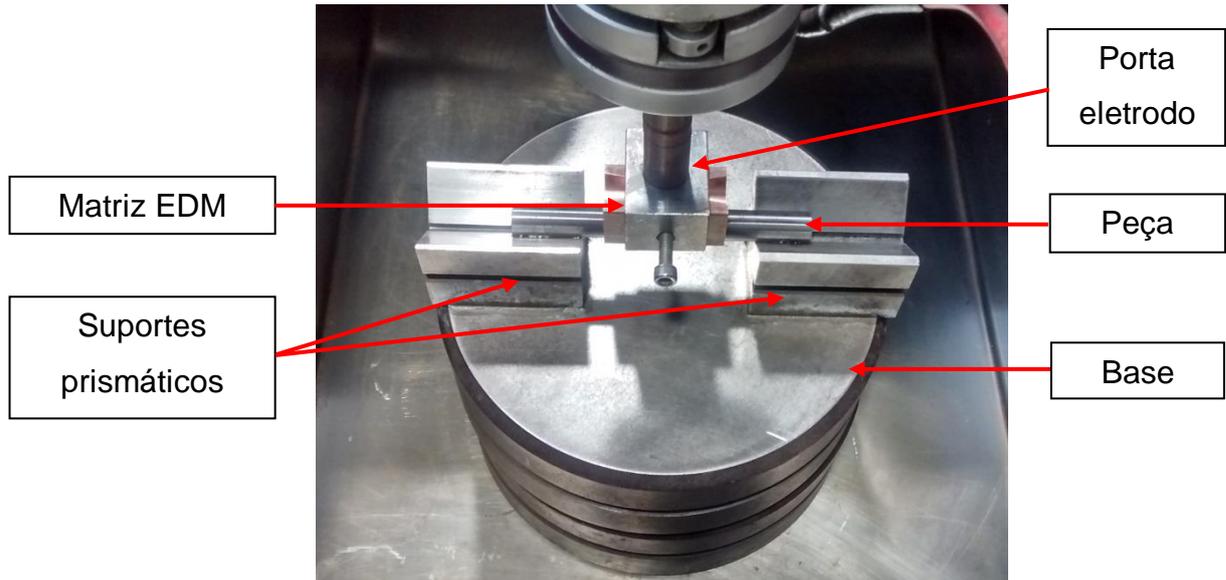
Tabela 14 - Composição e informação sobre os ingredientes da ureia utilizada.

Componente	Concentração	CAS
Nitrogênio	46% (mín.)	7727-37-9
Amônia	200 [ppm]	7664-41-7
Biureto	1 [ppm]	108-19-0
Formol	100 [ppm]	50-00-0

Fonte: Petrobrás, 2015 (adaptada pelo autor, 2016).

A Figura 34 apresenta a matriz EDM (eletrodo ferramenta) e o corpo de prova para ensaios de fadiga (eletrodo peça) fabricado em aço ABNT 4140 montados no interior da cuba auxiliar.

Figura 34 - Eletrodo peça e matriz EDM montados dentro da cuba auxiliar



Fonte: Autor, 2016.

A condutividade elétrica do fluido dielétrico foi medida antes e após as séries de experimentos EDM, com o uso de condutivímetro portátil, modelo CD-203 pHtek com faixa de operação de 0 a 1.999 $\mu\text{S}/\text{cm}$, resolução de 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e incerteza de $\pm 2\%$. A água deionizada foi obtida utilizando água potável com condutividade elétrica média de 155 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e após passar por aparelho deionizador com capacidade de vazão de 50 l/h, a condutividade elétrica adquiriu valor de 0 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Este deionizador é equipado com lâmpada indicadora de condutividade limite de 3 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

4.4.2. Testes preliminares de usinagem por EDM e nitretação por NDE

Os testes preliminares de usinagem por EDM e nitretação por NDE foram realizados com o objetivo de especificar o sobremetal, a geometria e diâmetro menor (útil) a serem obtidos durante o processo de usinagem convencional (torneamento CNC) dos corpos de prova para ensaios de fadiga. Sobremetal este que foi removido posteriormente nos processos EDM e NDE. Foi definido, também nesta etapa, o tempo de realização dos testes EDM e NDE para cada lado do corpo de prova de fadiga, uma vez que a matriz possui geometria que usina 180° da seção transversal do corpo de prova por vez. Os resultados desta etapa estão apresentados (Tabela 15).

Tabela 15 - Especificação dos corpos de prova de fadiga após usinagem CNC

Corpo de prova	Diâmetro menor após usinagem CNC [mm]	Tempo de processo [min], cada lado do corpo de prova de fadiga
Usinado por EDM	8,75	5
Nitretado por NDE	8,75	5

Fonte: Autor, 2016.

Nota-se que o diâmetro menor (útil) dos corpos de prova de fadiga, após o processo de usinagem convencional (torneamento CNC), foi estabelecido em 8,75 mm, o qual inclui o sobremetal a ser removido durante os processos de usinagem EDM, lixamento e polimento.

4.5. Análise de rugosidade

Após o processo de usinagem de cada grupo de amostras, e antes de realizar as medições de rugosidade, as superfícies dos corpos de prova de fadiga foram preparadas por meio de lixamento com lixas d'água de granulometria # 220, 320, 400, 600, 1200, 1500 e 2000 mesh, respectivamente, e polimento com abrasivo óxido de alumínio com granulometria 9, 3 e 1 μm , obtendo acabamento superficial com aspecto de espelhado. O processo de lixamento e polimento foi realizado em torno convencional com velocidade de 660 RPM e tempo de duração dois (2) minutos para cada sequência de lixa e abrasivos de polimento mencionados. Sendo realizados na direção longitudinal do corpo de prova, conforme ASTM E466-15.

Na sequência, a rugosidade ou erro microgeométrico de cada corpo de prova foi medido antes de realizar os ensaios de fadiga. Um sistema de avaliação do estado da superfície real modelo RUGOSURF 20 de fabricação TESA *Technology* foi utilizado. Este consiste em uma caneta (ponta) que desloca sobre determinada região da superfície em análise, com velocidade constante. O comprimento de amostragem neste aparelho eletrônico, chamado de *cut-off*, "le" foi definido de 0,8 milímetros. A distância total (lt) percorrida pelo apalpador do rugosímetro sobre a superfície em análise, corresponde a cinco vezes o "le" mais a distância para atingir a velocidade de medição (extremidade inicial da medição) e para a parada do apalpador (extremidade final). O comprimento total de avaliação (efetivo) de cada

medição realizada corresponde assim a cinco vezes o comprimento de amostragem *cut-off*, sendo descartadas pelo aparelho as medições das extremidades, mantendo os cinco *cut-offs*, cujos valores médios são indicados pelo rugosímetro.

Todas as medições de rugosidade Ra foram realizadas na região onde o corpo de prova sofre maior ação do carregamento de fadiga, ou seja, no comprimento útil e na região do diâmetro menor da seção de teste (8,0 mm). Foram realizadas três medições em pontos equidistantes cobrindo a circunferência do corpo de prova, de forma a obter maior variação da rugosidade do corpo de prova.

4.6 Ensaio de fadiga axial em corpos de prova ABNT 4140

O ensaio de fadiga axial consiste em testar vários corpos de prova em diferentes níveis de tensão, com o objetivo de construir a curva S-N. A carga aplicada pode ser facilmente calculada em função da tensão definida e do diâmetro do corpo de prova na sua menor seção transversal. Para a obtenção da resistência à fadiga, foi utilizado o método tensão-número de ciclos (S-N) juntamente com o domínio de fadiga de alto ciclo, o qual predomina na maioria dos meios de projeto.

Os ensaios de fadiga foram realizados no Laboratório de Materiais da Engenharia Experimental FCA Fiat Chrysler Automóveis Brasil Ltda, utilizando equipamento de fadiga axial servo-hidráulico fabricado pela INSTRON e com as principais características descritas (INSTRON, 2016):

- Modelo 8801: Sistema de testes de fadiga servo-hidráulico;
- Capacidade de carga axial de tração e compressão de até ± 100 kN;
- Malha fechada controlada por computador - *software* INSTRON;
- Registro automático do número de ciclos, quando o corpo de prova rompe.

O equipamento utilizado possui contador de ciclos do ensaio, quando ocorre a ruptura do corpo de prova, a contagem de ciclos é interrompida automaticamente e o registro é armazenado.

Foram realizados ensaios de fadiga axial em 40 (quarenta) corpos de prova fabricados em aço ABNT 4140, distribuídos em três grupos: estado laminado (conforme recebido), usinados por EDM, e, por último, nitretados por NDE, com o objetivo de avaliar o material e o processo de fabricação que lhe garanta a maior

resistência à fadiga. Ambos os grupos de materiais foram submetidos a ensaios de fadiga axial de alto ciclo, sob carregamento cíclico de tração-tração, frequência de prova de 25 Hz e razão de tensão 0,1 ($R = 0,1$, conforme utilizado por Martins (2010) também em equipamento Instron 8801). Os ensaios de fadiga axial, do presente trabalho, foram realizados em temperatura controlada de 23 °C na sala de ensaios, e repetido com cada corpo de prova, os quais foram solicitados a diferentes níveis de tensão. Os níveis de tensão de fadiga axial foram definidos com base nos resultados obtidos dos ensaios de tração, sendo utilizado o limite de resistência à tração do aço ABNT 4140 laminado para definir cada nível de tensão.

Os corpos de prova foram identificados conforme o tipo de material, sendo os laminados identificados com a letra “P”, nitretados por NDE com letra “N” e os usinados por EDM com fluido dielétrico água deionizada identificados com letra “A”.

A Tabela 16 apresenta um resumo dos grupos de ensaios de fadiga axial realizados e a identificação dos respectivos corpos de prova para cada grupo.

Tabela 16 - Grupos de ensaios de fadiga realizados em amostras ABNT 4140.

Grupo de ensaio	Denominação
1	Corpos de prova (Laminado e usinado por CNC, “P”)
2	Corpos de prova (Nitretados por NDE, “N”)
3	Corpos de prova (Usinados por EDM, “A”)

Fonte: Autor, 2016.

Os ensaios de fadiga axial foram realizados conforme especificado pela norma ASTM E466-15.

As Tabelas (17, 18, 19, 20 e 21) apresentam o resumo dos ensaios realizados para cada corpo de prova de cada grupo, com a respectiva identificação e o nível de tensão que foi submetido. Os corpos de prova laminados e usinados por CNC (P13, P14, P15) e nitretados por NDE (N13, N14, N15), representam a réplica dos ensaios de fadiga axial com o maior nível de tensão (80% do limite de resistência), com o objetivo de obter mais resultados neste nível de tensão.

Tabela 17 - Corpos de prova de fadiga do grupo 1.1 - laminado e usinado CNC.

GRUPO 1.1 - "P"	Corpo de prova	Nível de Tensão
Nível 1	P1	0,80*LRT
	P2	0,80*LRT
	P3	0,80*LRT
Nível 2	P6	0,75*LRT
	P10	0,75*LRT
	P7	0,75*LRT
Nível 3	P11	0,725*LRT
	P12	0,725*LRT
Nível 4	P8	0,70*LRT
	P9	0,70*LRT
Nível 5	P4	0,65*LRT
	P5	0,65*LRT

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 18 - Corpos de prova de fadiga do grupo 1.2 - laminado e usinado CNC.

GRUPO 1.2 - "P"	Corpo de prova	Nível de Tensão
Nível 1	P13	0,80*LRT
	P14	0,80*LRT
	P15	0,80*LRT

Tabela 19 - Corpos de prova de fadiga do grupo 2.1 - nitretado por NDE.

GRUPO 2.1 - "N"	Corpo de prova	Nível de Tensão
Nível 1	N1	0,80*LRT
	N2	0,80*LRT
	N3	0,80*LRT
Nível 2	N4	0,65*LRT
	N12	0,65*LRT
Nível 3	N9	0,60*LRT
	N10	0,60*LRT
	N11	0,60*LRT
Nível 4	N6	0,55*LRT
	N7	0,55*LRT
	N8	0,55*LRT
Nível 5	N5	0,50*LRT

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 20 - Corpos de prova de fadiga do grupo 2.2 - nitretado por NDE.

GRUPO 2.2 – “N”	Corpo de prova	Nível de Tensão
Nível 1	N13	0,80*LRT
	N14	0,80*LRT
	N15	0,80*LRT

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 21 - Corpos de prova de fadiga do grupo 3 - usinado por EDM.

GRUPO 3 – “A”	Corpo de prova	Nível de Tensão
Nível 1	A1	0,80*LRT
	A2	0,80*LRT
Nível 2	A5	0,75*LRT
	A6	0,75*LRT
Nível 3*	A3*	0,65*LRT
	A4*	0,65*LRT
Nível 4	A7	0,50*LRT
	A8	0,50*LRT
Nível 5	A9	0,45*LRT
	A10	0,45*LRT

Fonte: Autor, 2016.

Observa-se que para o levantamento das curvas S-N, foram utilizados 5 níveis de tensão para os ensaios de fadiga axial do aço ABNT 4140 laminado, nitretado por NDE e usinado por EDM. Para os materiais do grupo nitretados por NDE e usinados por EDM não se conhecia precisamente qual era a melhor tensão para realizar os ensaios, e assim foi definido conforme o procedimento abaixo.

Para ensaiar o primeiro corpo de prova de cada grupo, foi definido a aplicação da carga correspondente ao maior nível de tensão calculado (80% de LRT) conforme estabelecido nas Tabelas 17 à 21. Este valor de tensão máxima é próximo ao limite de resistência do material de referência laminado e usinado por CNC, o qual foi obtido no ensaio de tração. Possibilitando assim obter um ponto da curva S-N mais rápido, uma vez que a vida em fadiga decresce com o aumento da carga aplicada. Em seguida, os outros corpos de prova foram ensaiados com cargas sucessivamente mais baixas, até se obter o limite de fadiga (*run out*), ou seja, os corpos de prova atinjam o número de cinco milhões de ciclos (5×10^6), estabelecido como ponto de corte do ensaio de fadiga, para ambos os grupos e corpos de prova

ensaiados. Este valor 5×10^6 ciclos foi definido em função de estar dentro da faixa de ciclos definida como fadiga de alto ciclo e vida finita, conforme apresentado anteriormente (Figura 7), além de corroborar com valor usual pela FCA Fiat para a realização de ensaios de fadiga de materiais metálicos.

4.7 Caracterização microestrutural e ensaios de dureza em amostras ABNT 4140

A morfologia das superfícies das amostras de aço ABNT 4140 foi observada por meio de microscópio eletrônico de varredura (MEV) *Shimadzu*. Para analisar a microestrutura das camadas refundidas e nitretadas, as amostras foram preparadas por meio de processos metalográficos e análise executada com microscópio óptico marca *KONTROL®*, modelo 1M713 equipado com *software Scope photo 3.0*, microscópio óptico incorporado à microdurômetro *Shimadzu* modelo HMV-2T E com *software Easy Test HMV-AD* versão 3.10 e também por meio de MEV.

4.7.1 Morfologia das superfícies usinadas por EDM e nitretadas por NDE

A morfologia das superfícies de amostras de aço ABNT 4140 nitretadas por NDE usando fluido dielétrico solução de água deionizada e ureia, na concentração de 30 g/l, e usinadas por EDM com dielétrico água deionizada foram verificadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), tensão de 15 kV e detecção de imagens de elétrons secundários.

4.7.2 Micrografia em amostras de aço ABNT 4140

O ensaio de micrografia foi utilizado para analisar a microestrutura do material e determinar seus constituintes estruturais. Sendo que após os testes de eletroerosão, foram preparadas três amostras por técnicas convencionais de preparação metalográfica, uma usinada por EDM e duas nitretadas por NDE. E mais nove amostras preparadas após os ensaios de fadiga, as quais foram obtidas das amostras A1, P15 e N13, ambas ensaiadas a 80% do limite de resistência à tração

do material ABNT 4140 laminado, de forma a analisá-las com o mesmo parâmetro de ensaio de fadiga.

A preparação metalográfica consistiu no corte transversal da seção dessas amostras, com o uso de disco abrasivo, embutimento com resina especial para garantir a retenção de borda, lixamento manual, polimento e ataque químico com solução Nital 2%. O corte foi realizado por meio de cortadora metalográfica de bancada modelo CM80 Teclago, com lubri-refrigeração constante, e feito na seção transversal à superfície usinada por EDM, com o objetivo de se conseguir superfícies planas da seção transversal para análise via microscopia óptica. Nesta etapa foi utilizado disco de corte abrasivo para uso geral em aços e ferros fundidos. Em seguida, foi feito o embutimento a quente por meio de embutidora Arotec PRE-40 automática, utilizando resina epóxi termo-endurecível. Posteriormente, foi feito o lixamento manual nas amostras, empregando lixas d'água com diferentes granulometrias (# 180, 220, 320, 400, 600, 1200, 1500 e 2000 mesh), sendo as lixas com granulometrias até 1200 fabricadas com grãos abrasivos óxido de alumínio e as lixas # 1200 e acima fabricadas com abrasivos carbetos de silício para a realização de microacabamento superficial uniforme. Ambas as lixas com costado de papel à prova d'água. O polimento foi realizado em politriz manual rotativa, utilizando óxido de alumínio com granulometrias de 9, 3 e 1 μm respectivamente e posteriormente pasta de diamante com granulometria 1/4 μm , ambos com tempo de 2 minutos. Posteriormente as amostras foram limpas com álcool etílico PA e secadas com secador. O acabamento superficial obtido apresentou aspecto de espelhado indicando boa planicidade e baixa rugosidade. As micrografias e medições de espessuras das camadas refundidas e nitretadas foram realizadas usando microscópio óptico *KONTROL®* modelo 1M713, microscópio óptico incorporado à microdurômetro *Shimadzu* modelo HMV-2T E e também em MEV

4.7.3 Microdureza Vickers em amostras ABNT 4140

Os ensaios de microdureza Vickers foram realizados no laboratório de materiais da PUC Minas em Contagem, por meio de microdurômetro automático *Shimadzu* modelo HMV-2T E, com microscópio óptico incorporado e *software Easy Test* HMV-AD versão 3.10, imagens capturadas por meio de câmera digital acoplada

ao equipamento. Carga de 10 gf (98,07 mN) e tempo de 20 segundos foram definidos para obtenção das indentações, as quais foram realizadas em seção transversal de amostras do aço ABNT 4140 nos estados conforme recebido (laminado), usinado por EDM e nitretado por NDE.

As amostras foram preparadas por técnicas metalográficas após os testes de usinagem EDM e nitretação por NDE. O procedimento de preparação metalográfica adotado foi similar ao realizado para as amostras descritas no tópico 4.1.3, exceto que aqui foi feito o embutimento utilizando resina epóxi termo-endurecível, carregada com minerais, com baixa contração e boa aderência. Além disso, por possuir dureza relativamente mais elevada que as resinas comuns, esta resina é recomendada para a preservação de bordas e manutenção de planicidade. Isso evita que a camada refundida se desprenda durante o lixamento e possibilita obtenção de indentações próximas da superfície, característica esta essencial em processos EDM e NDE, uma vez que a zona refundida e a camada nitreta possuem baixas espessuras.

4.7.4 Superfícies fraturadas por fadiga axial

A observação das superfícies de fratura por fadiga axial foi conduzida por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e realizada para as três condições de fabricação dos corpos de prova:

- ✓ ABNT 4140 laminado, conforme recebido e usinado por CNC;
- ✓ ABNT 4140 nitretado por NDE com solução aquosa de ureia em água deionizada como fluido dielétrico; e,
- ✓ ABNT 4140 usinado por EDM com fluido dielétrico água deionizada.

Os corpos de prova foram preparados após a fratura por fadiga axial, que consistiu no recobrimento com verniz da região de interesse (fratura), com o objetivo de proteger a superfície e evitar a contaminação no corte subsequente. Posteriormente, as amostras a serem observadas passaram por operação de limpeza em ultrassom durante 5 minutos, as quais foram imersas em acetona.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos dos ensaios e procedimentos realizados neste trabalho, assim como considerações gerais sobre os resultados.

5.1. Caracterização inicial do aço ABNT 4140

Os resultados da caracterização realizada em amostras do aço ABNT 4140 estão apresentados nos tópicos 5.1.1, 5.1.2, 5.1.3 e 5.1.4.

5.1.1. Análise química do aço ABNT 4140

A análise química do ABNT 4140 revelou os seguintes elementos principais, percentual em peso (Tabela 22).

Tabela 22 - Análise química (% em peso) do aço ABNT 4140

Elemento Químico	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	Desvio Padrão	Apresentação
C	0,399	0,402	0,404	0,402	0,003	0,402±0,003
Mn	0,797	0,804	0,807	0,803	0,005	0,803±0,005
P	0,012	0,013	0,012	0,012	0,001	0,012±0,001
S	0,003	0,004	0,003	0,003	0,001	0,003±0,001
Si	0,326	0,327	0,327	0,327	0,001	0,327±0,001
Cr	0,889	0,897	0,894	0,893	0,004	0,893±0,004
Mo	0,182	0,184	0,183	0,183	0,001	0,183±0,001
Fe	97,180	97,160	97,160	97,167	0,012	97,167±0,012

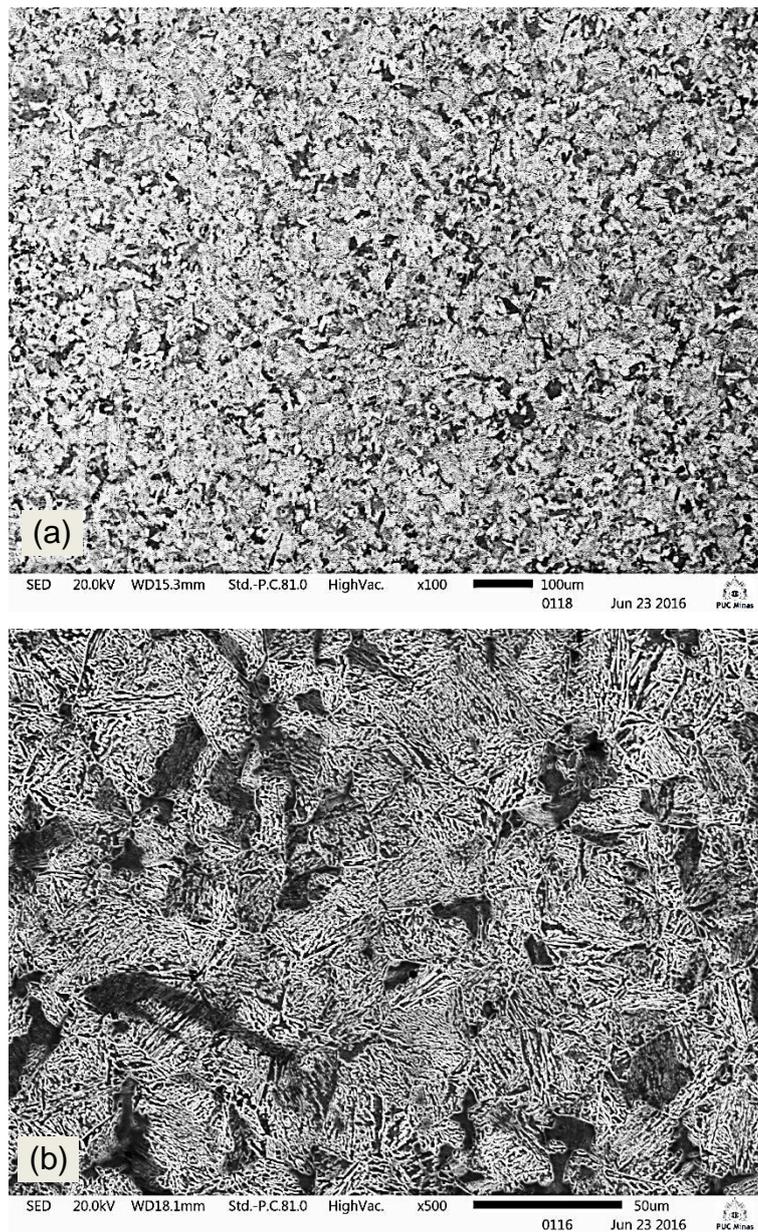
Fonte: Autor, 2016.

Nota-se que estes resultados corroboram com a especificação SAE J404 (SAE, 2000) e catálogos de fabricantes (Gerdau, 2011; ArcelorMittal, 2013). A presença de elementos químicos como Cr, Mo, favorecem a nitretação. Estes valores referem ao resumo obtido após análise química de três amostras do aço ABNT 4140, sendo os resultados completos disponíveis no Anexo A.

5.1.2. Microestrutura do aço ABNT 4140

A Figura 35 (a) e (b) apresenta microestrutura de amostra do aço ABNT 4140 no estado conforme recebido (CR). Ampliações: (a) 100x; (b) 500x. Ataque químico com reagente Nital 2%.

Figura 35 - Micrografias de amostra ABNT 4140 no estado conforme recebido.

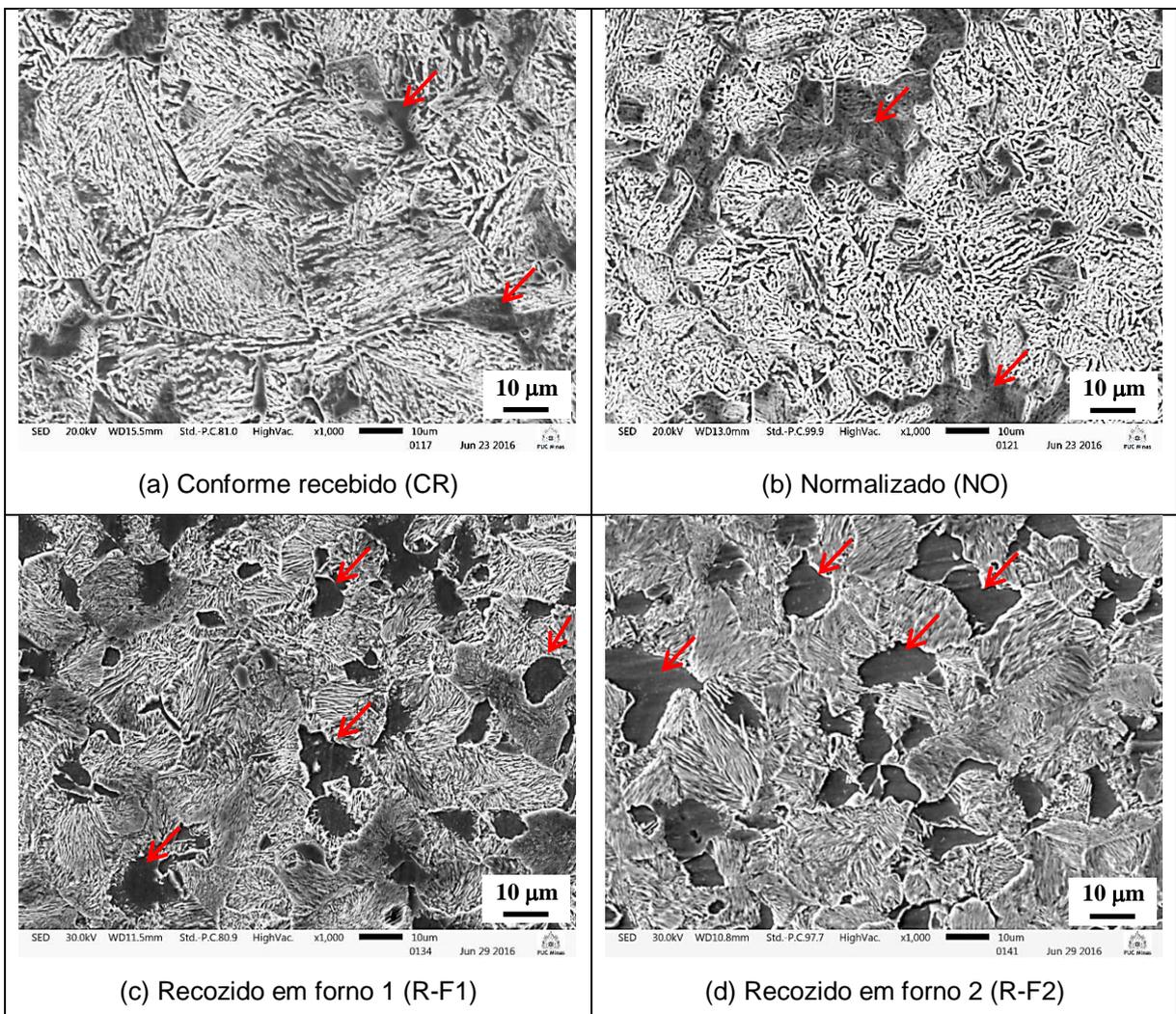


Fonte: Autor, 2016.

Observa-se a microestrutura com alguns cristais de ferrita e nódulos de perlita fina, sendo a quantidade de perlita maior devido à presença de elementos de liga e taxa de resfriamento após a laminação.

A Figura 36 apresenta microestrutura de amostras do aço ABNT 4140 nos estados: (a) conforme recebido; (b) normalizado a 900°C por 50 minutos e resfriado à temperatura ambiente; e, recozido pleno a 900°C em forno 1 (c) e forno 2 (d). Ampliação de 1000x com ataque químico realizado com reagente Nital 2%.

Figura 36 - Micrografias de amostras ABNT 4140 nos estados indicados.



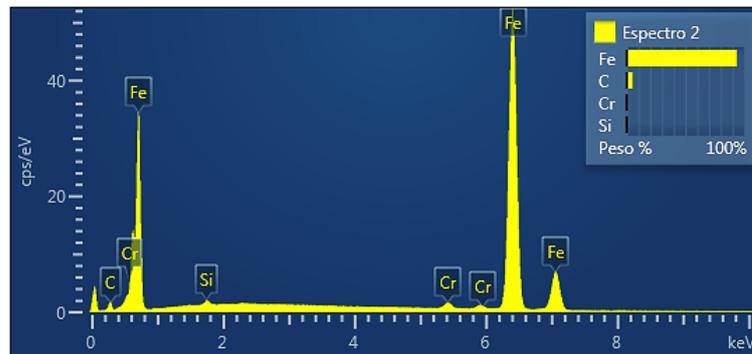
Fonte: Autor, 2016.

Observa-se que o material normalizado apresenta tamanho de grão menor que o material laminado (conforme recebido). Enquanto o material recozido em função do resfriamento mais lento, apresenta microestrutura com maior quantidade

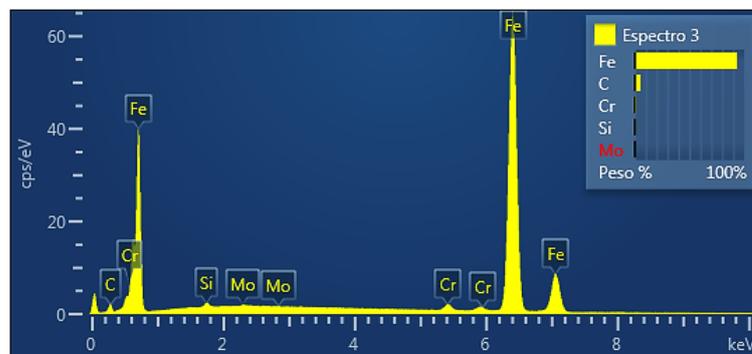
de grãos de ferrita em relação ao material laminado. Nota-se ainda microestrutura predominantemente perlita lamelar e ferrita para o material recozido.

A Figura 37 apresenta espectros das microanálises realizadas sobre amostras de aço ABNT 4140 nos estados conforme recebido, normalizado, recozidos em forno 1 e 2. Análise realizada por meio de espectrômetro de raios-X por dispersão de energia (EDS) modelo *AZtec Oxford Instruments* acoplado ao MEV JSM-IT300.

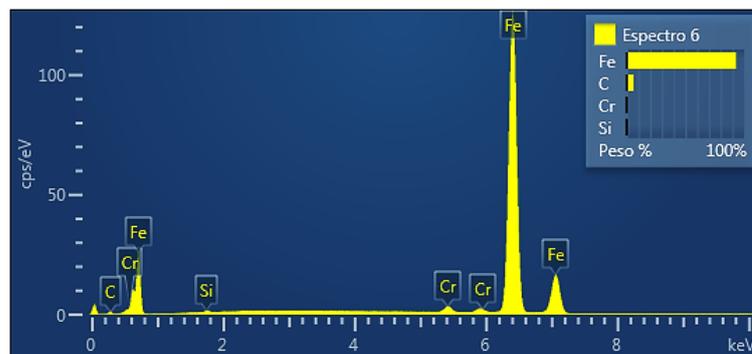
Figura 37 - Espectros das microanálises efetuadas em amostras ABNT 4140.



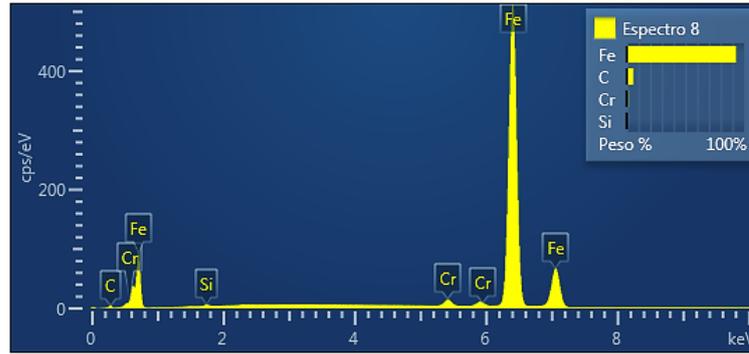
(a) Conforme recebido



(b) Normalizado



(c) Recozido em forno 1



(d) Recozido em forno 2

Fonte: Autor, 2016.

Observa-se a presença de alguns elementos químicos de liga nas amostras, tais como apresentados o Cr, Si e Mo, elementos típicos do aço ABNT 4140.

5.1.3. Microdureza do aço ABNT 4140

A microdureza Vickers foi realizada com carga de 98,07 mN (10 gf) durante tempo de 20 s em amostras do aço ABNT 4140 nos estados conforme recebido (4140 CF), normalizado a 900°C por 50 minutos e resfriado à temperatura ambiente (4140 NO), recozido pleno a 900°C em forno 1 (4140 R-F1) e forno 2 (4140 R-F2). Ambas as amostras atacadas com Nital 2%. A Tabela 23 apresenta o resultado de sete medições de microdureza, a média e desvio padrão.

Tabela 23 - Microdureza Vickers em amostras do aço ABNT 4140.

Medição	4140 CR	4140 NO	4140 R-F1	4140 R-F2
1	236	391	276	263
2	275	351	197	269
3	231	391	252	197
4	318	343	263	257
5	282	361	231	200
6	303	391	236	276
7	303	361	252	200
Média	278,3	369,9	243,9	237,4
Desvio Padrão	± 33,8	± 20,7	± 25,7	± 36,4

Fonte: Autor, 2016.

5.1.4. Ensaios de tração do aço ABNT 4140

Foram realizados ensaios de tração em três amostras ABNT 4140 laminadas.

A Tabela 24 apresenta os resultados deste ensaio, com valores médios de limite de escoamento, limite de resistência à tração e alongamento percentual.

Tabela 24 - Valores dos ensaios de tração (aço ABNT 4140 laminado).

Diâmetro (mm)	Limite de Escoamento (LE, MPa)	Limite de Resistência (LRT, MPa)	Alongamento Percentual (AI, %)
5,1 ±0,01	680,99 ±29,01	1076,92 ±6,11	12,93 ±0,28

Fonte: Autor, 2016.

O limite de resistência obtido do material ABNT 4140 laminado foi utilizado para definir os níveis de tensão utilizados nos ensaios de fadiga axial.

5.2 Condutividade elétrica dos flúidos dielétricos

A condutividade elétrica inicial da água deionizada de ambos os processos, usinagem por EDM e nitretação NDE, apresentou valor de 0 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

A Figura 38 ilustra o monitoramento da condutividade elétrica inicial da água deionizada para os processos de usinagem por EDM e nitretação NDE antes da diluição da ureia na água, utilizando condutímetro CD-203 pHtek com sua extremidade sensora imersa em água deionizada.

Figura 38 - Condutividade elétrica inicial para os processos EDM e NDE.



Fonte: Autor, 2016.

A condutividade elétrica foi monitorada durante os processos de usinagem por EDM e nitretação NDE com solução aquosa de ureia em água deionizada (30 g/l). A Tabela 25 apresenta a condutividade elétrica média dos fluidos dielétricos utilizados.

Tabela 25 - Condutividade elétrica média dos dielétricos EDM e NDE.

Processo	Condutividade elétrica média ($\mu\text{S/cm}$)	
	Antes do processo	Após o processo
Usinagem por EDM	0	3 ± 1
Nitretação NDE	80 ± 6	100 ± 4

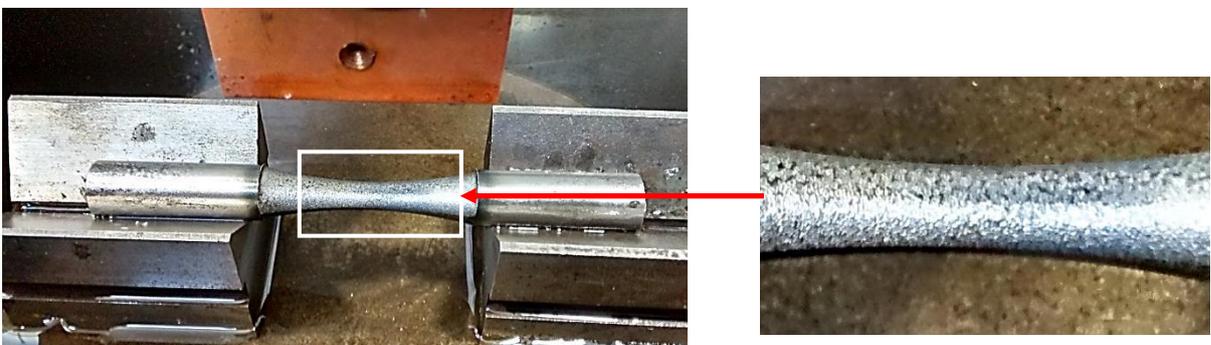
Fonte: Autor, 2016.

Estes valores mostraram-se satisfatórios, uma vez que Santos (2013) obteve condutividade elétrica média de $4 \mu\text{S/cm}$ na usinagem por EDM do ABNT 4140 com água deionizada, e após o monitoramento com diferentes soluções de ureia em água deionizada (de 1 à 20 g/l), obteve valores de 79 à cerca de $2000 \mu\text{S/cm}$, dependendo do nível de concentração de ureia, sendo constatado que a usinagem e nitretação NDE não foi possível à partir de condutividades elétricas maiores que $1570 \mu\text{S/cm}$. Isso em função da alta condutividade elétrica adquirida pelo fluido.

5.3 Eletrodo peça usinado e nitretado por NDE

A Figura 39 apresenta o processo de usinagem e nitretação NDE de corpo de prova para ensaios de fadiga em ABNT 4140 utilizando matriz de cobre eletrolítico.

Figura 39 - Corpo de prova ABNT 4140, nitretado por NDE com matriz de cobre.



Fonte: Autor, 2016.

Observou-se durante a realização dos testes de EDM e NDE que a fixação e o alinhamento do eletrodo ferramenta com o eletrodo peça nos três eixos da máquina EDM (X, Y, Z) é importante para garantir a formação de arco de plasma constante e uniforme ao longo do perfil cilíndrico do corpo de prova. Resultando assim em melhoria da forma geométrica cilíndrica deste produto usinado por descargas elétricas. Quaisquer desalinhamentos na montagem contribuem para a formação de geometria não uniforme no corpo de prova usinado por EDM. Item este considerado crítico para o processo, uma vez que os corpos de prova foram submetidos posteriormente a ensaios de fadiga, cujo requisito para aumento de vida à fadiga é evitar pontos de concentração de tensões além de dimensional uniforme.

5.4. Ensaios de fadiga axial em corpos de prova ABNT 4140

Foram obtidos resultados de ensaios de fadiga axial para 40 corpos de prova do aço ABNT 4140. As Tabelas 26, 27, 28, 29 e 30 apresentam o resumo dos ensaios realizados para cada grupo de amostras, com a respectiva identificação, níveis de tensão e o número de ciclos obtidos após cada ensaio.

Tabela 26 - Corpos de prova de fadiga do grupo 1.1 - laminado e usinado CNC.

	CP#	Nível de Tensão	Tensão (S, MPa)	Nº de ciclos (N)
Nível 1	P1	0,80*LRT	861,54	77.351*
	P2	0,80*LRT	861,54	105.285*
	P3	0,80*LRT	861,54	110.496*
Nível 2	P6	0,75*LRT	807,69	180.889*
	P7	0,75*LRT	807,69	181.710*
	P10	0,75*LRT	807,69	169.681*
Nível 3	P11	0,725*LRT	780,77	5.000.000
	P12	0,725*LRT	780,77	5.000.000
Nível 4	P8	0,70*LRT	753,84	5.000.000
	P9	0,70*LRT	753,84	5.000.000
Nível 5	P4	0,65*LRT	700,00	5.000.000
	P5	0,65*LRT	700,00	5.000.000

Fonte: Autor, 2016.

* Run out (falhou).

Tabela 27 - Corpos de prova de fadiga do grupo 1.1 - laminado e usinado CNC.

	CP#	Nível de Tensão	Tensão (S, MPa)	Nº de ciclos (N)
Nível 1	P13	0,80*LRT	861,54	534.238*
	P14	0,80*LRT	861,54	74.513*
	P15	0,80*LRT	861,54	144.889*

Fonte: Autor, 2016.

* *Run out* (falhou).

Tabela 28 - Corpos de prova de fadiga do grupo 2.1 - nitretado por NDE.

	CP#	Nível de Tensão	Tensão (S, MPa)	Nº de ciclos (N)
Nível 1	N1	0,80*LRT	861,54	39.346*
	N2	0,80*LRT	861,54	40.375*
	N3	0,80*LRT	861,54	33.298*
Nível 2	N4	0,65*LRT	700,00	80.665*
	N12	0,65*LRT	700,00	99.724*
Nível 3	N9	0,60*LRT	646,15	186.876*
	N10	0,60*LRT	646,15	217.883*
	N11	0,60*LRT	646,15	124.539*
Nível 4	N6	0,55*LRT	592,31	271.662*
	N7	0,55*LRT	592,31	503.941*
	N8	0,55*LRT	592,31	258.031*
Nível 5	N5	0,50*LRT	538,46	5.000.000

Fonte: Autor, 2016.

* *Run out* (falhou).

Tabela 29 - Corpos de prova de fadiga do grupo 2.2 - nitretado por NDE.

	CP#	Nível de Tensão	Tensão (S, MPa)	Nº de ciclos (N)
Nível 1	N13	0,80*LRT	861,54	58.476*
	N14	0,80*LRT	861,54	96.794*
	N15	0,80*LRT	861,54	49.404*

Fonte: Autor, 2016.

* *Run out* (falhou).

Tabela 30 - Corpos de prova de fadiga do grupo 3 - usinado por EDM.

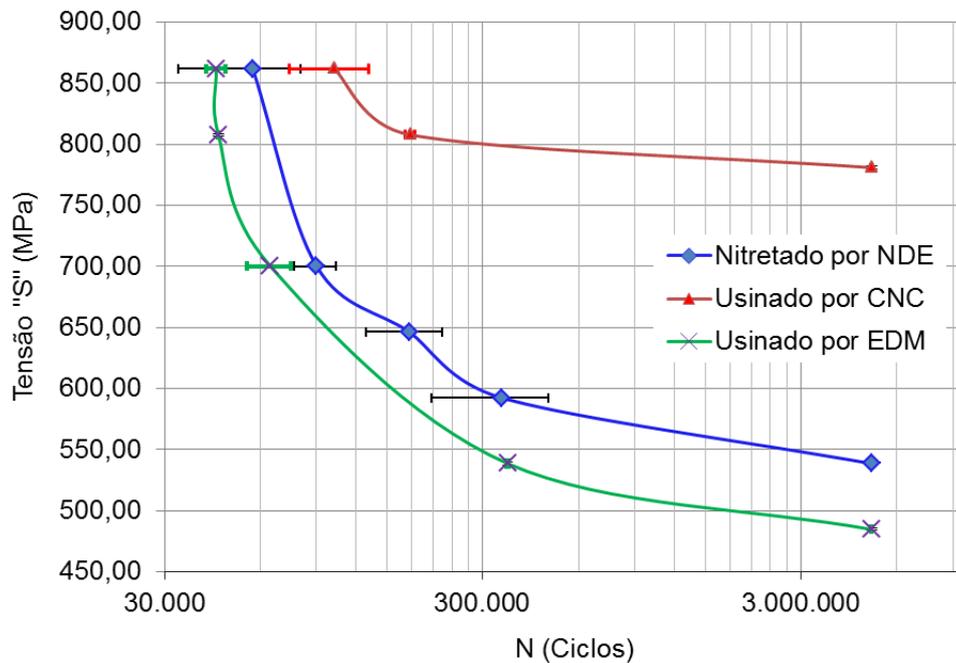
	CP#	Nível de Tensão	Tensão (S, MPa)	Nº de ciclos (N)
Nível 1	A1	0,80*LRT	861,54	45.903*
	A2	0,80*LRT	861,54	41.377*
Nível 2	A6	0,75*LRT	807,69	44.334*
Nível 3	A3	0,65*LRT	700,00	57.502*
	A4	0,65*LRT	700,00	204.280*
	A5	0,65*LRT	700,00	71.709*
Nível 4	A7	0,50*LRT	538,46	358.184*
	A8	0,50*LRT	538,46	361.185*
Nível 5	A9	0,45*LRT	484,61	5.000.000
	A10	0,45*LRT	484,61	5.000.000

Fonte: Autor, 2016.

* Run out (falhou).

A Figura 40 apresenta curvas S-N com resultados dos ensaios de fadiga axial em corpos de prova ABNT 4140 laminados; nitretados NDE e usinados por EDM.

Figura 40 - Curvas S-N dos corpos de prova ABNT 4140.



Fonte: Autor, 2016.

Nota-se que para um mesmo nível de tensão aplicada, o aço ABNT 4140 nitretado por NDE com solução de ureia em água deionizada apresenta maior resistência à fadiga do que o ABNT 4140 usinado por EDM em água deionizada. Já o aço ABNT 4140 laminado e usinado por CNC apresenta maior resistência à fadiga em relação ao ABNT 4140 nitretado por NDE. Observa-se ainda que, a fadiga além de depender diretamente do tipo de material, depende fundamentalmente do processo de fabricação utilizado e da integridade superficial do componente. Microtrincas podem formar na camada branca ou ZR a qual é quebradiça e dura. Essas contribuem para reduzir a resistência à fadiga do material usinado por EDM e nitretado por NDE. Se esta camada ZR for grossa e não for reduzida ou removida por polimento, o efeito desta camada pode causar falhas prematuras na peça em algumas aplicações (KUMAR, 2009). Entretanto, optou-se neste trabalho em não prolongar o polimento manual de forma a remover totalmente a camada ZR, pois, isso atingiria a camada nitretada, a qual foi decidido ser preservada.

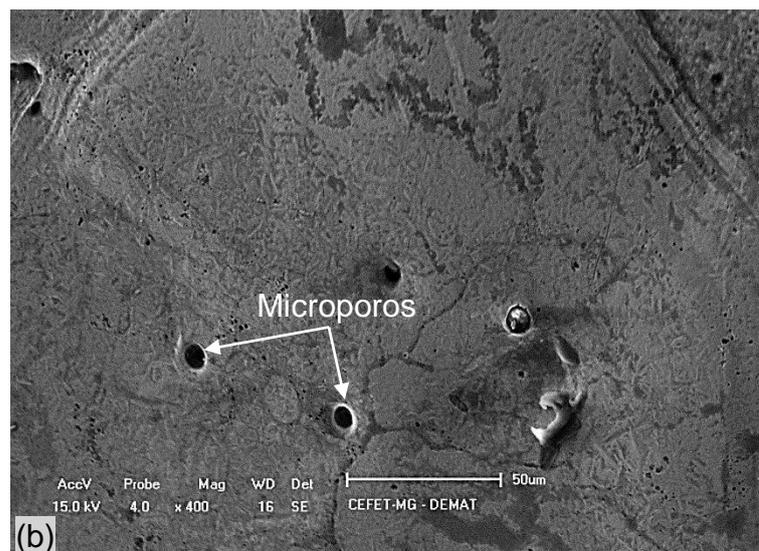
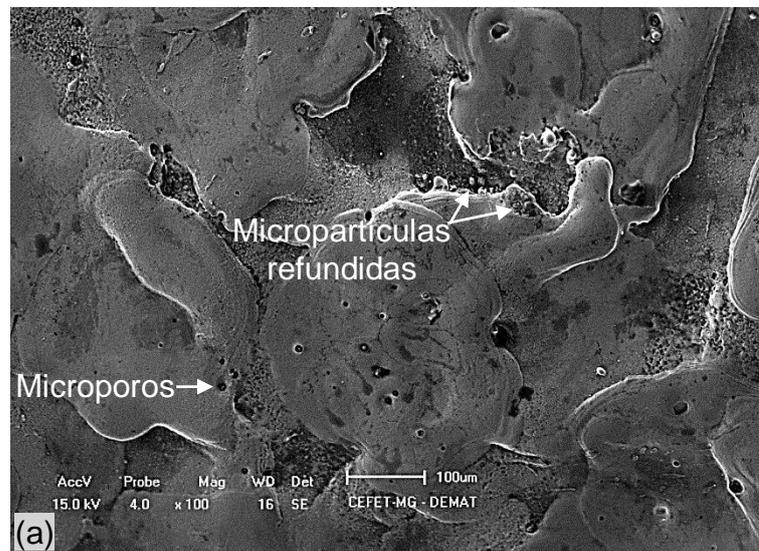
5.5 Caracterização microestrutural e ensaios de dureza em amostras 4140

A caracterização microestrutural de amostras do aço ABNT 4140, incluindo morfologia das superfícies usinadas por EDM e nitretadas por NDE, além de microdureza Vickers estão apresentadas neste tópico.

5.5.1. Morfologia das superfícies usinadas por EDM e nitretadas por NDE

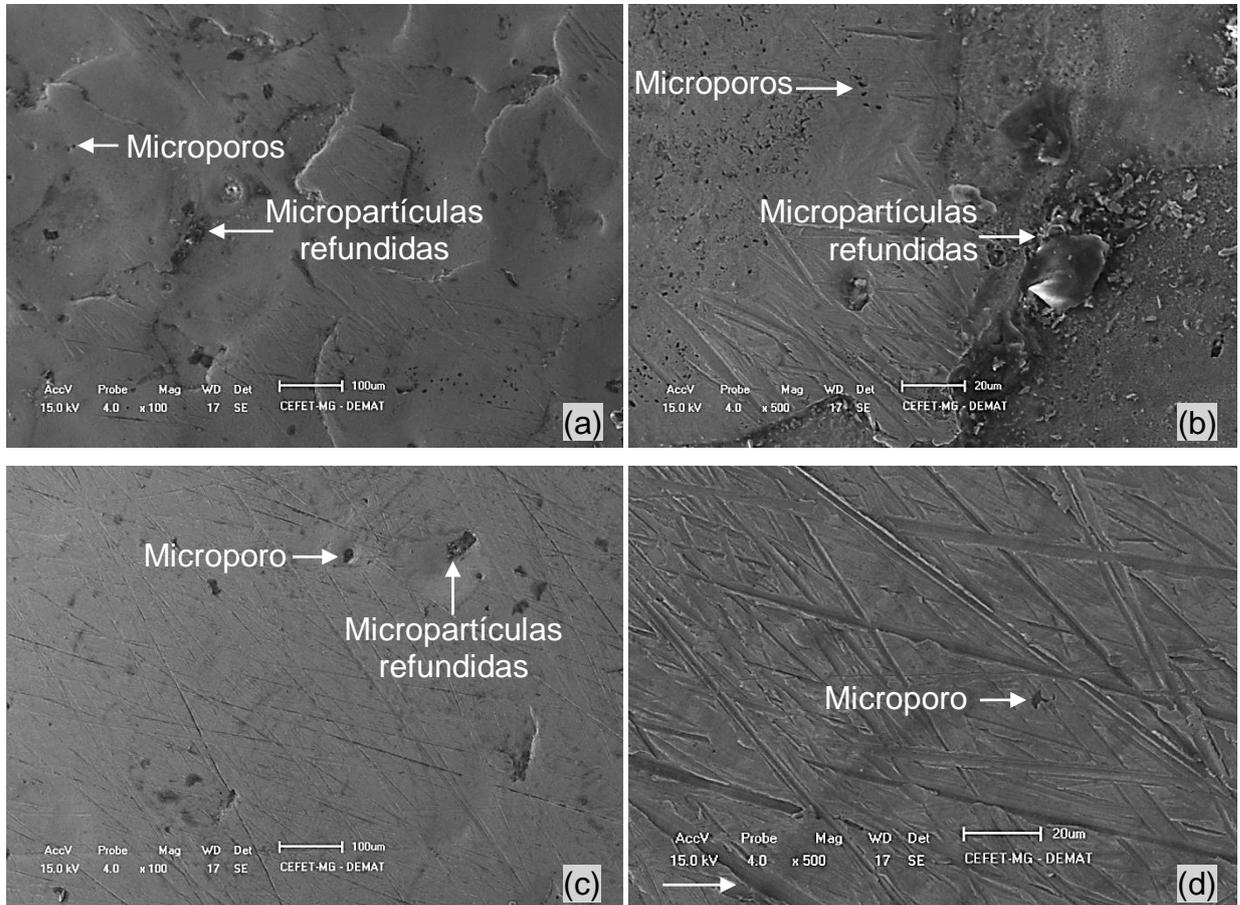
As descargas elétricas geradas pelo processo EDM com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico e aplicadas na superfície de amostras do aço ABNT 4140 laminado, utilizando como fluido dielétrico água deionizada e solução de água deionizada e ureia, na concentração de 30 g/l, produziram as morfologias das superfícies apresentadas nas Figuras 41 e 42, respectivamente.

Figura 41 - Imagem MEV da superfície de amostras sem polir do ABNT 4140 usinado por EDM ($I=40$ A, T_{ON} 100 μ s, T_{OFF} 10 μ s): (a) Ampliação 100x; (b) 400x.



Fonte: Autor, 2016.

Figura 42 - Morfologia da superfície de amostras ABNT 4140 nitretadas por NDE ($I=40$ A, T_{ON} 100 μ s e T_{OFF} 10 μ s) - MEV: (a) e (b) Sem polir, ampliação 100x e 500x; (c) e (d) polidas 100x e 500x, respectivamente.



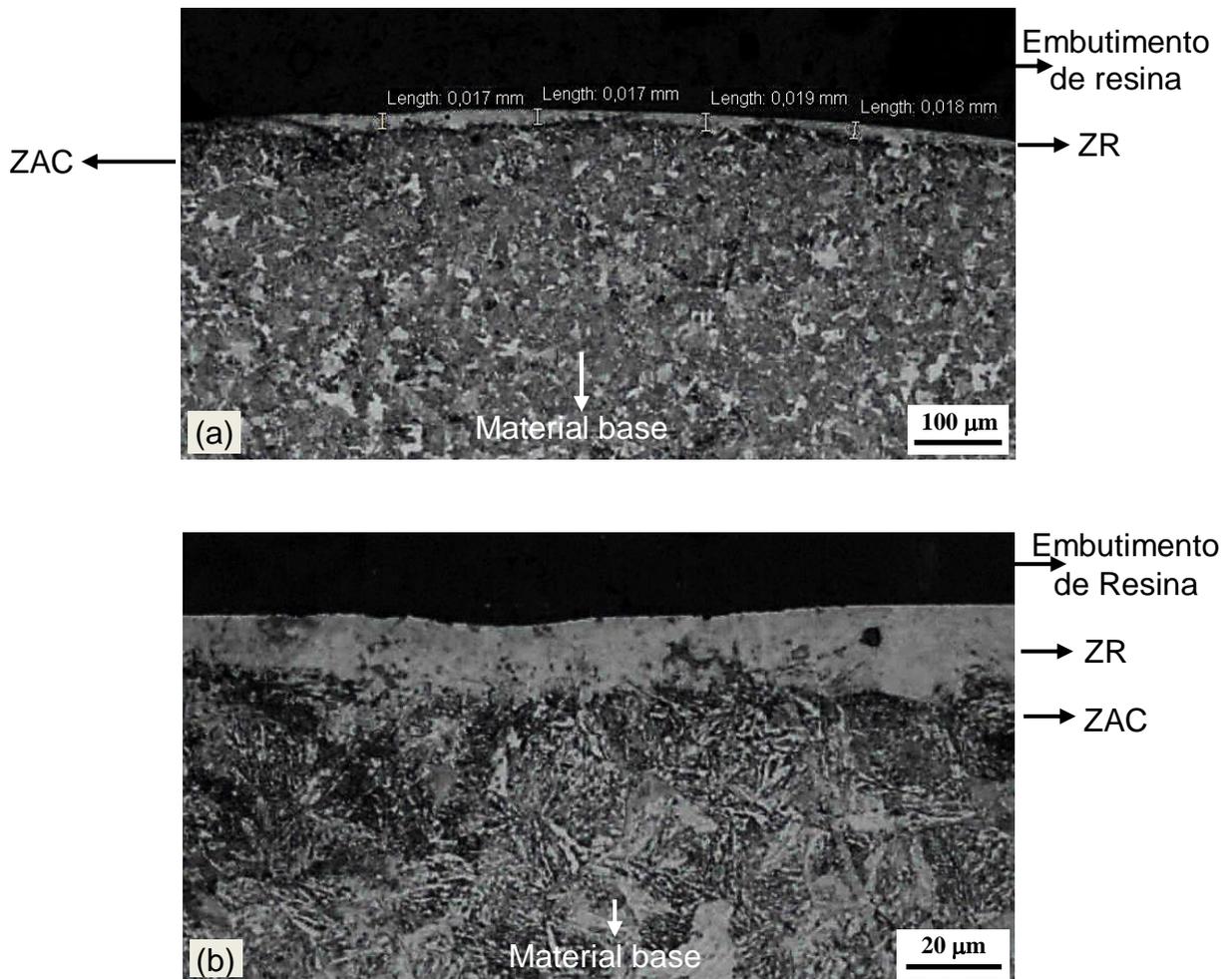
Fonte: Autor, 2016.

Observa-se pelas imagens das amostras sem polir (41 e 42 (a) e (b)), apresentam microporos e micropartículas refundidas e depositadas sobre a superfície. Essa morfologia é a normalmente presente em materiais submetidos a processos EDM convencional por penetração, no qual, altas temperaturas conduzem à formação de microtrincas, microporos e micropartículas refundidas. Nota-se ainda pelas imagens das superfícies polidas (42 (c) e (d)), redução da quantidade de microporos, em relação aos das superfícies sem polir.

5.5.2. Microestrutura de amostras ABNT 4140 usinadas por EDM e nitretadas por NDE

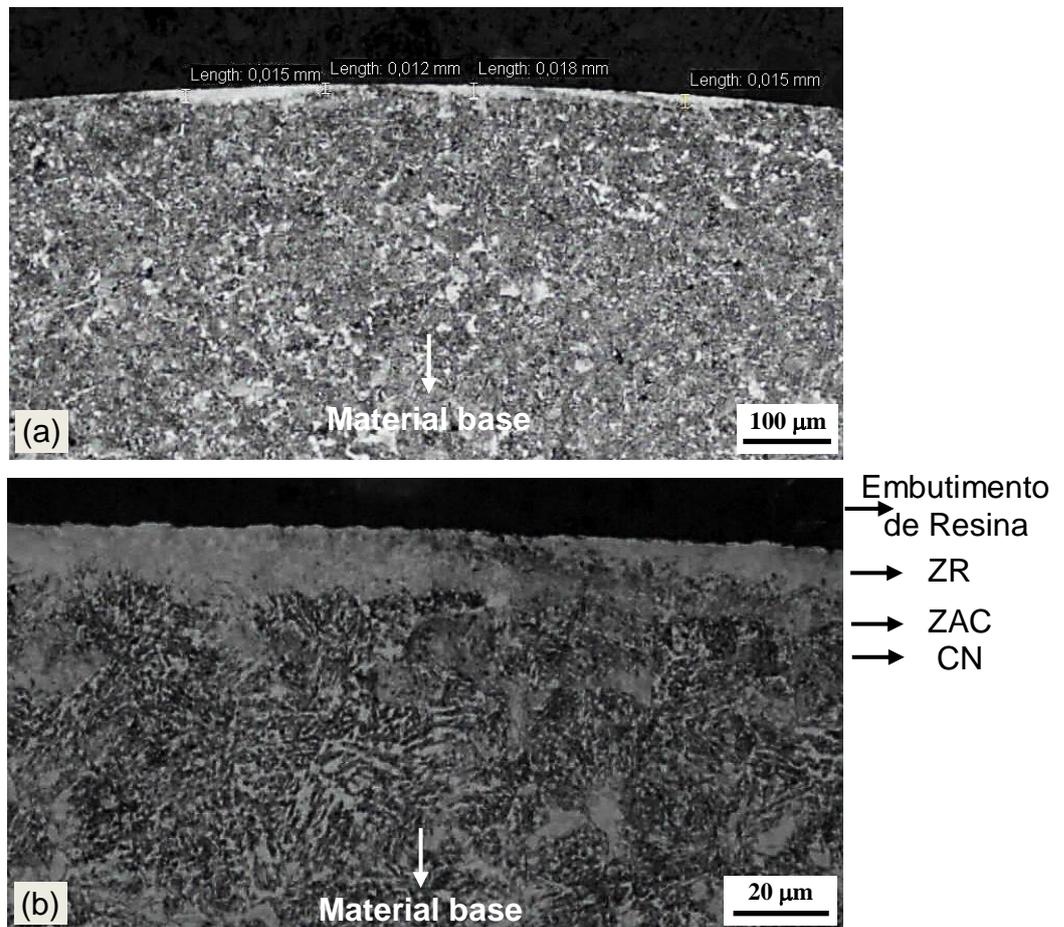
As Figuras 43 e 44 apresentam micrografias de seções transversais das amostras: usinada por EDM (A1) e nitretada por NDE (N13). Ambas fabricadas de material base (substrato) aço ABNT 4140 laminado, usinadas por CNC, lixadas e polidas posteriormente aos processos de EDM e nitretação por NDE. Ataque químico com reagente Nital 2%.

Figura 43 - Micrografia MEV da seção transversal da amostra A1 usinada por EDM e polida, com dielétrico água deionizada: Ampliação de 100x (a) e 500x (b).



Fonte: Autor, 2016.

Figura 44 - Micrografia MEV da seção transversal de amostra polida N13, nitretada por EDM com solução água deionizada e ureia: Ampliação 100x (a) e 500x (b).



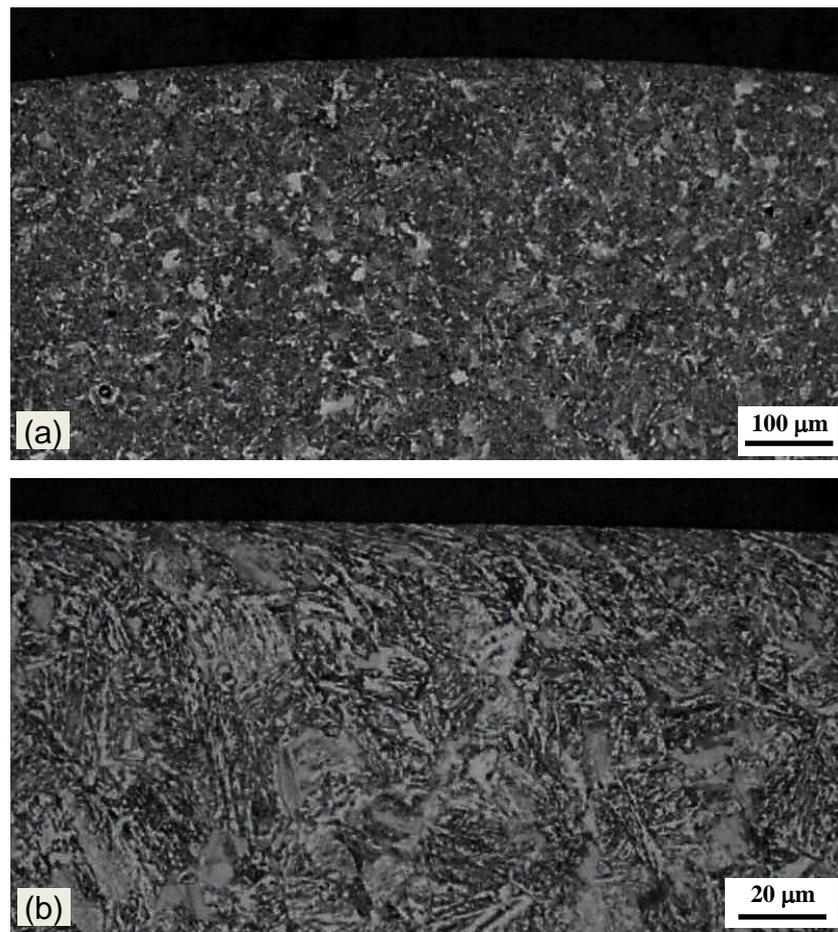
Fonte: Autor, 2016

Nota-se a formação de uma camada de cor mais clara, na superfície do material usinado por EDM e nitretado por NDE, denominada de zona refundida (ZR) ou “camada branca” e, logo abaixo, na subsuperfície uma região de cor mais escura, aspecto de sombra, denominada de zona afetada pelo calor (ZAC) e/ou camada nitretada (CN). Estas camadas aparecem destacadas e com textura diferente. Essa diferença de tonalidade pode estar associada à mudança microestrutural no material, que segundo Lim *et al.* (1991) *apud* Santos, (2013) pode ser atribuído a algum gradiente de carbono ou até mesmo de elementos contidos no fluido dielétrico ou eletrodo ferramenta. Estas regiões são comuns em peças produzidas pelo processo de usinagem por EDM (STEVENS, 1998).

Nota-se pelas imagens evidências que mesmo após o processo de polimento a camada refundida (ZR) permanece na superfície das amostras, a qual não foi totalmente removida por meio de polimento, para preservar a camada nitretada.

A Figura 45 apresenta imagem obtida por meio de MEV da seção transversal da amostra P15 de aço ABNT 4140, usinada pelo processo convencional de torneamento CNC e posteriormente lixada e polida. Ataque químico com reagente Nital 2%.

Figura 45 - Micrografia MEV da seção transversal da amostra P15 em ABNT 4140 usinada por CNC, lixada e polida: Ampliação de 100x (a) e 500x (b).

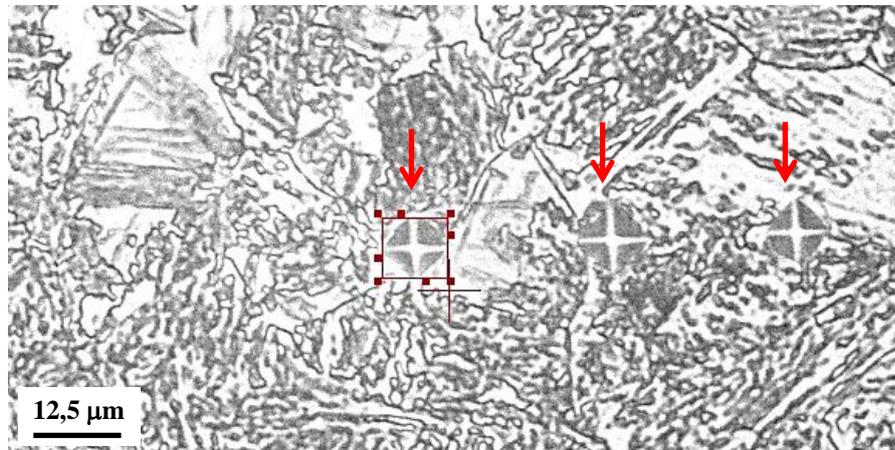


Fonte: Autor, 2016.

5.5.3. Microdureza Vickers em amostras ABNT 4140

A Figura 46 apresenta a seção transversal de amostra do aço ABNT 4140 usinada por EDM (A0X) com fluido dielétrico água deionizada com algumas indentações de microdureza Vickers no substrato (10 gf, 20 s). Ampliação de 400x, ataque químico com reagente Nital 2%.

Figura 46 - Micrografia com impressões de microdureza Vickers (10 gf, 20 s) em substrato de amostra (A0X) ABNT 4140 usinada por EDM.

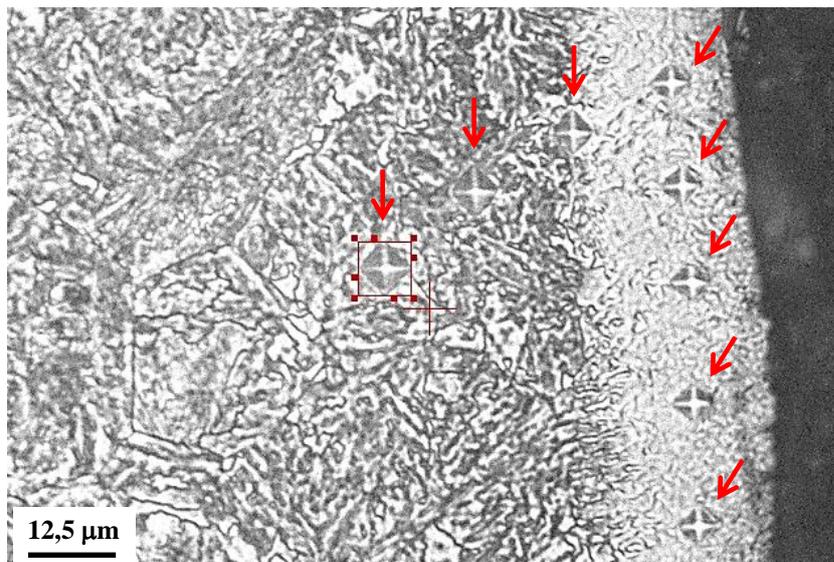


Fonte: Autor, 2016.

Foi obtido valor médio de $312,2 \pm 12,6$ HV (10 gf, 20 s) após realização de seis medições de microdureza no substrato da amostra usinada por EDM.

A Figura 47 apresenta a seção transversal de amostra usinada por EDM com indentações de microdureza Vickers realizadas na zona refundida assim como perfil de microdureza em direção ao substrato. Ampliação de 400x, ataque químico com reagente Nital 2%.

Figura 47 - Micrografia com perfil de microdureza Vickers (10 gf, 20 s) na seção transversal de amostra (A0X) ABNT 4140 usinada por EDM.

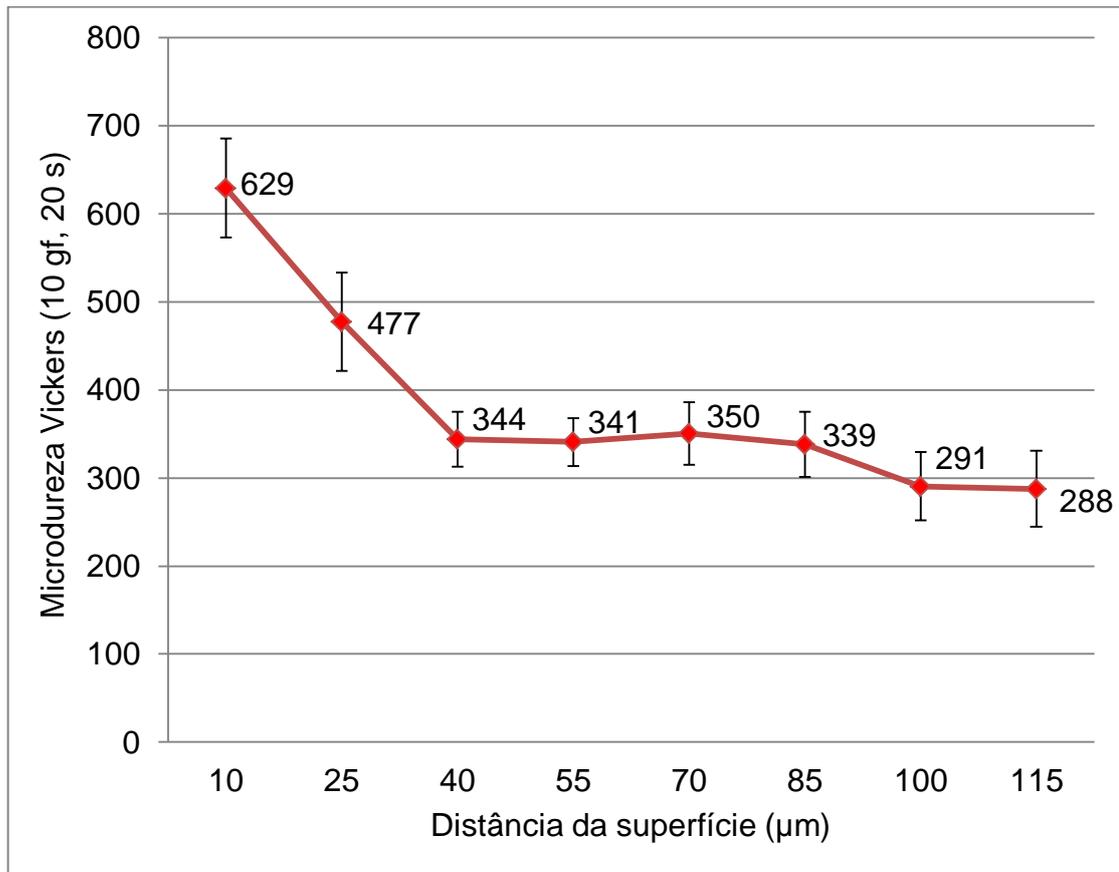


Fonte: Autor, 2016.

Notam-se as camadas zona refundida e zona afetada pelo calor, além do material base (substrato).

A Figura 48 apresenta o perfil médio de microdureza Vickers (10 gf, 20 s) em função da distância X da superfície (μm) de amostra ABNT 4140 usinada por EDM. Resultado médio obtido em três perfis, sendo oito indentações feitas em cada.

Figura 48 - Perfil de microdureza Vickers (10 gf, 20 s) na seção transversal de amostra ABNT 4140 usinada por EDM.

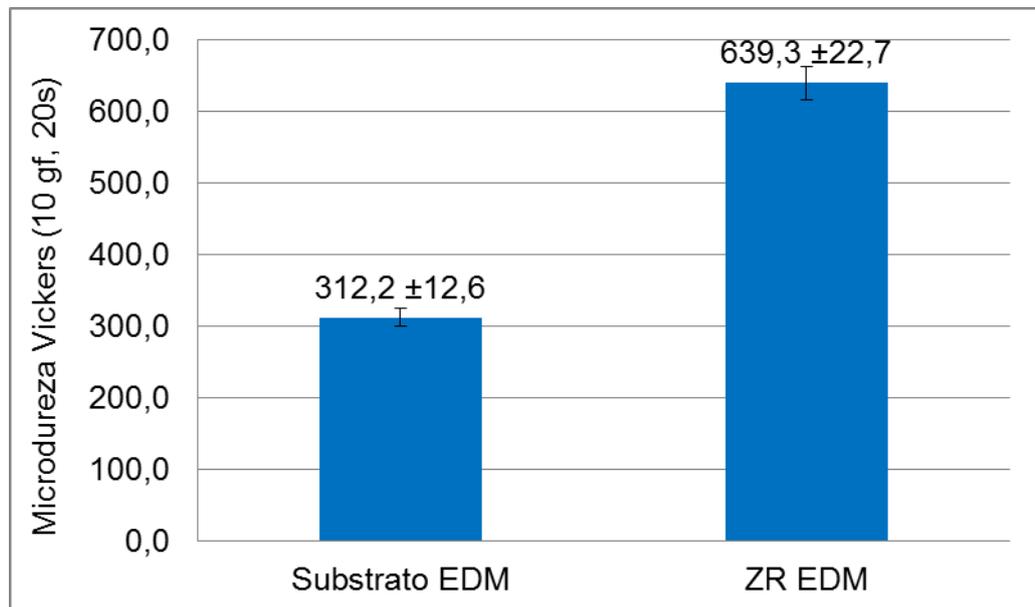


Fonte: Autor, 2006.

Analisando o perfil de microdureza Vickers realizado na amostra usinada por EDM, observa-se evidências de elevação de dureza na camada ZR em relação ao substrato.

Adicionalmente foram realizadas seis medições de microdureza Vickers em três regiões diferentes da ZR e substrato de amostras ABNT 4140 usinada por EDM. Os resultados estão apresentados na Figura 49.

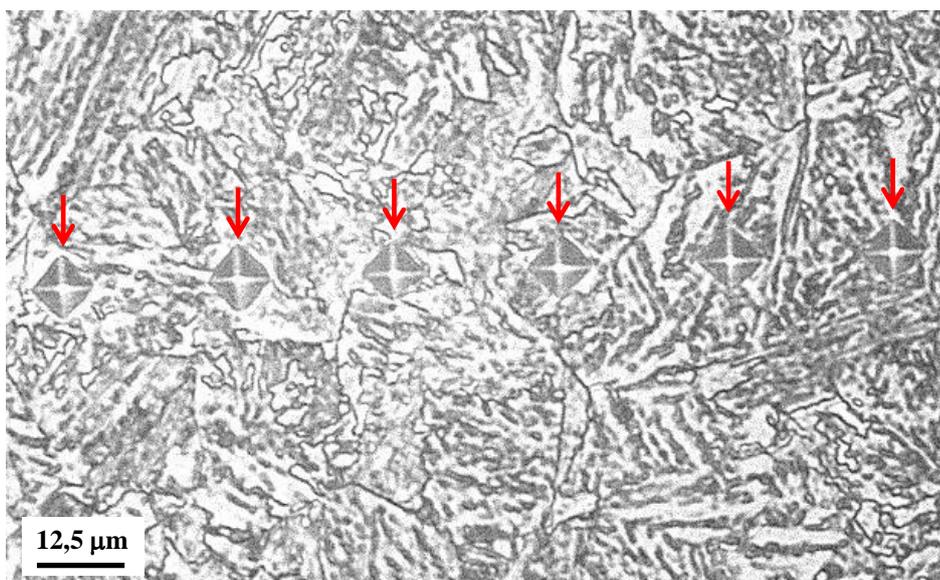
Figura 49 - Microdureza Vickers (10 gf, 20 s) em substrato e ZR de seção transversal de amostra ABNT 4140 usinada por EDM.



Fonte: Autor, 2016.

A Figura 50 apresenta micrografia com impressões de microdureza Vickers (10 gf, 20 s) realizada em seção transversal de substrato de amostra nitretada por NDE. Ampliação de 400x, ataque químico com reagente Nital 2%.

Figura 50 - Micrografia com impressões de microdureza Vickers (10 gf, 20 s) na seção transversal de substrato de amostra ABNT 4140 nitretada por NDE.

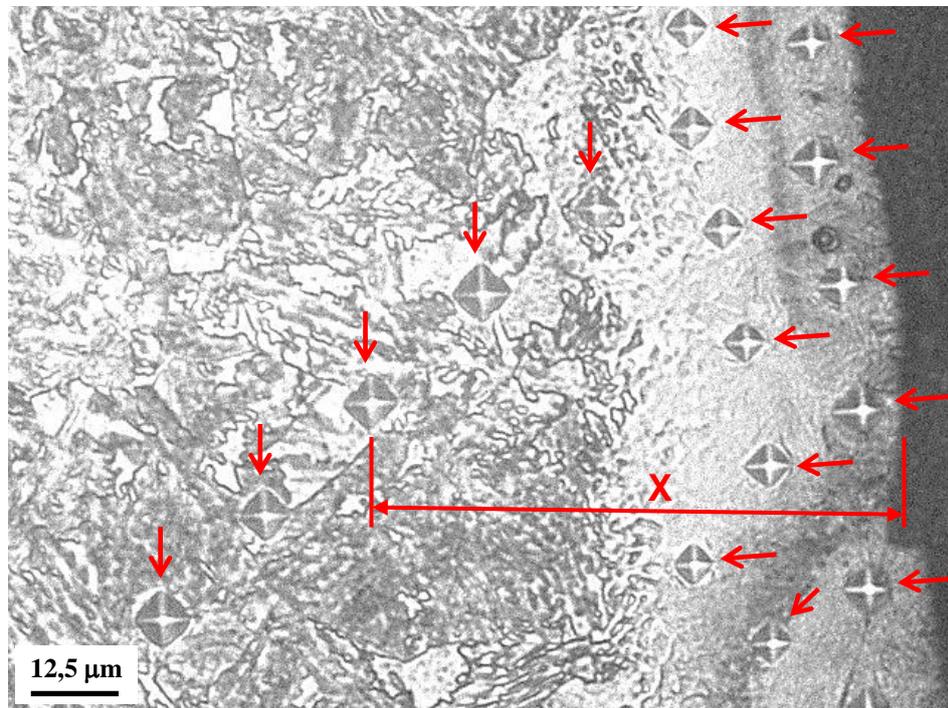


Fonte: Autor, 2016.

Foi obtido valor médio de $331,7 \pm 4,5$ HV (10 gf, 20 s) após realização de seis medições de microdureza no substrato da amostra nitretada por NDE.

A Figura 51 apresenta perfil médio de microdureza Vickers (10 gf, 20 s) em função da distância X da superfície (μm) de amostra ABNT 4140 nitretada por NDE. Resultado médio obtido a partir de três perfis, sendo oito indentações em cada. Ampliação de 400x, ataque químico com reagente Nital 2%.

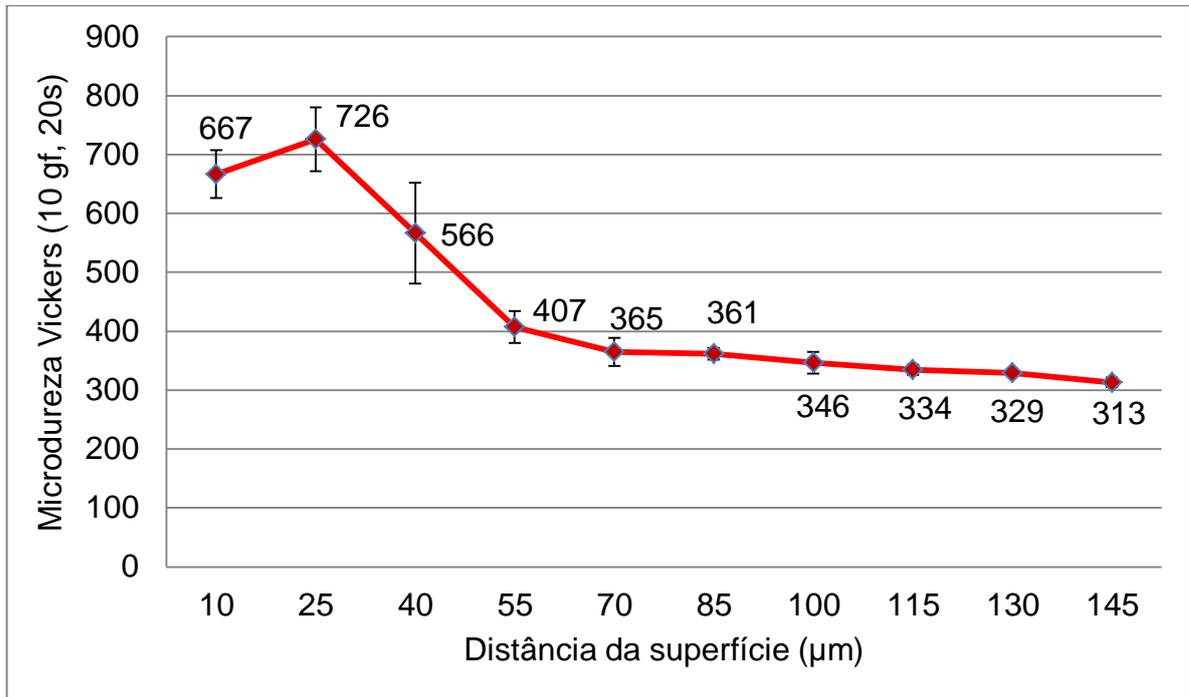
Figura 51 - Micrografia com impressões de microdureza Vickers (10 gf, 20 s) em seção transversal de amostra ABNT 4140 nitretada por NDE.



Fonte: Autor, 2016.

A Figura 52 apresenta o perfil médio de microdureza Vickers (10 gf, 20 s) em função da distância da superfície (μm) de amostra do aço ABNT 4140 nitretada por NDE. Resultado médio obtido após medição realizada em três perfis, sendo dez indentações em cada perfil.

Figura 52 - Perfil de microdureza Vickers (10 gf, 20 s) na seção transversal de amostra ABNT 4140 nitretada por NDE.



Fonte: Autor, 2016.

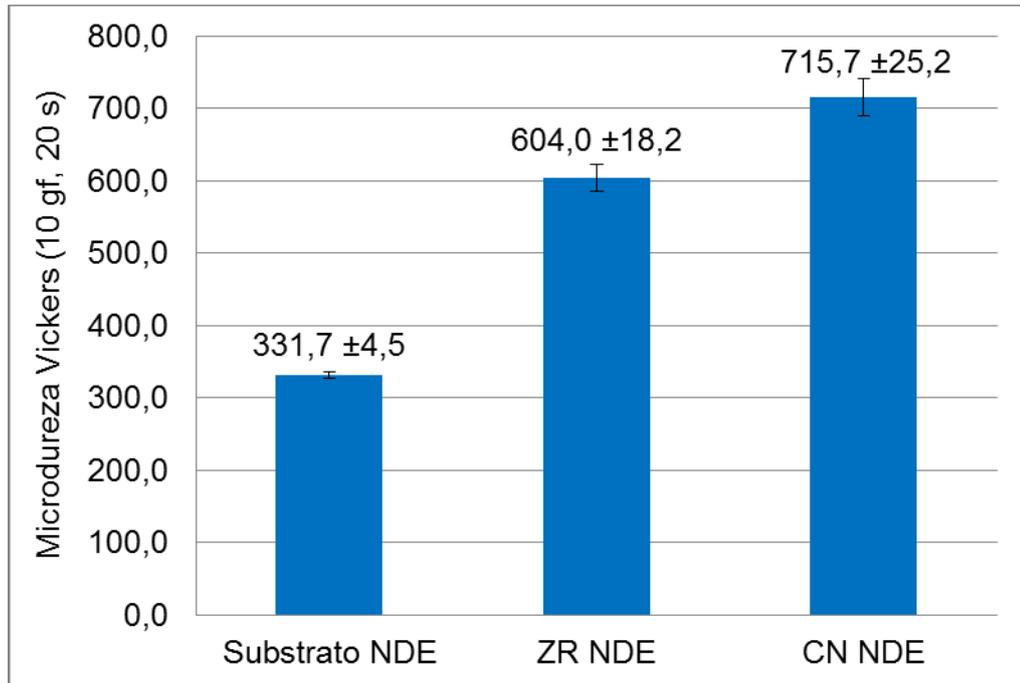
O perfil de microdureza Vickers em função da distância da superfície evidencia elevação de dureza nas camadas (refundida e nitretada), sendo a mesma mais efetiva para amostras nitretadas por NDE em comparação com usinadas por EDM. O decréscimo dos valores de microdureza pode ser justificado em função da diminuição da concentração de nitrogênio da superfície em direção ao substrato para amostra nitretada por NDE.

Adicionalmente foram realizadas seis medições de microdureza Vickers em três regiões diferentes das camadas ZR, CN e substrato de amostras do aço ABNT 4140 nitretada por NDE. Os resultados estão apresentados na Figura 53.

Observa-se que a camada nitretada da amostra, apresenta ganho de microdureza de aproximadamente 215% em relação ao substrato, enquanto o ganho de microdureza na zona refundida é cerca de 180% em relação ao substrato. Isso evidencia que houve o enriquecimento por nitretos, simultaneamente ao processo de usinagem por descargas elétricas, corroborando com pesquisas realizadas por Yan, Tsai e Huang (2005); Camargo, Costa e Raslan (2009); Silva (2012); Santos (2013); Raslan (2015). Apesar da zona refundida estar mais próxima da fonte de nitrogênio (superfície em contato com a solução aquosa de ureia), nota-se elevação de

microdureza na camada nitretada em relação à zona refundida. Isso pode ser justificado em função da zona refundida possuir microporos, microvazios e micropartículas refundidas, conforme evidenciado no tópico 5.5.1.

Figura 53 - Microdureza Vickers (10 gf, 20 s) em amostra nitretada por NDE.

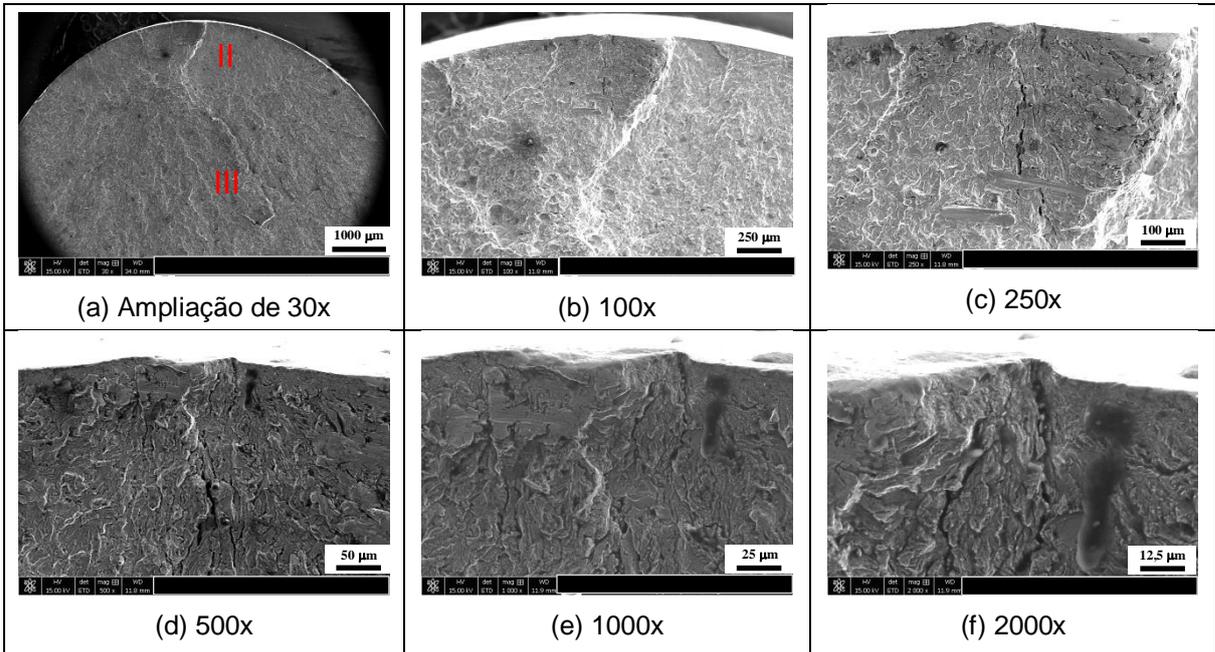


Fonte: Autor, 2016.

5.5.4. Fractografias das superfícies fraturadas por fadiga axial (MEV)

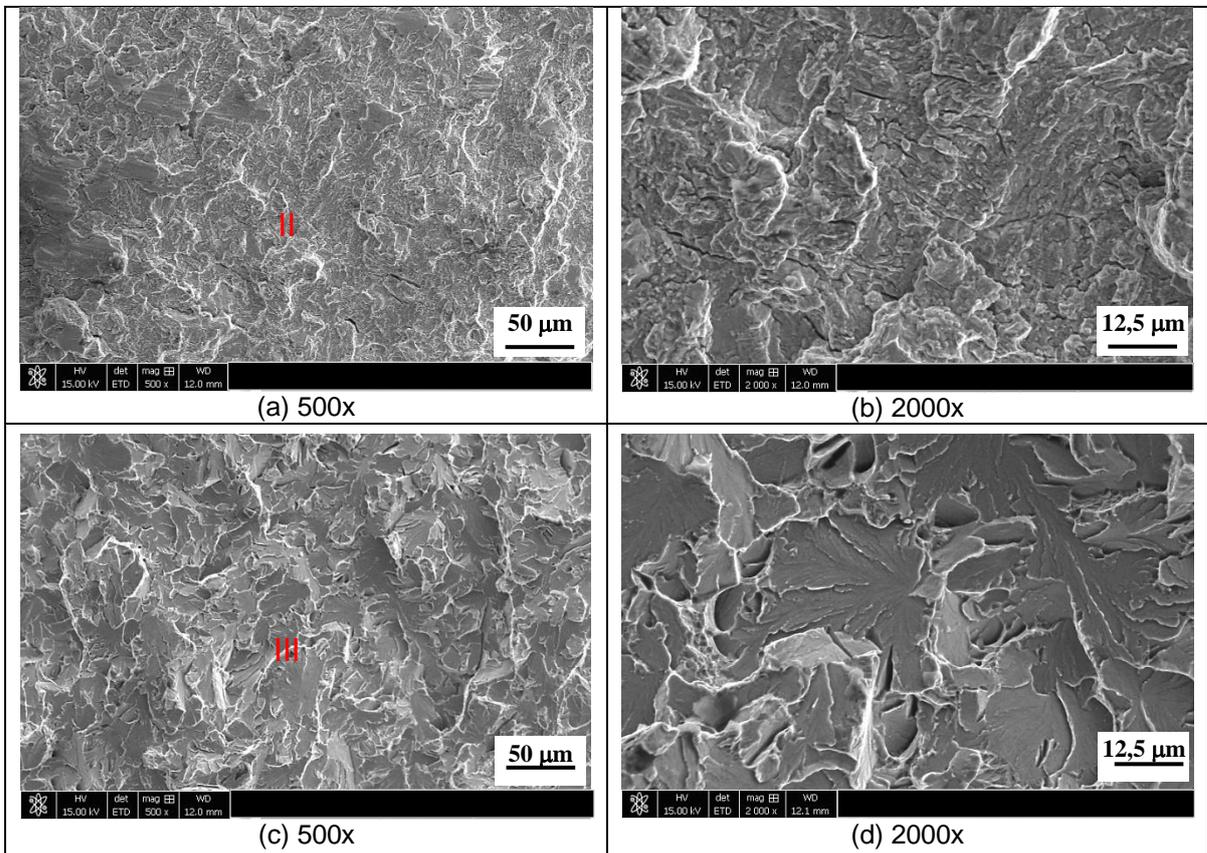
A análise fractográfica foi realizada pela técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e teve por finalidade observar as morfologias das superfícies fraturadas por fadiga axial dos três grupos de material ABNT 4140 pesquisados, além de verificar os micromecanismos principais de falha por fadiga. A análise foi realizada em corpos de prova ensaiados no nível de tensão 80% do limite de resistência à tração (LRT), tendo em vista a maior quantidade de ensaios de fadiga axial realizados neste nível. As fractografias das superfícies fraturadas por fadiga dos respectivos corpos de prova: Usinados por EDM; Nitretados por NDE; e, Laminados e usinados por CNC estão apresentadas em diferentes ampliações (Figuras 54, 55, 56, 57, 58 e 59).

Figura 54 - Fractografias da amostra A1 em aço ABNT 4140 usinada por EDM em diferentes ampliações da região de início da fratura por fadiga.



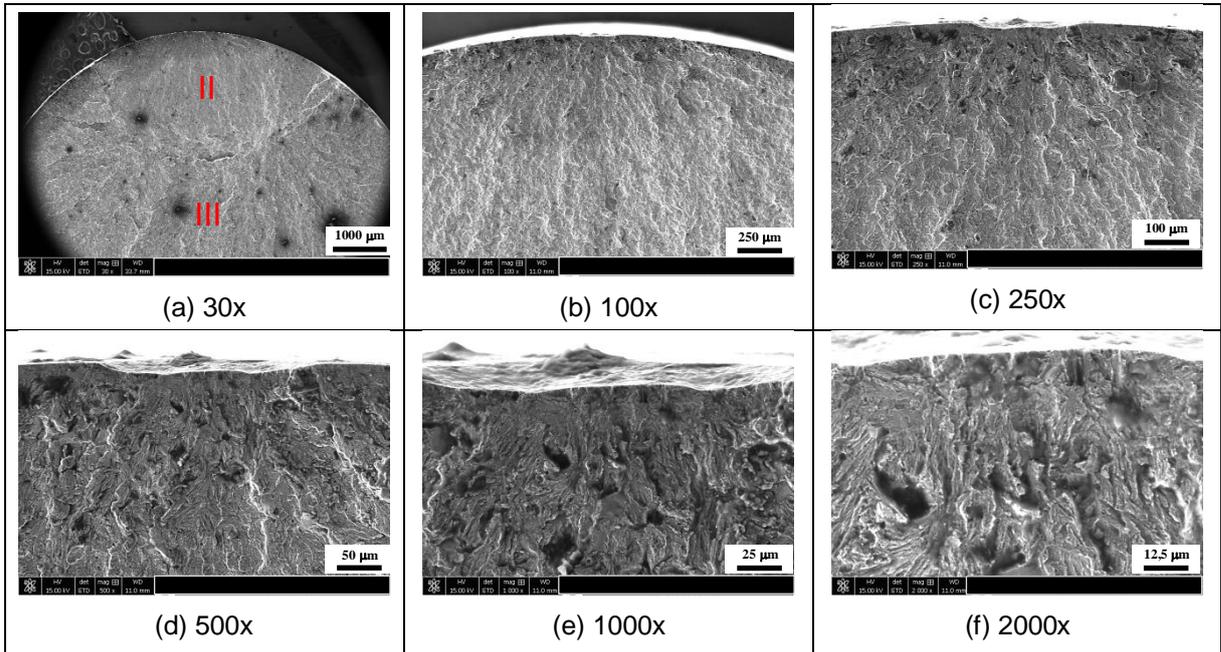
Fonte: Autor, 2016

Figura 55 - Fractografias da amostra A1 aço ABNT 4140 usinada por EDM, com ampliação dos estágios II e III de propagação estável e instável da trinca.



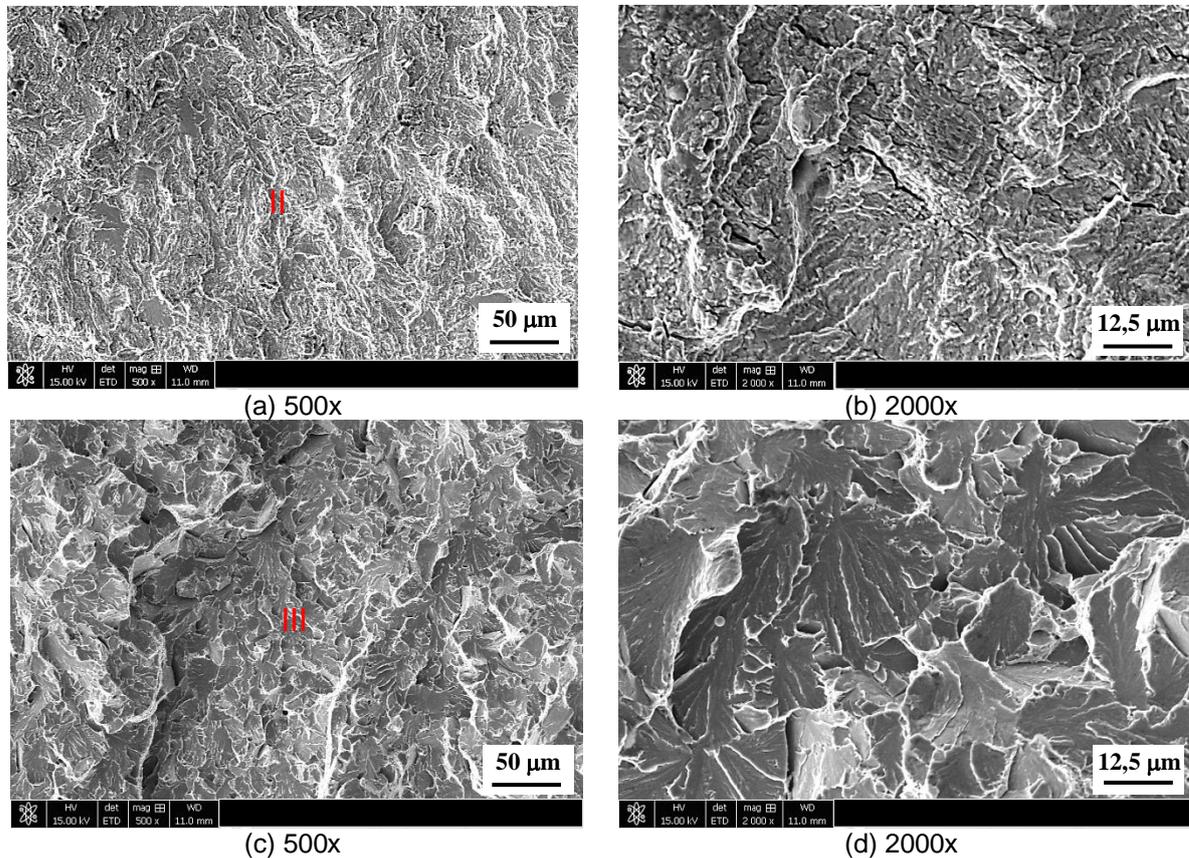
Fonte: Autor, 2016.

Figura 56 - Fractografias da amostra N13 em aço ABNT 4140 nitretada por NDE em diferentes ampliações da região de início da fratura por fadiga.



Fonte: Autor, 2016.

Figura 57 - Fractografias da amostra N13 aço ABNT 4140 nitretada por NDE, com ampliação dos estágios II e III de propagação estável e instável da trinca.



Fonte: Autor, 2016.

Figura 58 - Fractografias da amostra P15 em aço ABNT 4140 laminada e usinada por CNC em diferentes ampliações da região de início da fratura por fadiga.

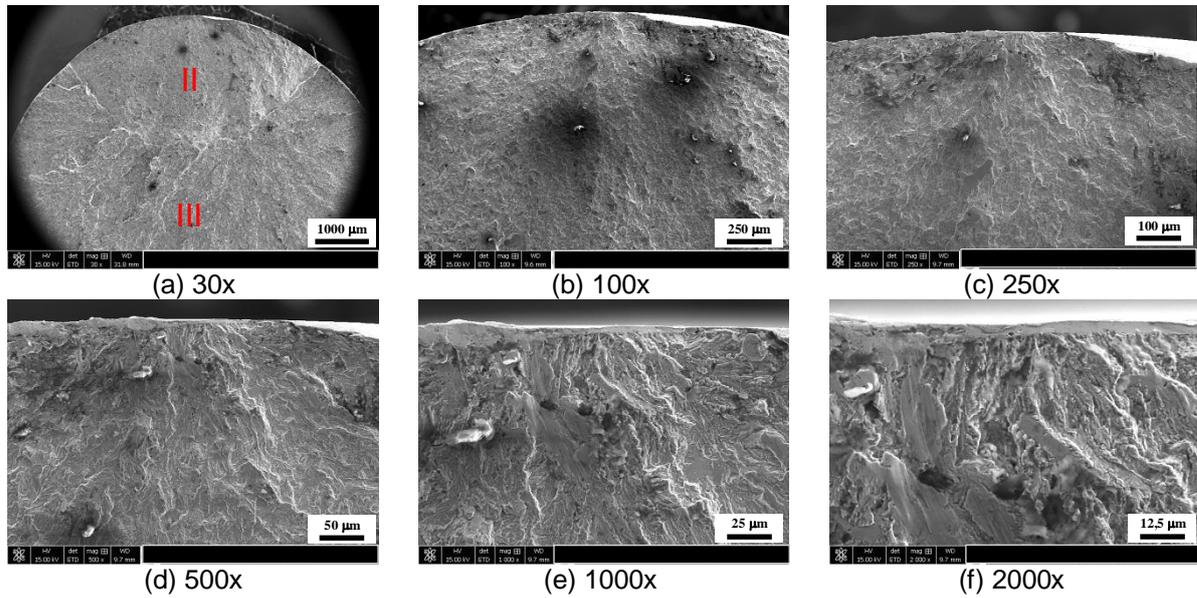
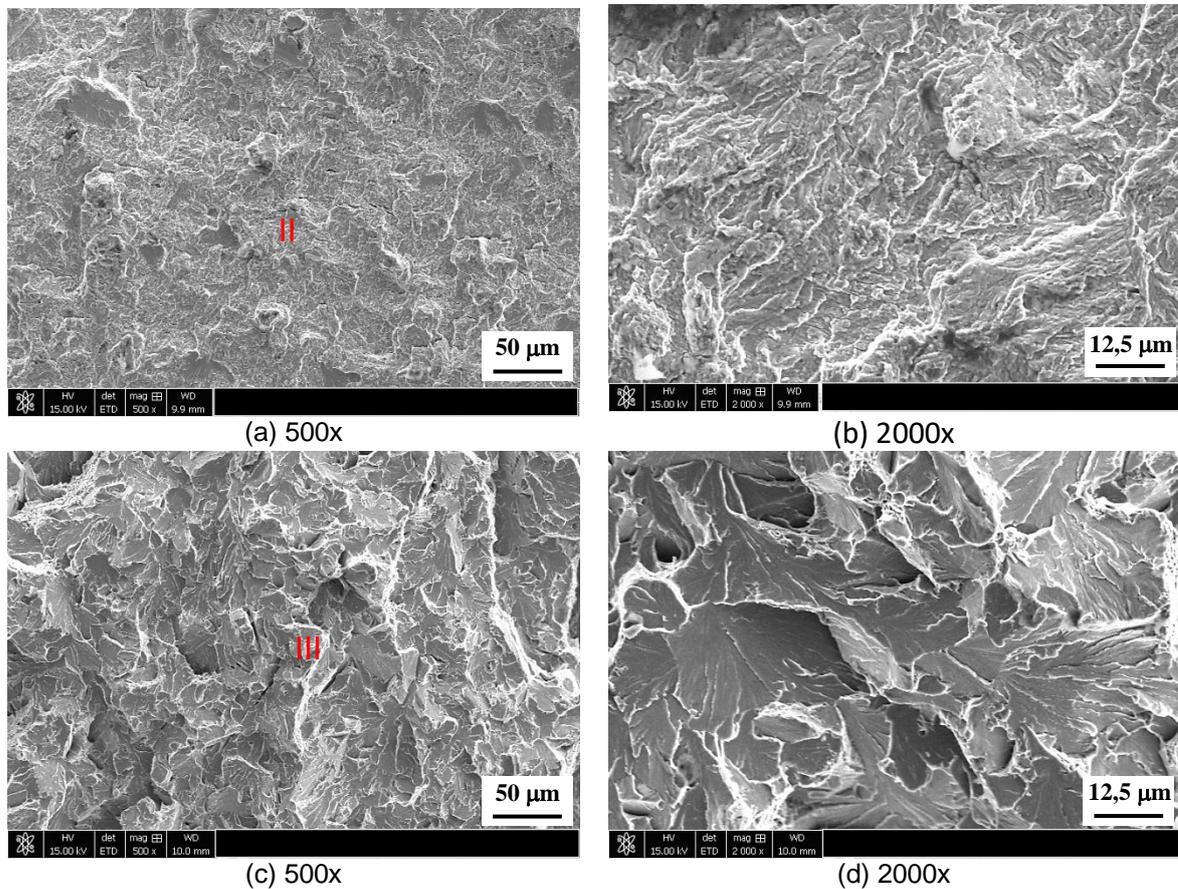


Figura 59 - Fractografias da amostra P15 aço ABNT 4140 laminada e usinada por CNC, com ampliação dos estágios II e III de propagação estável e instável da trinca.



Fonte: Autor, 2016.

Nota-se que a fratura originou-se, para ambos os corpos de prova analisados, a partir de pontos distintos na superfície dos corpos de prova, não sendo observada ocorrência de fratura devido a inclusões. Exames em baixa ampliação revela a região II que apresenta textura diferente da região III, conforme pode ser observado nas Figuras 54(a), 56(a) e 58(a). Regiões estas correspondentes respectivamente aos estágios de propagação estável e instável da trinca. As Figuras 55, 57 e 59 apresentam estas regiões, com maior ampliação, sendo este último estágio caracterizado à medida que a profundidade das trincas aumenta, a resistência mecânica da seção remanescente do material diminui, contribuindo para a fratura brusca e repentina. Nota-se pelas Figuras 55(a), 57(a) e 59(a) morfologia de fadiga e nas Figuras 55(b), 57(b) e 59(b) microtrincas e estrias de fadiga, típica de fratura por fadiga. Já as Figuras 55, 57 e 59, ambas (c) e (d) apresentam clivagem típica de fratura frágil transgranular (aspecto de “conchas”, com facetas lisas de fratura).

5.6 Considerações gerais sobre os resultados do trabalho

Apesar de a literatura afirmar que a nitretação melhora a resistência à fadiga devido a cargas compressivas induzidas na superfície, este trabalho mostrou que a nitretação por NDE não contribuiu com melhoria da resistência a fadiga se comparado com material laminado. Observa-se que o início das fraturas (nucleação das trincas) ocorreu nas superfícies das amostras, sendo evidenciados defeitos tais como: microporos, microvazios e microtrincas nas superfícies e subsuperfícies das amostras usinadas por EDM e nitretadas por NDE, fato este que pode ser atribuído ao processo EDM em si, que gera integridade superficial rude na peça em processo. A alta temperatura empregada no processo EDM com resfriamento rápido após a interrupção da corrente elétrica e circulação do fluido dielétrico, resulta em fusão e ressolidificação do material (ZR). Estes fatos mostraram bom acordo com observações realizadas por outros autores (Yan, Tsai e Huang, 2005; Klocke *et al.*, 2016). Isso permite considerar que a fadiga, além de depender diretamente do tipo de material, depende fundamentalmente do processo de fabricação e integridade superficial da peça.

A espessura das camadas ZR e nitretada (CN) foram avaliadas por diferentes imagens de microscopia óptica e MEV de amostras sem polir e extraído uma média

posteriormente, resultando em valor de camada aparente na faixa de 22 μm para ZR de amostras usinadas por EDM e de 45 μm para a ZR + CN de amostras nitretadas por NDE. Este resultado corroborou com a dureza efetiva realizada por meio de microdureza Vickers, sendo obtida camada ZR na faixa de 22 μm para amostra usinada por EDM e camadas ZR + nitretada de 45 μm para amostras nitretadas por NDE. Este valor está acima de valores encontrados por Santos (2013) que conduziu experimentos NDE para o aço ABNT 4140. Esta diferença pode ser justificada em função da corrente elétrica e concentração de ureia utilizada nas duas pesquisas, sendo adotada por Santos (2013) corrente de 30 A e concentração de ureia 10 g/l obtendo espessuras ZR + CN de 25 μm *versus* no presente trabalho 40 A e 30 g/l. É válido ressaltar que houve variações nessas espessuras de camadas. Esse efeito pode ser atribuído aos parâmetros do processo EDM, sendo a potência e energia de descarga elétrica dependentes do produto tensão *versus* corrente, os quais variam com o tempo o que pode causar espessuras irregulares das camadas ZR e nitretada, além de serem importantes para a integridade superficial. Esse resultado corrobora com experimentos realizados por Klocke *et al.* (2016) que desenvolveu pesquisas EDM em aço ABNT 4140 e encontrou espessura da camada nitretada (ZAC) e ZR na faixa de 30 μm .

As análises realizadas de falha por fadiga estão na direção de corroborar com a literatura que as trincas por fadiga têm início em regiões de alta concentração de tensão ou em regiões de baixa resistência mecânica local. Assim, como Bannantine, Comer e Handrock (1990) defendem que 95% dos casos de fadiga iniciam-se na camada superficial dos componentes. Componentes mecânicos com superfícies ásperas e irregulares apresentam limite de resistência à fadiga inferior aos mesmos componentes com superfícies lisas (COLLINS, 1993; NORTON, 2004).

6. CONCLUSÕES

Houve aumento significativo de dureza das camadas ZR e nitretada em relação ao substrato. Sendo evidenciado aumento de 205% na ZR de amostras usinadas por EDM, 182% na ZR de amostras nitretadas por NDE e 215% a camada nitretada. Isso evidencia que o processo EDM modifica não somente a superfície da peça de trabalho, mas também a subsuperfície.

Observou-se que a soma da espessura média das camadas ZR e nitretada de amostras sem polir é na faixa de 45 μm para amostras nitretadas por NDE. Enquanto que nas amostras usinadas por EDM, a camada ZR é de 22 μm aproximadamente.

Foi observado pelos testes, análises e resultados obtidos que a nitretação ocorreu simultaneamente à usinagem por eletroerosão dos corpos de prova em aço ABNT 4140 pesquisados.

Houve melhora na resistência à fadiga dos corpos de prova ABNT 4140 nitretados por NDE em comparação aos apenas usinados por EDM. Sendo que os corpos de prova usinados por CNC apresentaram maior resistência à fadiga.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em função do escopo definido inicialmente e, principalmente por não estarem incluídas nos objetivos propostos para o desenvolvimento deste trabalho, algumas sugestões são feitas para que algumas questões possam ser desenvolvidas e melhor compreendidas. Entre estas sugestões, destacam-se:

- Investigar o efeito da corrente elétrica e tensão (V) sobre a resistência à fadiga do aço ABNT 4140, ou similar, nitretado por NDE (efeito na rugosidade).

- Investigar meios que garantem maior uniformidade da geometria do corpo de prova cilíndrico durante o processo EDM.

- Investigar a influência de polimento por meio de retífica CNC ao invés de manual sobre a vida em fadiga de corpos de prova nitretados por NDE.

- Avaliar a resistência à fadiga do aço ABNT 4140 nitretado por NDE utilizando como eletrodo ferramenta a grafita.

- Avaliar a influência do tempo de processo de nitretação por NDE na espessura da camada nitretada.

- Avaliar a resistência à fadiga de corpos de prova planos nitretados por NDE.

- Avaliar a influência da operação de usinagem por torneamento sobre as propriedades mecânicas e/ou metalúrgicas (limite de resistência à fadiga, tensão residual, microdureza).

- Avaliar a resistência à fadiga do ABNT 4140 ou similar, com revestimento fino aplicado sobre superfícies nitretadas por NDE *versus* nitretação convencional.

Finalmente, nota-se que um modelo abrangente das inter-relações do processo de nitretação por NDE deve ser desenvolvido para prever a integridade da superfície resultante e melhorar a vida em fadiga neste processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A370-15**: standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products - ASTM International. West Conshohocken, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E466-15**: standard practice for conducting force controlled constant amplitude axial fatigue tests of metallic materials - ASTM International. West Conshohocken, 2015.

AMORIM, F. **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. 156f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

ANDERSON, T. L. **Fracture mechanics**: fundamentals and applications. 3.ed, CRC Taylor & Francis, Boca Raton, 2005.

ARCELORMITTAL. Aços longos: **barras laminadas** - março 2010. Disponível em: <<http://longos.arcelormittal.com.br/pdf/produtos/industria/barras-laminadas/catalogo-barras-laminadas.pdf>>. Acesso em: 19 jun. 2016.

ARCELORMITTAL. Aços longos: **guia do aço** – março 2013. Disponível em: <<http://brasil.arcelormittal.com/pdf/quem-somos/guia-aco.pdf>>. Acesso em: 19 jun. 2016.

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

ASM HANDBOOK. **Heat treating**. American Society for Metals – ASM International, v.4, Ohio, 1998.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6152**: materiais metálicos – ensaio de tração à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2002.

BANNANTINE, J. A.; COMER, J. J.; HANDROCK, J. L. **Fundamentals of metal analysis**. 2. ed. New Jerse : Prentice Hall, 1990.

BATHIAS, C.; DROUILLAC, L.; LE FRANÇOIS, P. How and why the fatigue S-N curve does not approach a horizontal asymptote. **International Journal of Fatigue**, Elsevier. France, v.23, n.1. p.143-151, 2001.

BORGIOLI, F., FOSSATI, A., GALVANETTO, E., BACCI, T. Glow-discharge nitriding of AISI 316L austenitic stainless steel: influence of treatment temperature. **Surface and Coatings Technology**, v.200, p.2474-2480, 2005.

CALLISTER, W. D., RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8.ed., Rio de Janeiro: LTC, 2012.

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

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

COLLINS, J. A. **Failure of materials in mechanical design: analysis, prediction, Prevention**. 2. ed. New York: John Wiley & sons, 1993.

COLLINS, J. A. **Projeto mecânico de elementos de máquinas: uma perspectiva de prevenção da falha**. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

COSTA, Paulo *et al.* **Substâncias carboniladas e derivados**. Porto Alegre: Bookman, 2003.

DIBITONTO, D. D.; EUBANK, P. T.; PATEL, M. R.; BARRUFET, M. A. Theoretical models of the electrical discharge machining process: a simple cathode erosion mode. **Journal of Applied Physics**. v.66, n.9.p.4095-4103, nov. 1989.

DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. Tradução Antonio S. S. ; Silva, Luiz H. de Almeida; Paulo E. V. de Miranda. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1981.

DOWLING, N. E. **Mechanical Behavior of Materials: Engineering methods for deformation, fracture, and fatigue**. 3.ed. New Jersey. Pearson Prentice Hall, 2007.

ETBX ENGRASP. **Stress-life fatigue analysis: an engineer's toolbox calculation module**. Engrasp Inc., 2005. Disponível em: <http://www.fea-optimization.com/ETBX/stresslife_help.html>. Acesso em: 06 jul. 2015.

FREITAS, W. F. **Avaliação das propriedades mecânicas e resistência à fadiga do aço AISI 4140 submetido a diferentes valores de temperatura de revenimento**. 2010. 91f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 365 p., 2012.

GERDAU. Catálogo de produtos. **Manual de aços**. 2011. Disponível em: <<https://www.comercialgerdau.com.br/pt/produtos#>>. Acesso em: 04 dez. 2015.

GUITRAU, E. B. **The Electrical Discharge Machining Handbook**. Cincinnati, USA: Hanser Gardner Publications, 306p., 1997.

GUU, Y. H.; HOCHENG, H; CHOU, C. Y.; DENG, C. S. Effect of electrical discharge machining on surface characteristics and machining damage of AISI D2 tool steel. *Materials Science and Engineering*, v.358, n.1-2. p.37–43, Out. 2003.

INSTRON. Series 4460. Table top load frames. **Reference manual – equipment**. M10-24400-1, revision D, 1994. Disponível em: <<http://www.eng.uc.edu/~beaucag/Classes/Characterization/M10-24400-1-2%20%284465%20manual%29.pdf>>. Acesso em: 06 mai. 2016.

INSTRON. 8801 (100kN) “**Fatigue Testing Systems**”. Disponível em: <<http://www.instron.com.br/pt-br/products/testing-systems/dynamic-and-fatigue-systems/servohydraulic-fatigue/8801-floor-model>>. Acesso em: 06 mai. 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 6507-1: 2005(E)**: Metallic materials - Vickers hardness test - part 1: test method – ISO International. Geneva, 2005.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R., **Manufacturing engineering and technology**, 6.ed., Pearson, 2009.

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

KLOCKE, F; KÖNIG, W.; *Fertigungsverfahren 3 - Abtragen und Generieren*. 2007. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/9783540234920#section=326632&page=2&locus=3>>. Acesso em: 10 jul. 2015.

KLOCKE, F.; SCHNEIDER, S; EHLE, L; MEYER, H; HENSGEN, L; KLINK, A. Investigations on surface integrity of heat treated 42CrMo4 (AISI 4140) processed by sinking EDM. **Science Direct**. In: 18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XVIII). *Procedia CIRP* 42. p. 580–585. 2016

KUMAR, S.; SINGH, R.; SINGH, T. P.; SETHI, B. L. Surface modification by electrical discharge machining: a review. **Journal of Materials Processing Technology**. v.209, p.3675-3687. 2009.

LEE, Y.; PAN, J; HATHAWAY, R B.; BARKEY, M. E. **Fatigue testing and analysis: Theory and practice**. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.

LESER, C. High-cycle fatigue test. **MTS Materials Solutions**, 2013.

LOPES, K. S. S.; SALES, W. F.; PALMA, E. S. **Influence of machining parameters on fatigue endurance limit of AISI 4140 steel**. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science & Engineering*. ABCM. v.XXX, No. 1 / 77. 2008.

MACHADO, Á. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Blücher, 2009.

MARTINS, M. S. **Fadiga do aço para molas de válvula SAE 9258 produzido industrialmente por lingotamento convencional e contínuo**. 2010. 145f. Dissertação (Mestrado em Projetos e Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Guaratinguetá, 2010.

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

MITCHELL, M. R. Fundamentals of modern fatigue analysis for design. In: **ASM handbook: fatigue and fracture**, 1996, v.19, p.553-616.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

PETROBRÁS. **Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico – FISPQ**. Reforce N. Rio de Janeiro. 2015. Disponível em: <<http://www.br.com.br/wps/wcm/connect/25e41380441ec7f58e508eebba755bc2/fispq-quim-ureia-reforce-n.pdf?MOD=AJPERES>>. Acesso em: 12 ago. 2016.

PETROBRÁS. Produtos nitrogenados: **Reforce N**. Disponível em: <<http://www.br.com.br/wps/wcm/connect/33ed1800441ec5078e088eebba755bc2/ft-quim-ureia-reforce-n.pdf?MOD=AJPERES>>. Acesso em: 12 ago. 2016.

PODGORNIK, B.; VIZINTIN, J.; WÄNSTRAND, O.; LARSSON, M.; HOGMARK, S.; RONKAINEN, H.; HOLMBERG, K. Tribological properties of plasma nitrided and hard coated AISI 4140 steel. **Wear**, v.249, n.3-4, p. 254-259, May. 2001.

RASLAN, A. A. Implantação iônica em meio aquoso por EDM: resistência ao desgaste de aço AISI 4140. **COBEF Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, 8, Salvador, BA, 2015.

RASLAN, A. A.; SANTOS, R. F.; SILVA, E. R. Método de Nitretação através da usinagem com descargas - NDE. BR 10 2012 030523-2. Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG). Universidade Federal de Uberlândia (UFU), 2012.

REBELO J. C.; MORÃO DIAS, A.; KREMER, D; LEBRUN, J. L. **Influence of EDM pulse energy on the surface integrity of martensitic steels**. Journal of Materials Processing Technology (84). p. 90–96. 1998

SANTOS, R. F. **Influência do material da peça e do tratamento térmico na eletroerosão dos aços AISI H13 e AISI D6**. 2007. 132f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

SANTOS, R. F. **Nitretação por EDM do aço AISI 4140**. 2013. 128f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

SERVSPARK. **Manual de operação Eletroplus EDM-540/340**. Servspark Indústria de Máquinas Ltda. São Paulo, SP, 2014.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de engenharia mecânica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 960 p. 2005.

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

SILVA, E. R.; SANTOS, R. F.; RASLAN, A. A.. **Parameters Influencing the Process AJEDM**. In: CONGRESSO ANUAL - ABM, 67, 2012, Rio de Janeiro, Anais ISSN 1516-392X Rio de Janeiro: ABM, 1998. p. 3828-3840.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **SAE J404**: chemical compositions of SAE alloy steels – SAE INTERNATIONAL. Warrendale, 2000.

SOUZA, A. F.; ULBRICH, C. B. L. Engenharia Integrada por Computador e Sistemas CAD/CAM/CNC - princípios e aplicações. Artliber, 2ª ed., São Paulo, SP, 2013.

SOUZA, J. F. P. **Propriedades mecânicas de aços inoxidáveis austeníticos nitretados submetidos à hidrogenação catódica**. 2006. 90f. Tese (Mestrado) - Departamento de Física, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SOUZA, S. A. Ensaio mecânicos de materiais metálicos. Fundamentos teóricos e práticos. 5. ed. Edgard Blücher, São Paulo, 1982.

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

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.

Tabela 31 - Composição química (ABNT 4140) fornecida pelo Espectrômetro.

(conclusão)

	Te	Ta	B	Zn	La	N	Fe	S+P
1	0,003	<0,007	<0,002	<0,001	<0,000	0,011	97,18	0,015097
2	0,003	<0,007	<0,002	<0,001	<0,000	0,011	97,16	0,162780
3	0,003	<0,007	<0,002	<0,001	<0,000	0,011	97,16	0,153880
Média:	0,003	<0,007	<0,002	<0,001	<0,000	0,011	97,167	0,015588
DP:	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,012	0,000615
LMínl	--	--	--	--	--	--	--	--
LMáxl	--	--	--	--	--	--	--	--

	Cr+Mo	Ti+Nb	Nb+Ti+V	Ni+Cr+Mo				
1	1,07108	0,003330	0,006806	1,09436				
2	1,08043	0,003529	0,007121	1,10411				
3	1,07672	0,003386	0,006874	1,10016				
Média:	1,07608	0,003415	0,006934	1,09955				
DP:	0,004707	0,000103	0,000166	0,004906				
LMínl	--	--	--	--				
LMáxl	--	--	--	--				

Fonte: Autor, 2016.

LMínl = Limite mínimo interno

LMáxl = Limite máximo interno