

UNESP

Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Guaratinguetá

2002



1110000493



***"Influência da Nitretação na
Resistência à Fadiga
do Aço ABNT 4340"***

CÉLIO PACHECO DE SIQUEIRA

176



CELIO PACHECO DE SIQUEIRA

INFLUÊNCIA DA NITRETAÇÃO NA RESISTÊNCIA
À FADIGA DO AÇO ABNT 4340

FACULDADE DE ENGENHARIA
DE GUARATINGUETÁ

BIBLIOTECA

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá,
Universidade Estadual Paulista, para
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Mecânica na área de Projetos e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Celso Pinto Morais Pereira

493

493

Guaratinguetá

2002

24/8/02
R\$ 20,00
CARGO LECTOR NÃO
PISQUE O LIVRO

CELIO PACHECO DE SIQUEIRA

INFLUÊNCIA DA NITRETAÇÃO NA RESISTÊNCIA
A FADIGA DO AÇO ABNT 4340

Siqueira, Celio Pacheco de
S618i Influência da nitretação na resistência a fadiga do aço ABNT
4340 / Celio Pacheco de Siqueira – Guaratinguetá : [s.n.], 2002
177f.: il.

Bibliografia: f. 163-168
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade
de Engenharia de Guaratinguetá, 2002
Orientador: Prof. Dr. Celso Pinto Morais Pereira
Co-Orientador: Prof. Dr. Herman Jacobus Cornelis Woorvald
1. Fadiga 2. Aço ABNT 4340 I. Título

CDU 620.178.3

**“INFLUÊNCIA DA NITRETAÇÃO NA RESISTÊNCIA À FADIGA
DO AÇO ABNT 4340”**

CÉLIO PACHECO DE SIQUEIRA

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROJETOS E MATERIAIS**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Dr. José Luz Silveira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. CELSO PINTO MORAIS PEREIRA
Orientador / Unesp-Feg



Prof. Dr. MAURO PEDRO PERES
Unesp-Feg



Prof. Dr. CARLOS ANTONIO REIS PEREIRA BAPTISTA
FAENQUIL/DEMAR

Maio de 2002

DADOS CURRICULARES

CELIO PACHECO DE SIQUEIRA

NASCIMENTO: 02.10.1948, VOLTA REDONDA / RJ

FILIAÇÃO: Mauro Varela de Siqueira
Nair Pacheco de Siqueira

1969/1973: Curso de Graduação em Engenharia Mecânica,
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá -
FEG/UNESP - Guaratinguetá / SP

1965/1967: 2º Grau
Colégio Municipal Getúlio Vargas
Volta Redonda / RJ

À minha esposa Lúcia, aos filhos Camila, Carolina
e Celinho, ao meu neto Gabriel e ao meu genro
Netinho, pelo amor carinho e compreensão.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível graças à colaboração direta e indireta de muitas pessoas. Os meus mais sinceros agradecimentos e gratidão a todos, e especialmente:

Ao Prof. Dr. Celso Pinto Morais Pereira pela sua amizade e incentivo, e por disponibilizar sua competência técnica e sua presteza durante a orientação.

Ao Prof. Dr. Herman Jacobus Cornelis Voorwald, pela sua importante colaboração, incentivo e poder de validação, que muito me facilitou no desenvolvimento deste trabalho.

À Maxion Componentes Estruturais Ltda, em especial ao Engenheiro Francisco Antônio Souza Manso, pela autorização de todo processo de confecção dos corpos de prova e tratamentos térmicos e termoquímicos.

Ao Demar-Faenquil / Departamento de Materiais pela microscopia eletrônica de varredura e em especial ao aluno de Doutorado Renato Chaves Souza pela presteza, dedicação e amizade, na obtenção das imagens no “MEV”.

Ao Departamento de Materiais e tecnologia da UNESP/FEG, na pessoa do então chefe o Prof. Dr. Valdir Alves Guimarães, pela utilização da máquina de fadiga por flexão rotativa e de ensaio de tração.

Aos professores de Departamento de Materiais e Tecnologia – UNESP/FEG e do Departamento de Mecânica – UNESP/FEG, pelos ensinamentos transmitidos.

Aos funcionários e técnicos do Departamento de Materiais e Tecnologia – UNESP/FEG, em especial ao técnico Sr. Wilson Roberto Monteiro, pela inestimável ajuda dada nos ensaios de flexão rotativa.

A todos os colegas, funcionários e subordinados da Maxion Componentes Estruturais Ltda, pela compreensão e ajuda, e em especial ao Benedito Sávio Gonçalves, pela confecção dos corpos de prova.

“As pessoas que triunfam neste mundo são as
que buscam as circunstâncias que desejam e, se não
conseguem encontrá-las, criam-nas”

Bernard Shaw



SIQUEIRA, C. P. Influência da nitretação na resistência à fadiga do aço ABNT 4340. 2002, 177f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Projetos e Materiais), Faculdade de Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

RESUMO

Objetivou-se inicialmente neste trabalho de pesquisa, estudar o comportamento em fadiga do aço de baixa liga e alta resistência ABNT 4340 forjado, temperado e revenido com dureza de 30HRc, nos tratamentos superficiais: polido com lixa #600, com shot peening, com concentrador, com nitretação e com concentrador e nitretação. Para avaliar o comportamento em fadiga deste material com os tratamentos superficiais foram realizados ensaios de fadiga por flexão rotativa. Após levantados estes resultados foram plotados em curvas $\sigma - N$ (Diagrama de Wöhler). E as superfícies fraturadas foram analisadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV). Como os resultados à fadiga por flexão rotativa dos corpos de prova nitretados foram excelentes, foram feitos ensaios também para o ABNT 4340 temperado e revenido com dureza de 39HRc, nos tratamentos superficiais: polido com lixa #600, com shot peening, com nitretação e com concentrador e nitretação. Todo este estudo surgiu da necessidade de se determinar a causa da falha prematura de árvores, de uso em máquinas de repuxamento de procedência alemã, usada na fabricação de aros para pneus com câmara para uso em caminhões, na empresa Maxion Componentes Estruturais Ltda.

PALAVRAS CHAVE: Aço ABNT 4340, shot peening, nitretação, fadiga.

SIQUEIRA, C. P. Influência da nitretação na resistência à fadiga do aço ABNT 4340. 2002, 177f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Projetos e Materiais), Faculdade de Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

ABSTRACT

It was initially aimed in this research to study the behavior of high resistance and low alloy AISI 4340 steel in fatigue, forged, quenched and tempered with hardness of 30HRc, in the superficial treatments: polished with sandpaper #600, with shot peening, with concentrator, with nitriding and with concentrator and with nitriding. To evaluate the behavior of this material in bending rotation fatigue with the superficial treatments were performed tests of bending rotation which were plotted in curves S – N (Diagram of Wöhler). The fractured surfaces were analyzed in scanning electron microscopy (SEM). As the results to the bending rotation fatigue of the nitreted specimens work out excellently, it was also performed, quenched and tempered with hardness of 39HRc, in the superficial treatments: polished with sandpaper #600, with shot peening, with nitriding and with concentrator and with nitriding tests for AISI 4340 steel. The study necessity was raised in order to determine the cause of the premature failure of spindle, used in flow forming machines, made in Germany, which are used to manufacture truck rim for tire with tube, at Maxion Componentes Estruturais Ltda Company.

KEYWORDS: AISI 4340 steel, shot peening, nitriding, fatigue.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTAS DE SÍMBOLOS

1	INTRODUÇÃO	
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	23
1.2	OBJETIVO DO TRABALHO	24
2	REVISÃO DA LITERATURA	25
2.1	AÇOS - CARBONO E AÇOS - LIGA	25
2.1.1	Introdução	25
2.1.2	Classificação dos aços	26
2.1.3	Tratamentos térmicos	26
2.1.4	Tratamentos termo-químico	27
2.2	A ÁRVORE - ESTUDO DE CASO	31
2.3	FADIGA DOS MATERIAIS	47
2.3.1	Conceito de fadiga	47
2.3.2	Mecanismo da fadiga	50
2.3.2.1	Nucleação	50
2.3.2.2	Propagação da trinca	52
2.3.2.3	Ruptura final	54
2.3.3	Carregamento cíclico	55
2.3.4	Curvas $\sigma \times N$	59
2.3.5	Influência dos fatores dimensionais na fadiga	61
2.3.5.1	Dimensão	61
2.3.5.2	Concentradores de tensão	62
2.3.5.2.1	Rugosidade superficial	62
2.3.6	Influência dos fatores ambientais no comportamento em fadiga	63
2.3.6.1	Efeito da temperatura	63
2.3.6.2	Meio ambiente corrosivo	64

2.3.7	Efeito das inclusões e defeitos no comportamento em fadiga	64
2.4	SHOT PEENING.....	66
2.4.1	Introdução.....	66
2.4.2	O processo shot peening.....	67
2.4.3	Aplicação do shot peening	67
2.4.4	Variáveis e tipos do processo shot peening	67
2.4.5	Conceito de intensidade de shot peening.....	68
2.4.6	Método de Almen	69
2.4.7	Cobertura e saturação	70
2.4.8	Preparação para o shot peening	71
2.4.9	Controle da intensidade do shot peening	71
2.5	NITRETAÇÃO.....	72
2.6	TENSÕES RESIDUAIS	74
2.7	APLICAÇÃO DA ESTATÍSTICA EM FADIGA.....	76
2.7.1	As funções de distribuição de probabilidades de Weibull e de Gauss	76
2.7.2	O método de Weibull	77
3	MATERIAL E MÉTODO	80
3.1	MATERIAL	80
3.1.1	Composição química	80
3.1.2	Tratamento térmico da árvore	81
3.1.3	Corpos de prova	82
3.1.4	Tratamento superficial dos corpos de prova	92
3.1.4.1	Material base polido - “MB30”	93
3.1.4.2	Material base polido e nitretação – “MN30”	93
3.1.4.3	Material base polido com shot peening - “MS30”	93
3.1.4.4	Material base com concentrador - “MC30”	93
3.1.4.5	Material base com concentrador e nitretação - “MCN30”	94
3.1.4.6	Material base polido - “MB39”	94
3.1.4.7	Material base polido e nitretação - “MN39”	94
3.1.4.8	Material base polido com shot peening - “MS39”	94
3.1.4.9	Material base com concentrador - “MCN39”	94

3.2	ENSAIOS EXPERIMENTAIS	95
3.2.1	Ensaio mecânicos básicos	95
3.2.2	Ensaio de fadiga	96
3.2.3	Ensaio de tensão residual	99
3.2.3.1	Métodos de medição da tensão residual.....	99
3.2.3.2	Medição de tensões residuais.....	100
3.2.4	Análise de falha e microscopia	101
4	RESULTADOS	102
4.1	ENSAIOS MECÂNICOS BÁSICOS	102
4.2	ENSAIOS DE FADIGA	102
4.3	MEDIÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS.....	116
4.4	FRACTOGRAFIA E METALOGRAFIA.....	122
4.4.1	Microscopia eletrônica de varredura – MEV	122
4.4.2	Microscopia óptica	131
4.5	ENSAIOS DE MICRODUREZA.....	135
4.6	ESTUDO ESTATÍSTICO DOS RESULTADOS.....	137
4.7	RESULTADO DO EFEITO DAS INCLUSÕES NO MATERIAL NITRETADO	142
5	DISCUSSÕES	144
5.1	ANÁLISE DOS ENSAIOS MECÂNICOS	144
5.2	ENSAIOS DE FADIGA	144
5.3	ANÁLISE DAS TENSÕES RESIDUAIS	151
5.4	ANÁLISE DE FRACTOGRAFIA E METALOGRAFIA	154
5.4.1	Análise de falhas e fractografia	154
5.4.2	Análise de falhas e metalografia	156
5.5	ANÁLISE DE MICRODUREZA	157
5.6	ANÁLISE DOS RESULTADOS ESTATÍSTICOS	158
5.7	ANÁLISE DOS RESULTADOS DO EFEITO DAS INCLUSÕES NO MATERIAL NITRETADO	160
5.8	ANÁLISE DA GEOMETRIA DA ÁRVORE	160
6	CONCLUSÕES	161

6.1 CONCLUSÕES SOBRE O TRABALHO..... 161

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 162

REFERÊNCIAS 163

APÊNDICE

ANEXOS

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Montagem em corte dos componentes no nariz da árvore	32
Figura 2.2 - Vista em corte do cabeçote montado – “LEIFELD”	33
Figura 2.3 - Fotografia de uma máquina de repuxamento -“LEIFELD”	34
Figura 2.4 - Aro “LEIFELD” (a) - Aro com Gutter pronto. (b) - Aro estirado (c) - Aro com aba pronta.....	35
Figura 2.5 - Combinação dos movimentos dos rolos, carro e mandril.....	36
Figura 2.6 - Árvore original com a presença da trinca.....	36
Figura 2.7 - Desenho do perfil da árvore original.....	37
Figura 2.8 - Desenho do perfil da árvore original, onde ocorreu a trinca.....	38
Figura 2.9 - Fotografia de uma árvore quebrada.....	38
Figura 2.10 - Desenho do perfil da árvore modificada.....	39
Figura 2.11 - Fotografia da árvore quebrada com três meses - 23/04/1985.....	40
Figura 2.12 - Desenho do perfil da árvore indicando a trinca.....	41
Figura 2.13 - Fotografia de uma árvore da segunda geração que quebrou em 1990	42
Figura 2.14 - Desenho do perfil da árvore modificado da terceira geração	42
Figura 2.15 - Desenho do perfil da árvore da terceira geração com nova posição da trinca no nariz da árvore.....	43
Figura 2.16 - Desenho do perfil da árvore modificada da quarta geração	43
Figura 2.17 - Vista frontal do nariz da árvore trincada.....	44
Figura 2.18 - Vista posterior do nariz da árvore trincada.....	45
Figura 2.19 - Fotografia da trinca vazada.....	45
Figura 2.20 - Fotografia da trinca não vazada.....	46
Figura 2.21 - Esquema de vida em fadiga.....	49
Figura 2.22 - Mecanismos de pacote ou estrias de deformação.....	51
Figura 2.23 - Mecanismos de formação de microdeformações de Cotrell e Hull ...	51
Figura 2.24 - Mecanismos de formação de microdeformações de Wood: a) deformação estática; b) deformação cíclica provocando intrusão; c) deformação cíclica provocando extrusão.....	51

Figura 2.25 - Estágios de crescimento da trinca.....	53
Figura 2.26 - Representação esquemática da superfície que falha por fadiga	55
Figura 2.27 - Um ciclo senoidal de um carregamento cíclico de amplitude constante.	56
Figura 2.28 - Carregamentos cíclicos senoidais de amplitude constante e razão de tensões (R) diferentes.....	57
Figura 2.29 - Carregamentos cíclicos de amplitude variável.....	58
Figura 2.30 - Espectro de carregamento: a) situação real; b) situação simplificada ...	59
Figura 2.31 - Curvas $\sigma - N$ para aço doce e liga de alumínio, sob carregamento cíclico de tração - compressão	60
Figura 2.32 - Forma típica da curva $\sigma - N$	60
Figura 2.33 - Localização da inclusão: (a) inclusão na superfície; (b) inclusão na subsuperfície; (c) inclusão interna.....	66
Figura 2.34 - O método Almen de plaquetas.....	70
Figura 2.35 - Tempo operacional “t” de saturação, se 2t não elevar a intensidade em mais de X %	71
Figura 3.1 - Distribuição da dureza em torno da trinca.....	82
Figura 3.2 - Árvore estudada de aço ABNT 4340 forjado.....	83
Figura 3.3 - Trinca apresentada no nariz da árvore.....	83
Figura 3.4 - Trinca da parte traseira do nariz da árvore	83
Figura 3.5 - Nariz da árvore cortada em três partes para análise.....	84
Figura 3.6 - Posições de corte transversal da árvore.....	85
Figura 3.7 - Plano de corte para bucha identificada por “A”.....	85
Figura 3.8 - Plano de corte para bucha identificada por “B” e “C”.....	86
Figura 3.9 - Plano de corte para bucha identificada por “D” e “E”.....	87
Figura 3.10 - Plano de corte para bucha identificada por “F” e “G”.	87
Figura 3.11 - Plano de corte para bucha identificada por “H”, “I” e “J”	88
Figura 3.12 - Plano de corte para bucha identificada por “K”, “L” e “M”	88
Figura 3.13 - Nariz da árvore seccionado em três partes a 120°.....	89
Figura 3.14 - Desenho corpo de prova pré-usinado para usinagem final em torno “CNC”	89

Figura 3.15 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de fadiga por flexão rotativa	92
Figura 3.16 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de fadiga por flexão rotativa com concentrador - riscos de ferramenta de corte na usinagem	92
Figura 3.17 - Fotografia da máquina de ensaio de tração “EMIC”.	95
Figura 3.18 - Fotografia da máquina de ensaio de flexão rotativa..	96
Figura 3.19 - Esquema de aplicação de carga e diagrama de momento fletor	97
Figura 3.20 - Fotografia do corpo de prova montado na máquina de ensaio de flexão rotativa.....	99
Figura 3.21 - Equipamento Síntese. 1) Fonte alta tensão. 2) Tubo de raio-x. 3) Colimador. 4) Unidade de controle. 5) Amostra.....	100
Figura 4.1 - Curva σ - N do material base polido em flexão rotativa - “MB30” ...	110
Figura 4.2 - Curva σ - N do material base polido e nitretação em flexão rotativa - “MN30”	111
Figura 4.3 - Curva σ - N do material base com concentrador em flexão rotativa - “MC30”	111
Figura 4.4 - Curva σ - N do material base polido com shot peening em flexão rotativa - “MS30”	112
Figura 4.5 - Curva σ - N do material base com concentrador e nitretação em flexão rotativa - “MCN30”	112
Figura 4.6 - Curva σ - N de todas as condições em flexão rotativa com dureza de 30 HRc	113
Figura 4.7 - Curva σ - N do material base polido em flexão rotativa - “MB39”	113
Figura 4.8 - Curva σ - N do material base polido e nitretação em flexão rotativa - “MN39”	114
Figura 4.9 - Curva σ - N do material base polido com shot peening em flexão rotativa - “MS39”	114
Figura 4.10 - Curva σ - N do material base com concentrador e nitretação em flexão rotativa - “MCN39”	115

Figura 4.11 - Curva σ - N de todas as condições em flexão rotativa com dureza de 39HRc	115
Figura 4.12 - Curva da profundidade versus tensão residual do material base polido com 30HRc - "MB30"	118
Figura 4.13 - Curva da profundidade versus tensão residual do material base polido com nitretação com 30HRc - "MN30"	119
Figura 4.14 - Curva da profundidade versus tensão residual do material base com concentrador com 30HRc - "MC30"	119
Figura 4.15 - Curva da profundidade versus tensão residual do material base polido com shot peening com 30HRc - "MS30"	120
Figura 4.16 - Curva da profundidade versus tensão residual do material base com concentrador e nitretação com 30HRc - "MCN30"	120
Figura 4.17 - Curva da profundidade versus tensão residual do material base polido e nitretação com 39HRc - "MN39"	121
Figura 4.18 - Curva da profundidade versus tensão residual do material base com concentrador com 39HRc - "MCN39"	121
Figura 4.19 - Fractografia do corpo de prova material base polido - MB3011B25x, tensão de 65% $\sigma_e = 488$ MPa e 487.100 ciclos	122
Figura 4.20 - Fractografia do corpo de prova material base polido - MB306E150x, tensão de 65% $\sigma_e = 488$ MPa e 107.900 ciclos.....	123
Figura 4.21 - Fractografia do corpo de prova material base polido e nitretação - MN3015D400x, tensão de 107% $\sigma_e = 807$ MPa e 59.400 ciclos.....	124
Figura 4.22 - Fractografia do corpo de prova material base polido e nitretação - MN304J1000x, tensão de 78% $\sigma_e = 590$ MPa e 7.819.800 ciclos ..	124
Figura 4.23 - Fractografia do corpo de prova material base polido e nitretação - MN305G100x, tensão de 84% $\sigma_e = 637$ MPa e 525.400 ciclos .	125
Figura 4.24 - Fractografia do corpo de prova material base com concentrador - MC307B25x, tensão de 65% $\sigma_e = 488$ MPa e 120.900 ciclos.....	125
Figura 4.25 - Fractografia do corpo de prova material base com concentrador - MC303D250x, tensão de 82% $\sigma_e = 620$ MPa e 26.700 ciclos	126

Figura 4.26 - Fractografia do corpo de prova material base polido com shot peening - MS306A200x, tensão de 90% $\sigma_e = 677$ MPa e 21.100 ciclos.....	126
Figura 4.27 - Fractografia do corpo de prova material base polido com shot peening - MS301A400x, tensão de 75% $\sigma_e = 568$ MPa e 83.700 ciclos.....	127
Figura 4.28 - Fractografia do corpo de prova material base com concentrador e nitretação - MCN304B450x, tensão de 95% $\sigma_e = 716$ MPa e 95.700 ciclos	127
Figura 4.29 - Fractografia do corpo de prova material base com concentrador e nitretação - MCN3011L800x, tensão de 88% $\sigma_e = 667$ MPa e 1.270.300 ciclos	128
Figura 4.30 - Fractografia do corpo de prova - MN3918B25x, tensão de 78% $\sigma_e = 871$ MPa e 76.700 ciclos	129
Figura 4.31 - Fractografia do corpo de prova - MN3922E400x, tensão de 66% $\sigma_e = 871$ MPa e 408.800 ciclos	129
Figura 4.32 - Fractografia do corpo de prova - MCN3909H300x, tensão de 68% $\sigma_e = 756$ MPa e 6.119.200 ciclos	130
Figura 4.33 - Fractografia do corpo de prova - MCN3909H1000x, tensão de 68% $\sigma_e = 756$ MPa e 6.119.200 ciclos	130
Figura 4.34 - Fotografia da micrografia da amostra MCN3G.....	131
Figura 4.35 - Fotografia da micrografia da amostra MCN10A.....	132
Figura 4.36 - Micrografia da região fraturada da árvore - falta de camada branca ..	132
Figura 4.37 - Micrografia da região fraturada da árvore - trinca principal e trinca secundária à esquerda - 100x.....	133
Figura 4.38 - Micrografia da região fraturada da árvore - trinca principal e trinca secundária à direita - 100x.....	133
Figura 4.39 - Micrografia da região fraturada da árvore, sem ataque de nital - trinca principal mais duas trincas secundárias - 200x.....	134
Figura 4.40 - Micrografia da região fraturada da árvore - trinca principal e trinca secundária - 100x.....	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Composição química do aço ABNT 4340	80
Tabela 3.2 - Composição química do aço ABNT 4340 - 39HRc	81
Tabela 3.3 - Composição química do aço ABNT4340 - 39HRc	81
Tabela 3.4 - Distribuição dos corpos de prova em blocos	91
Tabela 4.1 - Dados obtidos nos ensaios de fadiga por flexão rotativa para o material base polido - “MB30”	103
Tabela 4.2 - Dados obtidos nos ensaios de fadiga por flexão rotativa para o material base polido e nitretação - “MN30”	104
Tabela 4.3 - Dados obtidos nos ensaios de fadiga por flexão rotativa para o material base com concentrador - “MC30”	105
Tabela 4.4 - Dados obtidos nos ensaios de fadiga por flexão rotativa para o material base polido com shot peening - “MS30”	106
Tabela 4.5 - Dados obtidos nos ensaios de fadiga por flexão rotativa para o material base com concentrador e nitretação - “MCN30”	107
Tabela 4.6 - Dados obtidos nos ensaios de fadiga por flexão rotativa para o material base polido - “MB39”	108
Tabela 4.7 - Dados obtidos nos ensaios de fadiga por flexão rotativa para o material base polido e nitretação - “MN39”	109
Tabela 4.8 - Dados obtidos nos ensaios de fadiga por flexão rotativa para o material base polido com shot peening - “MS39”	109
Tabela 4.9 - Dados obtidos nos ensaios de fadiga por flexão rotativa para o material base com concentrador e nitretação - “MCN39”	110
Tabela 4.10 - Dados obtidos nos ensaios de medição da tensão residual do corpo de prova do material polido com 30HRc - “MB30”	116
Tabela 4.11 - Dados obtidos nos ensaios de medição da tensão residual do corpo de prova do material base polido e nitretação com 30HRc - “MN30”.	116

Tabela 4.12 - Dados obtidos nos ensaios de medição da tensão residual do corpo de prova do material base com concentrador com 30HRc - “MC30”	116
Tabela 4.13 - Dados obtidos nos ensaios de medição da tensão residual do corpo de prova do material base polido com shot peening com 30HRc - “MS30”	117
Tabela 4.14 - Dados obtidos nos ensaios de medição da tensão residual do corpo de prova do material base com concentrador e nitretação com 30HRc - “MCN30”	117
Tabela 4.15 - Dados obtidos nos ensaios de medição da tensão residual do corpo de prova do material base polido e nitretação com 39 HRc - “MN39”	117
Tabela 4.16 - Dados obtidos nos ensaios de medição da tensão residual do corpo de prova do material base com concentrador e nitretação com 39 HRc - “MCN39”	118
Tabela 4.17 - Perfil de microdureza com 0,2 kg de carga material base polido com nitretação - MN305B	135
Tabela 4.18 - Perfil de microdureza com 0,2kg de carga material base com concentrador e nitretação - MCN303K.	135
Tabela 4.19 - Perfil da microdureza com 0,2kg de carga material base com concentrador e nitretação - “MCN303K”	136
Tabela 4.20 - Perfil da microdureza com 0,2Kg de carga material base com concentrador e nitretação - 39HRc.....	136
Tabela 4.21 - Resultados da linearização da função de distribuição e de determinação dos limites de confiabilidade - “MB30”	137
Tabela 4.22 - Resultados da linearização da função de distribuição e de determinação dos limites de confiabilidade - “MN30”	138
Tabela 4.23 - Resultados da linearização da função de distribuição e de determinação dos limites de confiabilidade - “MC30”	138
Tabela 4.24 - Resultados da linearização da função de distribuição e de determinação dos limites de confiabilidade - “MS30”	139

Tabela 4.25 -Resultados da linearização da função de distribuição e de determinação dos limites de confiabilidade - “MCN30”	139
Tabela 4.26 -Resultados da linearização da função de distribuição e de determinação dos limites de confiabilidade - “MB39”	140
Tabela 4.27 -Resultados da linearização da função de distribuição e de determinação dos limites de confiabilidade - “MN39”	140
Tabela 4.28 -Resultados da linearização da função de distribuição e de determinação dos limites de confiabilidade - “MCN39”	141
Tabela 4.29 -Corpos de prova de material base polido e nitretação, com dureza 30HRc - ensaiados em flexão rotativa	142
Tabela 4.30- Corpos de prova de material base com concentrador e nitretação, com dureza 30HRc - ensaiados em flexão rotativa	143
Tabela 4.31 -Corpos de prova de material base polido e nitretação, com dureza 39HRc - ensaiado em flexão rotativa	143
Tabela 4.32 -Corpos de prova de material base com concentrador e nitretação, com dureza 39HRc - ensaiado em flexão rotativa	143
Tabela 5.1 - Relação das cargas em $\% \sigma_e$ / número médio de ciclos $\times 10^3$	145
Tabela 5.2 - Relação das cargas em $\% \sigma_e$ / número médio de ciclos $\times 10^3$	148

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	-	American Iron and Steel Institute
DIN	-	Deutscher Normenausschuss
ISO	-	International Standard Organization
MEV	-	Microscópio Eletrônico de Varredura
SAE	-	Society of Automotive Engineers
HRc	-	Dureza Rockwell Escala "C"
FEG	-	Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
UNESP	-	Universidade Estadual Paulista
DEMAR	-	Departamento de Materiais
DMT	-	Departamento de Materiais e Tecnologia
SEM	-	Scanning Electron Microscopy
FAENQUIL	-	Faculdade de Engenharia Química de Lorena



LISTA DE SÍMBOLOS

#	granulometria
%	percentagem
Å	angström
A%	estricção
Al	alumínio
c	carga de correção
Cr	cromo
f	freqüência
g	grama
h	horas
HRc	dureza Rockwell c
Hv	dureza Vickers
I	energia cinética
kg	quilograma
Kgf	quilograma força
kV	quilovolt
ln	logarítmo natural
m	massa
m	metro
m/min	velocidade
M_f	momento fletor
$M_{f\text{máx}}$	momento fletor máximo
min	minuto
mm	milímetro
mm^2	milímetro quadrado
mm/rotação	avanço
MPa	megapascal
N	newton
N	número de ciclo

Ni	níquel
Nn	ciclos para nucleação
Np	ciclos para propagação
°C	graus celsius
O	oxigênio
P	carga aplicada
Pv	distribuição cumulativa
N _f	número de ciclos até a falha
T _{fmáx}	tensão normal máxima
R	razão de carregamento
Ra	rugosidade média
s	segundo
T	período
t	tempo
W	tungstênio
V	vanádio
σ	tensão normal
τ	tensão de cisalhamento
$\Delta\sigma$	variação de tensão normal
β	parâmetro de forma ou de inclinação de Weibull
ε	alongamento específico
γ	parâmetro de vida mínima
η	parâmetro de escala ou de vida característica
μ	micro
μm	micrometro
ρ_r	vida confiável
σ'	tensão nominal na inclusão
σ'_w	tensão limite de resistência à fadiga predito
σ_a	amplitude de tensão
σ_c	tensão de escoamento

σ_f	tensão de flexão
σ_L	tensão limite de resistência à fadiga
σ_m	tensão média
$\sigma_{\max}$	tensão máxima
$\sigma_{\min}$	tensão mínima
σ_r	tensão limite de ruptura
σ_t	tensão limite de resistência à tração
$\varnothing$	diâmetro
$\varnothing$ médio	diâmetro médio
$\phi(x)$	função positiva não decrescente
$\sqrt{}$	raiz quadrada

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Muitos projetos de componentes mecânicos ou de elementos estruturais de máquinas, destinados a trabalhar sob solicitação cíclica em fadiga, eventualmente estes falham após um número de solicitações muito abaixo do previsto teoricamente. Daí a necessidade de uma ampla investigação das causas destas falhas.

Os problemas de melhoria de detalhes de projeto desafiam os profissionais de engenharia. As conseqüências das partes que falham são as mais diversas, variam desde o custo de reparação e perda de tempo de produtividade até os mais sérios acidentes envolvendo perda de vidas.

Esta situação pode tornar-se mais grave quando envolve altas velocidades e severas cargas repetitivas, com necessidade de vida mais longa em operação para justificar os largos planos econômicos. Existe a possibilidade do aumento do dano por fadiga, problemas estes encontrados nas indústrias de máquinas e equipamentos de movimentação, transportes industriais etc.

As falhas são raramente devidas ao material em si; e as experiências mostram que medidas corretivas, usualmente levam a uma modificação no projeto. Por exemplo, uma questão publicada pelo "Navy Bureau of Aeronautics", atesta que pequenas melhorias na vida em fadiga pode ser alcançada simplesmente pela troca de material, poucas dificuldades sérias de fadiga tem sido completamente corrigida neste sentido. Tais dificuldades são quase sempre sinalizadas por inadequados projetos, erros de fabricação e negligência na manutenção.

Pelo estudo dos fatores de concentração de tensões, muito pode ser esclarecido sobre como perceber nos projetos aqueles que são satisfatórios, do ponto de vista de resistência para cargas repetitivas, e como avaliar aproximadamente a influência de várias características geométricas (PETERSON, 1966).



1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo do presente trabalho é estudar e avaliar o efeito, isolado e de forma combinada, das variáveis: nitretação e concentradores de tensões, na resistência à fadiga por flexão rotativa do aço ABNT 4340. Além disso, será avaliada sua provável recuperação de vida em fadiga através do processo Shot Peening, responsável pela introdução de tensões residuais compressivas na superfície da amostra.

Todo este estudo está associado à fratura de árvores de aço ABNT 4340 forjado temperado, revenido e com nitretação, sendo nítido observar a influência negativa da concentração de tensões na nucleação de trincas de fadiga. Pretende-se neste estudo, propor modificações de projeto e de processo, para evitar fraturas desse componente.

Os corpos de prova fraturados terão suas fraturas analisadas em microscópio ótico e, em microscópio de varredura eletrônica (MEV).

Todos os corpos de prova serão tirados de uma árvore fraturada, no sentido do seu eixo, e numa parte onde a solicitação à flexo-torção foi insignificante. Após isto, serão numerados os corpos de provas em função da localização na árvore, e será feita uma distribuição aleatória, por computador, separando-os em lotes de dezoito corpos de prova cada.



2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 AÇOS-CARBONO E AÇOS-LIGA

2.1.1 Introdução

Os metais ferrosos mais usuais são o aço, o ferro fundido e o ferro laminado. Os dois primeiros são ligas de ferro e carbono, com outros elementos adicionais, como o silício, manganês, fósforo, enxofre etc.

O aço é o mais importante dos três. O teor de carbono varia de 0% até 1,7%. O carbono aumenta resistência do aço; porém, o torna mais duro e frágil a temperatura ambiente. Por outro lado, os aços com baixo teor de carbono tem menor resistência à tração; porém, são mais dúcteis.

O ferro fundido contém de 1,8% a 4,5% de carbono. Tem boa resistência à compressão (da ordem de 60 kgf/mm²); porém, a resistência a tração é da ordem de 60% da anterior, e sob efeito de choque, mostra-se quebradiço. São utilizados em peças de máquinas de forma irregular, como por exemplo, bases de motores etc. Existem duas modalidades principais de ferro fundido, denominado pela cor de fratura: ferro cinza e ferro branco. Este último, que é duro e quebradiço, pode ser transformado por tratamento térmico em ferro maleável, que apresenta melhor resistência ao impacto e maior trabalhabilidade.

O ferro laminado é praticamente um aço de baixo carbono (inferior a 0,12%). As pequenas partículas de escória espalhadas na massa do metal se apresentam em forma de fibras, devido às operações de laminação: estas fibras de escória permitem distinguir o ferro maleável do aço com o mesmo teor de carbono. Apresenta uma resistência à tração, na direção das fibras, de aproximadamente 35 kgf/mm²; enquanto que, na direção transversal diminui de 10% a 20% esse valor.

Dada a variedade de tipos de aços, foram criados sistemas para sua classificação, e podem ser classificados: quanto a sua composição (como aços-carbono e aços-liga), quanto ao processo de acabamento (como aços laminados a quente ou aços laminados a frio) e quanto a forma do produto acabado (como barras, chapas grossas, chapas finas, tiras, tubos ou perfis estruturais).



2.1.2 Classificação dos aços

Uma das classificações mais generalizadas e, que inclusive serviu de base para o sistema adotado no Brasil pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, é a que considera a composição química dos aços e, dentre os sistemas conhecidos, são muito usados os da American Iron and Steel Institute - AISI e da Society of Automotive Engineers - SAE. Nesse sistema, normalmente, os aços são indicados por quatro ou cinco algarismos, sendo que os dois primeiros podem indicar, por exemplo, se for 10, os aços são simplesmente ao carbono; se for 20 os aços são ao níquel; se for 30, contêm cromo e níquel; quando for 40, os aços são ao molibdênio, com 0,25% de molibdênio em média; se for 43, o aço contêm níquel, cromo e molibdênio, com 1,65 a 2% de Ni, 0,4 a 0,9% de Cr e 0,2 a 0,3% de Mo. Os algarismos que se seguem XX ou XXX (por exemplo, aço 43XX) correspondem à cifras indicadoras dos teores de carbono. Assim por exemplo, a classe 40 significa aço-carbono com 0,40% de carbono em média (CHIAVERINI, 1986a).

De acordo com a norma 6006 da ABNT, os aços-carbonos são assim chamados quando os teores de silício e manganês não ultrapassam os teores de 0,6% (Si) e 1,65% (Mn). Neles podem ainda ser especificados teor máximo de 0,1% de alumínio, teor mínimo de boro de 0,0005%, teor máximo de cobre de 0,3% ou ainda um teor máximo de chumbo de 0,35%. Já de acordo com essa mesma norma da ABNT, os aços-liga são os aços em que possuem outros elementos de liga, não se considerando como tais os elementos adicionados para melhorar sua usinabilidade. A soma de todos esses elementos, inclusive carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre não pode ultrapassar 6%. Ainda, se os teores de silício, manganês e alumínio, sempre presentes nos aços-carbono, ultrapassarem a 0,6%, 1,65% e 0,1%, respectivamente, estes aços serão considerados aços-liga (CHIAVERINI, 1986a).

2.1.3 Tratamentos térmicos

Os aços podem sofrer tratamentos térmicos para melhorar suas propriedades, quer sejam para reduzir tensões internas provocadas por laminação, soldas etc



(normalização e recozimento); quer para modificar a estrutura cristalina, com alteração da resistência e de outras propriedades (têmpera e revenido).

A normalização consiste em aquecer o aço a uma temperatura da ordem de 800°C (variável com a porcentagem de carbono), mantê-lo nessa temperatura durante quinze minutos e depois deixá-lo esfriar livremente ao ar. Comumente nas operações de manufatura, como laminação, forja, fundição etc, resultam tensões internas devidas ao resfriamento não uniforme, distorções etc. O efeito da normalização é refinar o grão, produzindo pequenos cristais, e remover as tensões internas.

O recozimento consiste em aquecer o aço a uma temperatura apropriada, dependendo do efeito desejado, e mantê-lo aquecido por algumas horas ou dias e depois deixá-lo esfriar lentamente, normalmente no forno. As características obtidas com o recozimento são: remover tensões internas, refinar o grão e reduzir a dureza.

A têmpera é quando o aço é aquecido a cerca de 900°C e esfriado rapidamente em água ou em óleo para cerca de 200°C . Na têmpera o aço aumenta a dureza e a resistência mecânica, mas diminui a ductilidade e a tenacidade.

O revenido é feito para diminuir a dureza e aumentar a tenacidade. No revenimento, o aço é aquecido entre 300°C e 700°C e é deixado esfriar ao ar. A redução na dureza é regulada pela temperatura de aquecimento.

2.1.4 Tratamento termo-químico

Os tratamentos termo-químicos aplicados no aço tem por objetivo o seu endurecimento superficial, através da modificação parcial da sua composição química, nas secções que se deseja endurecer.

O aço quando aquecido num meio apropriado pode sofrer alteração da sua composição química até uma profundidade que depende da temperatura de aquecimento e do tempo de permanência à temperatura de tratamento em contato com o meio em questão. A alteração parcial da composição química, seguida geralmente de tratamento térmico apropriado, produz também uma modificação da estrutura do material, resultando numa modificação também parcial das propriedades mecânicas.

Os tratamentos termo-químicos permitem aumentar a dureza e a resistência ao desgaste superficial, ao mesmo tempo que o núcleo do material permanece dúctil e tenaz, o que o torna de grande importância em inúmeras aplicações, onde para os aços com elementos de liga, pode-se conseguir núcleo de elevada resistência e tenacidade, com superfície extremamente dura, resultando num material capaz de suportar em alto grau, certos tipos de tensões.

Diversos são os processos de tratamento termo-químicos, podemos detectar: a cementação, a nitretação, a cianetação, a carbonitretação e a boretação.

A *cementação* consiste no aquecimento superficial de carbono em certos aços, aquecidos convenientemente em contato com substâncias carbonáceas. Através deste tratamento introduz-se carbono na superfície do aço, de tal forma que este, após ser temperado, apresente uma superfície mais dura. É necessário que o aço seja aquecido, em contato com a substância capaz de fornecer carbono até que a solução do carbono no ferro ocorra facilmente. Esta temperatura deve ser superior à zona crítica, que é de 850°C a 950°C.

A profundidade de penetração do carbono depende da temperatura e do tempo, sendo inicialmente rápido e decrescendo em seguida. Os processos usuais de cementação, eleva o teor superficial de carbono até 0,8% a 1,0%. A cementação é um fenômeno de difusão, está relacionado com o movimento de carbono no interior do aço (CHIAVERINI, 1986a).

A *nitretação* é um tratamento de endurecimento superficial, em que o aço na presença de um ambiente nitrogenoso, numa determinada temperatura, recebe por meio de difusão o nitrogênio, até uma determinada profundidade.

Os objetivos da nitretação são: obtenção de elevada dureza superficial, aumento da resistência ao desgaste e da resistência à escoriação, aumento da resistência à fadiga, melhora da resistência à corrosão e melhora da resistência ao calor, até temperaturas correspondentes às de nitretação.

Características do processo de nitretação que podem ser consideradas são: temperatura de tratamento inferior à crítica em pelo menos 10°C, em consequência as peças são menos suscetíveis de qualquer tratamento térmico posterior à nitretação reduzindo ao mínimo as probabilidades de empenamento ou distorção das peças.



Além da camada nitretada possuir elevada resistência à fadiga dos aços nitretados deve-se ao fato de que o processo introduz tensões residuais de compressão na superfície do aço.

No processo nitretação, apesar da peça ter pouca probabilidade de empeno ou torção, existe sempre o aumento nas dimensões externas das peças. Isto é devido aos nitretos e carbonetos formarem uma faixa ou “camada branca”, chamada “zona de compostos”, que pode atingir uma espessura de 0,005 a 0,030mm, conforme o tempo de nitretação que varia de 60 a 180 min.

A *carbonitretação* consiste em submeter o aço a uma temperatura elevada, geralmente acima da de transformação numa atmosfera gasosa que pode fornecer carbono e nitrogênio simultaneamente ao metal. Este processo pode ser chamado de “cianetação a gás” ou “nitrocarbonetação”, e é considerado um processo de cementação a gás modificado porque consiste em se introduzir amônia na atmosfera gasosa carburizante. A temperatura da carbonitretação está geralmente entre 705° e 900°C.

O objetivo da carbonitretação é dar ao aço uma camada dura e resistente ao desgaste com profundidade variando de 0,07 a 0,7mm. A camada carbonitretada apresenta melhor temperabilidade que a camada cementada, de tal forma que, por carbonitretação e tempera subsequente, pode-se obter uma camada dura a custo mais baixo.

A carbonitretação produz profundidade de camada inferior a cementação, mas por outro lado a resistência de uma camada carbonitretada ao amolecimento durante o revenido é muito superior à de uma superfície cementada. Conclui-se que a carbonitretação de aços de menor custo resulta em propriedades equivalentes às obtidas pela cementação à gás de aços-liga.

A *boretação*, este processo consiste em introduzir por difusão, na superfície do aço, o elemento boro, formando-se boreto de ferro com dureza elevada, cerca de 1700 a 2000 Vickers. Este processo permite tratar superficialmente aços carbonos de baixo e alto teor de carbono, ligados ou não, e também ferro fundido comum e ferro fundido nodular. A temperatura de tratamento varia de 800°C a 1050°C, sendo 900°C a mais comum, e o seu controle deve ser rigoroso. A profundidade da camada é menor que na



cementação, nitretação e carbonetação, para o mesmo tempo de exposição. A alta dureza superficial da camada boretada proporciona uma excelente resistência ao desgaste do material.

Dos tratamentos termo-químicos apresentados, a nitretação é o único que melhora sensivelmente a resistência à fadiga dos aços, quando trabalhando em flexo-torção, os outros apresentam como característica principal a resistência ao desgaste.

Segundo o informativo “Tenifer-Mittei-Lungen nº14” da Brasimet, para componentes mecânicos em aço, submetidos apenas a esforço de tração e compressão alternada, distribuídos homogeneamente por toda a secção transversal da peça, a nitretação contribuirá muito pouco, ou quase nada, no que se refere ao aumento da resistência à fadiga. Porém, se a estes esforços de tração e compressão alternada juntarem-se outros de flexão e/ou de torção alternada, o processo de nitretação aumentará sensivelmente a resistência à fadiga do componente. O mesmo efeito se fará sentir em peças entalhadas sujeitas, apenas a esforços de flexo-torção alternada.

Ainda, segundo o informativo “Tenifer-Mitteelungen nº14” da Brasimet, peças contendo entalhes, quando submetidas a flexão e/ou torção alternadas, por sua própria forma construtiva estabelecem, internamente, um gradiente de tensões internas e, que nestes casos, os efeitos benéficos da nitretação sobre a resistência à fadiga, serão sentidos com maior vigor.

Face ao sensível aumento na resistência à fadiga, propiciado pela nitretação, e devido ao esforço de flexão e torção rotativa alternada, aplicada ao componente mecânico denominado árvore, objeto deste estudo, numa das tentativas de aumentar sua vida em fadiga, no reprojeto deste componente, a nitretação foi aplicada, o que não era no projeto original, como uma alternativa para aumentar a vida deste componente mecânico.



2.2 A ÁRVORE - ESTUDO DE CASO

Um componente mecânico de grande importância numa caixa de redução ou numa caixa de mancal de uma máquina de repuxamento e conformação, é sem dúvida a árvore. Ela é o último elemento de saída da caixa de redução ou de mancal. Depois da árvore, vem as ferramentas que se denominam mandris ou rolos, que são fixados na sua extremidade por parafusos e/ou porcas. Denomina-se “nariz da árvore” a extremidade da árvore onde é fixado o mandril. Toda árvore é apoiada em dois ou mais mancais radiais de rolamentos juntamente com um mancal axial de rolamento.

O nariz da árvore, é uma parte da árvore que permite a troca rápida de mandris, sendo constituído de cone para centragem, flange com furos para fixação do mandril, pinos de locação, disco baioneta etc.

A geometria dimensional do nariz da árvore é normalizada pela Deutsche Normen - DIN ou International Standard Organization - ISO, e a norma que rege a árvore em apreço é a DIN 55027 (1980) ou ISO 702/III (1975), com o título: “SPINDLE NOSES WITH CENTERING TAPER, FACE PLATE AND BAYONET TYPE FASTENING, ACCESSORIES - DIMENSIONS”, sendo 15, o tamanho da árvore que está sendo pesquisada.

A Figura 2.1 - DIN 55027 (1980) ilustra a montagem em corte da árvore num cabeçote com o nariz da árvore recebendo a montagem dos componentes: disco baioneta, pino de guia, estojo, porca com colar, flange com furos para fixação do mandril.



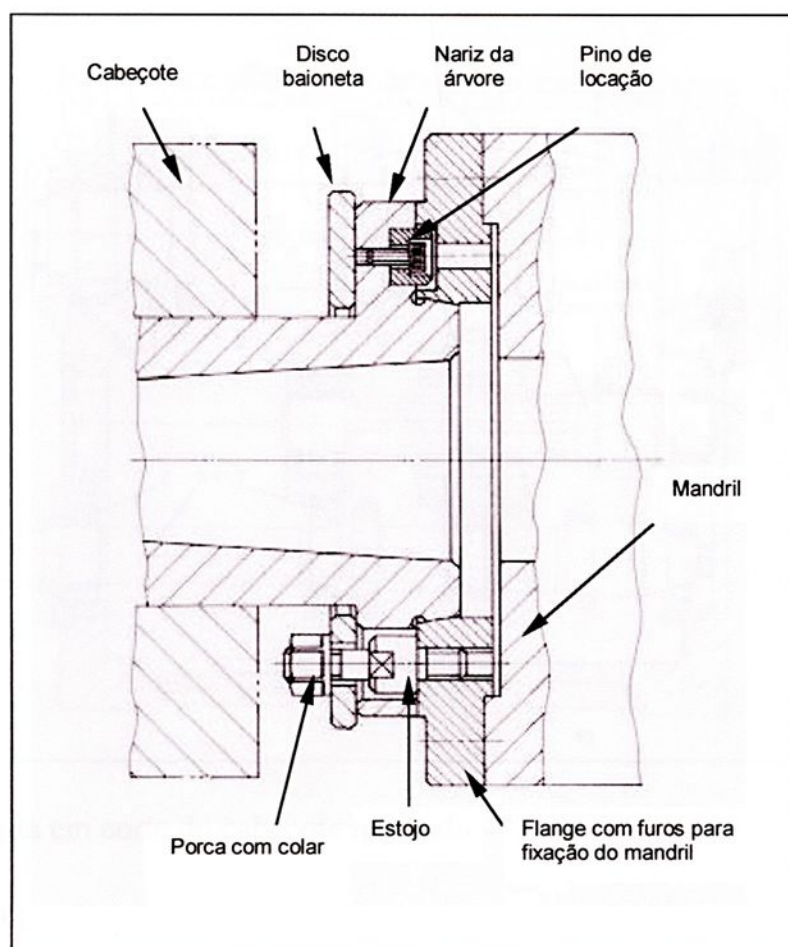


Figura 2.1 - Montagem em corte dos componentes no nariz da árvore

Numa máquina de repuxamento, com movimento dos rolos por servos cilindros e/ou cilindros hidráulicos e/ou servos motores e fusos de esferas ou planetárias, a árvore é um elemento vital da transmissão de potência e, como tal nunca deveria se quebrar, ainda que normalmente é bem dimensionada, para garantir precisão e rigidez estrutural ao conjunto do cabeçote na fabricação das peças.

A montagem de um cabeçote ou caixa de redução com a árvore, pode ser visto na Figura 2.2 (LEIFELD, 1970).

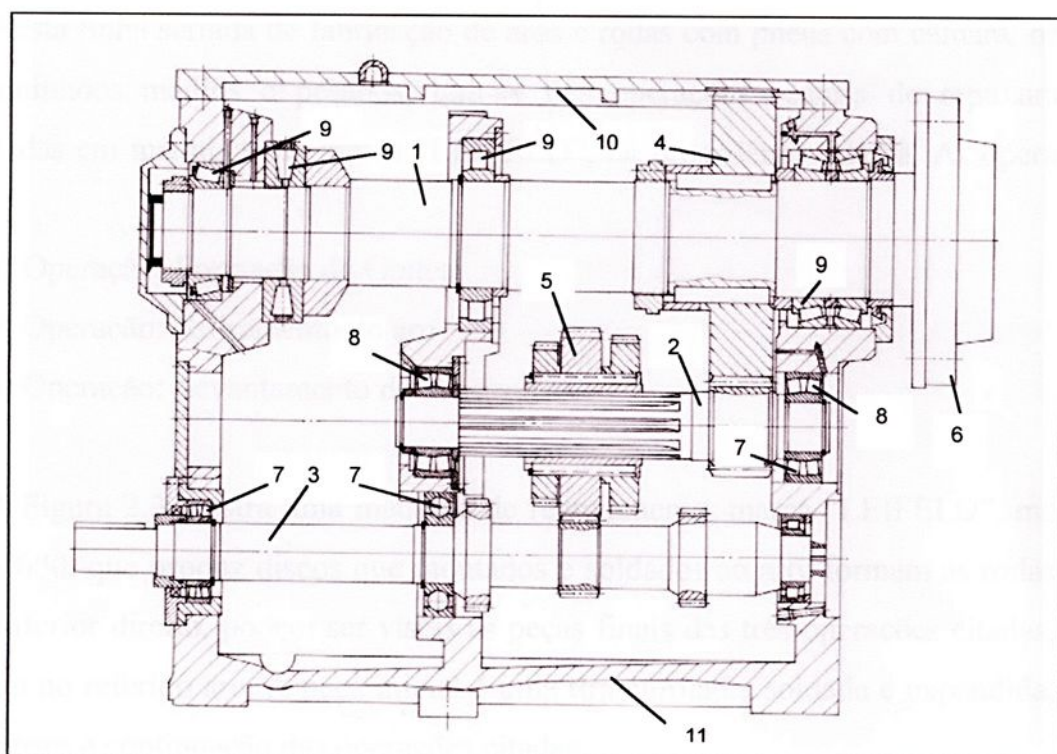


Figura 2.2 - Vista em corte do cabeçote montado - “LEIFELD”

- 1 - Árvore;
- 2 - Eixo pinhão intermediário;
- 3 - Eixo pinhão de entrada;
- 4 - Coroa de saída;
- 5 - Carretel de engrenagens mudança de marchas;
- 6 - Nariz da árvore;
- 7 - Mancais de rolamentos do eixo pinhão de entrada;
- 8 - Mancais de rolamentos do eixo pinhão intermediário;
- 9 - Mancais de rolamentos da árvore;
- 10 - Tampa do cabeçote; e
- 11 - Carcaça do cabeçote.

A árvore sobre a qual pesquisamos pertence a uma máquina de repuxamento, de uma série de máquinas em linha, utilizadas na fabricação de aros para serem montados ou não, em rodas para caminhões, médios e pesados, para uso em pneus com câmara. O modelo desta máquina é AFM 600 – AF, com produção horária atual de 120 peças a 100%. Esta máquina pertence a empresa Maxion Componentes Estruturais Ltda, instalada em Cruzeiro, SP.

Nesta linha seriada de fabricação de aros e rodas com pneus com câmara, de uso em caminhões médios e pesados, tem-se três operações básicas de repuxamento executadas em máquinas da marca “LEIFELD”, de procedência alemã. As operações são:

1ª Operação: Formação do Gutter

2ª Operação: Estiramento do aro

3ª Operação: Levantamento da aba

A Figura 2.3 mostra uma máquina de repuxamento, marca “LEIFELD”, modelo AFM - 600, que produz discos que montados e soldados ao aro, formam as rodas. No canto inferior direito, podem ser vistas as peças finais das três operações citadas, que resultam no referido aro. A peça inicial é uma tira enrolada, soldada e expandida, que servirá para a continuação das operações citadas.

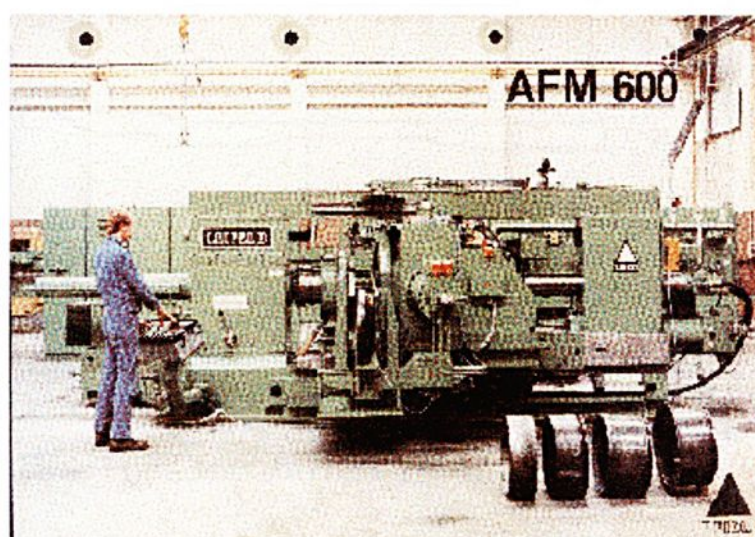


Figura 2.3 - Fotografia de uma máquina de repuxamento - “LEIFELD”

Na primeira e segunda operação, o esforço na árvore é de leve flexão e moderada torção; já na terceira operação, a flexão e a torção são altas, apesar da torção ter um pico de não mais de 3s, sendo a flexão o esforço predominante.

Este esforço de flexão alto, associado ao movimento de giro do mandril com a peça a se deformar plasticamente, causa uma flexão rotativa alternada na árvore ($R = -1$).

O esforço de flexão é alto porque trabalha-se na deformação das peças com dois rolos horizontais, montados sobre um carro guiado em prismas, acionados por cilindros hidráulicos, com batentes mecânicos reguláveis. Este carro movimenta-se longitudinalmente também acionado por outro cilindro hidráulico, com batente mecânico, que avança e retorna o carro sobre a peça a deformar.

A combinação destes movimentos deforma plasticamente o perfil da tira enrolada, como mostrado na Figura 2.4(a), até se obter a aba mostrada na Figura 2.4(c).

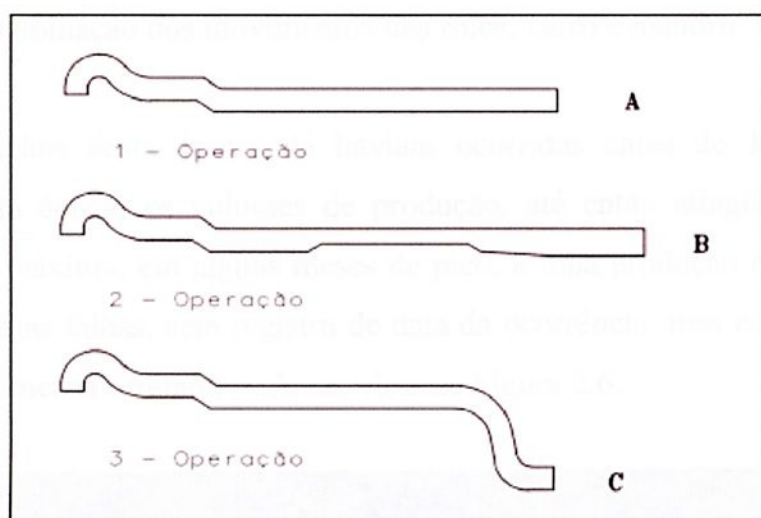


Figura 2.4 – Aro “Leifeld”. (a) - Aro com Gutter pronto; (b) - Aro estirado; (c) - Aro com aba pronta.

Uma combinação dos movimentos de avanço e retorno dos rolos, juntamente com o movimento de avanço e retorno do carro e mais giro do mandril com a peça presa, geram a deformação plástica na peça, como foi citado anteriormente, e pode ser visto na Figura 2.5.

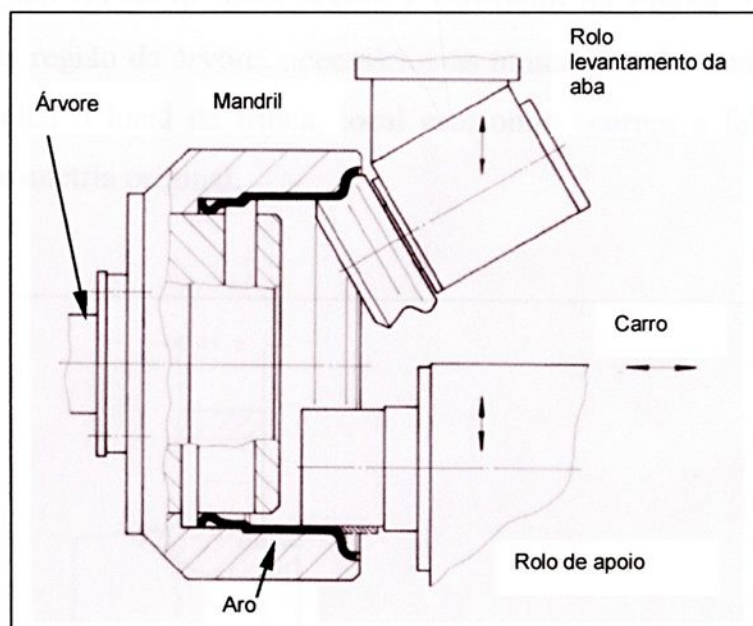


Figura 2.5 - Combinação dos movimentos dos rolos, carro e mandril

Muitas falhas desta árvore, já haviam ocorridas antes de 1985, na terceira operação. Nesta época, os volumes de produção, até então atingidos eram baixos, chegava-se no máximo, em alguns meses de pico, a uma produção mensal de 14.000 peças. Uma destas falhas, sem registro de data da ocorrência, mas certamente de uma árvore com geometria original, pode ser vista na Figura 2.6.

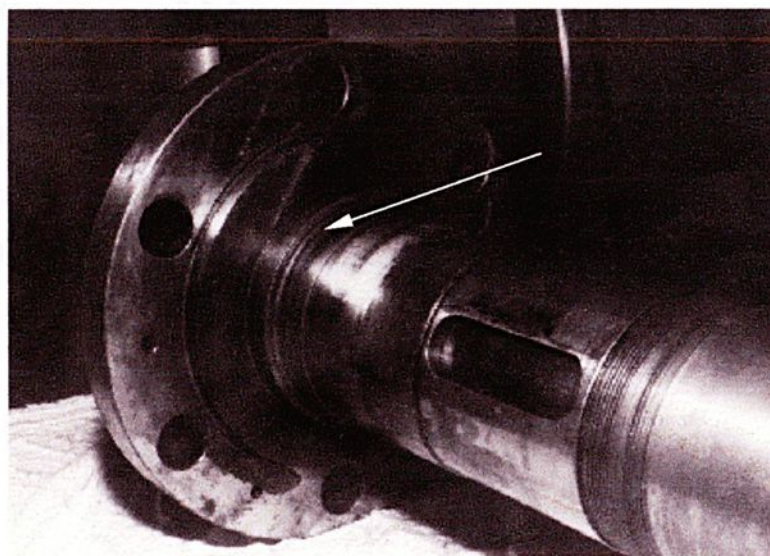


Figura 2.6 – Árvore original com a presença da trinca

Um desenho do perfil desta árvore é mostrado na Figura 2.7, com os vários diâmetros nesta região da árvore, necessários às montagens dos seus componentes. A Figura 2.8, indica o local da trinca, local este onde ocorreu a falha, para todas as árvores com geometria original.

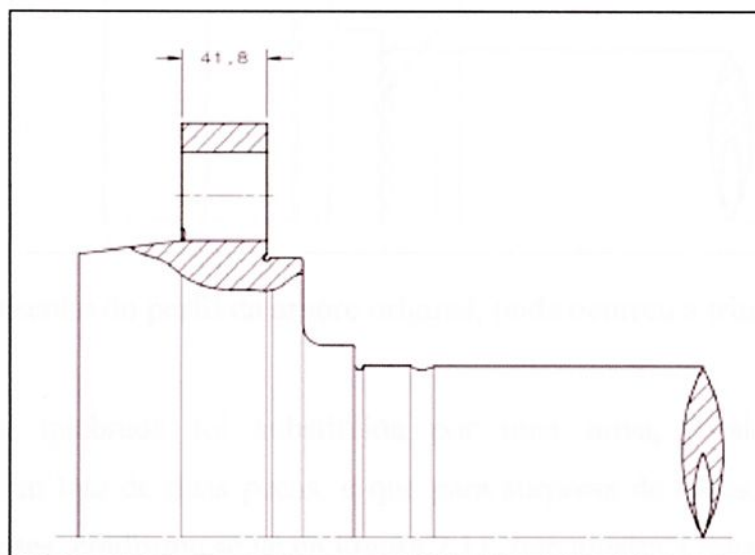


Figura 2.7 - Desenho do perfil da árvore original

Em 1985, teve-se a quebra por fadiga de mais uma árvore, que infelizmente não se tem o registro do tempo de vida, e que pode ser vista na Figura 2.9. Análise laboratorial desta árvore foi feita, e constatou-se que o seu material era o aço ABNT 4340 forjado, com dureza de 229/255 HB (21/25HRC), e que a dureza especificada em seu dimensionamento era de 255/302 HB (25/32HRC), estando portanto o material dentro da especificação. Esta árvore já contemplava uma modificação na sua geometria, que pode ser vista na Figura 2.10, comparada com a Figura 2.7.

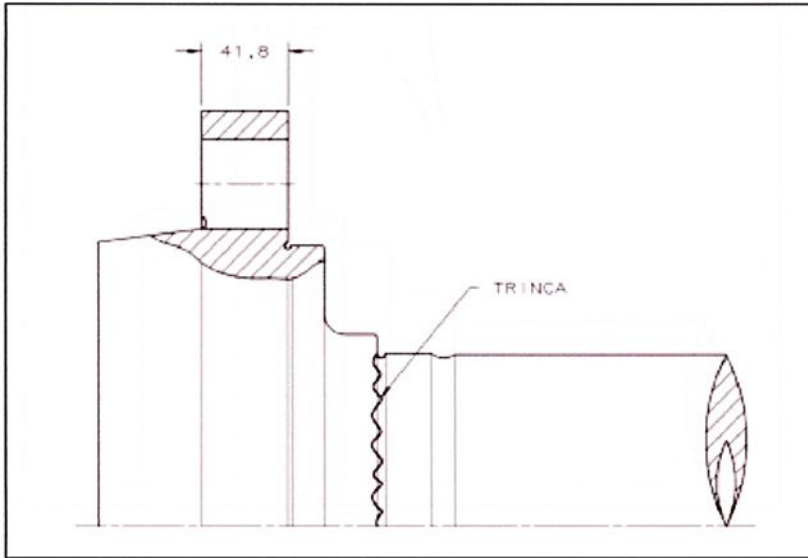


Figura 2.8 - Desenho do perfil da árvore original, onde ocorreu a trinca

A árvore quebrada foi substituída por uma nova, existente no estoque, pertencente a um lote de duas peças, e que para surpresa de todos, a mesma só teve vida de três meses, conforme se vê na Figura 2.11, que mostra a fotografia desta árvore quebrada. Análise laboratorial foi feita e constatou que o material era o aço ABNT 5120, com dureza 149/156 HB (80/82HRb), quando o especificado era o aço ABNT 4340 forjado com a dureza variando de 255/302 HB (25/32HRC). A conclusão da análise do laboratório foi “fratura devido a baixa resistência do material”.

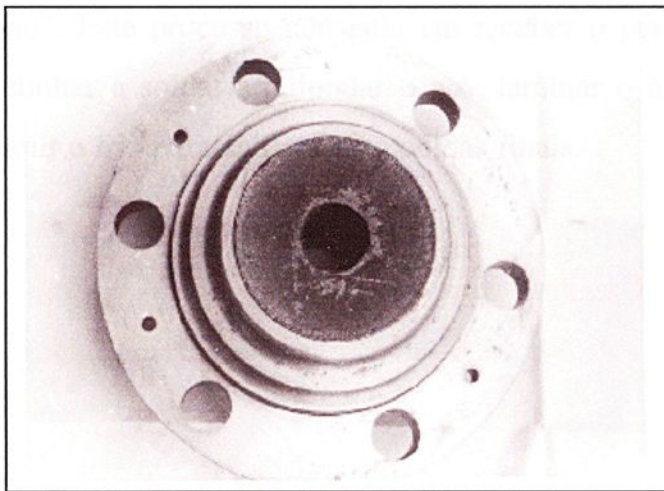


Figura 2.9 - Fotografia de uma árvore quebrada

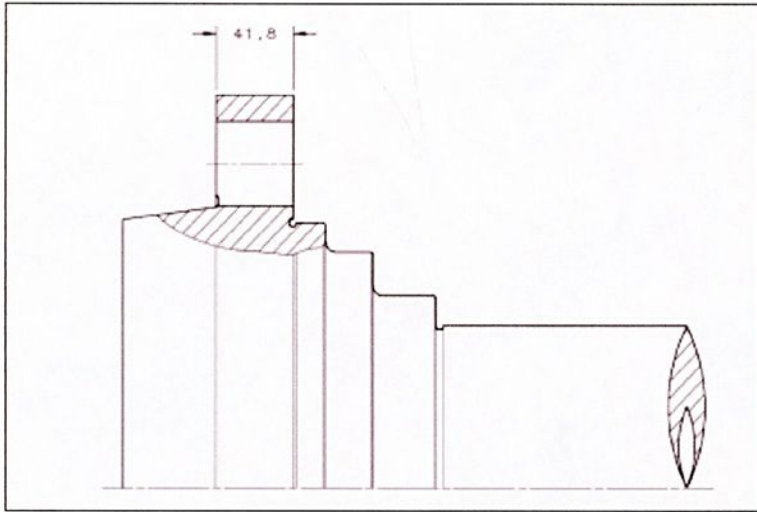


Figura 2.10 - Desenho do perfil da árvore modificada

A outra árvore foi retirada no estoque e montada em uma outra das três máquinas, onde o esforço é menor, e é realizada a primeira ou segunda operação. Não se tem registro da falha desta árvore.

Ainda no ano de 1985, a “Engesa S.A.” que havia comprado o poder acionário da FNV - Veículos e Equipamentos S.A. (desde dezembro/1983), recebeu e instalou uma repuxadeira hidráulica, marca BOKÖ, também de procedência alemã, nesta linha seriada de aros de pneus com câmara para caminhões leves e pesados.

A Engesa S.A.- Cruzeiro até então, tinha uma outra linha seriada que usava como matéria prima um perfil laminado a quente de aço, que operava segundo um processo “Firestone”. Este processo consistia em receber o perfil, enrolar, soldar de topo, rebarbar e cunhar a solda, arredondar o aro, laminar o aro para obter o perfil desejado e comprimir a frio para calibrar as medidas finais.

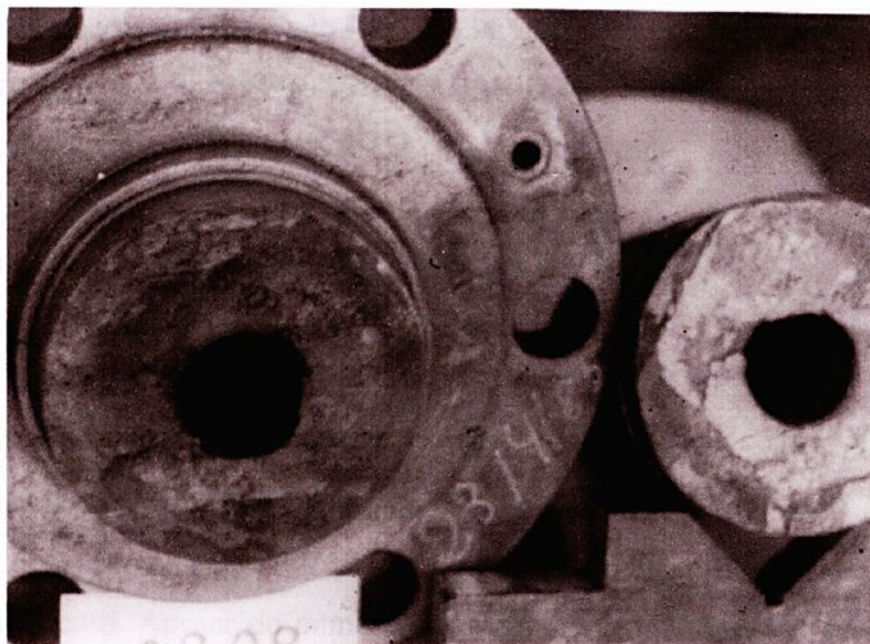


Figura 2.11 - Fotografia da árvore quebrada com três meses - 23/04/1985

O processo estava se tornando obsoleto porque o mercado exigia maiores capacidades de carga para os aros e rodas, o que não se obtinha com o aro partindo do perfil laminado a quente, sem aumentar as áreas resistentes e conseqüente aumento de peso. O aro, partindo do perfil laminado tinha seus dias contados; pois, o perfil repuxado apresentava uma performance de carga muito maior que o perfil laminado a quente.

Foi justamente este fato que levou a “Engesa S.A.”, a investir nesta linha de aro repuxado, fazendo alguns rearranjos, comprando algumas máquinas novas como a já citada e outras, para com estas ações chegar ao nível de 120 peças/h à 100% de rendimento operacional.

Nestes rearranjos, houve uma participação muito grande da Engenharia da “Engesa S.A.”, no redimensionamento de peças e componentes de máquinas desta linha que eram críticas quanto a alta freqüência de falhas. Esta árvore foi uma destas peças escolhidas.

Após análises e estudos dos esforços e históricos de quebras, a “Engesa S.A.”, sugeriu as seguintes alterações de projeto:

- Material: foi mantido o aço ABNT 4340 forjado.
- Dureza: passou de 255/302 HB (25/32HRC) para 28/32HRC.
- Nitretação: com profundidade de 0,2/0,3mm com dureza superficial de 650 HV 0,2kg.
- Não houve mudança dimensional na árvore, mantida conforme Figura 2.10 (última modificação).

Com as alterações feitas e o aumento da produção à partir dos anos de 1986/1987, as árvores passaram a ter uma vida média de $\pm 1.000.000$ aros, o que correspondia de dois a três anos de produção, numa produção horária de 120 aros, à 100% de rendimento. Apesar do aumento na vida em fadiga das árvores da segunda geração, ainda estava muito aquém das expectativas. Elas continuavam quebrando na região crítica conforme Figura 2.12, onde se vê o desenho do perfil da árvore com a indicação da posição da trinca, o que pode ser confirmado na Figura 2.13, que mostra a fotografia de uma árvore que quebrou em 1990.

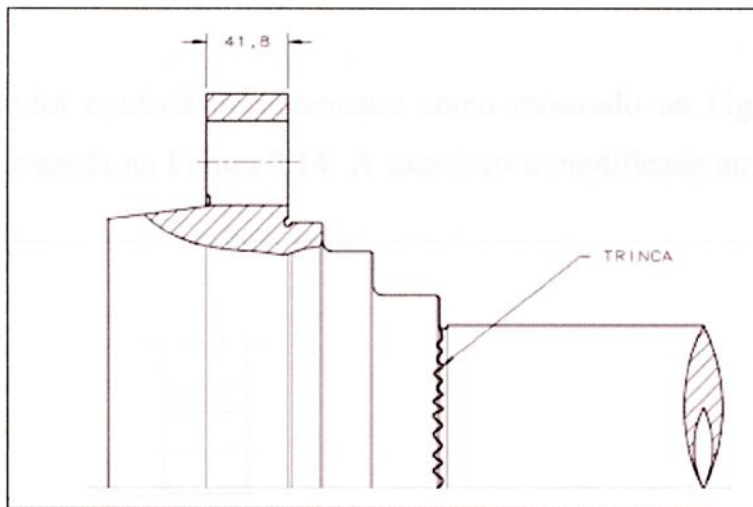


Figura 2.12 - Desenho do perfil da árvore mostrando a trinca

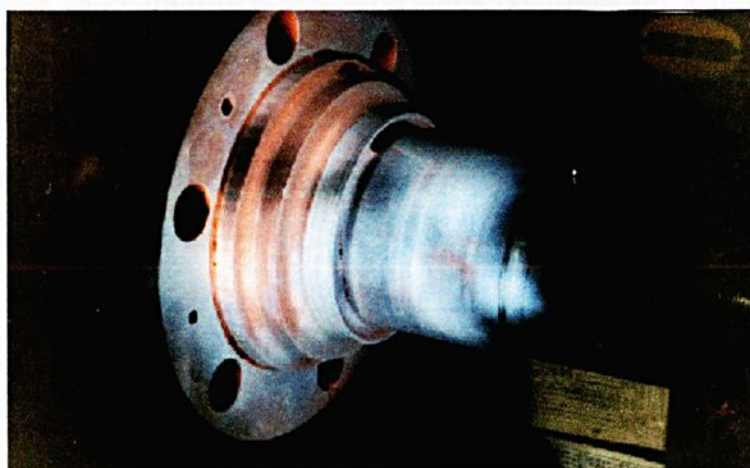


Figura 2.13 - Fotografia de uma árvore da segunda geração que quebrou em 1990

Nesta substituição da árvore quebrada em 1990, já se tinha nova alteração no projeto da árvore como segue:

Material: mantido o aço ABNT 4340 forjado.

Dureza: mantida 28/32HRc.

Nitretação: mantida a profundidade de 0,2/0,3mm com dureza superficial de 650 HV 0,2 kg.

Geometria: foi mudada drasticamente como mostrado na Figura 2.10, para a situação atual mostrada na Figura 2.14. A esta árvore modificada atribui-se a terceira geração.

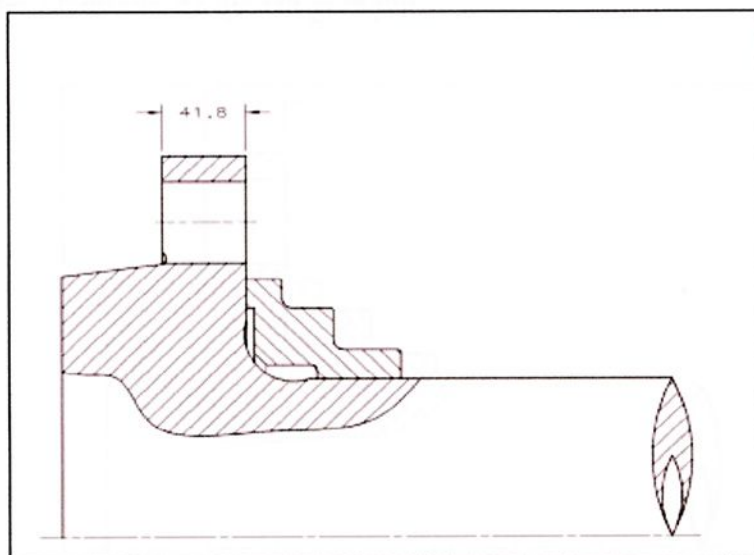


Figura 2.14 - Desenho do perfil da árvore modificada da terceira geração

Apesar de todas estas modificações as árvores continuaram a falhar por fadiga. Um fato curioso ocorreu, pois as falhas desta terceira geração de árvores, mudou de posição, como pode ser visto, comparando as Figuras 2.8 e 2.12, falhas da primeira e segunda geração da árvore respectivamente, e a Figura 2.15, onde está indicado no perfil da árvore a nova posição da trinca.

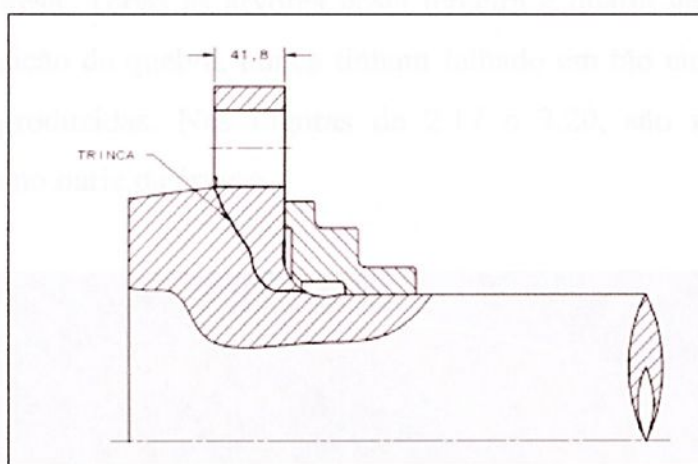


Figura 2.15 - Desenho do perfil da árvore da terceira geração com nova posição da trinca no nariz da árvore

Ainda uma outra tentativa no sentido de evitar a falha desta árvore foi feita, mantendo-se o material, a dureza e a nitretação, alterando nelas a medida de 41,8mm da espessura do flange do nariz da árvore para 47,0mm, como pode ser visto na Figura 2.16, que pode ser chamada de quarta geração.

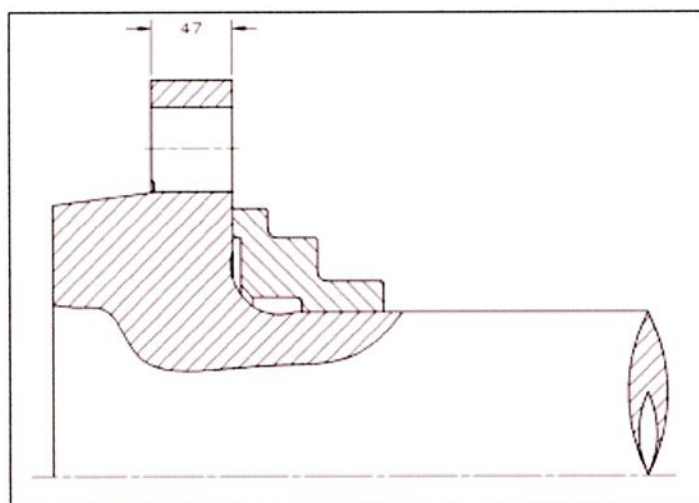


Figura 2.16 - Desenho do perfil da árvore da quarta geração

Da terceira geração e quarta geração de árvore, consumiu-se três árvores, sendo que a penúltima fratura ocorreu em fevereiro/2000, e a última em julho/2000, período este em que foram produzidos 70.000 aros. Os volumes de aros e rodas para pneus com câmara tem caído drasticamente nos últimos anos, cerca de 12.000 peças/mês.

Esta terceira árvore fraturada no mês de julho/2000 pertencia à quarta geração, e a sua falha foi surpresa. Todas as árvores desta terceira e quarta geração, apesar de terem mudado a posição da quebra, nunca tinham falhado em tão curto tempo e com tão poucas peças produzidas. Nas Figuras de 2.17 a 2.20, são mostradas várias fotografias da trinca no nariz da árvore.



Figura 2.17 - Vista frontal do nariz da árvore trincada



Figura 2.18 - Vista posterior do nariz da árvore trincada

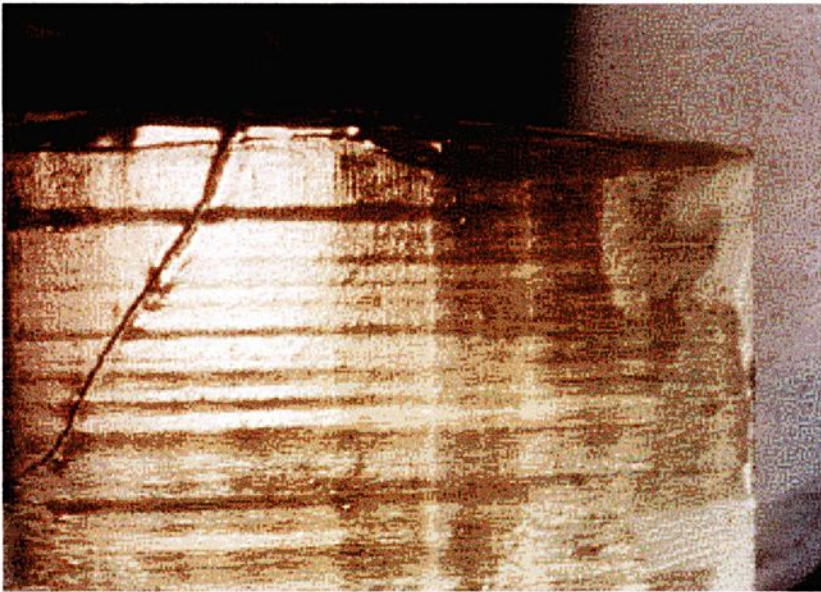


Figura 2.19 - Fotografia da trinca vazada

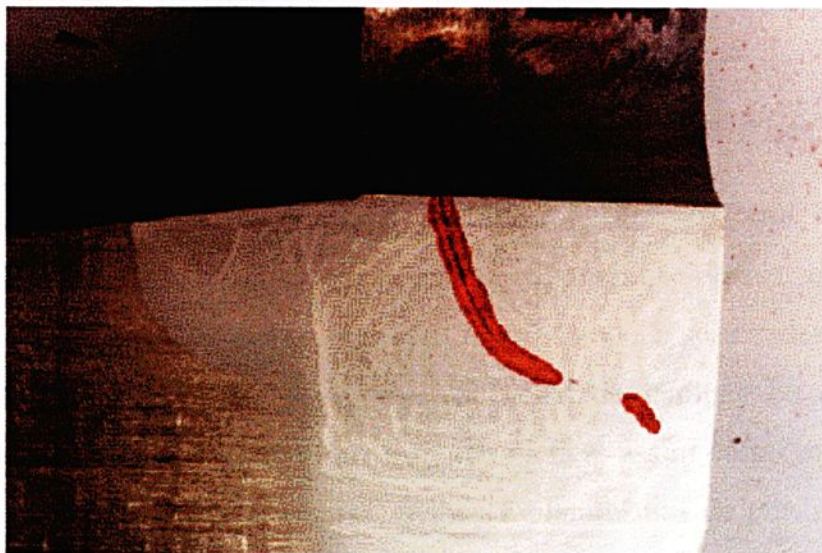


Figura 2.20 - Fotografia da trinca não vazada

A diminuição na vida desta última árvore fraturada, pertencente à quarta geração, gerou a necessidade de um novo e mais detalhado estudo, a fim de encontrar a verdadeira causa das fraturas, e em especial desta última, para se corrigir o projeto, visando aumentar a vida em fadiga ou mesmo eliminando a falha em definitivo.

O presente estudo, mais detalhado, tem o objetivo de avaliar, individual e de forma combinada, o efeito das variáveis: nitretação e concentradores de tensão, na resistência à fadiga por flexão rotativa, bem como, uma avaliação também num provável aumento da vida em fadiga através do processo “shot peening”, do aço ABNT 4340 forjado, com 30HRc de dureza, tendo como material base, o mesmo retirado da própria árvore fraturada em julho/2000.

Após este estudo, propor uma possível alteração de processo e projeto, a fim de aumentar a vida em fadiga ou eliminar definitivamente a fratura da árvore.

2.3 FADIGA DOS MATERIAIS

2.3.1 Conceito de fadiga

Uma grande parte dos materiais metálicos utilizados em aplicações de Engenharia são submetidas a cargas cíclicas. Exemplos desses elementos são numerosos, pode-se citar as bielas que são alternadamente solicitadas por tração e compressão pelos êmbolos das máquinas, as molas de lâminas ou as árvores de transmissão de potência são submetidos à flexão cíclica, assim como muitas peças de máquinas, peças de automóveis, pontes, aviões e plataformas de perfuração no mar. Em todos estes casos, o material é susceptível de fraturar por fadiga, que é a causa mais freqüente das rupturas em Engenharia. Na verdade, a fadiga costumeira é um critério de projeto, para garantir a segurança da estrutura e confiabilidade dos maquinários ou componentes estruturais.

Toda ruptura por fadiga inicia-se pela formação de uma pequena trinca, quase sempre num ponto da superfície externa e se propaga lentamente para o interior do material, mais ou menos perpendicular ao eixo principal de tração, sob forma de uma fenda estreita e aguçada, em direção a secção ainda não afetada, até o momento em que torna-se tão pequena que já não consegue mais suportar a carga aplicada. A fadiga caracteriza-se pelo rompimento da peça ou do componente numa tensão inferior àquela necessária para que haja a fratura do material devido à aplicação de uma carga estática. É sem dúvida um problema que afeta qualquer peça ou componente de máquina, quando submetido à uma solicitação cíclica ou dinâmica (PETERSON, 1966).

Experimentalmente é verificado que a frente da trinca de fadiga avança uma pequena distância em cada ciclo de tensão, e cada fase deste avanço fica registrada na superfície de fratura por pequena ondulação ou estria de fadiga. Estas estrias formam uma série de arcos, aproximadamente circulares e centrados na origem de fratura, que assinalam as sucessivas posições da frente da trinca.

Em condições ideais, essas estrias não são visíveis senão por métodos metalográficos especiais, pois são muito finas e regularmente distanciadas; no entanto,



na prática há flutuações na amplitude do ciclo de tensão, que geralmente provoca o aparecimento de um certo número de estrias mais longas e mais proeminentes do que as restantes, as quais podem ser facilmente observadas a olho nu na superfície de fratura que são chamadas “marcas de praia”.

A ruptura por fadiga torna-se portanto, facilmente reconhecível, uma vez que a superfície de fratura compreende duas partes distintas, uma associada à fratura em fadiga, com uma série de estrias concêntricas, e a outra resultante da ruptura simples de tração, ruptura dúctil ou ruptura frágil.

Também se associa fadiga ao dano acumulado no material quando é solicitado por tensões cíclicas. Este dano pode, eventualmente, conduzir à nucleação de uma trinca, que se propaga à medida que os ciclos de tensão são aplicados. Quando atinge um tamanho crítico, função da tenacidade do material, a trinca se propaga instavelmente. Este dano, na maioria das vezes não pode ser detectado pela medida de propriedades mecânicas médias macroscópicas, como dureza e resistência à tração, nem pelo exame metalográfico das fases presentes. A alteração gradual se dá ao nível de defeitos cristalinos, em particular, na alteração do arranjo de discordâncias e um aumento de defeitos pontuais, lacunas, além do valor termodinamicamente em equilíbrio (SILVA, 1999).

O dano pode ser associado a qualquer deterioração que o material sofra diminuindo a sua resistência e/ou sua vida residual. Ele é acompanhado por alterações no estado da microestrutura do material. Toda vez que um dado nível de tensão é imposto a um material, há um correspondente decréscimo de sua vida útil. Associando o dano à vida útil do material de um componente de máquina, sujeito a uma sucessão de solicitações imposta ao seu material é acompanhada de um dano acumulado, o qual proporciona uma diminuição progressiva de sua vida. Em determinados casos, pode-se esperar um aumento da resistência à fadiga e, em outros, uma diminuição da sua vida. Embora tais fatos estejam bem conhecidos e relatados, a contagem do dano no elemento é ainda motivo de estudos e de estabelecimentos de inúmeras teorias, as quais visam esclarecer como é o acúmulo do referido dano e conseqüentemente fornecer dados para projetos de fadiga (SILVA, 1998).

Existem diversas teorias para estudo de dano acumulado em fadiga, sendo a de Palmgren-Miner a mais usada por ser de aplicação mais simples. Uma variação da teoria de Palmgren-Miner foi proposta por Grover, que divide a vida total de um material solicitado a um carregamento cíclico, em dois estágios.

O primeiro estágio se relaciona ao número de ciclos necessários para a nucleação da trinca por fadiga, enquanto que o segundo estágio se refere à propagação, mais especificamente, ao número de ciclos necessários a propagação da trinca por fadiga até a falha final.

Assim, a vida em fadiga, de um material, pode ser representada como sendo:

$$N = N_n + N_p \quad (1)$$

Sendo, N_n o número de ciclos até a iniciação ou nucleação da trinca N_p é o número de ciclos para propagação da trinca até a fratura e N a vida total útil em fadiga. A Figura 2.21 ilustra estas etapas da vida em fadiga.

Em função dos conhecimentos, adquiridos ao longo dos anos de estudo, do fenômeno fadiga, pode-se dividir a falha nos seguintes estágios:

- 1º Estágio - Microdeformação plástica sob solicitação cíclica, com formação de bandas de escorregamento;
- 2º Estágio - Nucleação de uma ou mais microtrincas;
- 3º Estágio - Propagação de uma ou mais microtrincas; e
- 4º Estágio - Propagação instável da trinca até a fratura final (PERES, 1996).

Vida Total Útil em Fadiga (N)

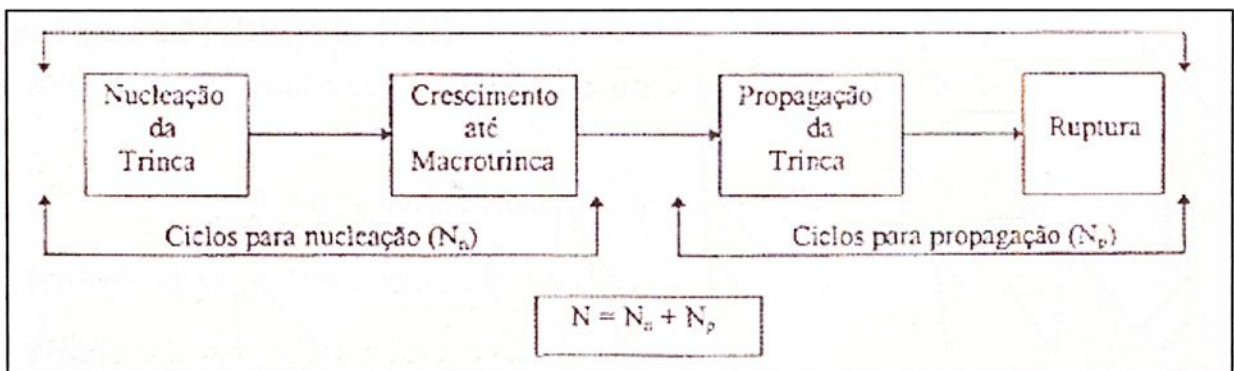


Figura 2.21 - Esquema de vida em fadiga (ANTUNES, 1997)

2.3.2 Mecanismo da fadiga

2.3.2.1 Nucleação

A presença de concentradores de tensão como riscos, amassamentos, mudanças bruscas de secção, pontos de corrosão, inclusões ou microtrincas, introduzidas durante a fabricação, uso ou manutenção, das peças e componentes das máquinas, equipamentos e dispositivos, geralmente são pontos iniciadores da trinca e normalmente estão na superfície do material ou, bem próximo à superfície.

As trincas de fadiga iniciam-se, em geral em pontos de concentração de tensões, que possam estar próximos ou presentes na superfície desde o início, ou se desenvolver durante a deformação cíclica. O deslizamento persistente e irreversível de bandas, produzido por deformação cíclica, provoca microdeformações, formando ressaltos e reentrâncias, que tendem a agrupar-se, denominadas de extrusões e intrusões (SILVA; REED-HILL, 1998, 1982).

As extrusões e intrusões, ou seja, ressaltos ou reentrâncias respectivamente, formadas sobre carregamentos cíclicos, tem alguns mecanismos propostos por pesquisadores como segue:

- As bandas de escorregamento tendem a agrupar-se em pacotes ou estrias, como indicado na Figura 2.22 (REED-HILL, 1982).

- Existência de dois sistemas de deslizamentos para produzir degraus na superfície, como ilustrado na Figura 2.23 (DIETER, 1981).

- Ocorrência de microdeformações na superfície do material submetido a carregamento de fadiga, com similaridade com carregamento estático, como mostrado na Figura 2.24 (DIETER, 1981).

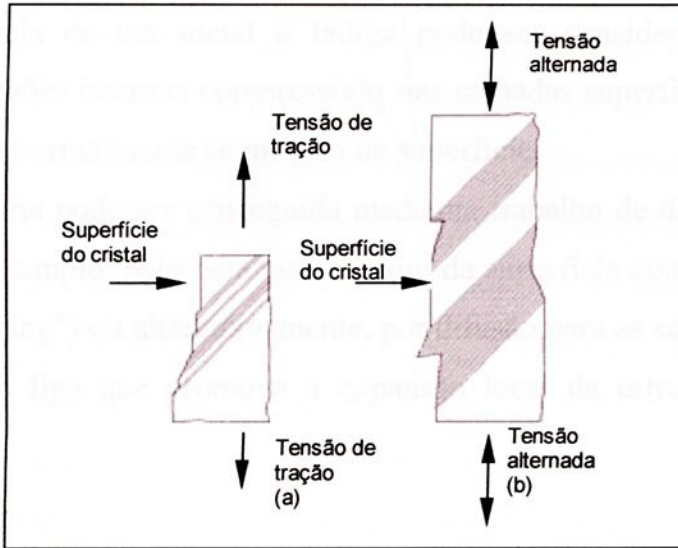


Figura 2.22 - Mecanismos de pacote ou estrias de deformação (REED-HILL, 1982)

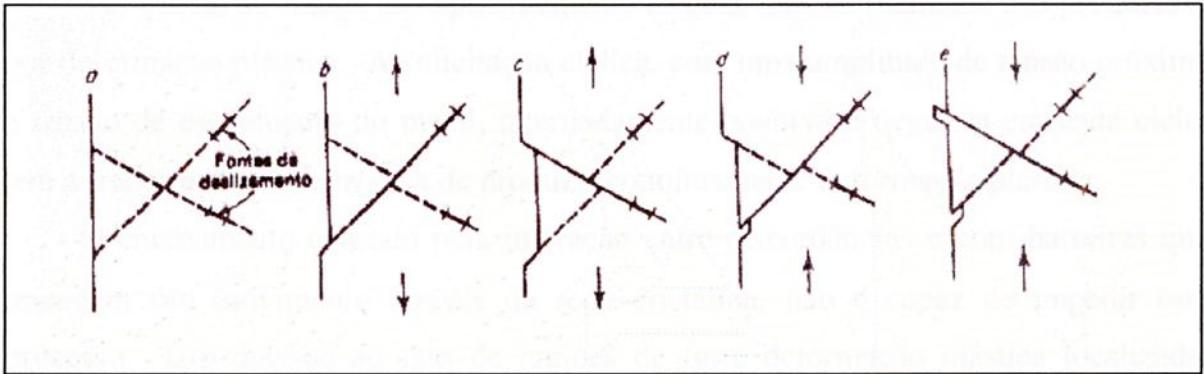


Figura 2.23 - Mecanismo de formação de microdeformações de Cottrell e Hull (DIETER, 1981)

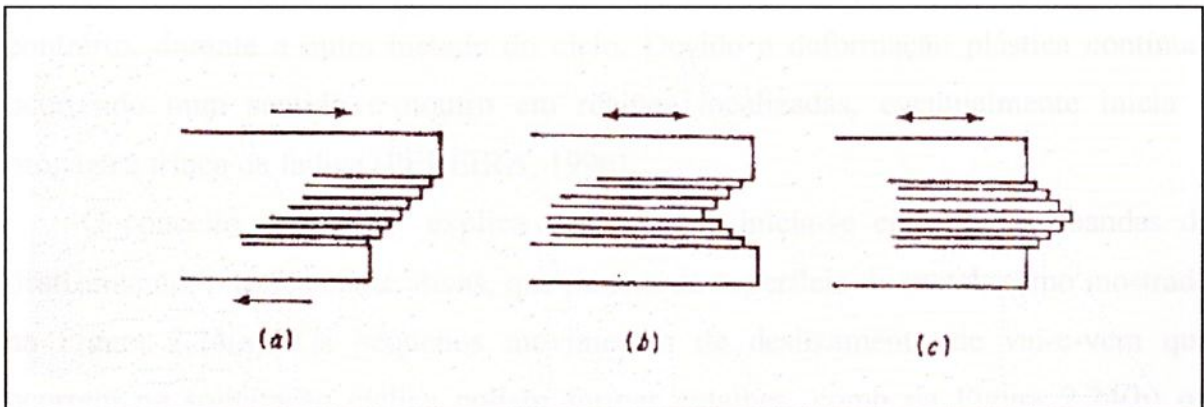


Figura 2.24 - Mecanismo de formação de microdeformações de Wood (DIETER, 1981)

- a) Deformação estática;
- b) Deformação cíclica provocando intrusão; e
- c) Deformação cíclica provocando extrusão.

A resistência de um metal à fadiga pode ser consideravelmente melhorada introduzindo tensões internas compressivas nas camadas superficiais, uma vez que as trincas de fadiga normalmente se iniciam na superfície.

Esta melhoria pode ser conseguida mediante trabalho de deformação plástica da superfície, por exemplo, pelo bombardeamento da superfície com granalhas ou esferas finas ("shot peening") ou alternativamente, por difusão para as camadas superficiais de um elemento de liga que promova a expansão local da estrutura (cementação ou nitretação).

2.3.2.2 Propagação da trinca

As trincas de fadiga são aparentemente frágeis, mas na realidade são produzidas por deformação plástica. A solicitação cíclica, com uma amplitude de tensão próxima a tensão de escoamento do metal, alternadamente positiva e negativa em cada ciclo, tem a importante característica de produzir continuamente deformação plástica.

O encruamento causado pela interação entre discordâncias e com barreiras que impedem seu movimento através da rede cristalina, não é capaz de impedir este processo. Isto deve-se ao fato de regiões de forte deformação plástica localizada, como no caso de grãos favoravelmente orientados, que se deformam plasticamente numa das metades do ciclo de tensão, serem depois solicitadas pelas regiões vizinhas elasticamente deformadas, pelo que também se deformam plasticamente, no sentido contrário, durante a outra metade do ciclo. Devido a deformação plástica contínua, ocorrendo num sentido e noutro em regiões localizadas, eventualmente inicia e propaga a trinca de fadiga (PEREIRA, 1996).

O conceito de Wood explica que a trinca inicia-se em espessas bandas de deslizamento, plasticamente ativas, que partem da superfície do metal, como mostrado na Figura 2.24(a). Os pequenos movimentos de deslizamento de vai-e-vem que ocorrem na solicitação cíclica podem formar entalhes, como na Figura 2.24(b) ou ressaltos, Figura 2.24(c), na superfície. O entalhe seria uma concentração de tensões de dimensões atômicas, o qual poderia perfeitamente dar origem ao início da trinca de fadiga. Os entalhes produzidos impulsionam gradualmente o metal, nessas bandas,



para dentro da superfície, formando as “intrusões”; ao passo que, os ressaltos impulsionam gradualmente o metal para fora, formando as “extrusões” de uma trinca de fadiga e está de acordo com as constatações de que as trincas de fadiga começam nas superfícies e, freqüentemente, em intrusões e extrusões (DIETER, 1981).

Com o aumento do número de ciclos, as extrusões e intrusões, adquirem a forma de uma trinca. As trincas de fadiga, uma vez formadas, tendem a se propagar inicialmente ao longo dos planos de deslizamentos, que se denomina de Estágio I, em condições de deformação plana seu crescimento é da ordem angströms por ciclos. Sua propagação ou crescimento se dá à 45° em relação à direção da solicitação, Figura 2.25, devido a elevados valores de tensão de cisalhamento (PEREIRA, 1996).

Em seguida, as trincas tomam a direção perpendicular à tensão de tração, denominado Estágio II, e sob condições de tensão plana, admitem crescimento da ordem de micrometros por ciclo. A propagação da trinca por fadiga é, normalmente, transgranular, como mostrado na Figura 2.25 (DIETER; ANTUNES, 1981, 1997).

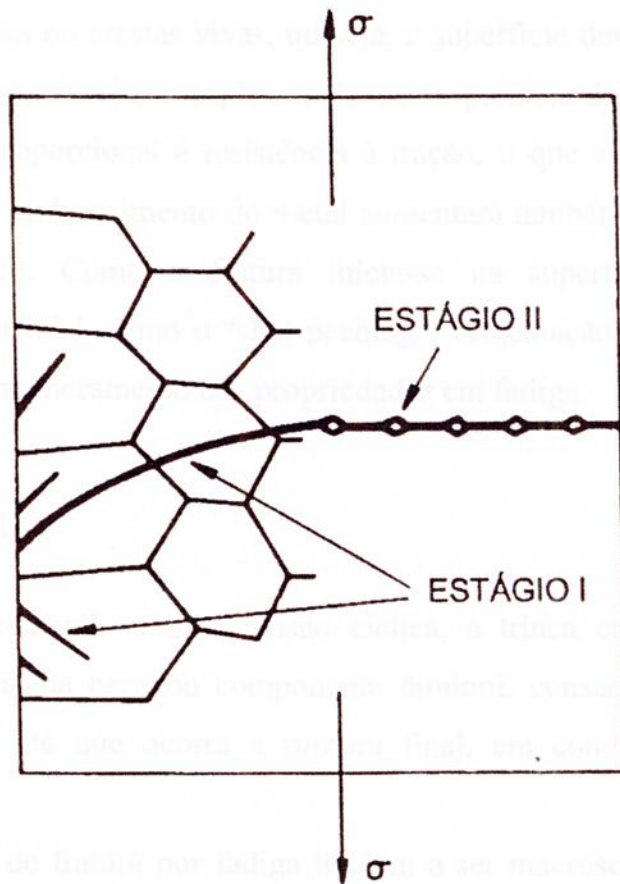


Figura 2.25 - Estágios de crescimento da trinca (MEYERS; KLESNIL, 1982, 1992)

Após as trincas terem atravessado alguns grãos, o que pode demorar alguns milhares ou milhões de ciclos, dependendo da amplitude da tensão, verifica-se uma alteração na direção de penetração, e as trincas passam a crescer perpendicularmente ao eixo principal da tração. O avanço é agora muito mais rápido e origina as características estrias de fadiga.

Em cada meio ciclo de tensão aplicado correspondente à tração, as faces da trinca são afastadas uma da outra por rasgamento plástico do material na raiz da trinca. Durante o meio ciclo compressivo, as faces são novamente apertadas, uma contra a outra, acontecendo o mesmo na região rasgada plasticamente. O processo repete-se do mesmo modo no ciclo seguinte a tensão, com a diferença de que agora a trinca é ligeiramente mais longa que anteriormente, porque a região rasgada plasticamente passou a fazer parte da superfície da trinca.

Como forma de melhorar a resistência a fadiga, deve-se dificultar a deformação plástica, e para isto resultam várias medidas práticas. Uma delas consiste em ter a superfície do material um bom acabamento superficial e isenta de concentradores de tensão, como entalhes ou arestas vivas, ou seja, a superfície deve ter um perfil suave. A resistência à fadiga, ou seja, a amplitude da tensão para um dado número de ciclos, é aproximadamente proporcional à resistência à tração, o que significa que, em geral, qualquer método de endurecimento do metal aumentará também a resistência à fadiga (COTTRELL, 1975). Como a fratura inicia-se na superfície, os métodos de endurecimento superficial, como o “shot peening”, cementação e nitretação dos aços, são importantes no melhoramento das propriedades em fadiga.

2.3.2.3 Ruptura final

Uma vez continuando com a tensão cíclica, a trinca cresce, como a secção resistente do material da peça ou componente diminui, conseqüentemente, a tensão aumenta na secção até que ocorra a ruptura final, em condições de crescimento instável da trinca.

As superfícies de fratura por fadiga tendem a ser macroscopicamente planas e apresentam duas aparências distintas. A superfície polida é devida ao atrito entre as



superfícies da trinca conforme a peça ou componente é deformado devido as solicitações alternadas ou flutuantes. Na região de ruptura instável a superfície apresenta uma aparência grosseira e irregular, pois já não existe o atrito. A Figura 2.26, mostra as fases de nucleação, crescimento e fratura da trinca.



Figura 2.26 - Representação esquemática da superfície que falha por fadiga (SILVA, 1998)

2.3.3 Carregamento cíclico

As cargas variáveis, que são típicas de cargas experimentadas por todos os tipos de máquinas, equipamentos e dispositivos, tem vindo a ser chamada de carga de fadiga e a tensão respectiva de: tensão variável ou tensão de fadiga. O processo de carga variável é chamado de espectro, que pode ser irregular, caótico, randômico ou ele pode mostrar certa regularidade. Nós, então denominamos de processo estacionário e não-estacionário. A idêntica repetição de regularidade de um espectro, em escolhido intervalo de tempo, chama-se período, e é a característica de uma carga variável periodicamente, chamada carga cíclica. Um ciclo, conseqüentemente, compreende um ciclo total de variação da carga e um correspondente ciclo total de variação da tensão.

Um caso especial de variação de carga é a carga senoidal. Esta tem sido tomada como a base para determinação das propriedades à fadiga das peças e componentes de máquinas, equipamentos e dispositivos (KOCANDA, 1978).

O ciclo senoidal de tensão mostrado na Figura 2.27, é descrito por uma tensão máxima do ciclo, $\sigma_{\text{máx.}}$; por tensão mínima do ciclo, $\sigma_{\text{mín.}}$; por um período de variação, T , ou seu inverso, a frequência de repetição do ciclo. Esses e outros conceitos

fundamentais usados nos ensaios de fadiga de metais, são cobertos por inúmeras normas (KOCANDA; PEREIRA, 1978, 1996).

Os dois tipos de carregamentos cíclicos são: o de amplitude constante e o de amplitude variável ou aleatório. No primeiro tipo, a variação de tensão, $\Delta\sigma$, deve permanecer constante, ou seja, a faixa de tensão não varia, ver Figura 2.27 e 2.28.

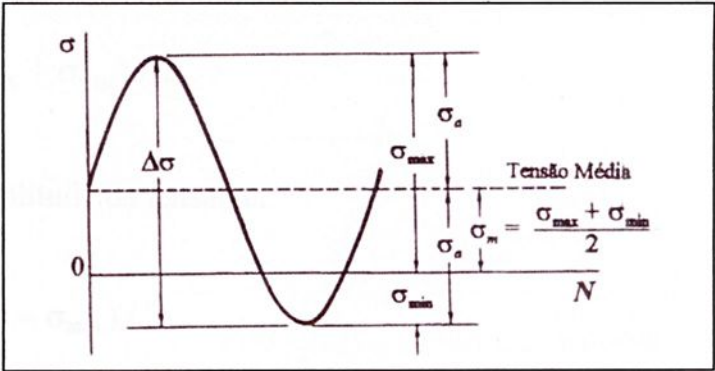


Figura 2.27 - Um ciclo senoidal de um carregamento cíclico de amplitude constante (PEREIRA, 1996)



Figura 2.28 - Carregamentos cíclicos variáveis de amplitude constante e variáveis de amplitude variável (PEREIRA, 1996)

- A variação da tensão é dada por:

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

- A tensão média é igual a :

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

- A amplitude da tensão é:

$$\sigma_a = (\sigma_{\text{máx.}} - \sigma_{\text{mín.}}) / 2 \quad (4)$$

- A razão de tensões de carregamentos é definida por:

$$R = \sigma_{\text{mín.}} / \sigma_{\text{máx.}} \quad (5)$$

Outros tipos de carregamentos cíclicos de amplitudes constantes e razão de cargas diferentes, são mostrados na Figura 2.28.

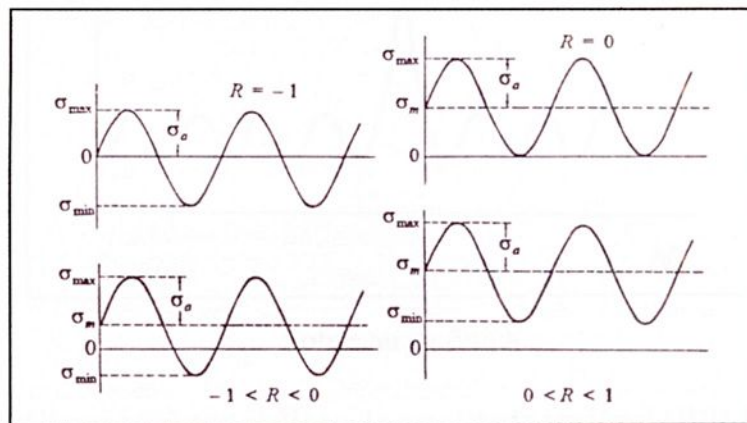
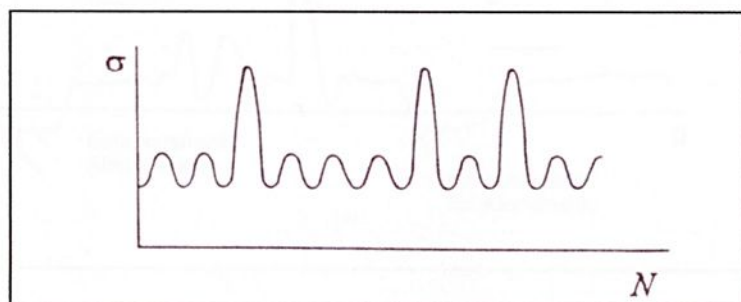
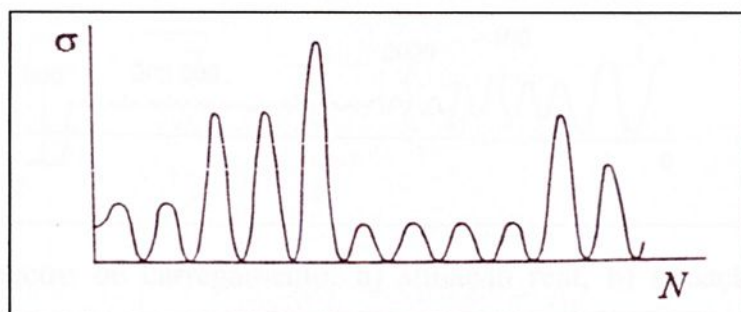


Figura 2.28 - Carregamentos cíclicos senoidais de amplitude constante e razão de tensões (R) diferentes (PEREIRA, 1996)

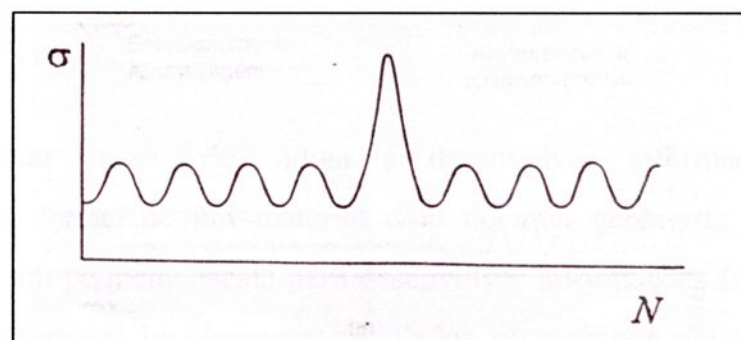
Para muitas peças e componentes de máquinas, equipamentos e dispositivos, os carregamentos cíclicos não são de amplitude constante, mas de amplitude variável, conforme Figura 2.29. Exemplos de cargas cíclicas com amplitudes variáveis pode ser encontrado em máquinas de formar, de repuxar, de estirar, e também em estruturas de navios, plataformas, pontes rolantes etc.



Sobrecargas múltiplas e constantes



Sobrecargas múltiplas variáveis



Sobrecarga única

Figura 2.29 - Carregamentos cíclicos de amplitude variável (WILLEMS, 1981)

Em alguns casos práticos, o ciclo de carregamento é aleatório como, por exemplo, o esforço no engate do primeiro vagão ferroviário de um comboio composto de duas ou três locomotivas e dezenas de vagões de minério; e em determinados componentes de um avião durante um ciclo de aterrissagem, estacionamento,

decolagem, voo, ventos, tempestades etc. Para se estudar casos como estes, os carregamentos reais devem ser simplificados em vários blocos de carregamentos cíclicos de amplitudes constantes, conforme Figura 2.30 (WILLEMS, 1981).

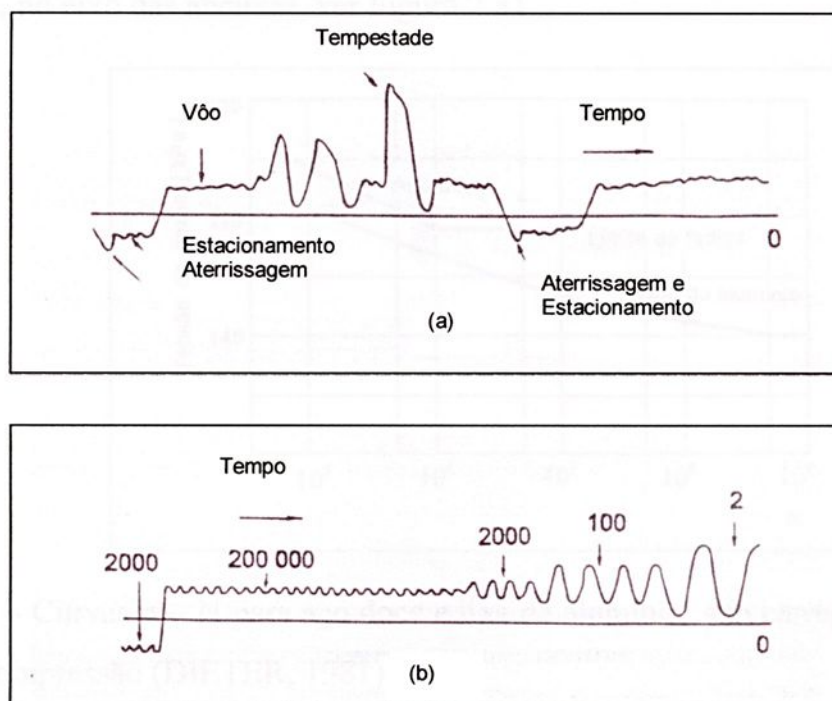


Figura 2.30 - Espectro de carregamento: a) situação real, b) situação simplificada (WILLEMS, 1981)

2.3.4 CURVAS $\sigma - N$

O objetivo do ensaio de fadiga é desenvolver informações sobre o comportamento em fadiga de um material e/ou de uma geometria específica. Os ensaios podem ser em pequena escala para desenvolver informações fundamentais do comportamento do material, ou elementos simulados, ou reais que são componentes de máquinas ou de estruturas. Exemplos deste último tipo de ensaio são feitos nas rodas e chassis para caminhões (WILLEMS, 1981).

A maneira mais rápida para a apresentação dos resultados dos ensaios de fadiga, onde corpos de prova idênticos são fabricados e testados em várias amplitudes de tensão (normalmente à amplitude constante), é sem dúvida, através da curva $\sigma - N$ ou curva de Wöhler (PEREIRA, 1996).

Nesta curva normalmente é lançada a tensão, $\sigma_{\text{máx.}}$, nominal, sem considerar o concentrador de tensões, no eixo das ordenadas contra o número de ciclos necessário à fratura, N , também denominado vida de fadiga, que normalmente emprega uma escala logarítmica, no eixo das abscissas, ver Figura 2.31.

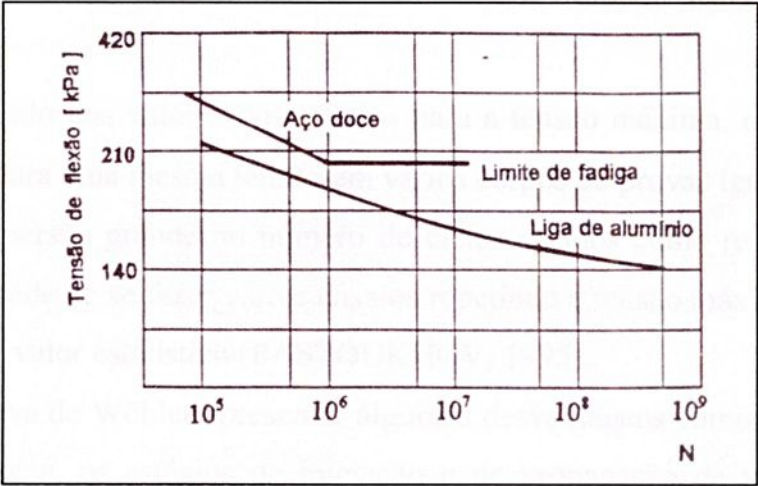


Figura 2.31 - Curvas $\sigma - N$ para aço doce e liga de alumínio, sob carregamento cíclico de tração-compressão (DIETER, 1981)

O limite de fadiga de um material é definido como sendo aquela tensão na qual o material teria vida infinita. Na prática é considerado vida infinita para os materiais ferrosos, como sendo $N = 10^7$ ciclos, conforme indicado na Figura 2.32.

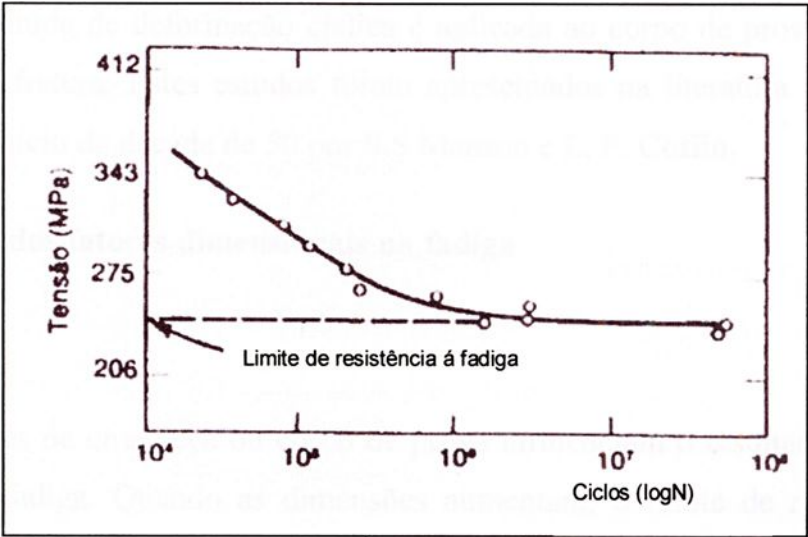


Figura 2.32 - Forma típica da curva $\sigma - N$ (MEYERS, 1982)

O procedimento utilizado na construção de curvas $\sigma - N$ é ensaiar o corpo de prova com um valor alto de tensão máxima, $\sigma_{\text{máx.}}$, onde se espera que a fratura do corpo de prova ocorrerá para um número baixo de ciclos N . Em seguida, diminui-se progressivamente o valor da tensão até que não ocorra mais a fratura do corpo de prova, onde, teoricamente para valores abaixo desta tensão, o material teria vida infinita.

No levantamento dos valores dos ensaios para a tensão máxima, $\sigma_{\text{máx.}}$, e para o número de ciclos, para uma mesma tensão em vários corpos de provas iguais, constata-se que há uma dispersão grande no número de ciclos obtidos como resultados. Este fato gera a necessidade de se fazer vários ensaios repetindo a tensão máxima, a fim de se obter um melhor valor estatístico (PASTOUKHOV, 1995).

Apesar da curva de Wöhler apresentar algumas desvantagens como: não permitir distinguir com clareza, os estágios de iniciação e de propagação de trincas; tornar difícil a previsão da falha em fadiga; e apresentar elevado espalhamento ou dispersão, ela representada na forma $\sigma = f(\log N)$ é a mais usada para os fins da engenharia (VOORWALD, 1983, 1987).

A curva de Wöhler, que representa a resistência à fadiga em função do número de ciclos até a fratura do corpo de prova, não é a única forma de representar o fenômeno fadiga. Pode-se representar a fadiga também pela curva amplitude de deformação em função do número de ciclos até a fratura do corpo de prova. Neste ensaio uma amplitude de deformação cíclica é aplicada ao corpo de prova, que pode ou não levá-lo à fratura. Estes estudos foram apresentados na literatura técnica pela primeira vez no início da década de 50 por S.S Manson e L. F. Coffin.

2.3.5 Influência dos fatores dimensionais na fadiga

2.3.5.1 Dimensão

As dimensões de uma peça ou corpo de prova influenciam o resultado do limite de resistência à fadiga. Quando as dimensões aumentam, o limite de resistência à fadiga diminui, este fato é devido ao aumento de imperfeições na microestrutura (BRANCO, 1986).



2.3.5.2 Concentradores de tensão

Praticamente, é impossível que peças e componentes mecânicos de máquinas, equipamentos e dispositivos não contenham algum tipo de irregularidades em sua geometria, tais como orifícios, furos, ranhuras e roscas, além de defeitos, imperfeições etc. Então, estas descontinuidades nas peças e componentes concentram o fluxo de tensão e causam perturbações localizadas na distribuição das tensões, resultando em um aumento da tensão média na vizinhança da descontinuidade. Esses pontos são chamados de pontos de concentração de tensões (PEREIRA, 1996).

O efeito de um concentrador de tensão é avaliado através de teste em corpos de prova com entalhes. Em alguns casos, cria-se um concentrador bem próximo ao da peça que falha por fadiga, a fim de se chegar a resultados mais próximos do verdadeiro. O efeito da profundidade do rasgo causa o aumento da taxa de crescimento da trinca, reduzindo ainda mais a vida em fadiga (SILVA, 1998).

Para materiais dúcteis, a influência dos concentradores de tensões é menos significativa, pois eles possuem uma boa capacidade de se deformarem plasticamente, o que permite uma redistribuição e conseqüente alívio de tensões nos locais dos concentradores. O mesmo não ocorre com materiais frágeis, pois estes não se deformam plasticamente, sendo então fortemente afetada sua resistência à fadiga (SILVA, 1998).

2.3.5.2.1 Rugosidade superficial

A camada superficial é condicionada por processos de fabricação, particularmente, pelo tratamento final. Entre esses processos estão: processos de remoção de cavacos, operações abrasivas, métodos de deformação superficial, métodos eletro-físico e eletro-químico, métodos ultrasônico e a laser. Durante o processo de fabricação a camada superficial é submetida a deformação elastoplástica e aquecimento, que resulta numa mudança estrutural, encruamento e tensão residual, enquanto irregularidades podem surgir, criando uma superfície rugosa. A resistência à fadiga de peças e componentes de máquinas, equipamentos e dispositivos, podem ser

aumentada pela seleção dos métodos e condições que irão oferecer a combinação ótima de parâmetros para a integridade da superfície (ZAHAVI, 1996).

A superfície real de peças e componentes, fabricada ou formada por um processo de fabricação, não é uma superfície igual como visto nos desenhos de engenharia. A superfície real sempre contém irregularidades na forma de picos e vales. O grande número de irregularidades, relativamente espaçadas perto uma da outra, representa a rugosidade superficial. O perfil da ferramenta deixa marca na geometria da rugosidade superficial após o processo mecânico, provocando distorção através de deformações plástica e elástica, vibração e outros fatores ligados com o processo especial. Por exemplo, a ferramenta de corte, enquanto está em movimento, destrói os grãos do metal (alguns são cortados, outros são quebrados), criando inúmeras pequenas trincas ao longo do caminho da ferramenta (ZAHAVI, 1996).

2.3.6 Influência dos fatores ambientais no comportamento em fadiga

2.3.6.1 Efeito da temperatura

As peças e componentes de máquinas, equipamentos e dispositivos, sujeitos ao fenômeno da fadiga, encontram-se operando em temperaturas diferentes da ambiente. Por exemplo, componentes de aeronaves em grandes altitudes podem alcançar temperaturas de congelamento, enquanto uma turbina a gás ou a vapor irá funcionar a centenas de graus celsius (PEREIRA, 1996).

Em temperaturas baixas, da ordem de -50°C , experiências mostraram que a resistência à fadiga é praticamente igual ou, em alguns casos, melhor que a temperatura ambiente (CHIAVERINI, 1986).

Por outro lado, os testes de fadiga em altas temperaturas, aproximadamente 300°C , mostram pouco ou nenhum efeito, após o qual para os aços, por volta de 400°C , há um aumento da resistência à fadiga, atingindo um valor máximo, seguido por uma rápida queda de valores bem abaixo daqueles à $+20^{\circ}\text{C}$ (PEREIRA; BRANCO, 1996, 1986).



2.3.6.2 Meio ambiente corrosivo

A vida em fadiga pode ser severamente afetada, caso haja ataque do meio em que se encontra a peça ou componente. Os fenômenos de corrosão podem alterar as propriedades do material como reduzir seu limite de resistência à fadiga (PERES, 1996).

A corrosão é a deterioração das propriedades que os materiais e suas ligas sofrem, devido a reações químicas ou eletroquímica que se processam entre eles e o meio ambiente que os envolve (SOUZA, 1998).

Uma explicação simplificada do mecanismo da fadiga com corrosão é que a microestrutura da superfície do metal é atacada pelo agente corrosivo, causando uma fácil e mais rápida iniciação das trincas. A concentração de tensões na ponta das trincas quebra o filme de óxido, e o agente corrosivo da trinca age como uma forma de eletrodo, com a ponta da trinca tornando-se um anodo, pelo qual o material é removido, e assim ajudando a ação da propagação sob fadiga (PEREIRA, 1996).

2.3.7 Efeito das inclusões e defeitos no comportamento em fadiga

Inclusões são partículas de impurezas contidas num material metálico e é inerente ao processo de fabricação destes materiais. Estas inclusões são de materiais não metálicos e podem ser chamadas de inclusões duras, tais como Al_2O_3 , TiN e TiC , ou inclusões moles, tais como MnS .

Imperfeições do reticulado ou defeitos são encontrados na maior parte dos materiais metálicos, tal como as inclusões, são inerentes ao processo de fabricação destes materiais metálicos. Os defeitos podem ser pontual, de linha ou de fronteira. Estas imperfeições influenciam a maioria das propriedades dos materiais metálicos sendo a resistência mecânica à fadiga fortemente afetada (VAN VLACK, 1984).

A importância da influência de inclusões não metálicas e de pequenos defeitos na resistência à fadiga de materiais metálicos tem sido reconhecida por muito tempo. O comportamento em fadiga dos materiais metálicos contendo pequenos defeitos ou inclusões são tão complicados que a predição da influência destes defeitos e inclusões



é muito difícil. Tem sido feitas muitas investigações neste campo e é um tanto difícil fazer uma descoberta exata e imparcial desta predição. O limite de resistência à fadiga foi visto no passado como uma condição crítica para o início da trinca, mas atualmente o limite de resistência à fadiga do aço é visto como a condição limite para a não propagação da trinca emanando de uma matriz ou defeito (MURAKAMI et al., 1991).

As trincas que iniciam no interior ou na interface de uma inclusão, provoca na superfície fraturada uma marca que se denomina por “olho de peixe”, a qual pode ser vista em microscópio eletrônico de varredura – MEV. Um olho de peixe numa superfície fraturada por fadiga, em aços de alta resistência, é aceito ser uma fonte útil de informações para solucionar este problema. A relação entre a forma, tamanho e natureza da inclusão encontrada no centro do olho de peixe e a tensão atuando naquele ponto revelam os efeitos da inclusão ou defeito na resistência à fadiga dos materiais de alta resistência. Estas informações ajudará a estabelecer um entendimento universal dos efeitos das inclusões e defeitos na resistência à fadiga dos materiais, incluindo aços de baixa e média resistência (MURAKAMI et al., 1991).

Baseado em estudos e considerações, concluiu que a variação na composição e forma não é o fator que mais afeta a resistência à fadiga se as inclusões tem o mesmo tamanho, especialmente o mesmo valor da projeção da área, $\sqrt{\text{área}}$. Isto quer dizer que o efeito das trincas, defeitos e inclusões na resistência à fadiga são aceitos ser essencialmente o mesmo, e seus tamanhos controlam a magnitude dos efeitos.

Murakami et al. (1989), baseado nas considerações que fez acima e com o objetivo de avaliar quantitativamente o efeito das trincas, defeitos e inclusões, numa maneira unificada, propôs que a raiz quadrada da área projetada ($\sqrt{\text{área}}$), como um parâmetro geométrico, é relevante para a avaliação dos defeitos e inclusões na resistência à fadiga. Em estudos mais recentes, após muitos experimentos e análises de pequenos defeitos, obtiveram uma equação de predição para o limite mínimo de fadiga σ_w como uma função da área e a dureza Vickers Hv.

Estes pesquisadores colocaram as equações para predição dos efeitos das inclusões em várias localizações, no limite mínimo de fadiga, como sendo:

- Para inclusões na superfície, conforme Figura 2.33(a)

$$\sigma_w = 1,43 (Hv + 120) / (\sqrt{\text{área}})^{1/6} \quad (6)$$

- Para inclusões na subsuperfície, conforme Figura 2.33(b)

$$\sigma_w = 1,41 (Hv + 120) / (\sqrt{\text{área}})^{1/6} \quad (7)$$

- Para inclusões no interior, conforme Figura 2.33(c)

$$\sigma_w = 1,56 (Hv + 120) / (\sqrt{\text{área}})^{1/6} \quad (8)$$

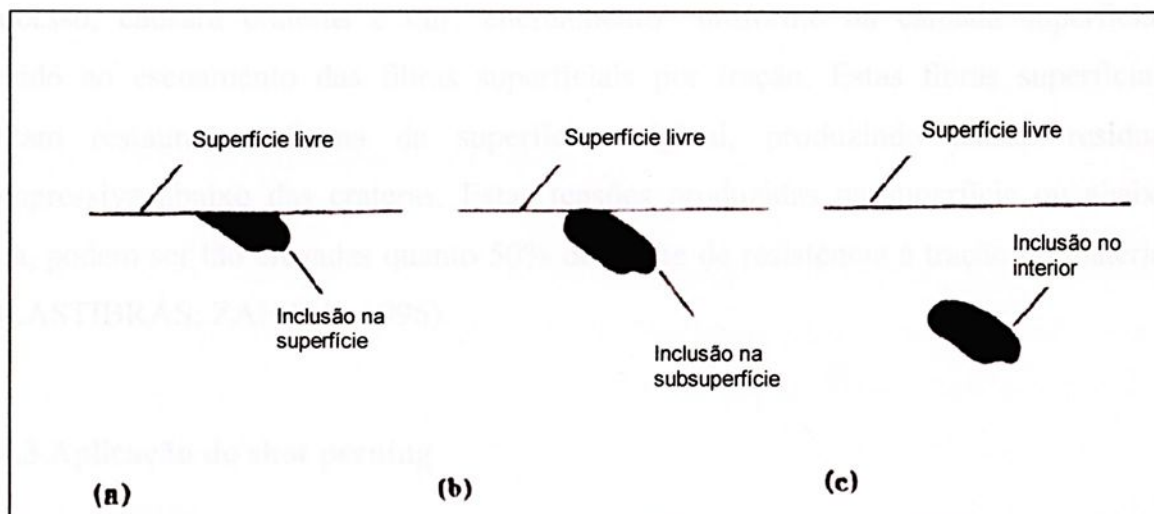


Figura 2.33 - Localização da inclusão.(a) Inclusão da superfície; (b) Inclusão na subsuperfície; (c) Inclusão interna

2.4 SHOT PEENING

2.4.1 Introdução

É comum na história do desenvolvimento industrial, que importantes invenções tenham surgido, mas que durante muitos anos foram irregularmente utilizadas. Uma vez redescobertas pela comunidade científica, elaboradas e difundidas, tornam-se consagradas internacionalmente como ferramentas industriais de inestimável valor. É o caso, por exemplo, do “shot peening”, que somente nos últimos anos vem evoluindo devido a sua importância e versatilidade de aplicações, apesar de já se ter referências de seu emprego em Ur (2700 a.C.) aplicado ao ouro, em Damasco e em Toledo (1100 a 1400 a.C.) na produção das célebres espadas dos legendários cruzados. É atualmente, o mais difundido processo de trabalho a frio usado para “encruamento” da camada superficial de peças metálicas (BLASTIBRÁS; ZAHAVI, 1998, 1996).

2.4.2 O processo shot peening

Neste processo, um fluxo contínuo de esferas ou partículas de forma arredondada são arremessadas nas peças a serem “encruadas” à uma velocidade que alcança 100m/s. As partículas arremessadas contra a superfície da peça ou componente em processo, causará crateras e um “encruamento” uniforme na camada superficial, devido ao escoamento das fibras superficiais por tração. Estas fibras superficiais tentam restaurar a forma da superfície original, produzindo tensão residual compressiva abaixo das crateras. Estas tensões produzidas na superfície ou abaixo dela, podem ser tão elevadas quanto 50% do limite de resistência à tração do material (BLASTIBRÁS; ZAHAVI, 1996).

2.4.3 Aplicação do shot peening

O shot peening é um processo mecânico de deformação a frio, que uma vez aplicado na superfície de peças metálicas aumenta sua resistência à fadiga, fadiga por contato, trinca por tensão de corrosão, fadiga por corrosão e várias outras falhas relacionadas a metais por tensão de tração. Este processo tem também sido muito usado, com eficácia, para formar curvaturas aerodinâmicas em grandes escultura de painéis, tais como a casca da asa de aeronave, algumas com mais de 30m de comprimento. Na totalidade dos casos, a eficiência do processo é devido a introdução de tensões residuais compressivas na superfície das peças e dos componentes (ECKERSLEY, 2001).

2.4.4 Variáveis e tipos do processo shot peening

Os principais parâmetros do “shot peening” são as dimensões das partículas de 0,1 a 5,0mm de diâmetro médio; material das partículas (aço, vidro e cerâmica); velocidade da partícula de até 100 m/s; taxa de fluxo de partículas em kg/min; e o tempo de exposição da peça ao jato, em minutos.



Há dois modos de implementar o “shot peening”: a aplicação convencional conhecida como “processo a seco” e o “processo úmido”. Neste último, as partículas batem na superfície da peça ou componente em processo, através de um filme de óleo. Como os impactos são mais suaves, a camada superficial processada é substancialmente mais fina e as tensões são mais uniformes do que as produzidas pelo “processo a seco” (ZAHAVI, 1996).

2.4.5 Conceito de intensidade de peening

O conceito de intensidade é intuitivo. Quanto mais massa têm a partícula arremessada, maior será a intensidade da deformação na peça ou componente. Quanto maior a velocidade de uma partícula no momento do impacto, mais forte será sua ação. Poderia relacionar a energia “I” com a massa “m” e a velocidade “v” da partícula, da seguinte forma:

$$I = mv^2 / 2 \quad (9)$$

que é a energia cinética do fluxo das partículas.

No entanto, avaliar a intensidade partindo dessa fórmula é praticamente impossível pelos motivos:

- As esferas de aço, vidro ou cerâmica, são fornecidas dentro de faixas de granulometria e seu diâmetro (massa) pode variar por quebra, desgaste etc.;
- A velocidade média também não é fácil de se determinar, quer usando ar comprimido, quer usando turbina.

Por outro lado, especificar uma determinada intensidade a ser reproduzida indicando as diversas variáveis envolvidas como material (aço, vidro ou cerâmica), granulometria, pressão ou rotação da turbina, ângulo de ataque, distância, tempo operacional, entre outros, não garante a precisão e a confiabilidade em operação do “shot peening” (BLASTIBRÁS).

2.4.6 Método de Almen

John Almen, desenvolveu um sistema que recebeu seu nome e incorporou nele todos os fatores, mas sendo superficialmente prático para o uso em oficina. O método Almen é internacionalmente usado para especificar a intensidade do “shot peening”, apesar de alguma inerente imprecisão, ainda que muitos esforços tenham sido feito até o momento.

Ele usou plaquetas planas padronizadas de aço mola, ver Figura 2.34, que se curva quando exposta a um fluxo de partículas em um dos lados. O grau de curvatura é proporcional a intensidade da energia cinética do fluxo de partículas. Cada plaqueta está totalmente coberta com impressões de “peening”, quando o grau de curvatura da plaqueta não é, relativamente, afetado pelo tempo de exposição. A curvatura da plaqueta é medida em um relógio comparador especial que mede a profundidade Almen em milésimos de polegada ou centésimos de milímetros, e assim tornou-se número de “intensidade Almen” (ECKERSLEY, 2001).

Três espessuras de plaquetas Almen denominadas por N, A e C, cobrem toda a gama de intensidades. Essas plaquetas tem as seguintes características:

- Aço mola laminado a frio SAE 1070.
- Comprimento: $3'' \pm .015''$.
- Largura $.745''$ a $.750''$.
- Espessura N: $.031'' \pm .001''$; Planicidade: $\pm .001''$.
- Espessura A: $.051'' \pm .001''$; Planicidade: $\pm .001''$.
- Espessura C: $.094'' \pm .001''$; Planicidade: $\pm .0015''$.
- Dureza: 44 a 50 HRc.



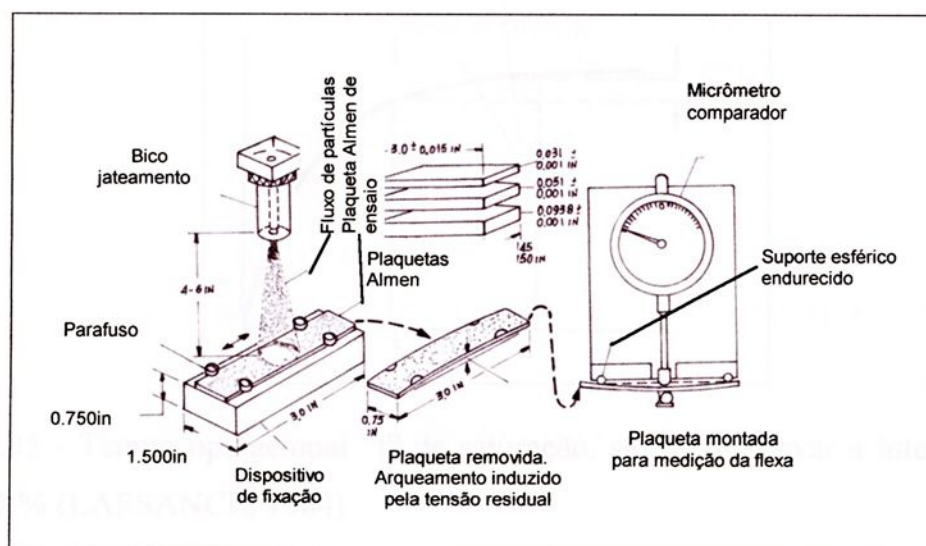


Figura 2.34 - O método Almen de plaquetas (ECKERSLEY, 2001)

2.4.7 Cobertura e saturação

Levantando um gráfico relacionando o tempo operacional com a intensidade obtida, obtém-se uma curva característica, que mostra o crescimento acelerado da intensidade nos primeiros momentos, crescimento este que pode se reduzir progressivamente, atingindo, à partir de certo ponto, uma estabilização, ou seja, a saturação superficial da peça. Diz-se que “t” é o ponto de saturação se a intensidade, após 2t, não se elevar X%, geralmente na faixa de 10 a 20%, normalmente 10%, ver Figura 2.34.

É compreensível que esse ponto de saturação coincida com o momento em que toda a área atingida foi uniformemente compactada, o que pode ser constatado até visualmente pela observação das indentações sobre a superfície quando é avaliado o percentual da área coberta em relação a não atingida. São comuns especificações como 50% ou 90% de cobertura. O tempo t corresponde a saturação de 100%. Especificação de 150% ou 200%, nada mais é, do que expor a peça a um tempo operacional de 1,5t ou 2t, respectivamente (LASSANCE, 1984).

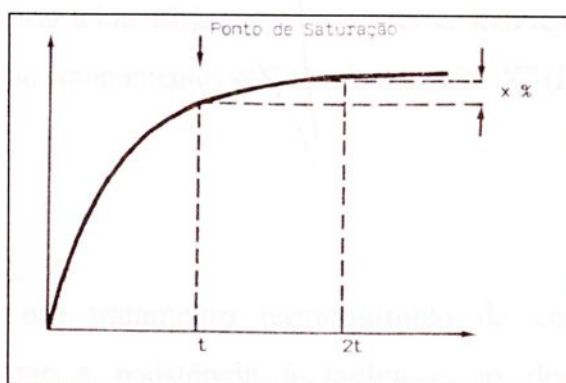


Figura 2.35 - Tempo operacional “t” de saturação, se $2t$ não elevar a intensidade em mais de $X\%$ (LASSANCE, 1984)

2.4.8 Preparação para o shot peening

Inicialmente, para cada caso, são feitos testes sucessivos obtendo-se a curva de saturação. As condições iniciais, para se obter essa curva de saturação, com maior ou menor propriedade em função dos resultados anteriormente obtidos são selecionados pela prática do operador. A utilização de uma intensidade obtida na faixa crescente da curva é insegura. A operação deve ser especificada para tempos após o ponto de saturação.

Como é um processo que varia em função do tempo de utilização das esferas, de aço, vidro ou cerâmica, ele deve ser aferido periodicamente, com tempo predeterminado por norma, para se garantir a intensidade dentro de certos valores especificados. Qualquer que seja a faixa especificada, o ponto de saturação tem que estar contido nela (LASSANCE, 1984).

2.4.9 Controle da intensidade do shot peening

O controle de qualidade do “shot peening” deve ser durante a aplicação, e não posterior, pois é mais fácil inspecionar com rigor a preparação e aplicação do processo. Ele requer mão-de-obra especializada e consciente, e equipamentos automáticos que ofereçam o recurso de reproduzir impessoalmente, os mesmos valores das variáveis anteriormente identificadas (LASSANCE, 1984).

É possível se verificar a intensidade aplicada e as tensões residuais obtidas no processo “shot peening”, usando-se equipamentos sofisticados de raio “X” (PREVEY, 2001).

2.5 NITRETAÇÃO

A nitretação é um tratamento termoquímico de endurecimento superficial aplicado para aumentar a resistência à fadiga e ao desgaste de componentes mecânicos, pela formação de uma camada dura e um campo de tensão residual compressivo na superfície do material. Como consequência, o núcleo do material permanece mole, e resulta em diferentes respostas para carregamento externo e deformação (GUAGLIANO, 1977).

Na nitretação a dureza aumenta consideravelmente, devido à precipitação de partículas muito finas de nitretos. O efeito mais importante dessa faixa de difusão de nitrogênio é o aumento apreciável da resistência à fadiga, porque os nitretos formados bloqueiam qualquer deformação dos cristais de ferro, elevando os valores do limite de escoamento e, portanto, do limite de fadiga do material (CHIAVERINI, 1986b).

Ela se processa pela difusão de nitrogênio para dentro da superfície do metal ferroso, aumentando a sua dureza superficial. O nitrogênio é um átomo pequeno igual ao carbono, e seu efeito nos aços é similar que o do carbono, mas com adicional vantagens e desvantagens. Ele tem um importante efeito que é sua habilidade em formar compostos duros com o ferro. Esses compostos podem aumentar a dureza superficial de alguns aços, tão alto quanto 70HRC. Esta é uma das mais altas durezas que pode ser obtida em têmpera para aços de alta liga.

A nitretação é um processo de endurecimento subcrítico. Usualmente feito na faixa de temperatura de 530°C a 590°C. Ele não envolve têmpera. Peças e componentes podem ser lentamente resfriados da temperatura de nitretação e adquirir dureza sem subsequente tratamento térmico. Quando aços ligados são nitretados, eles são temperados e revenidos a uma temperatura que está pelo menos 10°C acima da temperatura de nitretação. Isto é feito para promover uma estrutura ferrita e minimizar a deformação durante o processo de nitretação.



Nesse processo existe um limite técnico para a profundidade, normalmente inferior a 0,8 mm, e um maior tempo de nitretação aumenta a tendência para formar a camada branca e torná-la mais espessa. Especialmente quando a nitretação é gasosa, a profundidade da camada e a chamada camada branca dependem da velocidade de dissociação da amônia, que por sua vez depende da velocidade do fluxo de amônia e da temperatura do forno, além do tempo (CHIAVERINI, 1996b).

Este processo apresenta alguns inconvenientes, dentre os quais o mais importante é o crescimento do material que ele produz e, depende principalmente do tempo e da temperatura. Este fato convém ser levado em conta nos projetos de peças, para que suas dimensões sejam diminuídas convenientemente, ou então possa ser o material removido pela retificação, de modo a conferir as dimensões definitivas, dentro das tolerâncias especificadas.

A formação dos compostos de nitrogênio causa uma expansão de volume que afeta o aço. Isto resulta em tensões compressivas que são muito desejáveis, uma vez que estas tensões aumentam a resistência à fadiga. As trincas de fadiga nucleam quando a superfície é submetida à tensão de tração; entretanto, se uma superfície contém tensão residual compressiva, a trinca por fadiga não nucleará até aparecer tensões para superar a tensão negativa (compressiva) na superfície.

Uma regra denominada “regra do dedão” usada para alguns tratamentos térmicos, e em casos de nitretação pesada, 0,50 a 0,75mm, causa um crescimento de aproximadamente 0,0125mm na superfície do diâmetro em volta da barra e um similar crescimento no diâmetro interno; alteração no comprimento pode ser de aproximadamente 0,001µm/mm de comprimento.

A nitretação ocorrerá no diâmetro interno se existir adequada exposição ao meio nitretante. O meio nitretante líquido irá atuar dentro de qualquer furo; já se o meio nitretante for gasoso, somente irá dentro dos furos, se o fluxo de gás for adequado. Aconselha-se evitar formas de cantos nas peças e componentes na nitretação. Existe o risco de interromper o efeito de endurecimento (BUDINSKI, 1988).

Uma grande vantagem da nitretação sobre outros tratamentos de endurecimento superficial reside no fato de que a temperatura do tratamento não é muito elevada,



geralmente na faixa de 530°C a 590°C, como citado anteriormente, sendo inferior à temperatura crítica. Com isto, as peças são menos suscetíveis a empenamentos ou distorções; além disso, na nitretação não há a necessidade de qualquer tratamento térmico posterior, o que reduz ainda mais as probabilidades de empenamento e distorção.

2.6 TENSÕES RESIDUAIS

Tensões residuais são tensões que atuam numa peça ou componente de máquina com ausência de esforços externos, sejam cargas mecânicas, esforços resultantes de gradientes de temperatura ou de efeitos inerciais. Portanto, pela própria definição, as tensões residuais constituem um sistema em equilíbrio (SILVA, 1999).

Estas tensões normalmente ocorrem no processo de fabricação das peças e componentes de máquinas como um resultado da deformação elasto-plástica irregular na soldagem, no tratamento térmico, e em outros processos mecânicos (ZAHAVI, 1996).

Para que estas tensões permaneçam nas peças e componentes de máquinas, após a remoção dos carregamentos externos, alguma seção ou parte desta, foi solicitada além do limite elástico do material produzindo deformações não transitórias; portanto, se não ocorrerem deformações plásticas, não serão geradas tensões residuais.

Não é possível diferenciar, simplesmente pelas suas aparências externas, peças com tensões residuais daquelas isentas delas. Entretanto, as características físicas e mecânicas podem ser diferentes. Sob a ação de cargas externas, as tensões residuais e as aplicadas podem somar-se linearmente no regime elástico, e causar a ruptura inesperada ou em certos casos aumentar a vida de peças e componentes em fadiga.

As tensões residuais, em materiais metálicos policristalinos, podem ser caracterizadas em três modos diferentes, em função de como se apresentam nos materiais:

- *Tensões residuais do Modo I*: são quase homogeneamente distribuídas numa grande região do material, ou seja, distribuídas em vários grãos. Numa superfície de corte, através de todo o corpo, as forças internas relativas as tensões residuais do Modo



I estão em equilíbrio desse modo se anula o somatório dos momentos das forças relativas a qualquer eixo. Com a alteração do equilíbrio das forças e dos momentos de um corpo contendo tensões residuais do Modo I, ocorrem alterações macroscópicas nas dimensões do corpo.

- *Tensões residuais do Modo II*: são quase homogeneamente distribuídas numa pequena região do material, ou seja, num grão, ou região da ordem de grandeza do tamanho de grão. As forças e momentos internos relativos às tensões residuais do Modo II estão em equilíbrio, considerando-se apenas um número pequeno de grãos. Com alteração deste equilíbrio, podem se apresentar com alterações macroscópicas nas dimensões do corpo.

- *Tensões residuais do Modo III*: são heterogeneamente distribuídas através de pequenas regiões do material, ou seja, da ordem de distâncias interatômicas. As forças e momentos internos relativos às tensões residuais do Modo III estão em equilíbrio; no entanto, não apresentam modificações macroscópicas nas dimensões do corpo.

As origens das tensões residuais são muito diversas e podem ser divididas em três categorias:

- Tensões oriundas de processamento e/ou carregamento mecânico;
- Tensões oriundas de deformações metalúrgicas; e
- Tensões oriundas de efeitos térmicos.

As tensões residuais apresentadas pelas peças e componentes de máquinas são, em muitos casos, produzidas pela combinação destas três categorias atuando individualmente ou de forma combinada.

A influência das tensões residuais na sobrevida e na resistência à fadiga, assim como sobre o surgimento e a propagação de trincas, vem sendo estudada por vários pesquisadores e o grau desta influência depende, entre outros fatores, do tipo de carregamento externo. Vários estudos confirmaram que as tensões residuais de compressão aumentam o limite de resistência à fadiga, enquanto que as tensões residuais de tração o diminuem.

A constatação do aumento da resistência à fadiga, ocasionado pelo estado compressivo da superfície, estimulou o desenvolvimento de vários métodos de



tratamentos superficiais de introdução de tensões residuais de compressão. Os principais métodos são: jateamento por partículas esféricas ou shot peening, cementação, nitretação, têmpera por indução, rolamento superficial, entre outros. Estes processos ou tratamentos, além de introduzirem campos de tensões residuais compressivas na superfície, também elevam a dureza superficial do material e, conseqüentemente aumentam a resistência a fadiga do mesmo.

2.7 APLICAÇÃO DA ESTATÍSTICA EM FADIGA

2.7.1 As funções distribuição de probabilidades de Weibull e de Gauss

Os resultados dos ensaios de fadiga apresentam, normalmente, um grande espalhamento. Devido a este espalhamento faz-se necessário um estudo estatístico a fim de se definir as características dos materiais em fadiga. Duas distribuições de probabilidades muito conhecidas e largamente utilizadas na prática, para análise estatística de ensaios mecânicos são a distribuição exponencial de Weibull e a distribuição normal. A função de distribuição normal de Gauss é melhor empregada onde não se considera o desgaste, como por exemplo, ensaios de tração simples, ensaios de cisalhamento simples, distribuições de peso e altura de um conjunto de prédios numa cidade, variações dimensionais de peças usinadas etc (JERONYMO; CRISTOVÃO, 1987).

A função de distribuição de probabilidade de Weibull tem sido largamente usada na análise dos resultados de ensaios mecânicos nos quais a variável de interesse é a vida útil do material submetido à fadiga.

De fato, dado assimetria da função de distribuição de Weibull, temos que certos elementos mais ciclados, em relação ao valor médio, falham com maior probabilidade que certos elementos menos ciclados em relação a este mesmo valor, o que é naturalmente, o esperado (JERONYMO; CRISTOVÃO, 1987).

Como este trabalho está todo baseado em ensaios de fadiga em flexão rotativa, vamos usar a função de distribuição de probabilidade de Weibull.



2.7.2 O método de Weibull

Weibull propôs a distribuição cumulativa da probabilidade mostrada abaixo para descrever o tempo de vida de materiais sob cargas que causam fadiga e fratura nos materiais. Ele considerou a distribuição das falhas na forma:

$$P = 1 - e^{-\phi(x)} \quad (10)$$

Onde P é a probabilidade de falha ao se considerar o fator x (que pode ser: a resistência do material, a vida em fadiga etc). A função $\phi(x)$ foi proposta por Weibull como sendo uma função positiva não decrescente. Logo, a distribuição proposta por Weibull pode ser apresentada da seguinte forma:

$$Pv(vida < t) = 1 - e^{-(N-\gamma / \eta-\gamma)^\beta} \quad (11)$$

Onde :

Pv – Probabilidade de atingir vida < t

N – Número de ciclos até a falha

t – Tempo de vida

γ – Parâmetro de vida mínima

β – Parâmetro de forma ou de inclinação de Weibull

η – Parâmetro de escala ou vida característica

Na equação, η é o parâmetro de escala, que é o valor característico, tal como o tempo de vida, a resistência mecânica ou a carga; β é o parâmetro de forma da distribuição, também conhecido como módulo de Weibull. Este valor controla a variância dos valores medidos, quanto maior seu valor, mais estreita é a distribuição dos valores medidos, e mais alto é o pico; γ é chamado também de parâmetro de localização, que é o menor valor característico do parâmetro medido.

Quando temos um valor de γ negativo, significa que a falha ocorreu antes do teste. Em ensaios de fadiga, pode-se adotar $\gamma = 0$, pois o material só estará sujeito a falha após início do teste, logo γ nunca será negativo.

Weibull se aproveitou da teoria do elo mais fraco de uma corrente para descrever o comportamento da resistência mecânica de materiais onde o ponto com a menor resistência determina a resistência do corpo inteiro. Desta forma, a resistência medida será sempre o menor valor de um conjunto de valores possíveis. Se os ensaios forem repetidos, outros valores mínimos serão obtidos. Logo, a resistência medida pode ser considerada um valor aleatório (MONTEIRO, 2001).

A equação é chamada “distribuição cumulativa de Weibull com três parâmetros”. Como citado anteriormente, pode-se seguramente assumir $\gamma = 0$, e a distribuição resultante é chamada “distribuição cumulativa de Weibull com dois parâmetros”, e será representada como segue:

$$P_v = 1 - e^{-(N/\eta)^\beta} \quad (12)$$

Os parâmetros da distribuição de Weibull para um conjunto de dados pode ser estimado através de vários métodos diferentes. Neste trabalho será usado o método da regressão linear.

Rearranjando a equação e em seguida aplicando logaritmo natural duas vezes, temos:

$$\ln [\ln(1/1-P_v)] = \beta \cdot \ln N - \beta \cdot \ln \eta \quad (13)$$

Que é a equação de uma reta do tipo $y = ax + b$, onde:

$$y = \ln \cdot \ln (1/1-P_v) \quad (14)$$

$$x = \ln \cdot \eta \quad (15)$$

$$a = \beta \quad (16)$$

$$b = -\beta \cdot \ln \cdot \eta \quad (17)$$

A probabilidade de falha, P_v , para um valor N pode ser calculada através de n dados medidos, após ordená-los de tal forma que $N_1 \leq N_2 \leq N_3 \leq \dots \leq N_n$. Usando se o método proposto por Wilks, um estimador, considerado não viciado para P_v pode ser calculado pela expressão

$$P_{v,i} = i / n + 1 \quad (18)$$

Onde $P_{v,i}$ é a probabilidade de se ocorrer o evento em estudo caso o valor da variável em estudo (tensão aplicada, vida em fadiga etc) seja N_i .

Neste trabalho adotaremos um outro estimador da função cumulativa de probabilidade, que consiste em ordenar os resultados de “tempo” ou “vida”, em ordem crescente, e a eles associar uma probabilidade cumulativa, denominada “Median Rank”. Os valores das “Median Rank” podem ser obtidos diretamente de tabelas confeccionadas para vários tamanhos de amostras, as quais podem serem vistas no apêndice 1,2 e 3 (KELLY; HARRIS, 1980).

Isto significa que os dados de “tempo” ou de “vida” plotados na escala horizontal do papel de probabilidade de Weibull versus probabilidade de falha plotados na escala vertical, podem ser representados por uma linha reta se a amostra segue uma distribuição de probabilidade de Weibull com vida mínima igual a zero.

Outros parâmetros importantes da função de Weibull são o índice de confiabilidade r ($0 < r < 1$) e a vida confiável p_r , definidos como segue:

$$p_r = R^{-1}(r) \quad (19)$$

$$p_r = \eta (-\ln r)^{1/\beta} \quad (20)$$

Onde $R(x)$ é a função que dá a probabilidade de itens perfeitos até a vida N ou seja, $R(N) = 1 - P_v$ (P_v é a função distribuição de Weibull, que nos dá a proporção de falha antes de N)

3 MATERIAL E MÉTODO

3.1 MATERIAL

O material utilizado no desenvolvimento deste trabalho foi o aço ABNT 4340 forjado, usado nas indústrias fabricantes de máquinas, equipamentos e componentes. Trata-se de um aço de baixa liga com excelentes propriedades mecânicas e boas características em fadiga.

Aplicações típicas deste aço são: virabrequins de aviões, tratores, caminhões e automóveis, bielas, engrenagens, eixos e árvores sujeitos a grandes esforços e peças que necessitam boas características mecânicas em seções de grandes dimensões (Villares).

3.1.1 Composição química

O material utilizado na confecção dos diversos corpos de prova com dureza de 28 a 32HRc, que serão identificados como 30HRc, foram retirados de uma árvore fraturada. O material usado na confecção dos diversos corpos de prova com dureza de 38 a 42HRc, que serão identificados como 39HRc, foram adquiridos no mercado, da firma “Megasteel”, e enviados à “Brasimet” para tratamento de recozimento, têmpera e revenimento para a obtenção da dureza. O certificado de análise química deste lote, de fabricação “Gerdau”, está no anexo “F” e o certificado de controle de qualidade da “Brasimet”, referente à têmpera e revenimento, está no anexo “E”.

Após feito a análise química do material de 30HRc, retirado da árvore, ficou comprovado que o material é realmente o ABNT 4340, conforme pode ser observado na comparação da Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Composição química do aço ABNT 4340 (Villares)

% Peso	C	S	Mn	Cr	Ni	Mo
especificado	0,38/0,43	0,025 máx.	0,60/0,80	0,70/0,90	1,65/2,00	0,20/0,30
encontrado	0,385	< 0,014	0,64	0,78	1,837	0,225



O material adquirido no mercado, da firma “Megasteel”, e de fabricação “Gerdau”, teve sua análise confirmada conforme pode ser comparado na Tabela 3.2, o certificado de análise química fornecido pela “Gerdau” versus o encontrado. Este material só foi usado nos corpos de prova do material base polido e nitretação – “MN39” e do material base com concentrador nitretação – “MCN39”.

O certificado dos resultados encontrados para a dureza nos corpos de prova, tratados pela “Brasimet”, pode ser visto no Anexo E.

Tabela 3.2 – Composição química do aço ABNT 4340-39HRc (Villares)

% peso	C	S	Mn	Cr	Ni	Mo
Cert. “Gerdau”	0,41	0,015	0,65	0,78	1,78	0,23
encontrado	0,406	0,0156	0,683	0,786	1,906	0,226

Para os corpos de prova de tração e flexão rotativa do material base polido – “MB39”, foram usados os dados obtidos por Nascimento (1999), com as mesmas características de dureza e material, que o citado na Tabela 3.2.

A Tabela 3.3, mostra a comparação entre a composição química especificado para o aço ABNT 4340 e a do aço usado para os corpos de prova em flexão rotativa citados acima.

Tabela 3.3 – Composição química do aço ABNT 4340-39HRc (Villares) (NASCIMENTO, 1999)

% peso	C	S	Mn	Cr	Ni	Mo
Especificado	0,38/0,43	0,025 máx.	0,60/0,80	0,70/0,90	1,65/2,0	0,20/0,30
encontrado	0,39	< 0,01	0,69	0,74	1,70	0,23

3.1.2 Tratamento térmico da árvore

No projeto da árvore recomenda-se um tratamento térmico de tempera e revenimento, a fim de se obter dureza de 28 a 32HRc. Adotaremos o valor médio 30HRc nas citações seguintes.

Foi batido uma série de medidas de dureza em torno da fratura, numa secção (fatia) de material cortado, usinado e polido, junto ao nariz da árvore, a fim de confirmar a dureza, isto está mostrado na Figura 3.1.

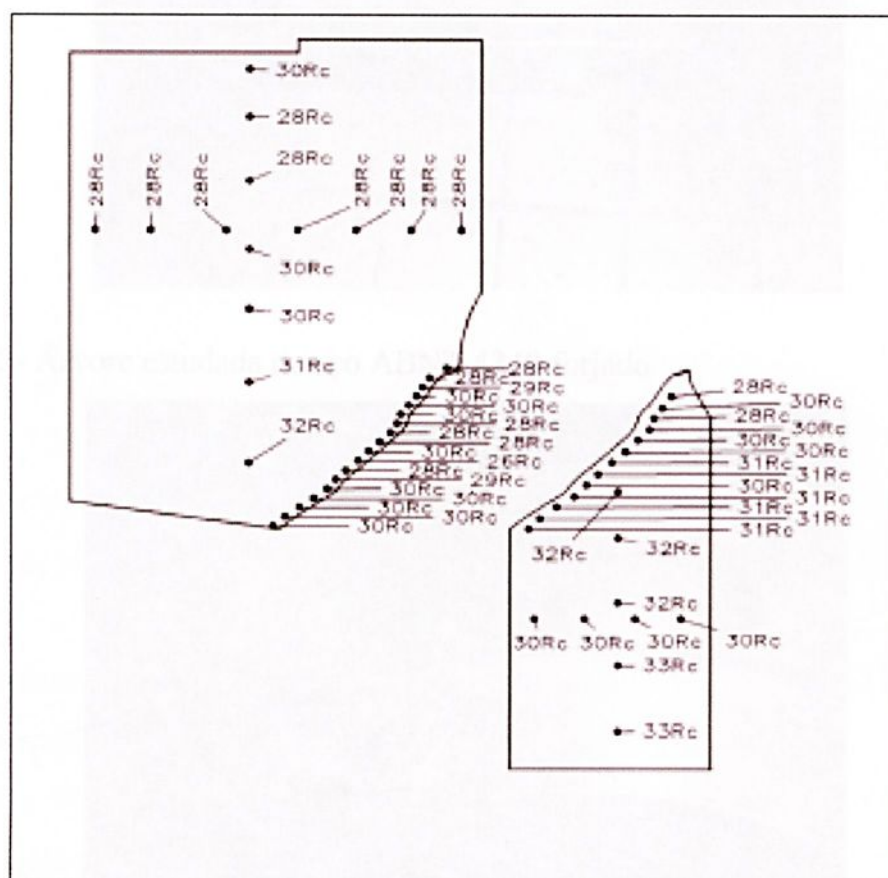


Figura 3.1 - Distribuição da dureza em torno da trinca

3.1.3 Corpos de prova

Todos os corpos de prova para ensaios de tração, flexão rotativa, análise de tensões residuais, análise da trinca, medidas de dureza e outros, foram extraídos de uma árvore fraturada, que pode ser vista nas Figuras 3.2 a 3.5.

Figura 3.4 - Trincas da parte traseira do nariz da árvore

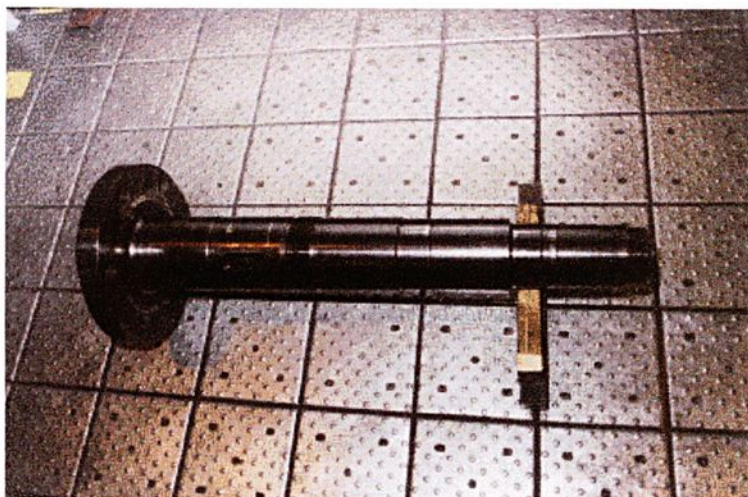


Figura 3.2 - Árvore estudada de aço ABNT 4340 forjado

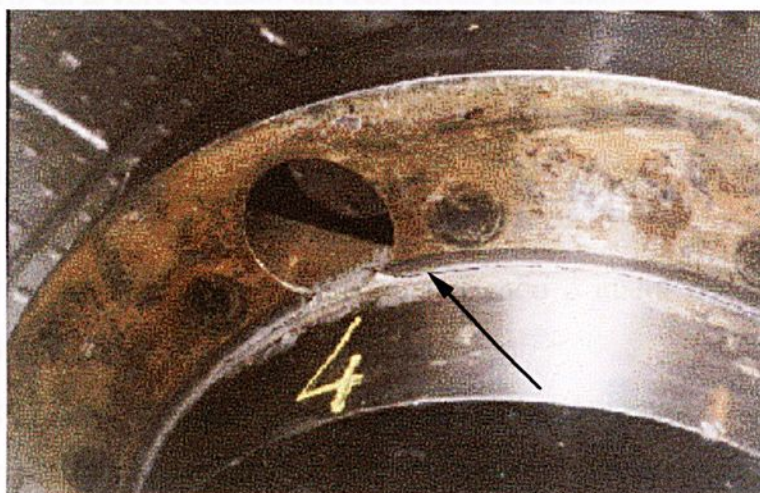


Figura 3.3 - Trinca apresentada no nariz da árvore

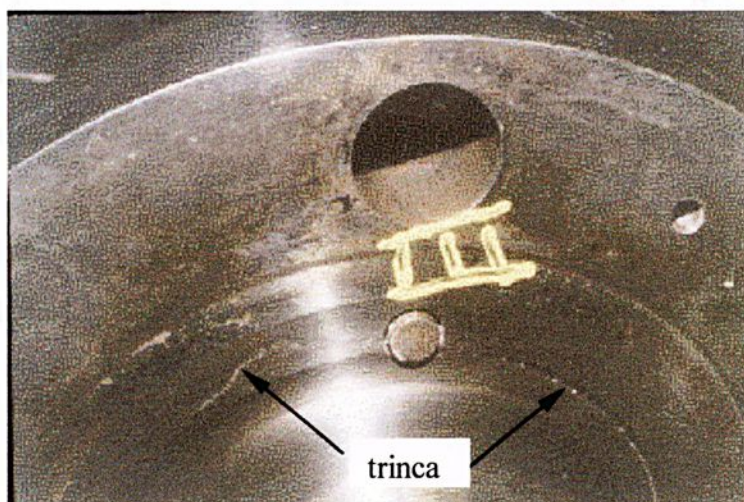


Figura 3.4 - Trinca da parte traseira do nariz da árvore

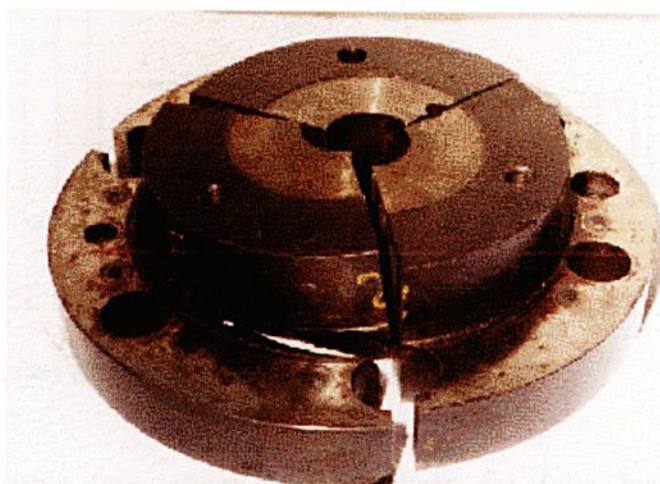


Figura 3.5 - Nariz da árvore cortado em três partes para análise

Como os corpos de provas deveriam ser extraídos do material da árvore fraturada, foi necessário se fazer o estudo de um plano de corte, com as seguintes premissas:

- Melhor aproveitamento do material, retirando o maior número de corpos de prova possível;
- Os corpos de prova não podiam ser retirados próximos às superfícies internas e externas para não ter risco de terem nitrogênio da nitretação;
- As partes a serem serradas deveriam ter o menor consumo de material possível;
- O tipo de corte não poderia alterar as características físico - químicas do material;
- Era necessário identificação de onde saiu cada corpo de prova; e
- Outros.

Partindo dessas premissas, o estudo do corte transversal foi feito e chegou-se à conclusão que deveríamos cortar a árvore em sete partes, conforme Figura 3.6.

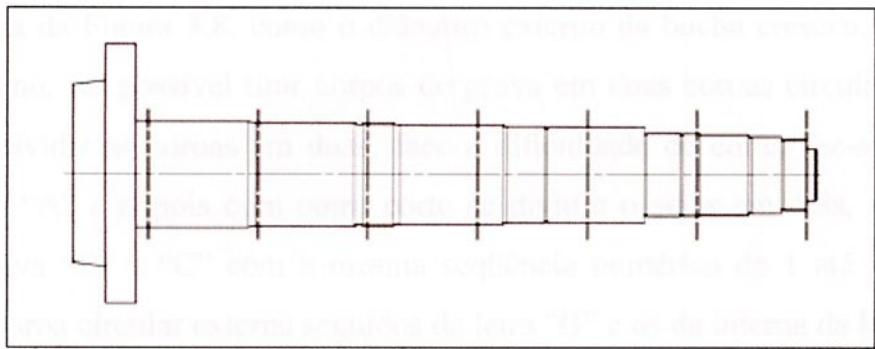


Figura 3.6 - Posições de corte transversal da árvore

Após os cortes transversais, novo estudo foi feito levando-se em conta os diâmetros internos e externos de cada bucha, eliminando-se a camada nitretada, para cada uma delas separadamente, a fim de se retirar os corpos de prova longitudinais do material da árvore. Todas as premissas iniciais foram levadas em conta neste novo estudo e os resultados são os apresentados a seguir:

Para a bucha da Figura 3.7, devido o diâmetro externo ser o menor existente na árvore, só deu para tirar corpos de prova numa coroa circular. O corte foi feito do diâmetro externo para o diâmetro interno da bucha. Todos os corpos de prova retirados desta coroa circular receberam o número seqüencial de 1 até o enésimo, seguido da letra “A”.

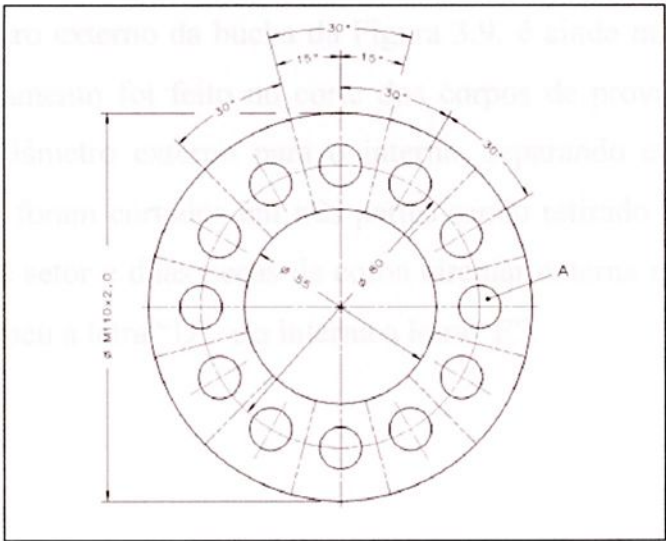


Figura 3.7 - Plano de corte para bucha identificada por “A”

Na bucha da Figura 3.8, como o diâmetro externo da bucha cresceu, mantido o diâmetro interno, foi possível tirar corpos de prova em duas coroas circulares. Como não dá para dividir as coroas em duas, face a dificuldade de corte, fez-se um corte igual a bucha “A” e depois com outro corte se dividiu o setor em dois, gerando os corpos de prova “B” e “C” com a mesma seqüência numérica de 1 até o enésimo. Sendo os da coroa circular externa seguidos da letra “B” e os da interna da letra “C”.

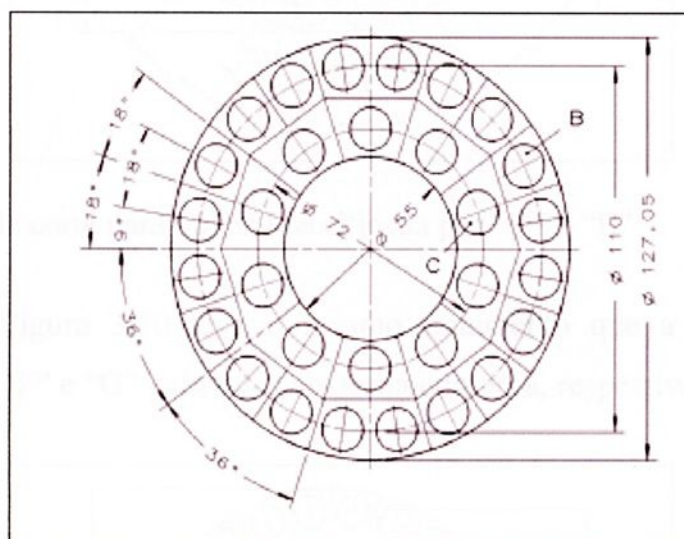


Figura 3.8 - Plano de corte para bucha identificada por “B” e “C”

Como o diâmetro externo da bucha da Figura 3.9, é ainda maior que a anterior, um melhor aproveitamento foi feito no corte dos corpos de prova. Nesta bucha, foi feito um corte do diâmetro externo para o interno, separando em vários setores a bucha. Estes setores foram cortados em três partes sendo retirado uma peça da coroa circular interna neste setor e duas peças da coroa circular externa neste setor. A coroa circular externa recebeu a letra “D” e a interna a letra “E”.

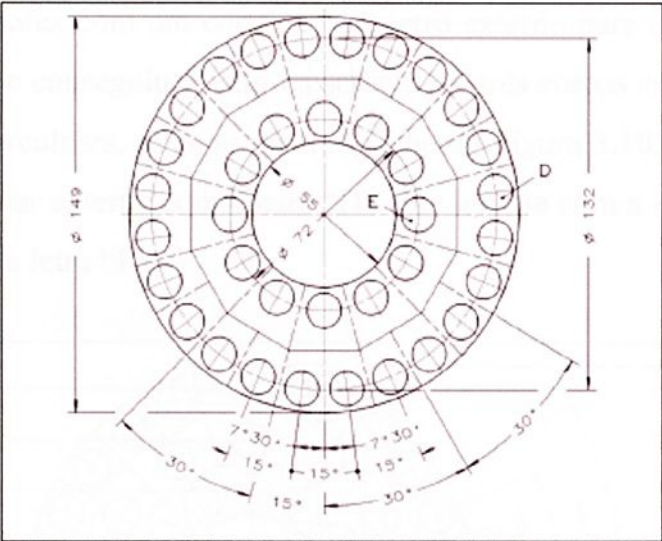


Figura 3.9 - Plano de corte para bucha identificada por “D” e “E”

A bucha da Figura 3.10 teve o mesmo tratamento que a da figura 3.9, e receberam as letras “F” e “G” para bucha externa e interna, respectivamente.

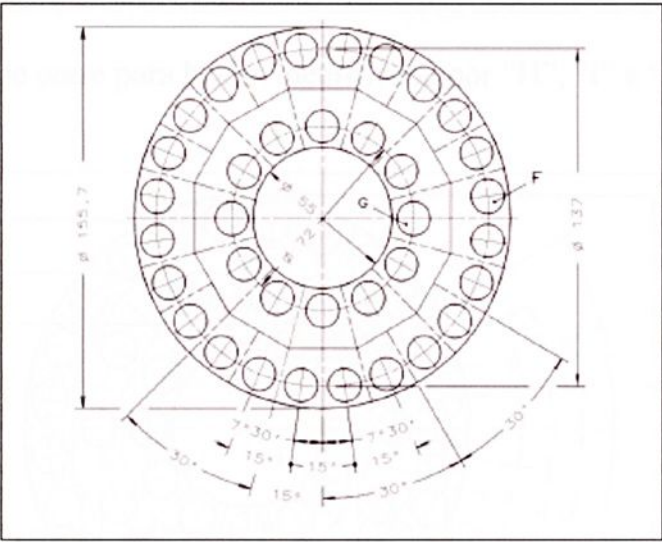


Figura 3.10 - Plano de corte para bucha identificada por “F” e “G”

Estas buchas da Figura 3.11 e 3.12, tiveram o mesmo tratamento apesar da bucha da Figura 3.11 conter um rasgo de chaveta e ter o diâmetro externo um pouco menor que a da Figura 3.12. Elas foram planejadas a serem cortadas em três coroas circulares, foi inicialmente feito um corte do diâmetro externo para o interno, dividindo a bucha em setores, cada setor foi cortado em três coroas circulares, sendo a mais externa ainda

dividida em dois setores com um corte do diâmetro externo para o interno. Na bucha da Figura 3.11 não se conseguiu dividir os setores em três coroas circulares e só foram feitas duas coroas circulares, ficando igual a bucha da Figura 3.10, gerando corpos de prova na coroa circular externa com a letra “H” e na interna com a letra “J”. Não gerou corpo de prova com a letra “I”.

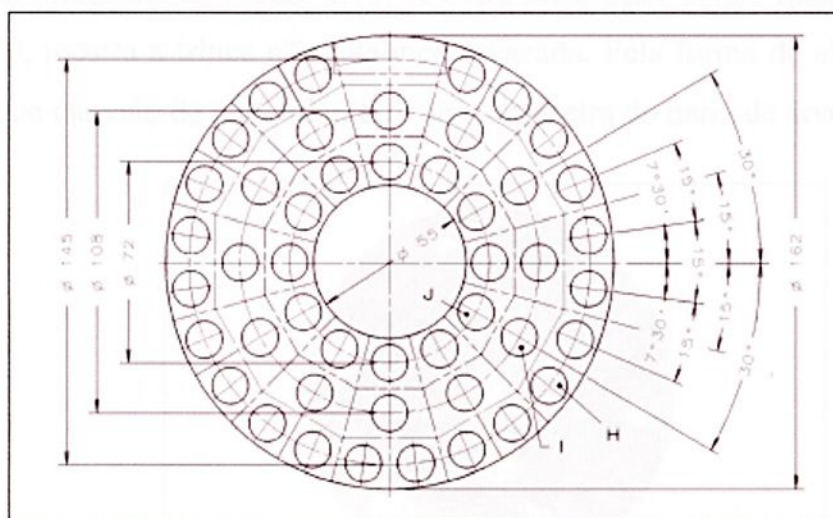


Figura 3.11 - Plano de corte para bucha identificada por “H”, “I” e “J”

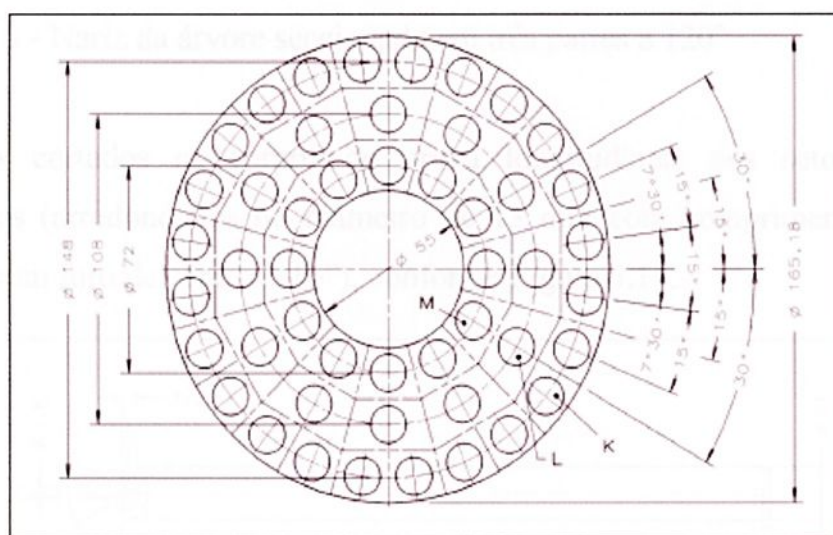


Figura 3.12 - Plano de corte para bucha identificada por “K”, “L” e “M”

Na Figura 3.12, foram gerados os corpos de prova conforme planejado e receberam as letras “K”, “L” e “M”, da coroa circular externa para a interna, respectivamente.

O nariz da árvore, foi cortado em três partes a 120° cada corte, para se identificar de onde a trinca partia pelas características da superfície fraturada. Aleatoriamente, como pode ser visto na Figura 3.13, como são 6 furos, escolheu-se um furo qualquer e cortou. Os outros cortes foram consequência do espaçamento a 120° . Para surpresa um dos três setores cortados, mostrou a trinca vazada em uma das faces cortada, que pode ser vista na fotografia da Figura 2.19. A outra face, deste setor, vista na fotografia da Figura 2.20, mostra a trinca não totalmente vazada. Pela forma de abertura da trinca, deduz-se que ela veio da parte dianteira para a traseira do nariz da árvore.

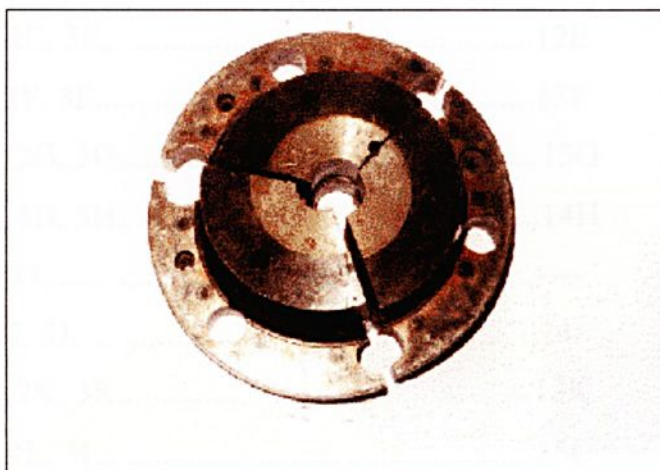


Figura 3.13 - Nariz da árvore seccionado em três partes a 120°

Após cortados os corpos de prova longitudinais dos setores, eles foram desbastados (arredondados no diâmetro de 13 mm com comprimento de $160\text{mm} \pm 0,1\text{mm}$ e com furo de centro $1/16''$), conforme Figura 3.14.

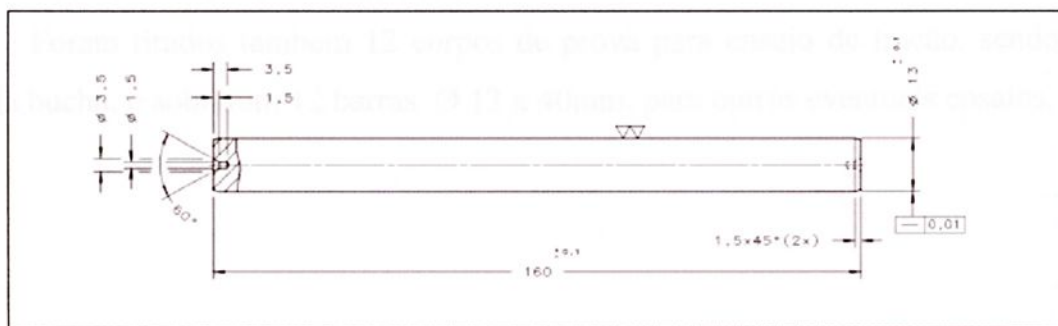


Figura 3.14 - Desenho do corpo de prova pré-usinado para usinagem final em torno "CNC"

Pelo planejamento feito deveria se obter cerca de 206 corpos de prova, mas devido aos desvios no corte, erros de traçagem, rasgo, de chavetas e roscas existentes na árvore, a quantidade real foi só de 159 corpos de prova.

O resultado do número de corpos de prova pré-usinados por setor circular foram:

A – 1A, 2A, 3A,.....	10A	10
B – 1B, 2B, 3B,.....	17B	17
C – 1C, 2C, 3C,.....	08C	08
D – 1D, 2D, 3D,.....	15D	15
E – 1E, 2E, 3E,.....	12E	12
F – 1F, 2F, 3F,.....	13F	13
G – 1G, 2G, 3G,.....	13G	13
H – 3H, 4H, 5H,.....	14H	12
I – ZERO,.....	----	0
J – 3J, 4J, 5J,.....	14J	12
K – 1K, 2K, 3K,.....	13K	13
L – 1L, 2L, 3L,.....	15L	15
M – 1M, 2M, 3M,.....	07M	07
TOTAL		147

Destes 147 corpos de prova, identificados e usinados, 8 blocos de 18 corpos de prova de cada foram escolhidos aleatoriamente, por um programa de computador, e ficaram distribuídos conforme, Tabela 3.2.

Foram tirados também 12 corpos de prova para ensaio de tração, sendo um de cada bucha, e sobraram 12 barras Ø 12 x 40mm, para outros eventuais ensaios.



Tabela 3.4 – Distribuição dos corpos de prova em blocos

Lote 1	Lote 2	Lote 3	Lote 4	Lote 5	Lote 6	Lote 7	Lote 8	Sobra
10D	11E	10F	10L	11D	11J	10A	10B	12K
10J	12B	10K	13B	12G	13J	10H	10E	3L
11F	12E	11G	13D	12L	15L	11B	10G	5B
11H	13L	12D	13F	13H	1A	12H	11K	
11L	14B	12J	2B	14J	1D	15D	12F	
13G	15B	1B	3C	1G	2E	1C	13K	
14D	16B	1L	3D	3A	2L	1M	17B	
14H	2G	2D	3M	3H	2M	2K	1F	
14L	5F	2F	5H	4D	4A	3B	2C	
1E	5M	3F	6D	4L	4F	3E	3J	
1K	6B	4C	6M	5E	5A	4H	4G	
2A	6F	4E	7B	5J	6A	5K	4J	
3G	6G	5C	7D	5L	6C	6E	4K	
3K	6L	6J	7E	7G	7H	7C	4M	
4B	7F	6K	7K	8B	8L	8D	5D	
6H	8E	7A	7L	8F	9B	8H	5G	
8A	8G	7J	9A	8J	9J	9D	7M	
8K	9G	9H	9F	9L	9K	9E	8C	

Nota: O corpo de prova 3L foi para o lote de material base. O 5B foi aumentar o lote do material base polido e nitretação, para servir como testemunho. O 12K serviu para testemunho do lote de material base polido com shot peening.

Estes blocos foram sorteados para serem preparados para o ensaio de flexão rotativa, e ficaram assim distribuídos:

- Lote 1: material base com concentrador e nitretação - “MCN30”
- Lote 2: material base polido com shot peening II – “não ensaiado”
- Lote 3: material base polido com nitretação e com shot pening I ou II - “não ensaiado”
- Lote 4: material base com concentrador - “MC30”
- Lote 5: material base com concentrador com nitretação e com shot peening I ou II - “não ensaiado”
- Lote 6: material base polido com shot peening I - “MS30”
- Lote 7: material base polido - “MB30”
- Lote 8: material base polido e nitretação - “MN30”

O programa experimental de fadiga foi realizado com corpos de provas usinados para ensaio de fadiga em flexão rotativa de acordo com Figura 3.15 e 3.16.

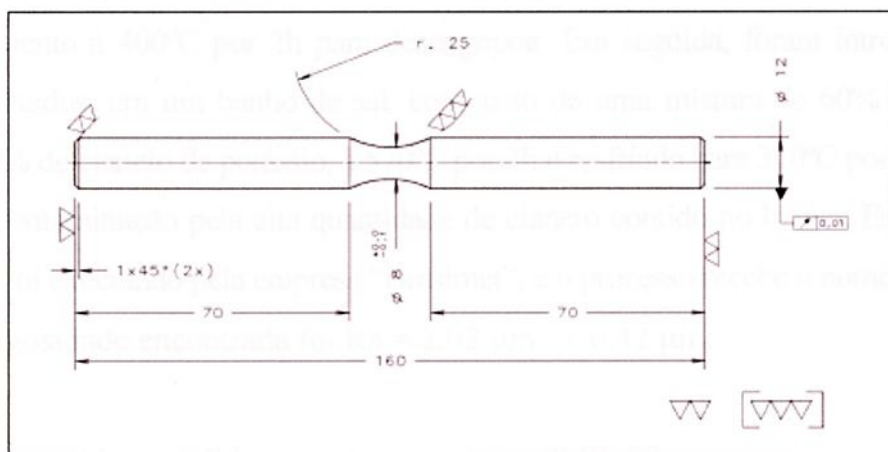


Figura 3.15 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de fadiga por flexão rotativa

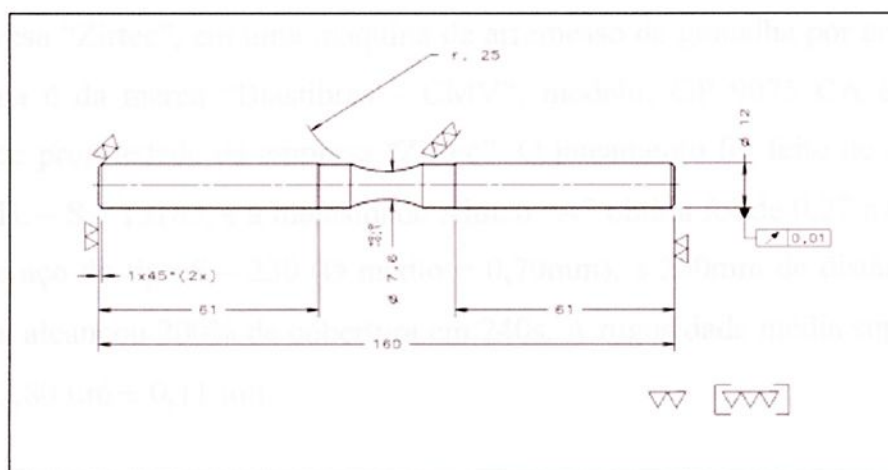


Figura 3.16 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de fadiga por flexão rotativa com concentrador - riscos de ferramenta de corte da usinagem

3.1.4 Tratamento superficial dos corpos de prova

3.1.4.1 Material base polido – “MB30”

Os corpos de prova após usinagem em torno CNC, foram lixados na região do raio de 25mm, com lixa # 600, resultando num polimento com rugosidade R_a de $1,40 \mu\text{m} \pm 0,28 \mu\text{m}$.

3.1.4.2 Material base polido e nitretação – “MN30”

Depois de polido com lixa # 600, os corpos de prova foram submetidos a um preaquecimento à 400°C por 2h para desengraxar. Em seguida, foram introduzidos, para serem nitretados, em um banho de sal, composto de uma mistura de 60% de cianeto de sódio e 40% de cianeto de potássio, à 570°C por 3h e resfriado para 320°C por 10min., a fim de evitar contaminação pela alta quantidade de cianeto contido no banho. Este trabalho de nitretação foi executado pela empresa “Brasimet”, e o processo recebe o nome de “Tenifer”.

A rugosidade encontrada foi $Ra = 2,02 \mu m \pm 0,42 \mu m$.

3.1.4.3 Material base polido com shot peening – “MS30”

Após o polimento com lixa # 600, o processo de shot peening foi executado, pela empresa “Zirtec”, em uma máquina de arremesso de granalha por ar comprimido. A máquina é da marca “Blastibrás – CMV”, modelo: GP 9075 CA e nº de série: 003049, de propriedade da empresa “Zirtec”. O jateamento foi feito de acordo com a norma MIL – S – 13165, e a intensidade Almen “A” obtida foi de 0,27 a 0,35mm, com esferas de aço do tipo S – 230 ($\varnothing$ médio = 0,70mm), a 250mm de distância do corpo de prova e alcançou 200% de cobertura em 240s. A rugosidade média superficial ficou em $Ra = 2,80 \mu m \pm 0,11 \mu m$.

3.1.4.4 Material base com concentrador – “MC30”

O concentrador de tensão foi feito através da reusinagem dos corpos de prova de material base, com diminuição do diâmetro de $\varnothing 8,0 [-0,1; +0,0]$ mm para $\varnothing 7,6 [-0,1; +0,0]$ mm, no raio de 25mm, usando os seguintes parâmetros no torno “CNC”:

- velocidade de corte	140,00 m/min
- avanço de ferramenta	0,25 mm/ rotação
- raio da ferramenta	0,80 mm

Com estes parâmetros de usinagem a rugosidade superficial ficou em $Ra=2,25 \mu m \pm 0,34 \mu m$.



3.1.4.5 Material base com concentrador e nitretação – “MCN30”

Após preparado o material base com concentrador, os corpos de prova foram submetidos ao tratamento de nitretação conforme o material base e nitretação, com as mesmas características de processo.

A rugosidade encontrada foi de $Ra=2,63 \mu m \pm 0,18 \mu m$.

3.1.4.6 Material base polido - “MB39”

O material utilizado foi o aço ABNT 4340, com dureza de 39HRC, que após usinagem em torno CNC, foi fixado na região do raio de 25mm, com lixa #600, resultando num polimento com rugosidade Ra de $2,75 \mu m$ (NASCIMENTO, 1999).

3.1.4.7 Material base polido e nitretação - “MN39”

Estes corpos de prova foram fabricados com material “Gerdau”, já citado anteriormente. Após usinagem em torno CNC, foram polidos com lixa #600. O tratamento superficial de nitretação foi executado pela “Brasimet”, exatamente como descrito em 3.1.4.2.

A rugosidade encontrada foi $Ra=2,06 \mu m \pm 0,20 \mu m$.

3.1.4.8 Material base polido com shot peening – “MS39”

O material foi tratado e ensaiado por Torres para uso na sua tese de doutorado. Estes dados de fadiga em flexão rotativa foram fornecidos gentilmente por ele, e serão apresentados na Tabela 4.8 (TORRES, 2002).

3.1.4.9 Material base com concentrador e nitretação – “MCN39”

Os corpos de prova foram fabricados com material “Gerdau”, já citado anteriormente. O concentrador de tensão foi feito conforme citado em 3.1.4.4 e a nitretação conforme 3.1.4.2.

A rugosidade encontrada foi $Ra= 2,34 \mu m \pm 0,24 \mu m$.



3.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

3.2.1 Ensaios mecânicos básicos

Os ensaios de tração foram realizados no Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT) da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP, conforme norma ASTM - 8M, para caracterizar as propriedades mecânicas do material, numa máquina de ensaio de tração marca: EMIC - Equipamentos Mecânicos para Indústrias e Construções Ltda, modelo: MEM - 10.000, n° série: 028, n° da ordem: 3221, equipada com célula de carga BTU 10K, n° de série: 280 e n° da ordem: 3222.

Os ensaios de dureza foram realizados na Maxion Componentes Estruturais Ltda - Cruzeiro, conforme norma ASTM E-18, em um durômetro marca: A.B-ALPHA-SUNDBYBERG-SWEDEN.

As microdurezas tiradas nos corpos de prova de material que recebeu nitretação, foram feitas pela “BRASIMET” - Campinas - S.P, conforme certificados anexos “A”, “B”, “C” e “D”.

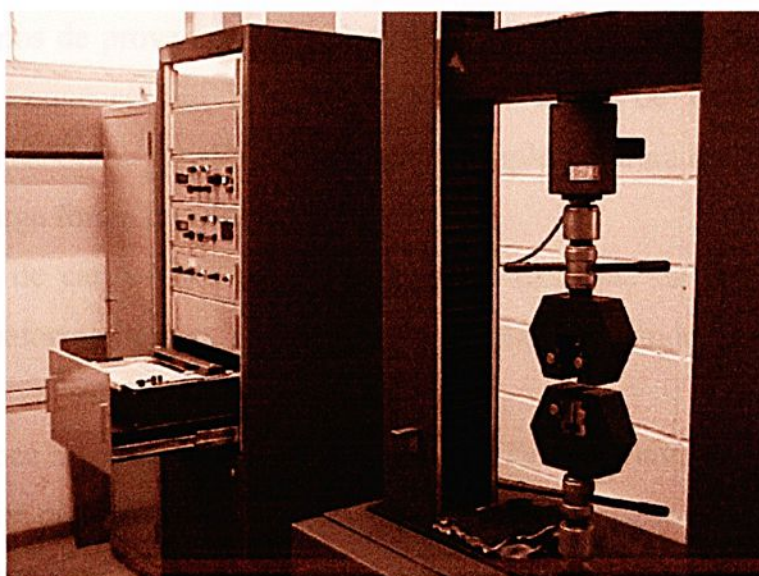


Figura 3.17 - Fotografia da máquina de ensaio de tração “EMIC”

3.2.2 Ensaio de fadiga

Os ensaios de fadiga, por flexão rotativa, foram realizados no “DMT - FEG - UNESP”, em uma máquina de fadiga marca “VEB WERKSTOFFPRÜFMACHINEN LEIPZIG”, modelo: UBM, nº fabricação/ série: 520/86/10, Ano 1988, mostrada na Figura 3.18.

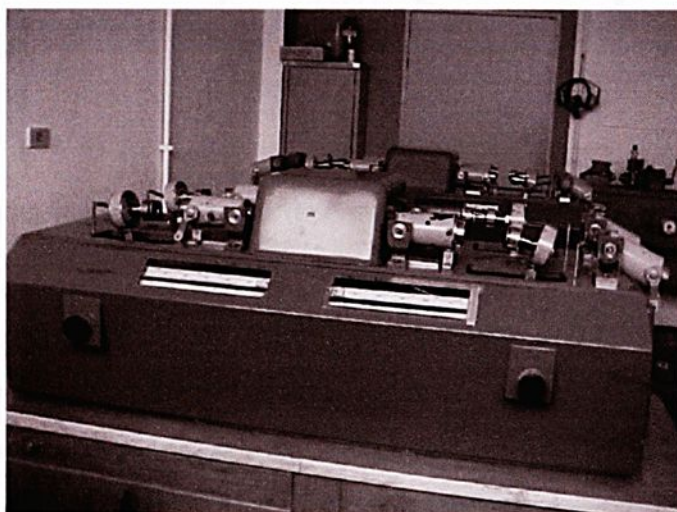


Figura 3.18 - Fotografia da máquina de ensaio de flexão rotativa

Todos os corpos de prova ensaiados à flexão rotativa, foram submetidos a uma carga senoidal a frequência de 50HZ (3000rpm) e razão de tensão $R = -1$, na temperatura ambiente. Como resistência à fadiga a completa fratura do corpo de prova ou 10^7 ciclos de carga foram considerados.

O valor total de carga a ser aplicada na escala existente na máquina para os corpos de prova conforme Figuras 3.15 e 3.16, e calculado seguindo as considerações a seguir:

A carga provoca no corpo de prova um momento fletor variável linearmente com as distância do ponto de aplicação da carga, o que gera uma distribuição triangular de momento. O esquema de aplicação da carga e o diagrama de momento fletor pode ser visto na Figura 3.19.

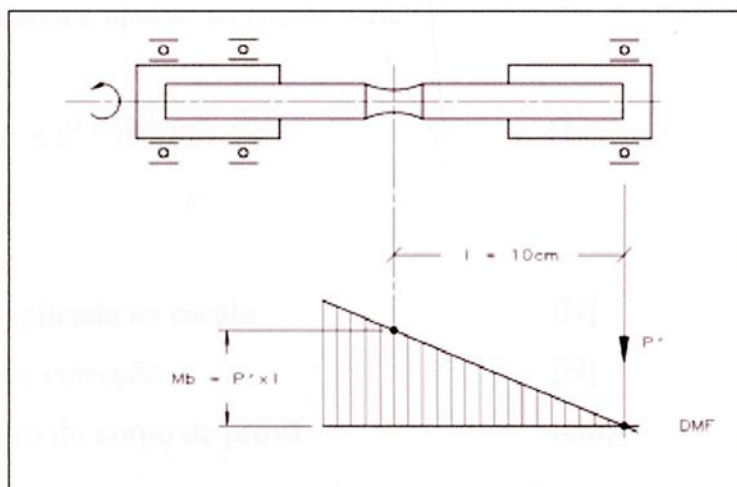


Figura 3.19 - Esquema de aplicação de carga e diagrama de momento fletor

Nota : A máquina foi projetada para ensaiar, à flexão rotativa, dois tipos de corpos de prova de dimensões diferentes, que no manual da máquina, é denominado tipo I e II. Para o corpo de prova do tipo I, carga aplicada em 4 pontos, com comprimento total de 226mm, não há necessidade de correção da carga aplicada versus carga lida na escala. Já, para o corpo de prova do tipo II, carga aplicada na extremidade, através de um mancal de rolamento, o fabricante da máquina recomenda uma carga a ser subtraída da carga lida na escala de $15,00\text{N} \pm 0,50\text{N}$. Para a máquina citada o valor desta carga de correção será de $c = 14,60\text{N}$.

Logo, o momento fletor M_b ficará:

$$P' = P - c \quad (21)$$

$$M_b = (P - c) \times 10 \quad [\text{N. cm}] \quad (22)$$

Tensão de flexão máxima, é dada por:

$$\sigma_{f. \text{máx.}} = (M_{f. \text{máx.}} / I) \cdot d / 2 = [M_{f. \text{máx.}} / (\pi / 64) \cdot d^4] \times d / 2 \quad (23)$$

$$\sigma_{f. \text{máx.}} = M_{f. \text{máx.}} \times 32 / \pi d^3 = 101,86 (P - c) / d^3 \quad [\text{N} / \text{cm}^2] \quad (24)$$

Donde a carga a ajustar na escala será:

$$P = (\sigma_{f. \text{ máx.}} \times d^3 / 101,86) + c \quad [N] \quad (25)$$

Onde:

P - carga aplicada na escala [N]

c - carga de correção [N]

d - diâmetro do corpo de prova [cm]

Se o diâmetro do corpo de prova for 0,8cm, como na Figura 3.13, temos:

$$P = \{ \sigma_{f. \text{ máx.}} \times (0,8)^3 / 101,86 \} + 14,60 \quad [N] \quad (26)$$

Casos, como o da Figura 3.16, onde o diâmetro do corpo de prova teve que ser alterado, para atender ao concentrador de tensão do tipo de risco de ferramenta de usinagem, o momento de inércia da seção teve que ser corrigido em função do novo diâmetro resultando em:

$$P = \{ \sigma_{f. \text{ máx.}} \times (0,76)^3 / 101,86 \} + 14,60 \quad [N] \quad (25)$$

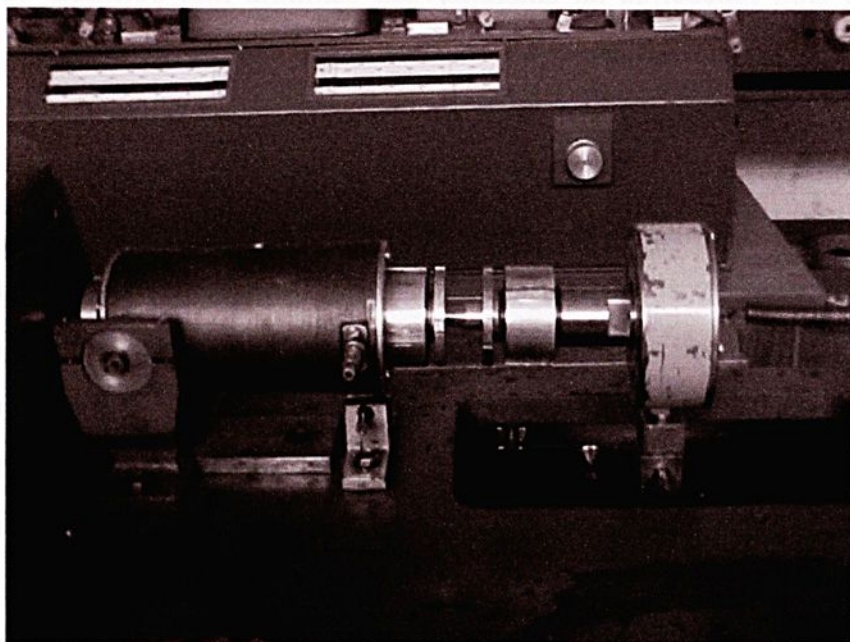


Figura 3.20 - Fotografia do corpo de prova montado na máquina de ensaio de flexão rotativa

Os corpos de prova por flexão rotativa, foram ensaiados na seqüência:

- A - Corpos de prova material base polido – “MB30”
- B - Corpos de prova material base polido e nitretação – “MN30”
- C - Corpos de prova material base com concentrador – “MC30”
- D - Corpos de prova material base polido com shot peening – “MS30”
- E - Corpos de prova material base com concentrador e nitretação – “MCN30”
- F - Corpos de prova material base polido e nitretação – “MN39”
- G - Corpos de prova material base com concentrador e nitretação – “MCN39”

3.2.3 Ensaio de tensão residual

3.2.3.1 Métodos de medição da tensão residual

A tensão residual pode ser determinada por um ou outro método, analítico ou por método experimental.

O método analítico tem algumas desvantagens na aplicação, pois não leva em conta dados importantes como: resistência e dados de transferências de calor do material em uma camada superficial transformada, ou a intensidade das fontes de calor; ou, as tensões residuais preditas são imprecisas. Face ao exposto, as tensões residuais são determinadas quase sempre pelo método experimental.

Este método experimental pode ser dividido em método destrutivo e não-destrutivo. No método destrutivo, as tensões residuais são derivadas das medições de deformação ocorridas após cortar e inspecionar as peças e componentes. Métodos experimentais não-destrutivos, são baseados na medição eletromagnética, ótica e outros fenômenos físicos no campo da tensão residual (ZAHAVI, 1996).

3.2.3.2 Medição de tensões residuais

As tensões residuais foram medidas pelo método de raio-x em um medidor portátil que é mostrado na Figura 3.21. O funcionamento deste equipamento denominado de Síntese, consiste no método de dupla exposição ao raio-x para determinação das tensões. As duas linhas de difração são registradas em filme.

As unidades de controle permitem monitoramento e ajuste do tubo de raio-x. O tubo utiliza dois anodos de cromo ($\lambda_{Cr} K_{\alpha} = 2.29092\text{\AA}$) para produção dos feixes de radiação monocromática. A tensão da fonte de raio-x é de 25kV e a corrente corresponde a 1,5mA. O tempo de exposição, no caso de medição de tensões residuais em aços, foi em torno de 10 minutos para cada ponto (TORRES, 2002).

Alguns corpos de prova foram ensaiados para medição da tensão residual, como segue:

- Material base polido – “MB30”
- Material base polido e nitretação – “MN30”
- Material base com concentrador – “MC30”
- Material base polido com shot peening – “MS30”
- Material base com concentrador e nitretação – “MCN30”
- Material base polido e nitretação – “MN39”
- Material base com concentrador e nitretação – “MCN39”





Figura 3.21 – Equipamento Síntese. 1) Fonte de alta tensão. 2) Tubo de raio-x. 3) Colimador. 4) Unidade de controle. 5) Amostra. (TORRES, 2002).

3.2.4 Análise de falha e microscopia

Os corpos de prova fraturados, tiveram a superfície de fratura analisada, geral e localizada, por um microscópio eletrônico de varredura, com o objetivo de encontrar a origem da trinca de fadiga e a causa provável.

Foram feitas, com a ajuda do microscópio eletrônico de varredura, várias fotografias mostrando a superfície fraturada.

Para efeito comparativo alguns corpos de prova foram cortados, antes ou após a fratura, bem como, partes da árvore foram também seccionadas, para serem preparadas como amostras a serem analisadas em microscópio óptico.

Todas estas amostras preparadas para análise em microscópio, tinham como objeto da análise, os aspectos que se seguem:

1. Análise da homogeneidade da interface da “camada branca” da nitretação em banho de sal;
2. Análise da falha da “camada branca” proveniente da nitretação em banho de sal;
3. Visualização da “camada branca” de nitretação e medição da sua espessura;
4. Investigação de pontos prováveis de nucleação das trincas por fadiga; e
5. Análise química qualitativa do material da inclusão.

4 RESULTADOS

4.1 ENSAIOS MECÂNICOS BÁSICOS

Os valores médios encontrados nos ensaios mecânicos básicos de tração e dureza, foram para o aço ABNT 4340 - 30HRc, como segue:

Limite de Escoamento	$\sigma_e = 756,0 \text{ MPa}$
Limite de Resistência à Tração	$\sigma_t = 931,6 \text{ MPa}$
Limite de Ruptura	$\sigma_r = 643,4 \text{ MPa}$
Alongamento Específico Percentual	$\epsilon\% = 18,7\%$
Estricção (Redução de Área)	$A\% = 56,75\%$
Dureza	30HRc

Estas propriedades estão dentro da faixa dada para este material após o tratamento térmico e atendem as exigências do projeto da árvore em estudo.

Para o aço ABNT 4340 - 39HRc, foram encontrados os seguintes valores: (NASCIMENTO, 1999):

Limite de Escoamento	$\sigma_e = 1118 \text{ MPa}$
Limite de Resistência à Tração	$\sigma_t = 1240 \text{ MPa}$
Alongamento Específico Percentual	$\epsilon\% = 14,9\%$
Dureza	39HRc

4.2 ENSAIOS DE FADIGA

A seguir apresentaremos os resultados obtidos nos ensaios de fadiga por flexão rotativa, nas Tabelas 4.1 a 4.9. As Tabelas referenciam os corpos de prova como segue:

Tabela 4.1 - Dados obtidos nos ensaios de fadiga por flexão rotativa para o material base polido – “MB30”

Nº	Nº do corpo de prova	Tensão aplicada		Carga “P” [N]	Nº de ciclos x 10 ³ até fratura	Observação
		σ [MPa]	%σ _e			
1	4H	637	84	335	24,1	
2	9D	637	84	335	26,5	feito “MEV”
3	2K	637	84	335	24,3	
4	1C	590	78	311	48,1	
5	7C	590	78	311	41,9	
6	10H	590	78	311	50,9	feito “MEV”
7	15D	590	78	311	48,7	
8	12H	542	72	287	98,9	feito “MEV”
9	10A	542	72	287	296,3	feito “MEV”
10	8H	542	72	287	105,5	
11	6E	488	65	260	107,9	feito “MEV”
12	11B	488	65	260	487,1	feito “MEV”
13	5K	488	65	260	354,1	
14	3E	438	58	235	2.038,2	feito “MEV”
15	3B	438	58	235	1.764,5	
16	3L	438	58	235	1.172,6	
17	1M	389	51	210	2.401,1	feito “MEV”
18	9E	389	51	210	12.805,4	“Runout”
19	8D	389	51	210	12.737,0	“Runout”

Tabela 4.2 - Dados obtidos nos ensaios de fadiga por flexão rotativa para o material base polido e nitretação – “MN30”

Nº	Nº do corpo de prova	Tensão aplicada		Carga “P” [N]	Nº de ciclos x 10 ³ até fratura	Observação
		σ [MPa]	% σ_e			
1	17B	807	107	420	35,5	
2	5D	807	107	420	59,4	feito “MEV”
3	6J	807	107	420	48,4	
4	10E	707	94	370	217,6	feito “MEV”
5	4K	707	94	370	392,7	feito “MEV”
6	11K	707	94	370	89,4	
7	2F	707	94	370	354,5	
8	4M	-----	----	----	----	Empenado na montagem
9	10G	637	84	335	754,7	
10	5G	637	84	335	525,4	feito “MEV”
11	2C	637	84	335	618,3	
12	4G	590	78	311	2.224,4	
13	4J	590	78	311	7.819,8	feito “MEV”
14	7M	590	78	311	2.063,1	
15	10B	568	75	300	10.000,1	“Runout”

Tabela 4.3 - Dados obtidos nos ensaios de fadiga por flexão rotativa para o material base com concentrador – “MC30”

Nº	Nº do corpo de prova	Tensão aplicada		Carga “P” [N]	Nº de ciclos x 10 ³ até fratura	Observação
		σ [MPa]	%σ _e			
1	5M	620	82	282	22,1	
2	3C	620	82	282	20,7	
3	3D	620	82	282	26,7	feito “MEV”
4	6D	542	72	248	58,6	feito “MEV”
5	7E	542	72	248	49,6	
6	5H	542	72	248	51,5	
7	7B	488	65	225	120,9	feito “MEV”
8	7K	488	65	225	105,7	
9	10L	488	65	225	92,9	
10	13D	388	51	182	240,4	
11	9A	388	51	182	315,3	feito “MEV”
12	13B	388	51	182	306,7	
13	9F	314	42	150	858,2	
14	4L	314	42	150	641,8	
15	7D	314	42	150	562,3	
16	13F	291	39	140	867,2	feito “MEV”
17	2B	268	35	130	5.761,4	feito “MEV”
18	3M	245	32	120	10.000,1	“Runout”

Tabela 4.4 - Dados obtidos nos ensaios de fadiga por flexão rotativa para o material base polido com shot peening – “MS30”

Nº	Nº do corpo de prova	Tensão aplicada		Carga “P” [N]	Nº de ciclos x 10 ³ até fratura	Observação
		σ [MPa]	% σ_e			
1	2E	807	107	420	2,1	
2	13J	727	96	380	5,6	
3	6A	677	90	355	21,1	feito “MEV”
4	2M	677	90	355	9,9	
5	7H	677	90	355	14,8	
6	9B	637	84	335	19,2	feito “MEV”
7	11J	637	84	335	12,7	
8	2L	568	75	300	56,6	
9	1A	568	75	300	83,7	feito “MEV”
10	12K	568	75	300	51,1	
11	6C	568	75	300	62,3	
12	5A	508	67	270	238,5	
13	4A	508	67	270	572,2	feito “MEV”
14	8L	508	67	270	138,3	
15	4F	448	59	240	1.907,5	feito “MEV”
16	15L	448	59	240	1.413,4	
17	9K	448	59	240	1.423,5	
18	8C	408	54	220	10.000,1	“Runout”
	9J	----	----	----	-----	

Tabela 4.5 - Dados obtidos nos ensaios de fadiga por flexão rotativa para o material base com concentrador e nitretação – “MCN30”

Nº	Nº do corpo de prova	Tensão aplicada		Carga “P” [N]	Nº de ciclos x 10 ³ até fratura	Observação
		σ [MPa]	% σ_e			
1	11H	807	107	362	29,2	feito “MEV”
2	6H	807	107	362	19,9	
3	10J	807	107	362	19,3	
4	1K	755	100	340	3,7	feito “MEV”
5	14H	755	100	340	71,1	feito “MEV”
6	11F	755	100	340	68,2	
7	4B	716	95	323	95,7	feito “MEV”
8	8A	716	95	323	4.394,1	“Runout”
9	10A	716	95	323	824,2	feito “MEV”
10	14D	716	95	323	270,7	
11	2A	716	95	323	1.806,1	feito “MEV”
12	11L	667	88	302	1.270,3	feito “MEV”
13	14L	667	88	302	559,1	feito “MEV”
14	8K	620	82	282	1.321,2	feito “MEV”
15	3G	620	82	282	3.476,5	feito “MEV”
16	1E	620	82	282	10000,1	“Runout”
17	13G	620	82	282	6.151,1	feito “MEV”
18	3K	----	----	----	----	Cortado para análise da camada nitretada

Tabela 4.6 - Dados obtidos nos ensaios de fadiga por flexão rotativa para o material base polido - “MB39”

Nº	Nº do corpo de prova	Tensão aplicada		Carga “P” [N]	Nº de ciclos x 10 ³ até fratura	Observação
		σ [MPa]	%σ _e			
1	24	950	85	490	10,3	
2	14	950	85	490	10,7	
3	34	871	78	450	39,8	
4	08	871	78	450	24,4	
5	38	871	78	450	19,1	
6	02	671	60	350	213,4	
7	11	671	60	350	146,6	
8	26	671	60	350	229,3	
9	32	643	57.5	336	352,4	
10	35	643	57.5	336	641,6	
11	33	643	57.5	336	618,4	
12	09	643	57.5	336	4.719,5	
13	12	615	55	322	866,2	

Tabela 4.7 - Dados obtidos nos ensaios de fadiga por flexão rotativa para o material base polido e nitretação - “MN39”

Nº	Nº do corpo de prova	Tensão aplicada		Carga “P” [N]	Nº de ciclos x 10 ³ até fratura	Observação
		σ [MPa]	%σ _e			
1	36	1.045	94	540	4,9	
2	26	1.045	94	540	5,4	feito “MEV”
3	23	950	85	492	41,3	feito “MEV”
4	37	950	85	492	20,8	
5	16	950	85	492	21,6	
6	17	871	78	452	143,2	
7	01	871	78	452	115,4	
8	18	871	78	452	76,7	feito “MEV”
9	14	767	69	400	1.236,4	
10	35	767	69	400	1.521,8	feito “MEV”
11	02	737	66	385	9.038,5	“Runout”
12	22	737	66	385	408,8	feito “MEV”
13	27	737	66	385	337,8	feito “MEV”
14	32	737	66	385	3.665,1	feito “MEV”
15	05	737	66	385	10.016,2	“Runout”

Tabela 4.8 - Dados obtidos nos ensaios de fadiga por flexão rotativa para o material base polido com shot peening - “MS39” (TORRES, 2002)

Nº	Nº do corpo de prova	Tensão aplicada		Carga “P” [N]	Nº de ciclos x 10 ³ até fratura	Observação
		σ [MPa]	%σ _e			
1	A	946	85	490	12,7	
2	B	866	77	450	23,2	
3	C	747	67	390	70,9	
4	D	707	63	370	64,3	
5	E	667	60	350	186,8	
6	F	647	58	340	315,9	

Tabela 4.9 - Dados obtidos nos ensaios de fadiga por flexão rotativa para o material base com concentrador e nitretação - “MCN39”

Nº	Nº do corpo de prova	Tensão aplicada		Carga “P” [N]	Nº de ciclos x 10 ³ até fratura	Observação
		σ [MPa]	%σ _e			
1	07	1015	91	452	8,7	Feito “MEV”
2	20	1015	91	452	7,4	
3	34	950	85	424	10,9	
4	08	950	85	424	24,1	Feito “MEV”
5	29	950	85	424	21,1	
6	10	895	80	400	69,3	Feito “MEV”
7	24	895	80	400	58,1	
8	04	870	78	390	57,3	
9	13	870	78	390	103,6	
10	33	870	78	390	140,2	Feito “MEV”
11	17	778	70	350	681,7	Feito “MEV”
12	15	778	70	350	15.238,5	
13	12	778	70	350	307,8	Feito “MEV”
14	09	756	68	340	6.119,2	Feito “MEV”
15	38	756	68	340	10.161,5	“Runout”

As curvas σ - N para cada condição de material e tratamento, estão representadas nas Figuras 4.1 a 4.11

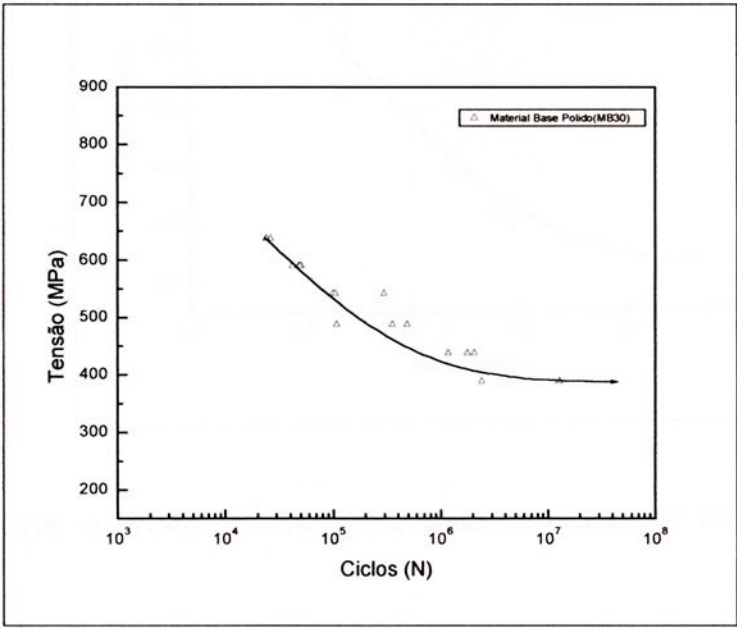


Figura 4.1 - Curva σ - N do material base polido em flexão rotativa – “MB30”

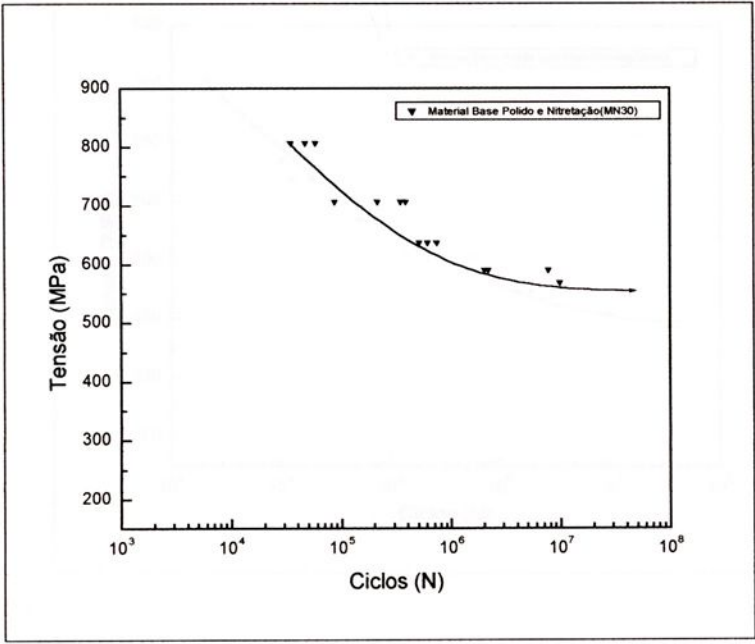


Figura 4.2 - Curva σ - N do material base polido e nitretação em flexão rotativa – “MN30”

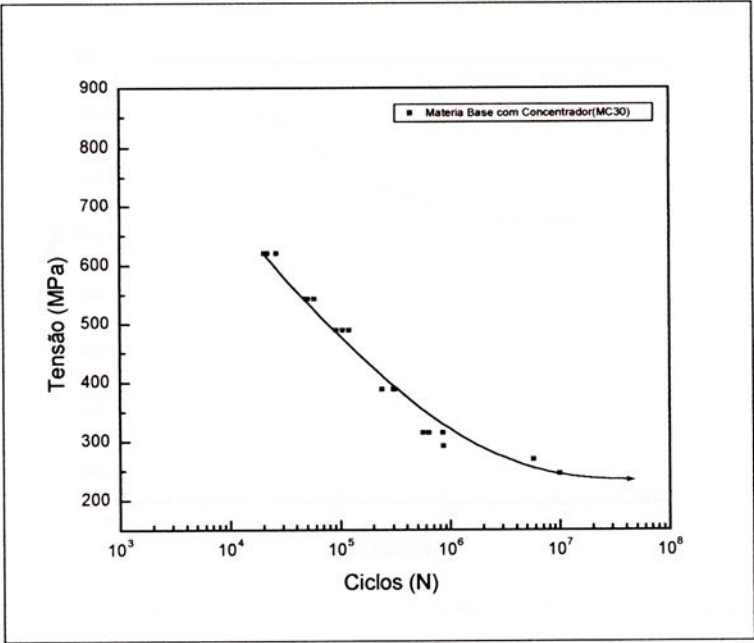


Figura 4.3 – Curva σ - N do material base com concentrador em flexão rotativa– “MC30”

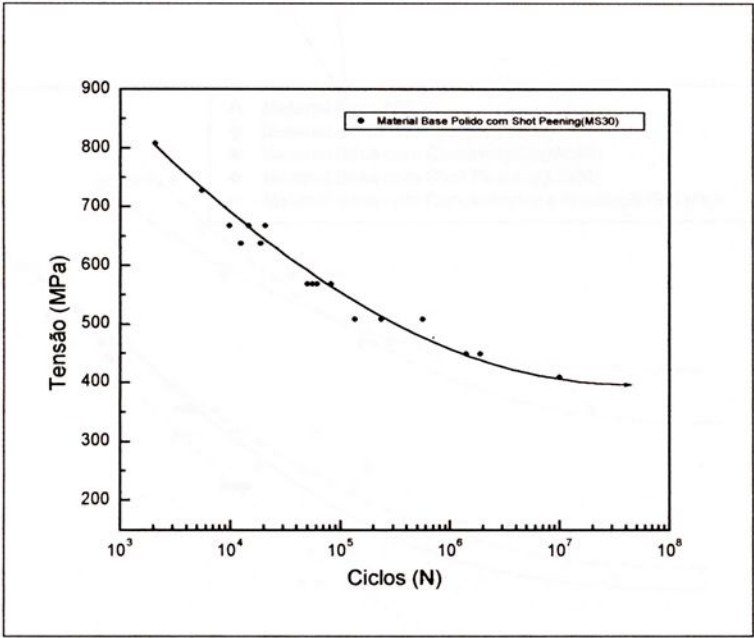


Figura 4.4 - Curva σ - N do material base polido com shot peening em flexão rotativa - “MS30”

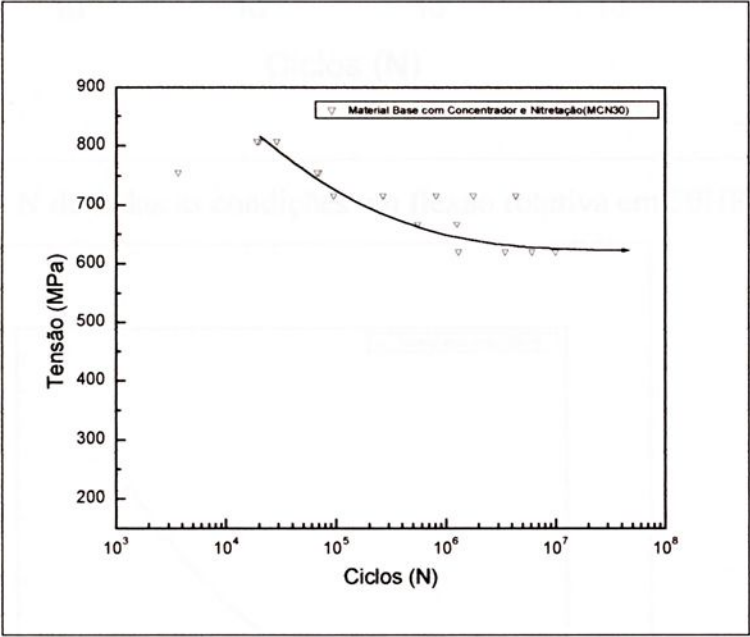


Figura 4.5 - Curva σ - N do material base com concentrador e nitretação em flexão rotativa – “MCN30”

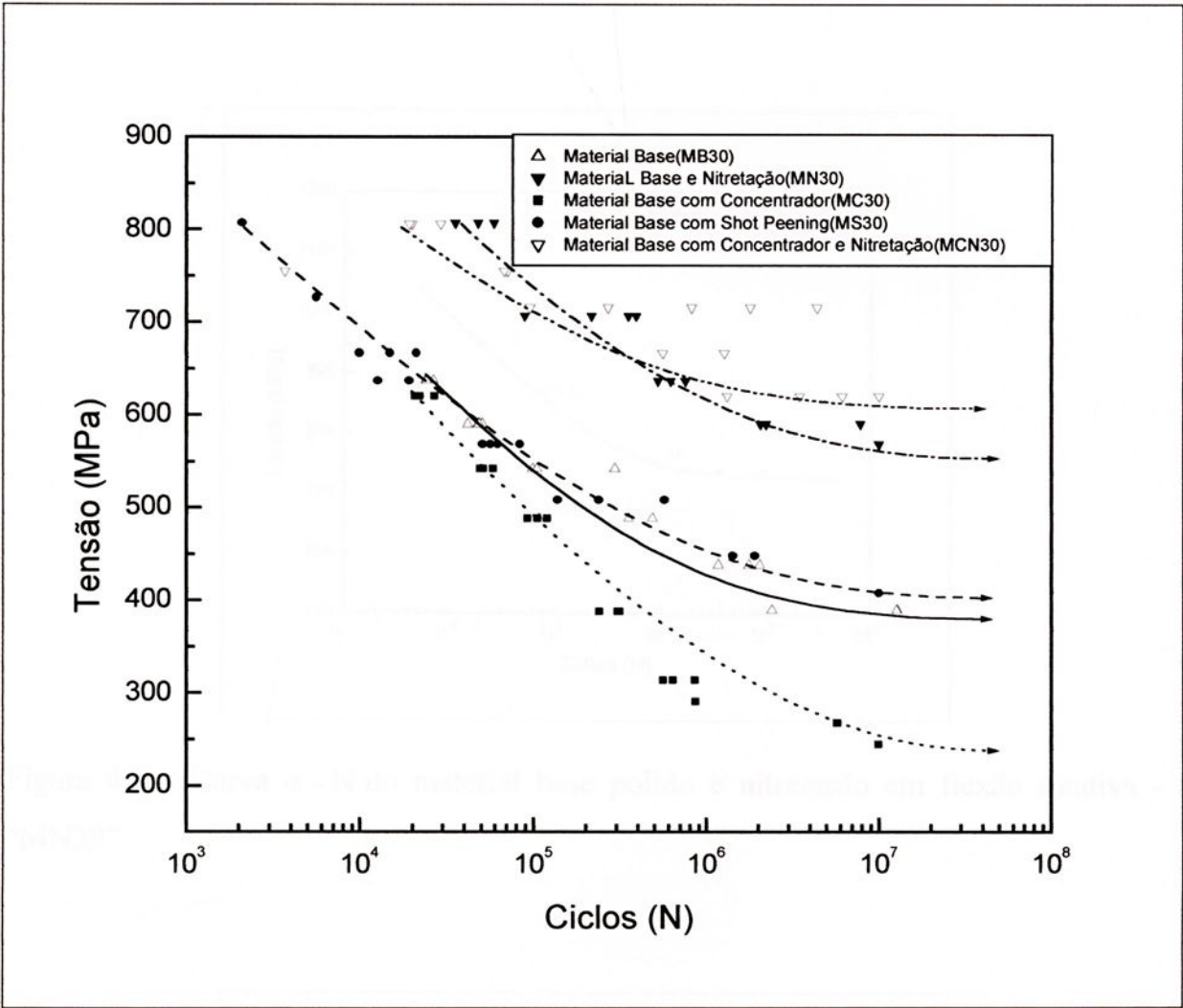


Figura 4.6 - Curva σ - N de todas as condições em flexão rotativa em 30HRc

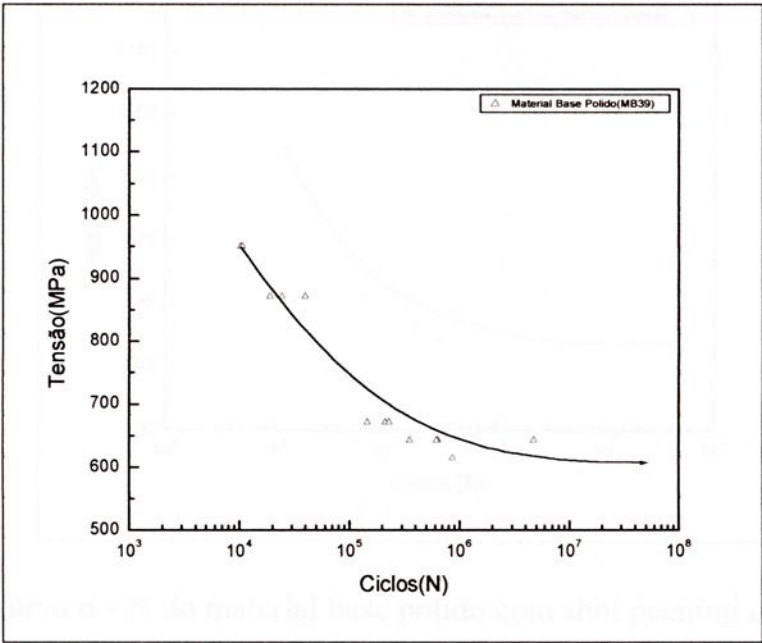


Figura 4.7 - Curva σ - N do material base polido em flexão rotativa - “MB39”

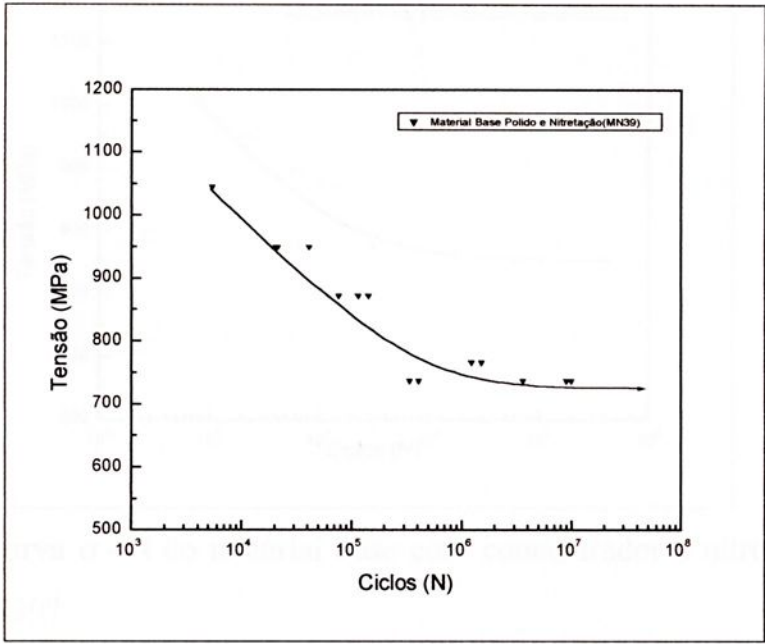


Figura 4.8 - Curva σ - N do material base polido e nitretação em flexão rotativa - “MN39”

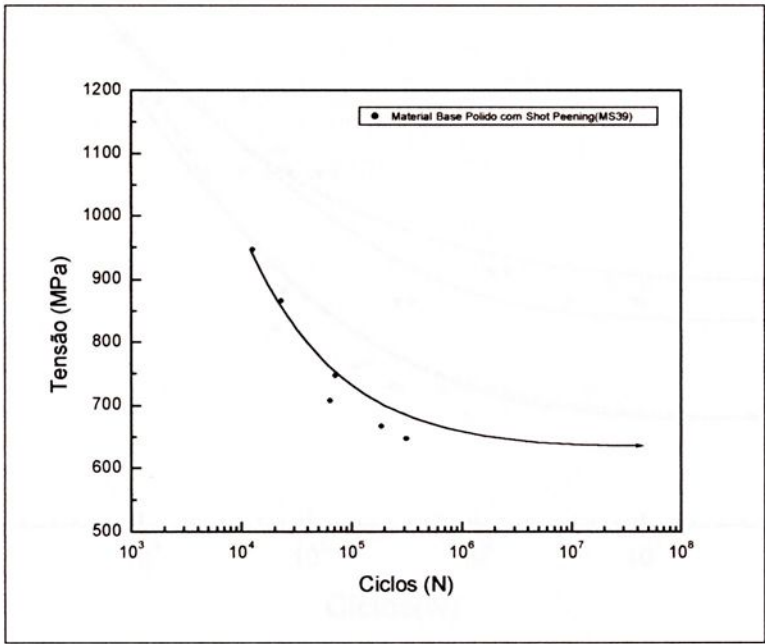


Figura 4.9 - Curva σ - N do material base polido com shot peening em flexão rotativa - “MS39”

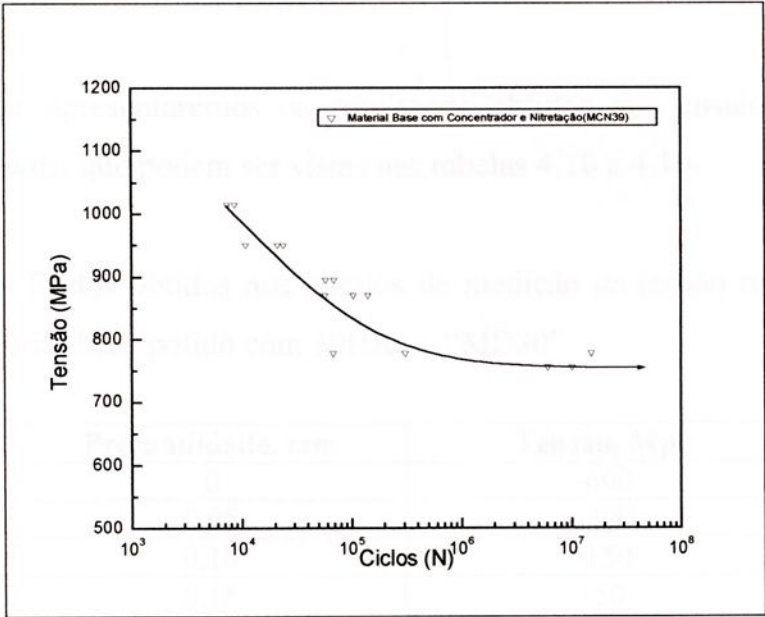


Figura 4.10 - Curva σ - N do material base com concentrador e nitretação em flexão rotativa - “MCN39”

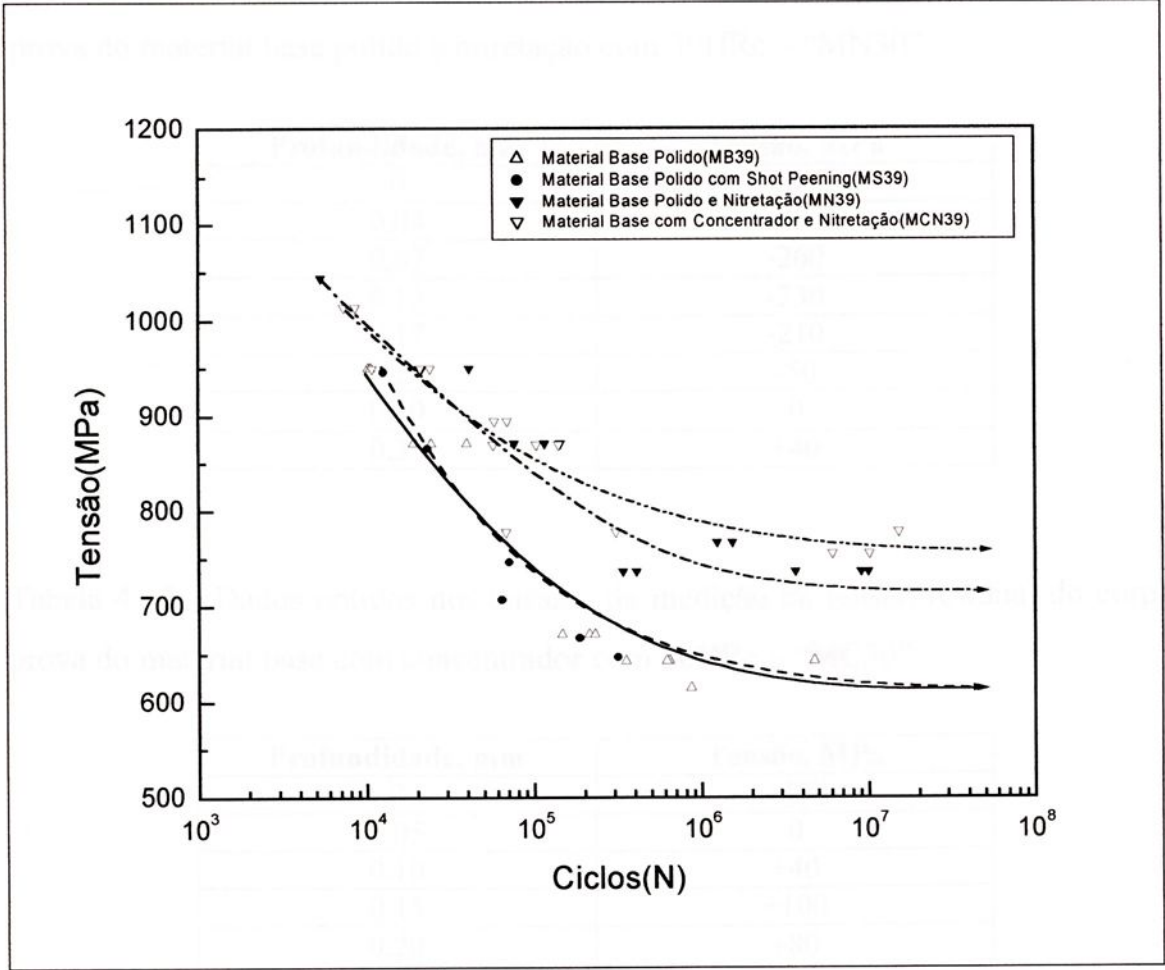


Figura 4.11 - Curva σ - N de todas as condições em flexão rotativa com dureza de 39HRc

4.3 MEDIÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS

A seguir apresentaremos os resultados obtidos nos ensaios de medição das *tensões residuais*, que podem ser vistas nas tabelas 4.10 a 4.16.

Tabela 4.10 - Dados obtidos nos ensaios de medição da tensão residual do corpo de prova do material base polido com 30HRc – “MB30”

Profundidade, mm	Tensão, Mpa
0	-600
0.05	-490
0.10	-150
0.15	-50

Tabela 4.11 - Dados obtidos nos ensaios de medição da tensão residual do corpo de prova do material base polido e nitretação com 30HRc – “MN30”

Profundidade, mm	Tensão, MPa
0	-310
0.04	-290
0.07	-260
0.12	-230
0.17	-210
0.24	-50
0.30	0
0.35	+40

Tabela 4.12 - Dados obtidos nos ensaios de medição da tensão residual do corpo de prova do material base com concentrador com 30HRc – “MC30”

Profundidade, mm	Tensão, MPa
0	+500
0.05	0
0.10	+40
0.15	+100
0.20	+80

Tabela 4.13 - Dados obtidos nos ensaios de medição da tensão residual do corpo de prova do material base polido com shot peening com 30HRc – “MS30”

Profundidade, mm	Tensão, MPa
0	-390
0.05	-420
0.10	-460
0.16	-350
0.24	-290
0.31	-90
0.37	0
0.43	+30
0.50	+70

Tabela 4.14 - Dados obtidos nos ensaios de medição da tensão residual do corpo de prova do material base com concentrador e nitretação com 30HRc – “MCN30”

Profundidade, mm	Tensão, MPa
0	-360
0.05	-290
0.10	-320
0.16	-350
0.21	-290
0.28	-200
0.36	-110

Tabela 4.15 - Dados obtidos nos ensaios de medição da tensão residual do corpo de prova do material base polido e nitretação com 39HRc – “MN39”

Profundidade, mm	Tensão, MPa
0	-260
0.05	-270
0.10	-200
0.16	-210
0.20	-170
0.25	-120
0.30	-70
0.35	-50

Tabela 4.16 - Dados obtidos nos ensaios de medição da tensão residual do corpo de prova do material base com concentrador e nitretação com 39HRc – “MCN39”

Profundidade, mm	Tensão, MPa
0	-230
0,05	-320
0,10	-260
0,14	-240
0,21	-160
0,28	-100
0,35	-40

As curvas da *profundidade versus tensão residual* para cada condição de material e tratamento, estão representadas nas figuras 4.12 a 4.18.

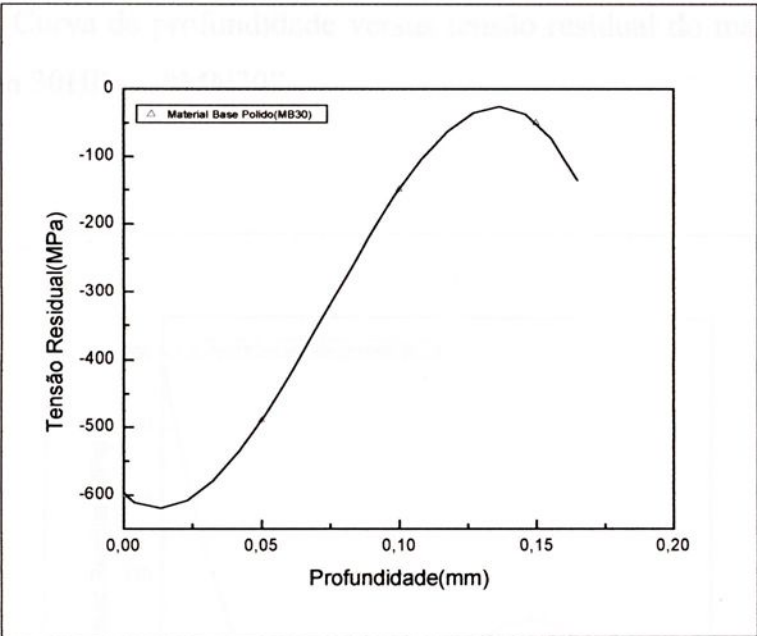


Figura 4.12 - Curva de profundidade versus tensão residual do material base polido com 30HRc - “MB30”

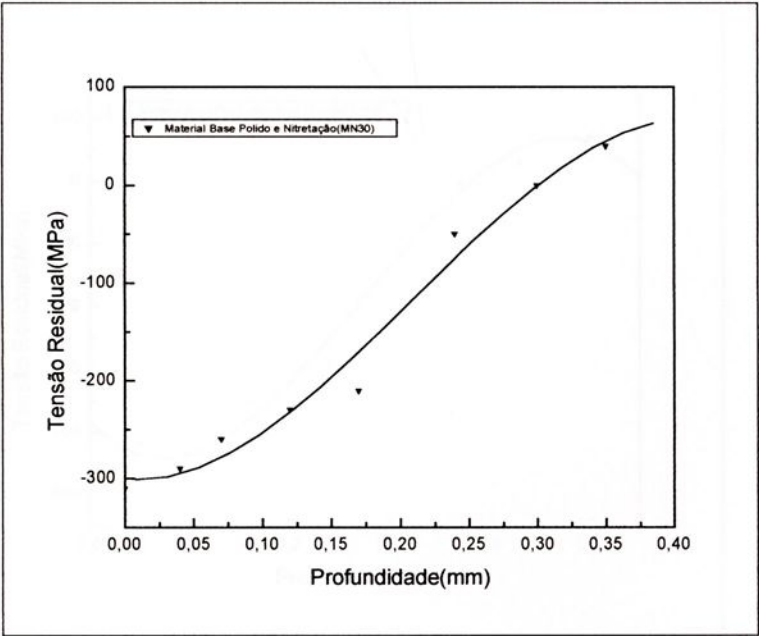


Figura 4.13 - Curva de profundidade versus tensão residual do material base polido e nitretação com 30HRc – “MN30”

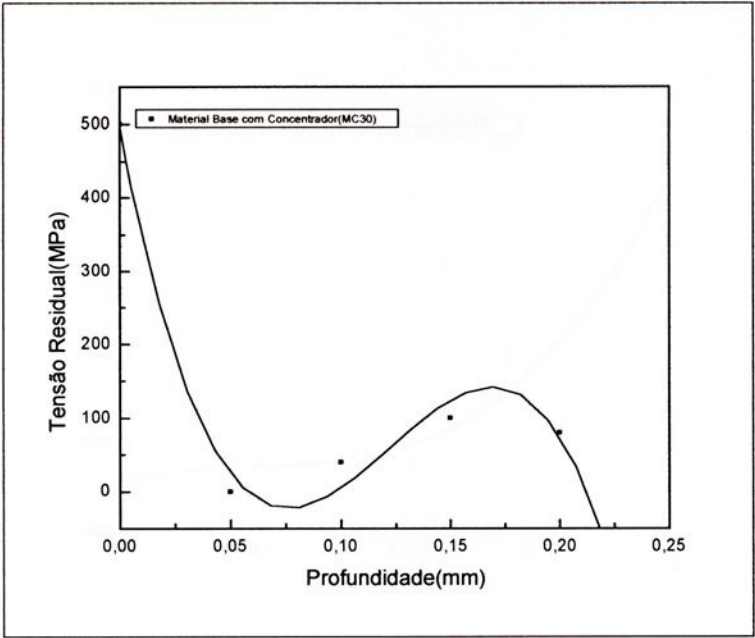


Figura 4.14 - Curva de profundidade versus tensão residual do material base com concentrador com 30HRc – “MC30”

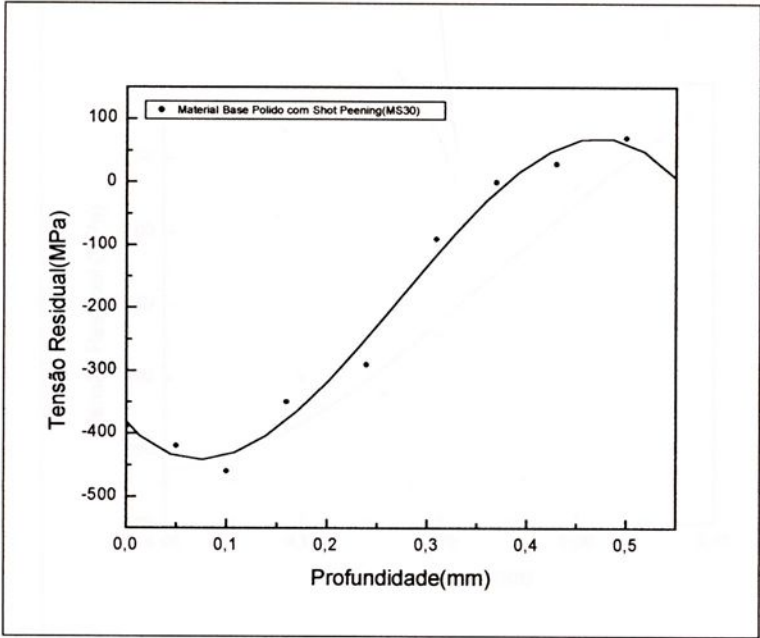


Figura 4.15 - Curva de profundidade versus tensão residual do material base polido com shot peening com 30HRc – “MS30”

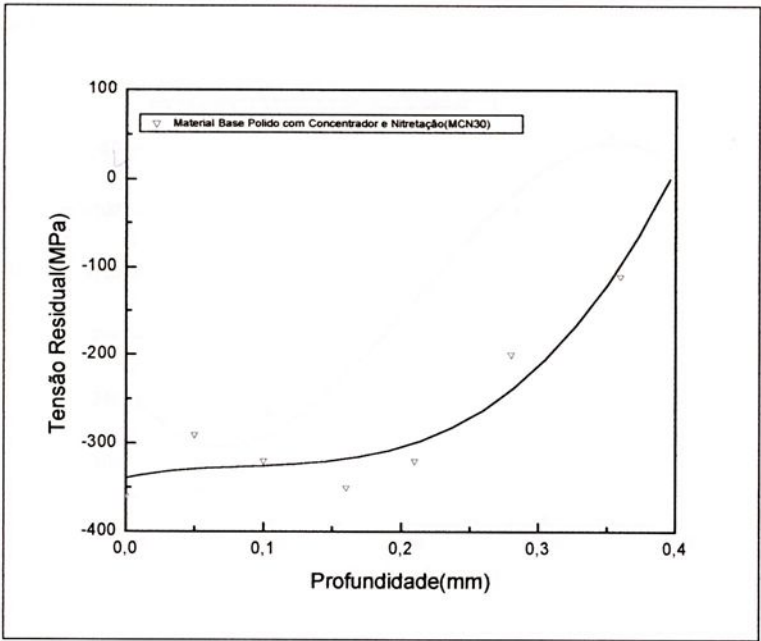


Figura 4.16 – Curva da profundidade versus tensão residual do material base com concentrador e nitretação com 30 HRc – “MCN30”

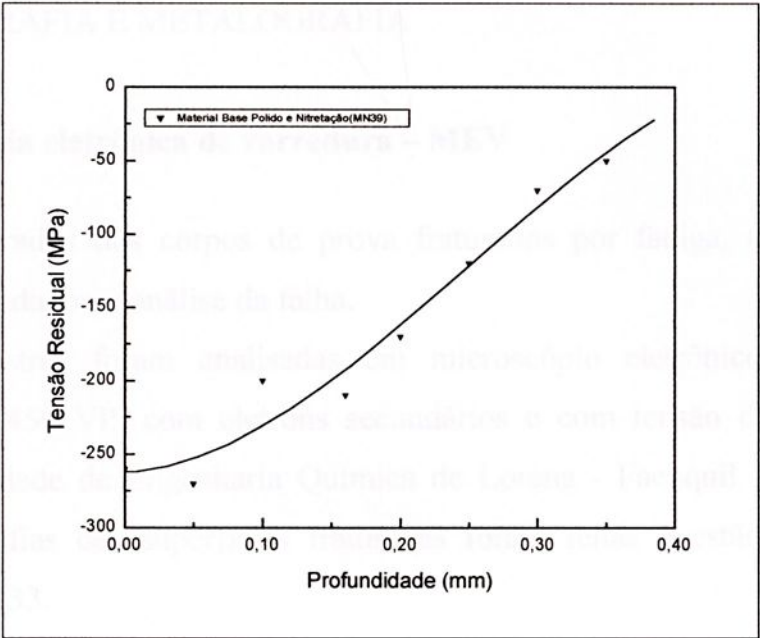


Figura 4.17 - Curva de profundidade versus tensão residual do material base polido e nitretação com 39HRc – “MN39”

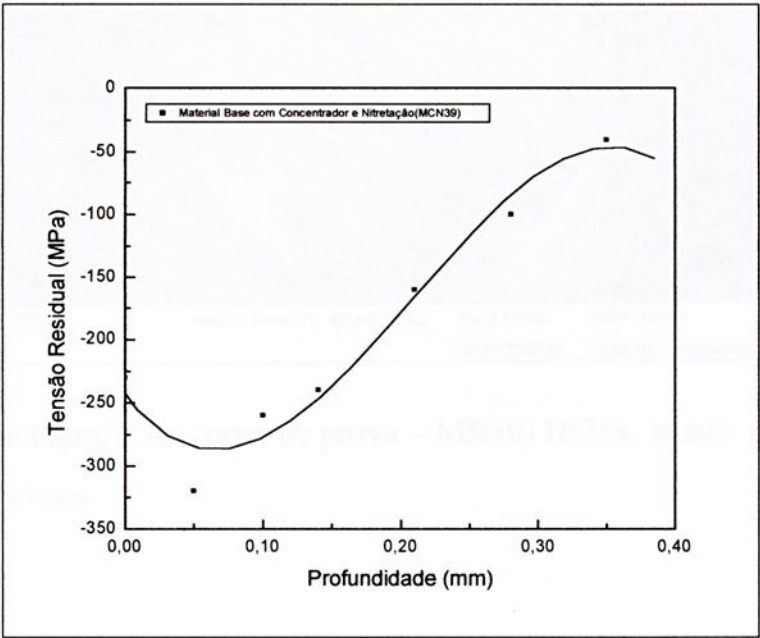


Figura 4.18 - Curva de profundidade versus tensão residual do material base com concentrador e nitretação com 39HRc – “MCN39”

4.4 FRACTOGRAFIA E METALOGRAFIA

4.4.1 Microscopia eletrônica de varredura – MEV

Foram retirados dos corpos de prova fraturados por fadiga, uma amostra da superfície fraturada, para análise da falha.

Estas amostras foram analisadas em microscópio eletrônico de varredura, modelo: LEO 1450 VP, com eletrons secundários e com tensão de aceleração de 20kV, da Faculdade de Engenharia Química de Lorena - Faenquil - Demar e, uma série de fotografias das superfícies fraturadas foram feitas e estão mostradas nas Figuras 4.19 a 4.33.

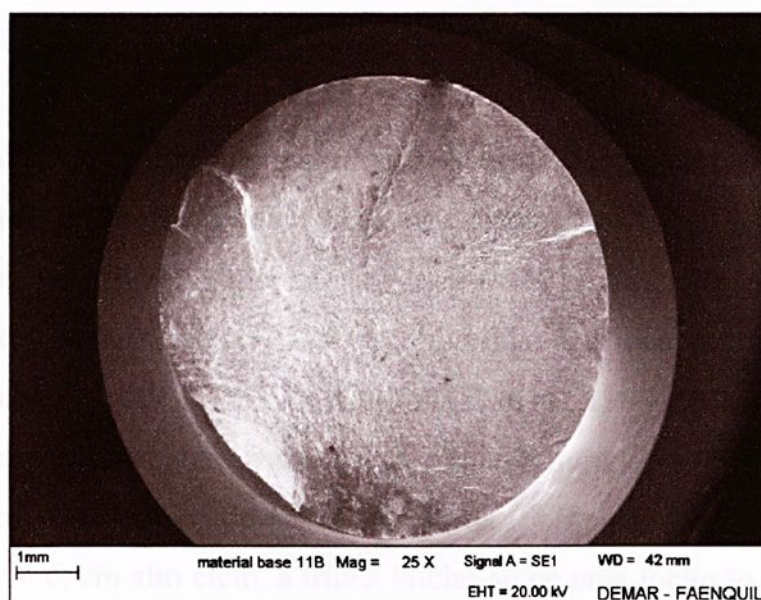


Figura 4.19 - Fractografia do corpo de prova – MB3011B25x, tensão de 65% $\sigma_e = 488$ MPa e 487.100 ciclos

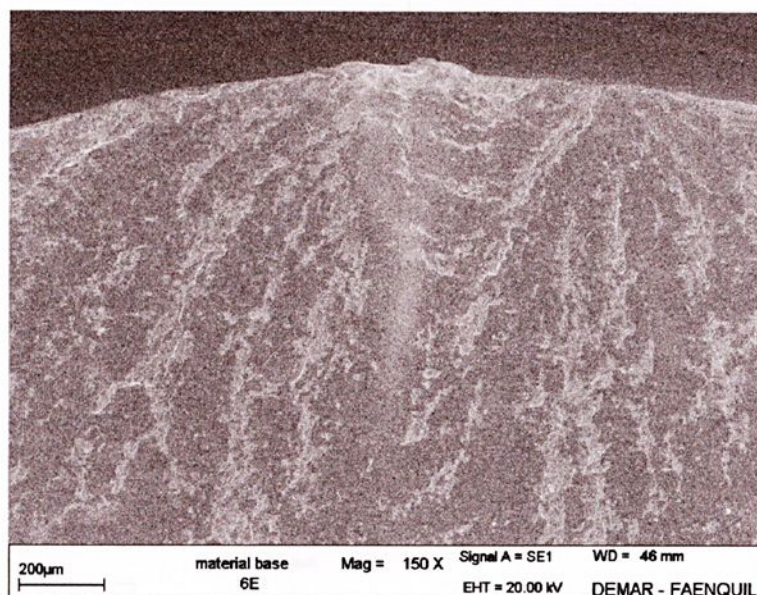


Figura 4.20 - Fractografia do corpo de prova – MB306E150x, tensão de 65% $\sigma_e = 488$ MPa e 107.900 ciclos

As Figuras 4.19 e 4.20, que mostram as superfícies de fratura do material base polido, e revelam aspectos característicos de fratura por fadiga, com nucleação de trinca na superfície e propagação para o interior do material. É conhecido que as trincas por fadiga usualmente iniciam da superfície lisa dos corpos de prova, em ambos os ciclos baixo e alto (ASM; VOORWALD et al., 1986, 1994).

As Figuras 4.21 a 4.23 mostram as superfícies fraturadas do material base polido e nitretação. Todos os corpos de prova nitretados e ensaiados, apresentam a mesma característica, que é, em alto ciclo, a trinca iniciar-se de uma inclusão. Na Figura 4.21, vê-se as trincas saindo de um único ponto e se propagando radialmente do mesmo. Na Figura 4.22 e 4.23 são vistas as trincas saindo da inclusão e formando uma Figura denominada “olho de peixe”. Estas inclusões foram analisadas quimicamente por “EDS” e indicou o Al e O como seus principais elementos.

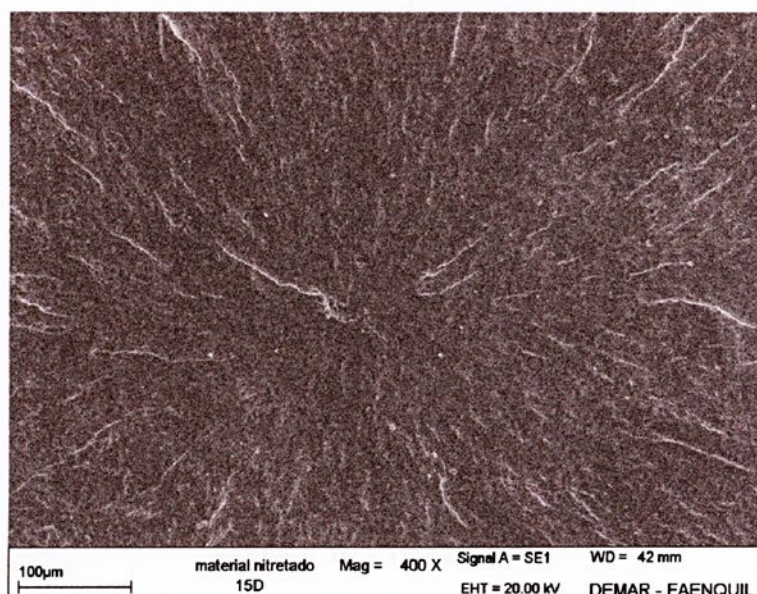


Figura 4.21 - Fractografia do corpo de prova – MN3015D400x, tensão de 107% $\sigma_e = 807$ MPa e 59.400 ciclos

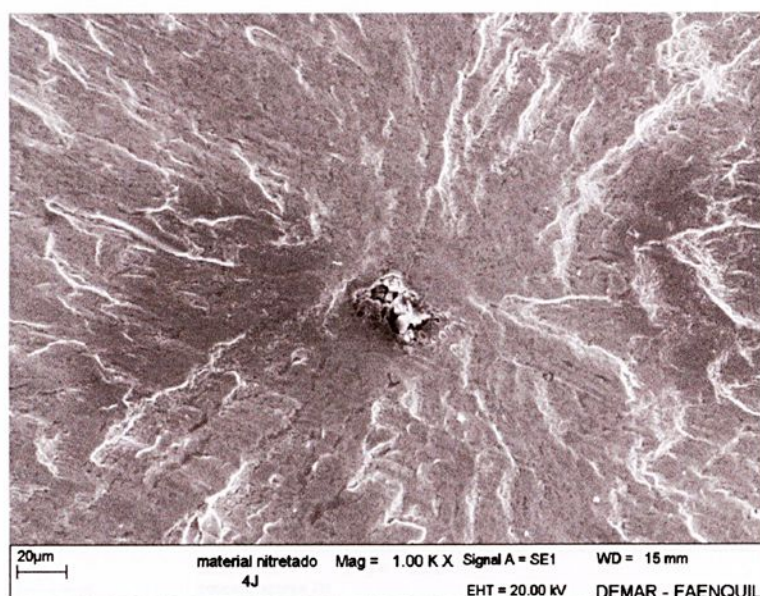


Figura 4.22 – Fractografia do corpo de prova – MN304J100x, tensão de 78% $\sigma_e = 590$ MPa e 7.819.800 ciclos

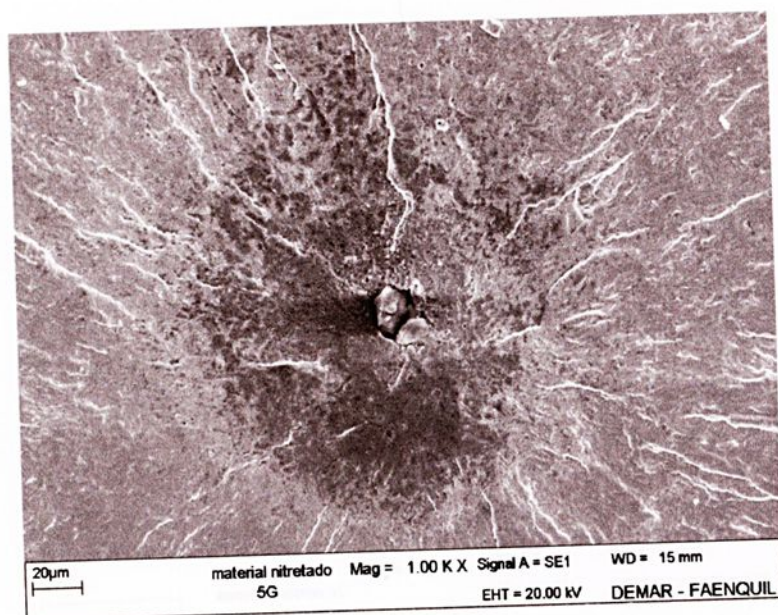


Figura 4.23 - Fractografia do corpo de prova – MN305G100x, tensão de 84% $\sigma_e = 637$ MPa e 525.400 ciclos

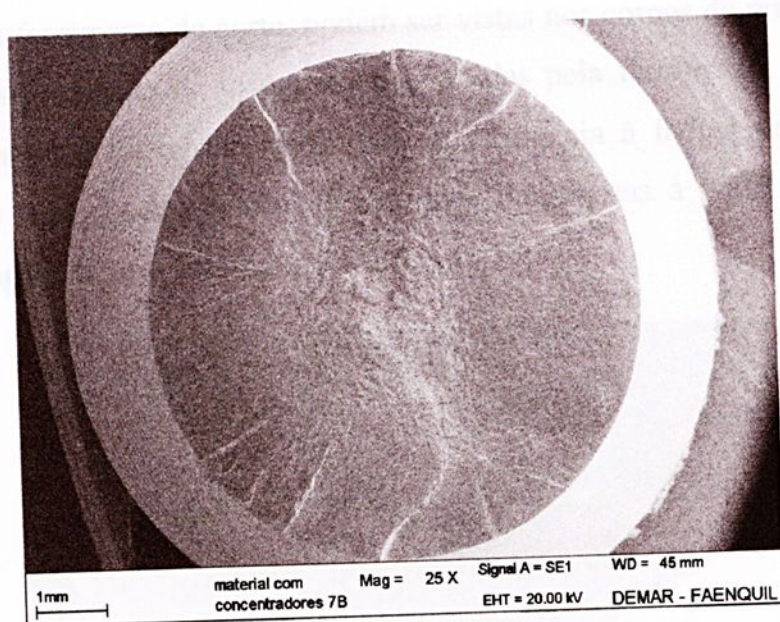


Figura 4.24 - Fractografia do corpo de prova – MC307B25x, tensão de 65% $\sigma_e = 488$ MPa e 120.900 ciclos

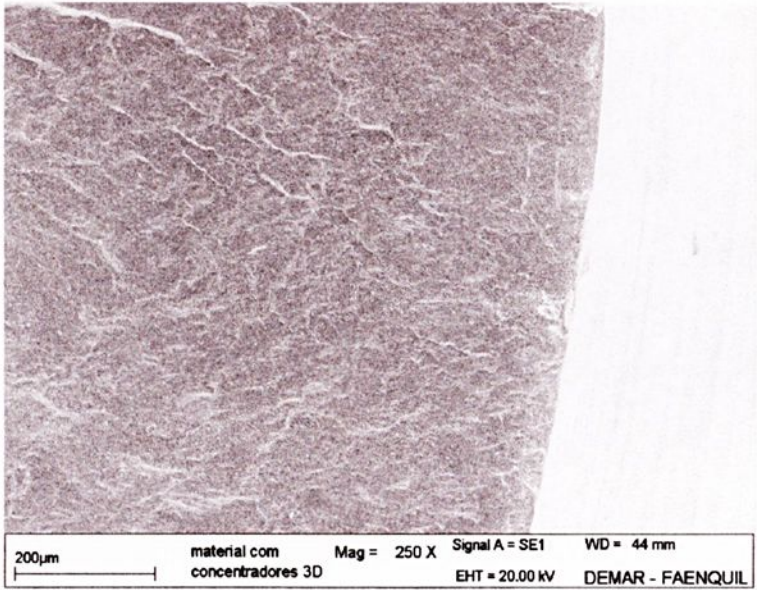


Figura 4.25 - Fractografia do corpo de prova – MC303D250x, tensão de 82% $\sigma_e = 620$ MPa e 26.700 ciclos

Marcas da ferramenta de corte, podem ser vistas nos corpos de prova das Figuras 4.24 e 4.25. Estas marcas de usinagem, provocadas pela ferramenta de corte, agem como concentradores de tensão, reduzindo a resistência à fadiga do material. Nas Figuras 4.24 e 4.25, pode ser visto a iniciação das trincas à partir das marcas de usinagem na região central reduzida ($R = 25\text{mm}$).

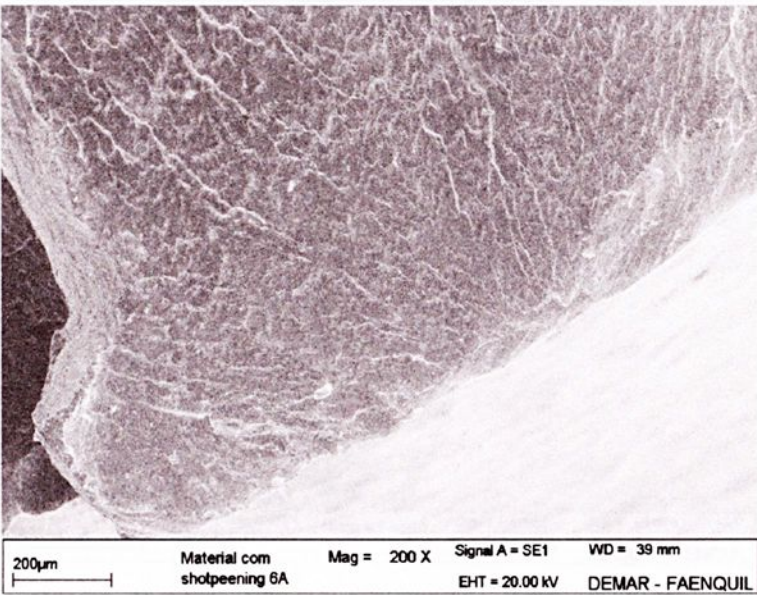


Figura 4.26 - Fractografia do corpo de prova – MS306A200x, tensão de 90% $\sigma_e = 677$ MPa e 21.100 ciclos

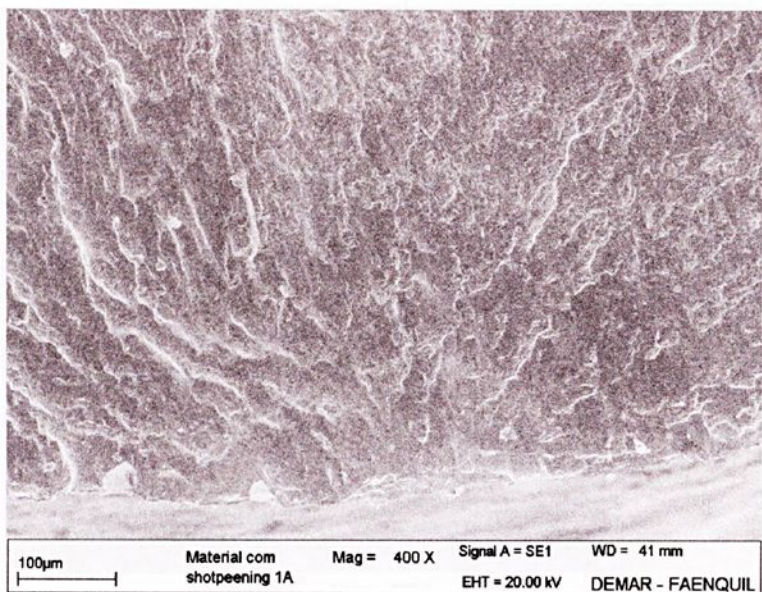


Figura 4.27 - Fractografia do corpo de prova – MS301A400x, tensão de 75% $\sigma_e = 568$ MPa e 83.700 ciclos

As Figuras 4.26 e 4.27 mostram a superfície fraturada dos corpos de prova do material base polido com shot peening. As trincas nuclearam da superfície livre com shot peening para o interior do material. Não houve nucleação de trinca subsuperficial como era de se esperar, em nenhum dos corpos de prova com shot peening.

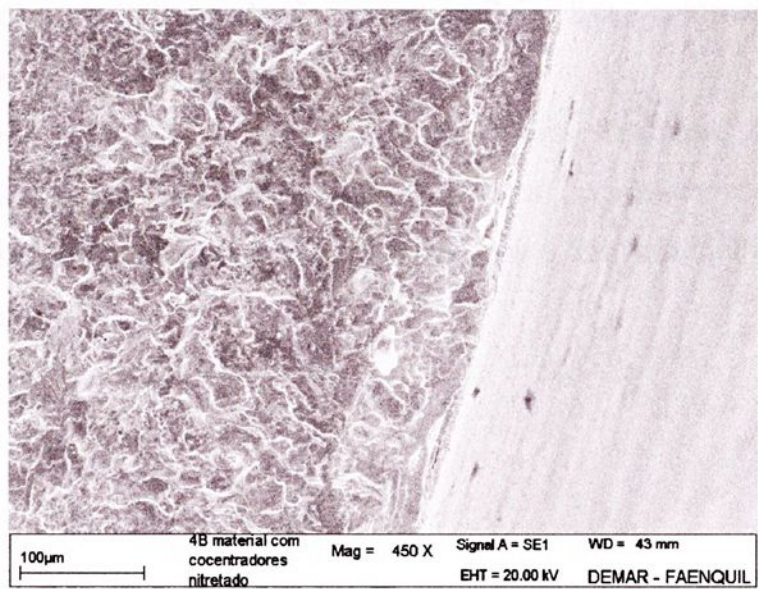


Figura 4.28 - Fractografia do corpo de prova – MCN304B450x, tensão de 95% $\sigma_e = 716$ MPa e 95.700 ciclos

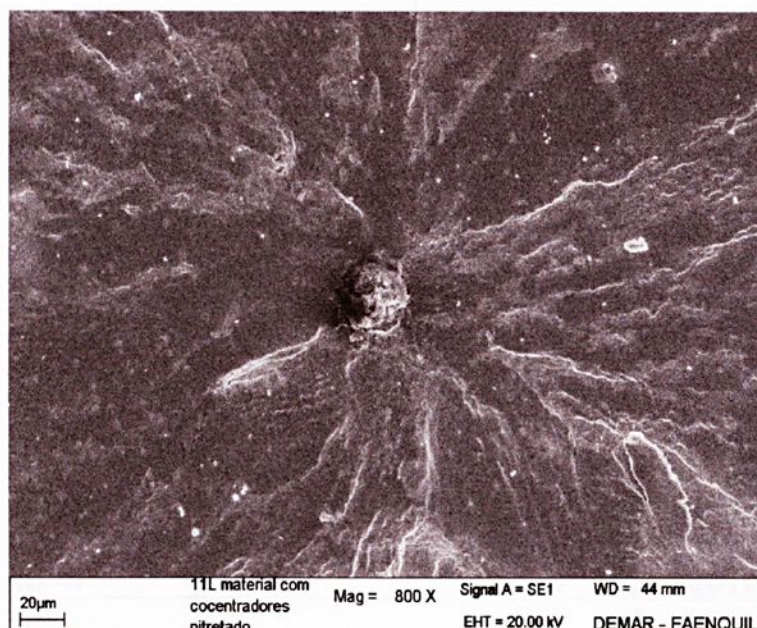


Figura 4.29 - Fractografia do corpo de prova – MCN3011L800x, tensão de 88% $\sigma_e = 667$ MPa e 1.270.300 ciclos

Nas Figuras 4.28 e 4.29 são mostradas as fractografias do material base com concentrador e nitretação. Na Figura 4.29, vê-se a trinca iniciando de uma inclusão que se localiza abaixo da superfície, caracterizando nucleação de trincas subsuperficial. Ela apresenta uma propagação radial à partir da inclusão. Na Figura 4.28 a propagação da trinca dá indícios de ter nucleado na superfície lisa, contradizendo a trinca subsuperficial do material nitretado.

As Figuras 4.30 e 4.31 mostram as superfícies fraturadas do material base polido e nitretação, com dureza 39HRc. Todos os corpos de prova nitretados e ensaiados, apresentam as mesmas características, que é, em alto ciclo, a trinca iniciar-se de um inclusão.

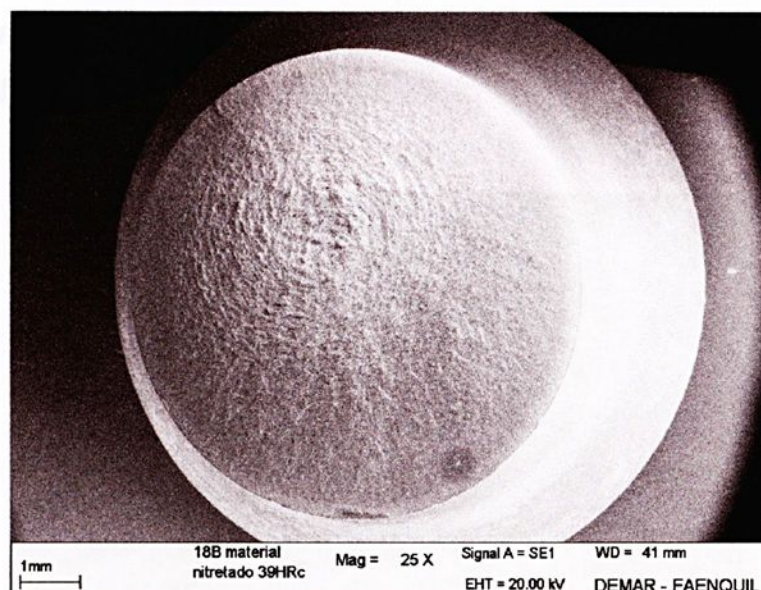


Figura 4.30 - Fractografia do corpo de prova – MN3918B25x, tensão de 78% $\sigma_e = 871$ MPa e 76.700 ciclos

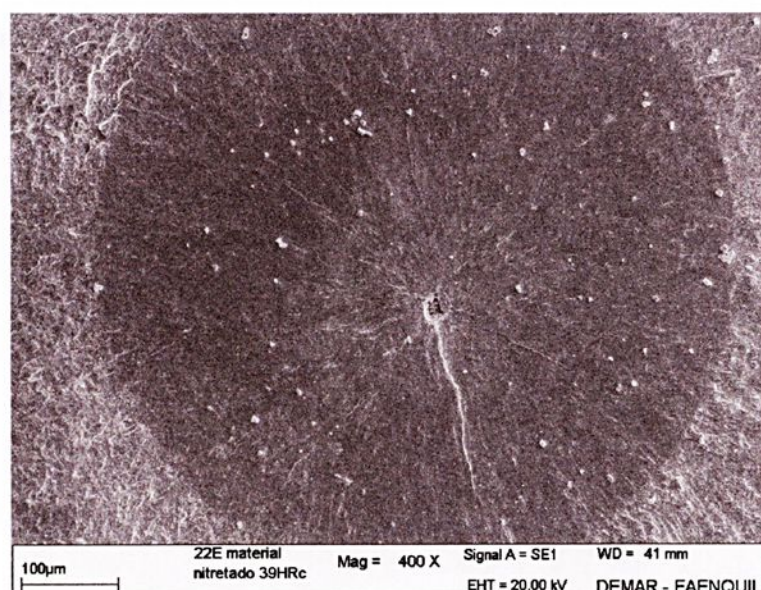


Figura 4.31 - Fractografia do corpo de prova – MN3922E400x, tensão de 66% $\sigma_e = 871$ MPa e 408.800 ciclos

Na Figura 4.30, vê-se as trincas saindo de um único ponto e se propagando radialmente ao mesmo. Observa-se, também, a superfície fraturada, e nela, uma mancha escura com ponto claro, onde se inicia a trinca.

Na Figura 4.31, vê-se as trincas saindo da inclusão e formando uma Figura denominada “olho de peixe”.

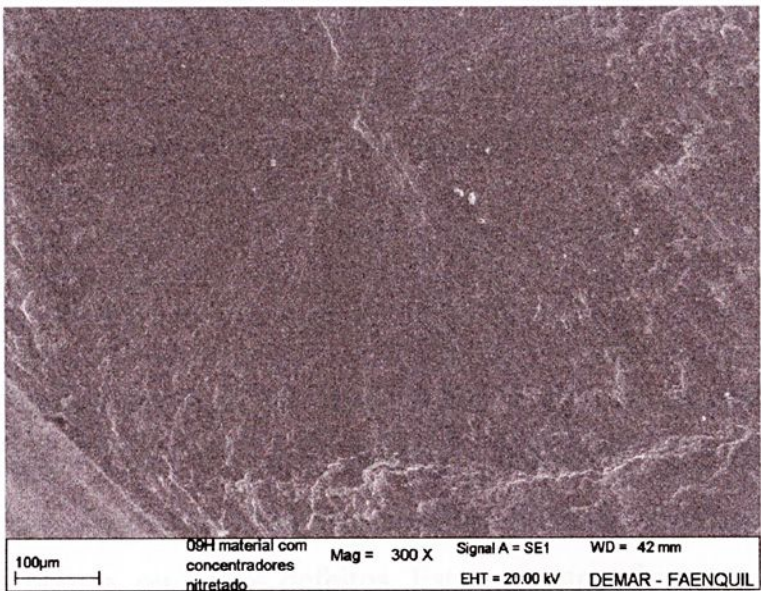


Figura 4.32 - Fractografia do corpo de prova – MCN3909H300x, tensão de 68% σ_e = 756 MPa e 6.119.200 ciclos

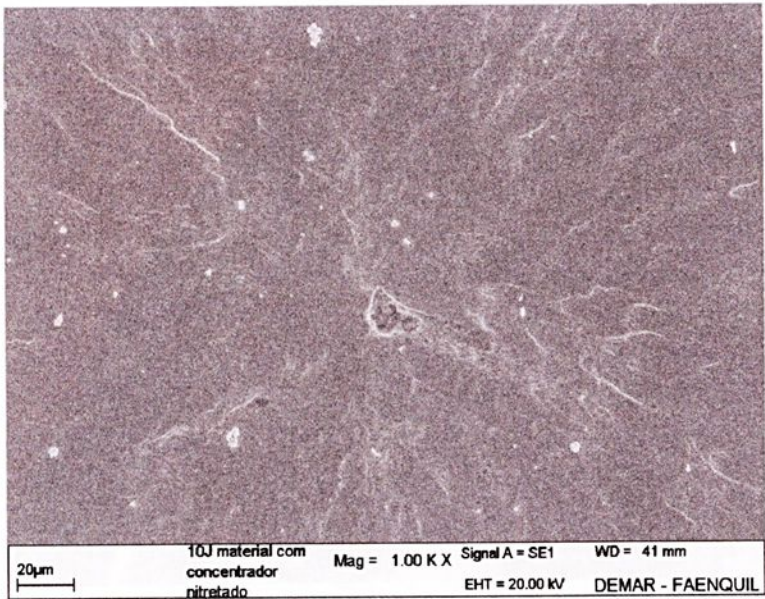


Figura 4.33 - Fractografia do corpo de prova – MCN3909H1000x, tensão de 68% σ_e = 756 MPa e 6.119.200 ciclos

As Figuras 4.32 e 4.33 mostram as superfícies fraturadas do material base com concentrador e nitretação, com dureza de 39HRc. Todos os corpos de prova nitretados e ensaiados, apresentam a mesma característica, que é, em alto ciclo, a trinca iniciar-se de uma inclusão.

Na Figura 4.33 é vista a cratera da inclusão vazia e as trincas saindo dela radialmente, formando um círculo, que denomina-se “olho de peixe”.

4.4.2 Microscopia óptica

Corpos de prova do material base polido com concentrador e nitretação, fraturados por fadiga, foram cortados, lixados, embutidos e preparados para exame metalográfico, com objetivo de verificar possível falha de nitretação, ou seja, não presença camada branca, ou outros defeitos. Estas amostras foram preparadas à partir da superfície fraturada.

As amostras foram atacadas com nital a 4% e as fotografias da superfície são mostradas nas Figuras 4.34 e 4.35.



Figura 4.34 - Fotografia da micrografia da amostra MCN3G

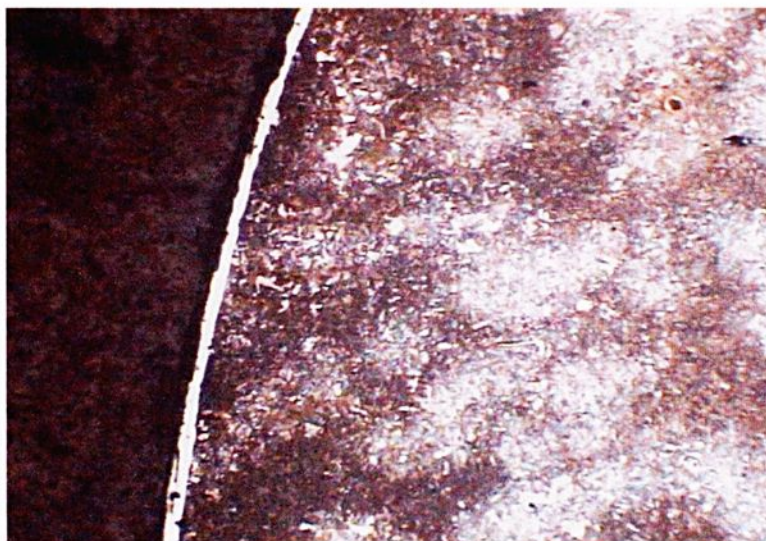


Figura 4.35 - Fotografia da micrografia da amostra MCN10A

Corpos de prova da região fraturada da árvore em estudo, que falhou por fadiga foram cortados, lixados, embutidos e preparados para exame metalográfico, com objetivo de verificar possível falha de nitretação, ou seja, não presença de camada branca, ou outros defeitos.

As amostras foram atacadas com nital a 4%, com exceção da micrografia da Figura 4.39, e as micrografias da superfície são mostradas nas Figuras 4.36 a 4.40.

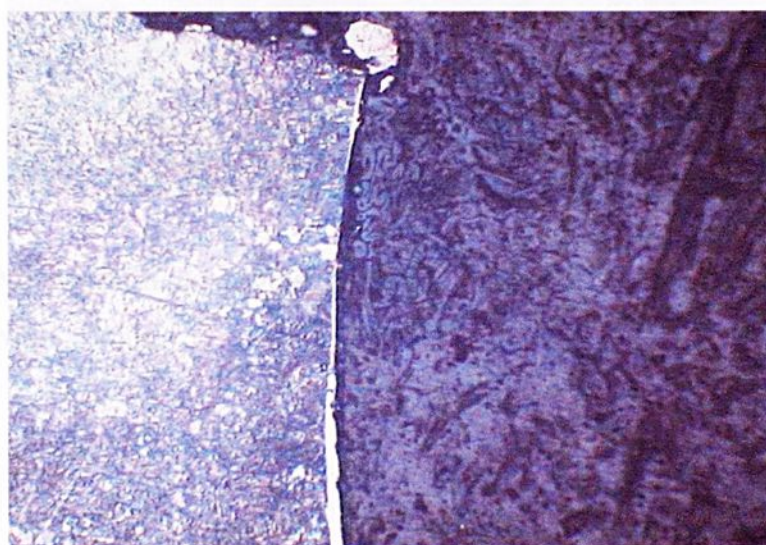


Figura 4.36 - Micrografia da região fraturada da árvore – falta de camada branca

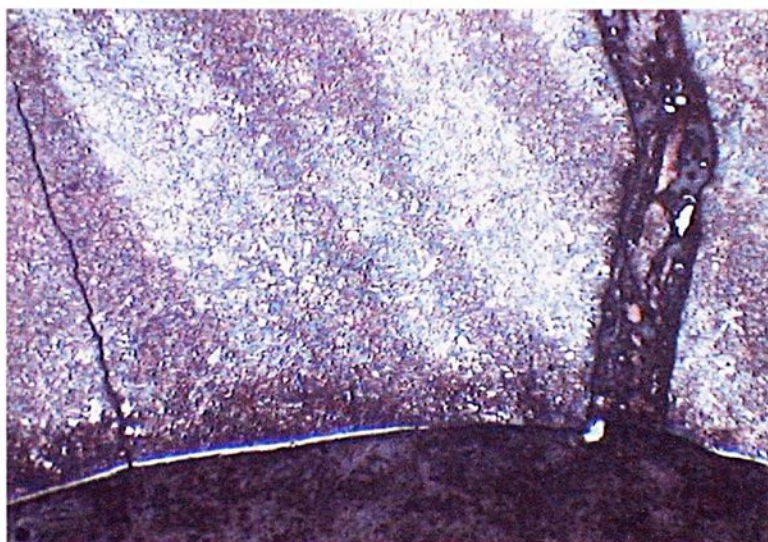


Figura 4.37 - Micrografia da região fraturada da árvore – trinca principal e trinca secundária à esquerda – 100x

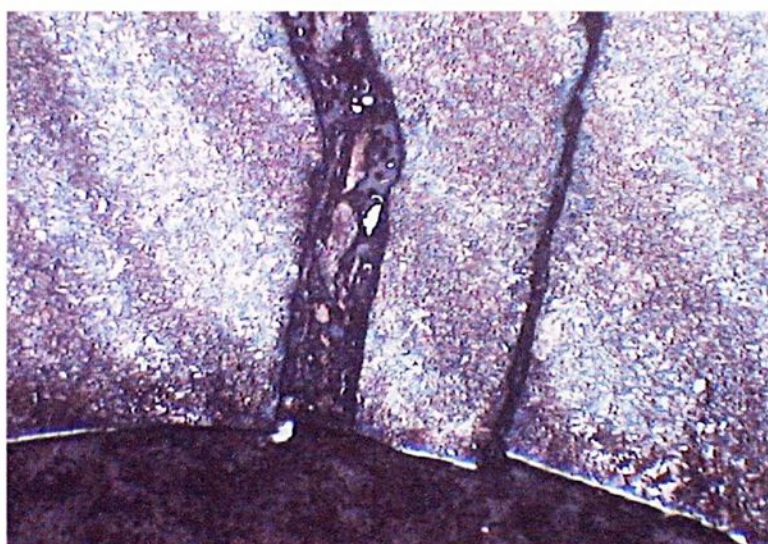


Figura 4.38 - Micrografia da região fraturada da árvore – trinca principal e trinca secundária à direita – 100x



Figura 4.39 - Micrografia da região fraturada da árvore, sem ataque de nital – trinca principal mais duas trincas secundárias – 200x

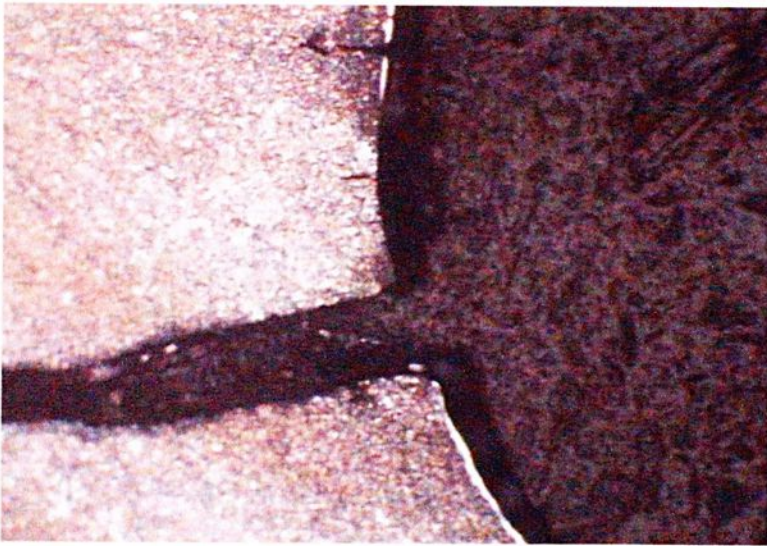


Figura 4.40 - Micrografia da região fraturada da árvore – trinca principal e trinca secundária – 100x

4.5 ENSAIOS DE MICRODUREZA

Dos lotes de corpos de prova nitretados, uma amostra de cada lote foi retirada e feito microdureza pela “BRASIMET”. Os resultados estão na Tabela 4.17 a 4.19 e os certificados emitidos pela BRASIMET nos anexos A, B e C.

O lote de corpos de prova do material base com concentrador e nitretação – “MCN”, nitretado pela “BRASIMET”, na primeira nitretação não atingiu a microdureza especificada de 650 HV 0,2. O perfil de microdureza pode ser visto na Tabela 4.18 e o certificado no anexo B.

Foi devolvido o lote para a BRASIMET e refeito a nitretação. Os valores de dureza constam do anexo C e o perfil de microdureza pode ser visto na Tabela 4.19, e agora dentro do especificado.

Tabela 4.17 - Perfil de microdureza com 0,2 kg de carga material base polido e nitretação – MN305B

Distância da superfície (mm)	Medida da microdureza (HV0,2)
0.00	644
0.05	490
0.10	473
0.28	381

Tabela 4.18 - Perfil de microdureza com 0,2kg de carga material base com concentrador e nitretação – MCN303K

Distância da superfície (mm)	Medida da microdureza (HV0,2)
0.00	538
0.05	509
0.10	441
0.20	386
0.31	353

Tabela 4.19 - Perfil da microdureza com 0,2kg de carga material base com concentrador e nitretação – “MCN303K”

Distância da superfície (mm)	Medida da microdureza (HV0.2)
0.00	644
0.05	509
0.10	473
0.35	321

A Tabela 4.20 mostra o perfil de microdureza para o material aço ABNT 4340, temperado e revenido, com dureza 39 a 40HRc, foi executado pela Brasimet, conforme certificado anexo “E”.

Deste material foram feitos corpos de prova de material base polido e nitretação e material base com concentrador e nitretação. O certificado de análise da microdureza na camada nitretada, feita pela “Brasimet”, está no anexo “D”.

Tabela 4.20 – Perfil da microdureza com 0,2kg de carga material base com concentrador e nitretação – 39HRc

Distância da superfície (mm)	Medida da microdureza (HV0.2)
0.00	766 a 841
0.05	593
0.20	441
0.26	412

4.6 ESTUDO ESTATÍSTICOS DOS RESULTADOS

Aplicando a função de distribuição cumulativa de Weibull com 2 parâmetros nos dados das Tabelas 4.1 a 4.7 e 4.9, pode-se montar as Tabelas 4.21 a 4.28.

Estas Tabelas apresentam os seguintes parâmetros:

Nº de ciclos (N_f) – número de ciclos até a falha do corpo de prova

$\ln N_f$ – logaritmo natural do nº de ciclos até a falha

Median Rank – distribuição de probabilidade cumulativa

β – parâmetro de forma ou inclinação de Weibull

η – parâmetro de escala ou vida característica

$\rho_{0,05}$ – confiabilidade de 5% - limite superior da vida

$\rho_{0,95}$ – confiabilidade de 95% - limite inferior da vida

Os resultados encontrados estão mostrados nas Tabelas 4.21 a 4.28, como segue:

Tabela 4.21 – Resultados da linearização da função de distribuição e de determinação dos limites de confiabilidade – “MB30”

Nº ciclos N_f	$\ln N_f$	Median Rank	β	η	Confiabilidade de 5% $\rho_{0,05}$	Confiabilidade de 95% $\rho_{0,95}$
24.100	10,08997	-1,46512				
24.300	10,09823	-0,36651	15,84001	25.675	27.518	21.285
26.500	10,18490	0,45643				
41.900	10,64304	-1,75283				
48.100	10,78104	-0,67440	11,48252	49.238	54.175	38.015
48.700	10,79343	-0,04854				
50.900	10,83762	0,60880				
98.900	11,50186	-1,46512				
105.500	11,56647	-0,36651	1,331180	205.527	468.444	22.095
296.300	12,59913	0,45643				
107.900	11,58896	-1,46512				
354.100	12,77733	-0,536651	1,17923	390.900	991.164	31.491
487.100	13,09622	0,45643				
1.172.600	13,97473	-1,46512				
1.764.500	14,38338	-0,36651	3,30328	1.856.143	2.587.396	755.281
2.038.200	14,52758	0,45643				

Tabela 4.22 - Resultados da linearização da função de distribuição e de determinação dos limites de confiabilidade – “MN30”

Nº ciclos N_f	$\ln N_f$	Median Rank	β	η	Confiabilidade de 5% $\rho_{0,05}$	Confiabilidade de 95% $\rho_{0,95}$
35.500	10,47729	-1,46512				
48.400	10,78726	-0,36651	3,71767	52.861	71.008	23.777
59.400	10,99205	0,45643				
89.400	11,40088	-1,75283				
217.600	12,29041	-0,67440	1,47974	307.626	645.715	41.332
354.500	12,77846	0,04854				
392.700	12,88080	0,60880				
525.400	13,17192	-1,46512				
618.300	13,33473	-0,36651	5,26235	682.838	841.138	388.322
754.700	13,53408	0,45643				
2.063.100	14,53972	-1,46512				
2.224.400	14,61500	-0,36651	1,09403	7.164.150	Runout	474.344
7.819.800	15,87217	0,45643				

Tabela 4.23 - Resultados da linearização da função de distribuição e de determinação dos limites de confiabilidade – “MC30”

Nº ciclos N_f	$\ln N_f$	Median Rank	β	η	Confiabilidade de 5% $\rho_{0,05}$	Confiabilidade de 95% $\rho_{0,95}$
20.700	9,93789	-1,46512				
22.100	10,00333	-0,36651	6,83624	24.627	28.914	15.949
26.700	10,19242	0,45643				
49.600	10,81175	-1,46512				
51.500	10,84934	-0,36651	10,19673	55.538	61.847	41,504
58.600	10,97849	0,45643				
92.900	11,43928	-1,46512				
105.700	11,56836	-0,36651	7,28610	112.763	131.089	75.011
120.900	11,70272	0,45643				
240.400	12,39006	-1,46512				
306.700	12,63363	-0,36651	6,07182	307.783	368.742	188.711
315.300	12,66128	0,45643				
562.300	13,23979	-1,46512				
641.800	13,37203	-0,36651	4,26414	753.354	974.419	375.397
858.200	13,66259	0,45643				

Tabela 4.24 - Resultados da linearização da função de distribuição e de determinação dos limites de confiabilidade – “MS30”

Nº ciclos N_f	$\ln N_f$	Median Rank	β	η	Confiabilidade de 5% $\rho_{0,05}$	Confiabilidade de 95% $\rho_{0,95}$
9.900	9,20029	-1,46512				
14.800	9,60238	-0,36651	2,54557	17.446	26.846	5.432
21.100	9,95703	0,45643				
12.700	9,44936	-1,05967	3,06071	17.954	25.695	6.803
19.200	9,86267	0,20535				
51.100	10,84154	-1,75283				
56.600	10,94376	-0,67440				
62.300	11,03972	-0,04854	4,36640	69.348	89.159	35.124
83.700	11,33499	0,60880				
138.300	11,83718	-1,46512				
238.500	12,38212	-0,36651	1,31442	377.332	869.447	39.387
572.200	13,25724	0,45643				
1.413.400	14,16151	-1,46512				
1.423.500	14,16863	-0,36651	4,69718	1.726.161	2.180.348	917.194
1.907.500	14,46130	0,45643				

Tabela 4.25 - Resultados da linearização da função de distribuição e de determinação dos limites de confiabilidade – “MCN30”

Nº ciclos N_f	$\ln N_f$	Median Rank	β	η	Confiabilidade de 5% $\rho_{0,05}$	Confiabilidade de 95% $\rho_{0,95}$
19.300	9,86786	-1,46512				
19.900	9,89848	-0,36651	3,58419	25.438	34.548	11.107
29.200	10,28192	0,45643				
3.700	8,21609	-1,46512				
68.200	11,13020	-0,36651	0,51740	63.524	529.535	204
71.100	11,17184	0,45643				
95.700	11,46897	-1,75283				
270.700	12,50877	-0,67440	0,77642	808.321	3.322.572	17.627
824.200	13,62217	-0,04854				
1.806.100	14,40668	0,60880				
559.100	13,23408	-1,05967	1,54145	1.111.878	2.265.602	161.891
1.270.300	14,05476	0,20537				
1.321.200	14,09405	-1,75283				
3.476.500	15,06154	-0,67440	1,15005	6.082.096	Runout	459.638
6.151.100	15,63214	-0,04854				
10.000.000	16,11810	0,60880				

Tabela 4.26 - Resultados da linearização da função de distribuição e de determinação dos limites de confiabilidade – “MB39”

Nº ciclos N_f	$\ln N_f$	Median Rank	β	η	Confiabilidade de 5% $p_{0,05}$	Confiabilidade de 95% $p_{0,95}$
10.300	9,23990	-1,05967	33,20262	10.634	10.991	9.724
10.700	9,27800	0,20535				
19.100	9,85744	-1,46512				
24.400	10,10234	-0,36651	2,48388	31.836	49.517	9.629
39.800	10,59162	0,45643				
146.600	11,89546	-1,46512				
213.400	12,27092	-0,36651	1,20417	393.858	979.604	33.428
229.300	12,34279	0,45643				
352.400	12,77252	-1,75283				
618.400	13,33489	-0,67440	0,75369	1.673.677	7.176.264	32.522
641.600	13,37172	-0,04854				
4.719.500	15,36721	0,60880				

Tabela 4.27 - Resultados da linearização da função de distribuição e de determinação dos limites de confiabilidade – “MN39”

Nº ciclos N_f	$\ln N_f$	Median Rank	β	η	Confiabilidade de 5% $p_{0,05}$	Confiabilidade de 95% $p_{0,95}$
4.900	8,49699	-1,05967	13,01997	5.315	5.782	4.231
5.400	8,59415	0,20535				
20.800	9,94271	-1,46512				
21.600	9,98045	-0,36651	2,12201	32.858	55.105	8.105
41.300	10,62862	0,45643				
76.700	11,24766	-1,46512				
115.400	11,65616	-0,36651	3,02706	125.919	180.928	47.201
143.200	11,87200	0,45643				
1.236.400	14,02771	-1,05967	6,09090	1.471.357	1.761.773	903.518
1.521.800	14,23540	0,2535				
337.800	12,73020	-1,75283				
408.800	12,92098	-0,67440	0,55373	3.484.265	25.272.272	16.314
3.665.100	15,11437	-0,04854				
10.000.001	16,11810	0,60880				

Tabela 4.28 - Resultados da linearização da função de distribuição e de determinação dos limites de confiabilidade – “MCN39”

Nº ciclos N_f	$\ln N_f$	Median Rank	β	η	Confiabilidade de 5% $\rho_{0,05}$	Confiabilidade de 95% $\rho_{0,95}$
3.700	8,21609	-1,05967	1,82503	6.613	12.064	1.229
7.400	8,90924	0,20535				
10.900	9,29652	-1,46512				
21.100	9,95703	-0,36651	2,17783	21.843	36.150	5.585
24.100	10,08997	0,45643				
58.100	10,96992	-1,05967	7,17620	67.345	78.470	44.520
69.300	11,14620	0,20535				
57.300	10,95605	-1,46512				
103.600	11,54829	-0,36651	2,10713	116.925	196.809	28.558
140.200	11,85083	0,45643				
307.800	12,63721	-1,05967	1,59096	599.151	1.194.106	92.628
681.700	13,43234	0,20535				
6.119.200	15,62694	-1,05967	2,57558	9.233.463	“Runout”	2.914.272
10.000.000	16,11810	0,20535				

4.7 RESULTADO DO EFEITO DAS INCLUSÕES NO MATERIAL NITRETADO

As Tabelas abaixo mostram os seguintes dados:

- N° do CDP – número do corpo de prova;
- N_f – número de ciclos até a falha;
- $\sqrt{a}$ – tamanho da inclusão – raiz quadrada da área projetada;
- Distância da superfície – distância da inclusão até à superfície;
- Tensão aplicada no corpo de prova;
- Tensão nominal na inclusão;
- Predição do limite de fadiga pelas equações (6,7 e 8) σ_w ;
- Relação σ'/σ_w ;
- Identificação do corpo de prova.

Estas Tabelas que se seguem foram montadas com dados tirados das imagens de fractografia, com valores calculados e resultados obtidos nos ensaios. Os resultados obtidos são:

Tabela 4.29 - Corpos de prova de material base polido e nitretação, com dureza 30HRc – ensaiados em flexão rotativa

N° do CDP	Ciclos até a falha N_f	Tamanh o da inclusão, $\sqrt{a}$ rea μm	Distância da superfície μm	Tensão aplicada na superfície livre do CDP(MPa)	Tensão nominal na inclusão σ' (MPa)	Predição do limite de fadiga pelas equações (6,7 e 8)	σ'/σ_w	Identificação do CDP
10E	217×10^3	14,8	450	707	627	420	1,49	10E30HMN
5D	$59,4 \times 10^3$	15,5	657	807	674	417	1,67	5D30HMN
4J	$7.819,8 \times 10^3$	17,1	713	590	485	410	1,18	4J30HMN
4K	392×10^3	21,1	477	707	623	396	1,57	4K30HMN
5G	$525,4 \times 10^3$	19,0	613	637	539	403	1,34	5G30HMN

Tabela 4.30 – Corpos de prova de material base com concentrador e nitretação, com dureza 30HRC – ensaiados em flexão rotativa

Nº do CDP	Ciclos até a falha N_f	Tamanho da inclusão, $\sqrt{a}$ área μm	Distância da superfície μm	Tensão aplicada na superfície livre do CDP(MPa)	Tensão nominal na inclusão σ' (MPa)	Predição do limite de fadiga pelas equações (6,7 e 8)	σ'/σ_w	Identificação do CDP
11L	$1.270,3 \times 10^3$	27,3	667	667	550	379	1,45	11L30HMCN
13G	$6.151,1 \times 10^3$	11,2	722	620	502	440	1,14	13G30HMCN
2A	$1.806,1 \times 10^3$	6,5	800	716	565	482	1,17	2A30HMCN
10A	$824,2 \times 10^3$	17,7	620	716	593	408	1,45	10A30HMCN
14D	$270,7 \times 10^3$	19,5	610	716	595	401	1,48	14D30HMCN
14L	$559,1 \times 10^3$	39,9	1000	667	482	356	1,35	14L30HMCN
1K	$3,7 \times 10^3$	--	0	755	755	--	--	1K30HMCN
3G	$3.476,5 \times 10^3$	16,2	625	620	512	414	1,24	3G30HMCN
8K	$1.321,2 \times 10^3$	12,0	640	620	510	435	1,17	8K30HMCN

Tabela 4.31 – Corpos de prova de material base polido e nitretação, com dureza 39HRC – ensaiado em flexão rotativa

Nº do CDP	Ciclos até a falha N_f	Tamanho da inclusão, $\sqrt{a}$ área μm	Distância da superfície μm	Tensão aplicada na superfície livre do CDP(MPa)	Tensão nominal na inclusão σ' (MPa)	Predição do limite de fadiga pelas equações (6,7 e 8)	σ'/σ_w	Identificação do CDP
18B	$76,7 \times 10^3$	29,5	462	871	770	446	1,73	18B39HMN
22E	$408,8 \times 10^3$	24,6	500	737	645	459	1,41	22E39HMN
27F	$337,8 \times 10^3$	19,2	507	737	644	479	1,34	27F39HMN
32G	$3.665,1 \times 10^3$	11,1	493	737	646	524	1,23	32G39HMN

Tabela 4.32 – Corpos de prova de material base com concentrador e nitretação, com dureza 39HRC – ensaiado em flexão rotativa

Nº do CDP	Ciclos até a falha N_f	Tamanho da inclusão, $\sqrt{a}$ área μm	Distância da superfície μm	Tensão aplicada na superfície livre do CDP(MPa)	Tensão nominal na inclusão σ' (MPa)	Predição do limite de fadiga pelas equações (6,7 e 8)	σ'/σ_w	Identific. do CDP
09H	$6.119,2 \times 10^3$	13,5	491	756	658	508	1,30	09H39HMCN
12O	$307,8 \times 10^3$	34,7	551	778	665	433	1,54	12O39HMCN
17K	$681,7 \times 10^3$	23,2	338	778	709	464	1,53	17K39HMCN

5 DISCUSSÕES

Na análise dos efeitos do tratamento termoquímico de nitretação, do tratamento a frio de “martelamento” do shot peening, do concentrador de tensões provocado por usinagem e da combinação entre eles, sobre a resistência do aço ABNT 4340, de aplicação industrial em geral, foi considerado somente o comportamento em fadiga por flexão rotativa, por ser o esforço predominante na árvore em estudo.

Todos os equipamentos usados no levantamento dos dados, bem como, as condições de ensaio foram informados em detalhes no capítulo Material e Método.

Será feito neste capítulo, uma análise crítica e comparativa dos vários tratamentos superficiais aplicados nos corpos de prova de aço ABNT 4340, para uma identificação clara como tratar a superfície da árvore em estudo, para aumentar sua vida em fadiga.

5.1 ANÁLISE DOS ENSAIOS MECÂNICOS

Os resultados encontrados dos ensaios mecânicos para o aço ABNT 4340 com dureza 30HRc e 39HRc, após os referidos tratamentos térmicos, estão de acordo com a literatura.

5.2 ENSAIOS DE FADIGA

As Tabelas 4.1 a 4.5 fornecem os resultados dos ensaios de fadiga por flexão rotativa e as Figuras 4.1 a 4.6 as curvas $\sigma - N$. Como os níveis de solicitação para cada tratamento superficial dos corpos de prova variaram bastante, a Tabela 5.1 foi montada para melhor elucidar os fatos.



Tabela 5.1 – Relação das cargas em %σe / número médio de ciclos x 10³ -
Material com dureza de 30HRc.

“MB30” %σe/x1000 ciclos	“MN30” %σe/x1000 ciclos	“MC30” %σe/x1000 ciclos	“MS30” %σe/x1000 ciclos	“MCN30” %σe/x1000 ciclos
----	107 / 47,8	----	107 / 2,1	107 / 22,8
----	----	----	----	100 / 69,7
----	----	----	96 / 5,6	----
----	----	----	----	95 / 749,2
----	94 / 262,4	----	----	----
----	----	----	90 / 15,3	----
----	----	----	----	88 / 914,7
84 / 25,0	84 / 632,8	----	84 / 16,1	----
----	----	82 / 23,2	----	82 / “runout”
78/47,4	78 / 4035,8	----	----	----
----	75 / “runout”	----	75 / 63,4	----
72 / 166,9	----	72 / 53,23	----	----
----	----	----	67 / 316,3	----
65 / 316,4	----	65 / 106,5	----	----
----	----	----	59 / 1581,5	----
58 / 658,4	----	----	----	----
----	----	----	54 / “runout”	----
51 / “runout”	----	51 / 287,5	----	----
----	----	42 / 687,4	----	----
----	----	39 / 867,2	----	----
----	----	35 / 5761,4	----	----
----	----	32 / “runout”	----	----

Fazendo-se uma análise criteriosa da Tabela 5.1, pode-se dizer que:

- Para o nível de $\sigma_{\text{máx.}} = 107\% \sigma_e$, só alcançado pelos corpos de prova material base polido e nitretação, material base polido com shot peening e material base com concentrador e nitretação, os seguintes valores médios para o número de ciclos obtidos foram: $47,8 \times 10^3$; $2,1 \times 10^3$ e $22,8 \times 10^3$, respectivamente. Observa-se nesse nível de tensão que o material base polido e nitretação teve um comportamento muito melhor na resistência à fadiga que os outros dois. O comportamento na resistência à fadiga

para este nível de carregamento também foi muito melhor para o material base com concentrador e nitretação comparado ao material base polido com shot peening.

- Para o nível de $\sigma_{\max.} = 94\%$ a $96\%\sigma_e$, ainda só alcançado para os materiais base polido e nitretação, material base polido com shot peening e material base com concentrador e nitretação, os seguintes valores médios para o número de ciclos obtidos foram: $262,4 \times 10^3$; $5,6 \times 10^3$ e $749,2 \times 10^3$, respectivamente. Neste nível de tensão o material base com concentrador e nitretação teve um comportamento muito melhor na resistência à fadiga que os outros dois. O comportamento na resistência à fadiga foi extremamente melhor para o material base polido e nitretação comparado ao material base polido com shot peening.

- Para o nível de $\sigma_{\max.} = 82\%$ a $84\%\sigma_e$, agora alcançado por todos os materiais dos corpos de prova de material base polido, material base polido e nitretação, material base com concentrador, material base polido com shot peening e material base com concentrador e nitretação, os seguintes valores médios para o número de ciclos obtidos foram: $25,0 \times 10^3$; $632,8 \times 10^3$; $23,2 \times 10^3$; $16,1 \times 10^3$ e runout, respectivamente. Neste nível de tensão, o material base com concentrador e nitretação, teve um comportamento extremamente melhor que o material base polido, o material base com concentrador e o material base polido com shot peening, e bem melhor que o material base polido e nitretação.

- Para o nível de $\sigma_{\max.} = 72\%$ a $75\%\sigma_e$, para os materiais dos corpos de prova de material base polido, material base polido e nitretação, material base com concentrador e material base polido com shot peening, os seguintes valores médios para o número de ciclos obtidos foram: $166,9 \times 10^3$; $53,23 \times 10^3$; $63,4 \times 10^3$ e runout, respectivamente. O comportamento na resistência à fadiga para este nível de carregamento foi extremamente melhor para o material base polido e nitretação, que os demais. O material base polido comportou melhor na resistência à fadiga que o material base com concentrador e o material base polido com shot peening.



- Para o nível de $\sigma_{\max.} = 51\%$ a $54\%\sigma_e$, para os materiais dos corpos de prova de material base polido, material base com concentrador e material base polido com shot peening, os seguintes valores médios para o número de ciclos obtidos foram: runout; $287,5 \times 10^3$ e runout, respectivamente. Neste nível de tensão, o material base com concentrador, teve uma resistência à fadiga extremamente menor que a do material base polido e material base polido com shot peening. Comparando o material base polido com o material base polido com shot peening, este último teve uma recuperação sobre o primeiro.

No nível $\sigma_{\max.} = 32\%\sigma_e$, o material base com concentrador, alcançou o runout no número de ciclos.

Comparando os limites de resistência à fadiga, dos corpos de prova dos demais materiais com o material base polido, tem-se:

1. Material base polido ($\sigma_L = 51\%\sigma_e$) x material base polido e nitretação ($\sigma_L = 75\%\sigma_e$). A nitretação, através de introdução de tensão residual compressiva na camada subsuperficial do material base, aumentou o limite de resistência à fadiga em 47%.
2. Material base polido ($\sigma_L = 51\%\sigma_e$) x material base com concentrador ($\sigma_L = 32\%\sigma_e$). O concentrador de tensão, gerado na superfície do corpo de prova, pela ferramenta de corte, causou uma redução do limite de resistência à fadiga do material de 62,7%.
3. Material base polido ($\sigma_L = 51\%\sigma_e$) x material base polido com shot peening ($\sigma_L = 54\%\sigma_e$). A aplicação de shot peening na superfície do corpo de prova, aumentou a resistência à fadiga do material em 5,9%.
4. Material base polido ($\sigma_L = 51\%\sigma_e$) x material base com concentrador e nitretação ($\sigma_L = 82\%\sigma_e$). O limite de resistência à fadiga do material base com concentrador e nitretação, comparado ao do material base polido, teve um aumento de 60%.



Se compararmos, o limite de resistência à fadiga do material base polido e nitretação, que é de 75%σ_e, com o limite de resistência à fadiga , do material base com concentrador e nitretação, que é de 82%σ_e, conclui-se que a nitretação recuperou os concentradores de tensão comparado ao polimento do material base.

Tabela 5.2 – Relação das cargas em %σ_e / número médio de ciclos x 10³ -
Material com dureza de 39HRc.

“MB39” %σ _e /x1000 ciclos	“MN39” %σ _e /x1000 ciclos	“MS39” %σ _e /x1000 ciclos	“MCN39” %σ _e /x1000 ciclos
	94/5,2		
			91/8,1
85/10,5	85/27,9	85/12,7	85/18,7
			80/63,7
78/27,8	78/11,8		78/100,4
		77/23,2	
			70/376,6
	69/1379,1		
			68/”Runout”
		67/70,9	
	66/”Runout”		
		63/64,3	
60/196,4		60/186,8	
		58/315,9	
57,5/1523,0			
55/866,2			

Analisando a Tabela 5.2, temos:

- Para o nível de tensão σ_{máx.} = 91% a 94% σ_e, só alcançado pelos corpos de prova material base polido e nitretação e material base com concentrador e nitretação, os seguintes valores médios para o número de ciclos obtidos foram: 5,2 x 10³ e 8,1 x 10³, respectivamente. Observa-se neste nível de tensão que o material base polido e

nitretação teve um comportamento ligeiramente melhor na resistência à fadiga que o material base com concentrador e nitretação.

- Para o nível de tensão $\sigma_{\text{máx.}} = 85\% \sigma_e$, agora alcançado por todos os materiais dos corpos de prova de material base polido, material base polido e nitretação, material base polido com shot peening e material base com concentrador e nitretação, os seguintes valores médios para os números de ciclos obtidos foram: $10,5 \times 10^3$; $27,9 \times 10^3$ e $18,7 \times 10^3$ respectivamente. Neste nível de tensão o material base polido e nitretação teve um comportamento muito melhor que o material base polido e o material base polido com shot peening, e um pouco melhor que o material base com concentrador e nitretação.

- Para o nível de tensão $\sigma_{\text{máx.}} = 77\% \text{ a } 78\% \sigma_e$, nível este alcançado por todos os materiais dos corpos de prova de material base polido, material base polido e nitretação, material base polido com shot peening e material base com concentrador e nitretação, os seguintes valores médios para o número de ciclos obtidos foram: $27,78 \times 10^3$; $111,8 \times 10^3$; $23,2 \times 10^3$ e $100,4 \times 10^3$ respectivamente. Para este nível de tensão o material base polido e nitretação teve uma ligeira melhora na resistência à fadiga comparado ao material base com concentrador e nitretação, e que ambos estão muito melhor na resistência à fadiga que o material base polido e o material base polido com shot peening.

- Para o nível de tensão $\sigma_{\text{máx.}} = 68\% \text{ a } 69\% \sigma_e$, onde temos somente os materiais dos corpos de prova de material base polido e nitretação e material base com concentrador e nitretação, os seguintes valores médios para o número de ciclos obtidos foram: $1379,1 \times 10^3$ e “Runout”, respectivamente. Neste nível de tensão o material base com concentrador e nitretação teve um comportamento no limite de resistência à fadiga, atingindo o “Runout” melhor que o material base polido e nitretação, invertendo a tendência que vinha tendo até então atingindo o “Runout” primeiro que o material base polido e nitretação. Apesar de não ter sido citado o material polido com shot peening e o material base polido, por não terem tido tensão nesta faixa, eles tiveram um comportamento do limite de resistência à fadiga bem inferior ao material

base polido e nitretação e material base com concentrador e nitretação, como pode ser visto na Tabela 5.2.

- Para o nível de tensão $\sigma_{\text{máx.}} = 66\% \text{ a } 67\% \sigma_e$, onde temos os materiais dos corpos de prova de material base polido e nitretação e material base com concentrador e nitretação, os seguintes valores médios para o número de ciclos obtidos foram: “Runout” e $70,9 \times 10^3$, respectivamente. Para este nível de tensão o material base polido e nitretação teve uma melhora muito grande na resistência à fadiga comparada ao material base polido com shot peening e também em relação ao material base polido, apesar deste não ter sido ensaiado para este nível de tensão, mas pode ser visto na Tabela 5.2.

- Para o nível de tensão $\sigma_{\text{máx.}} = 60\% \sigma_e$ onde temos somente os materiais dos corpos de prova de material base polido e material base polido com shot peening, os seguintes valores médios para o número de ciclos obtidos foram: $196,4 \times 10^3$ e $186,8 \times 10^3$, respectivamente. Neste nível de tensão o material base polido e o material base polido com shot peening tiveram um comportamento no limite de resistência à fadiga bem próximo um ao outro, tendência esta que pode ser vista na Tabela 5.2.

- Para o nível de tensão $\sigma_{\text{máx.}} = 55\% \text{ a } 58\% \sigma_e$, onde temos somente os materiais dos corpos de prova material base polido e material base polido com shot peening, apesar dos valores do número de ciclos não terem atingido o “Runout”, pode se afirmar que ambos tem uma tendência a atingi-los para o mesmo nível de tensão.

Comparando os limites de resistência à fadiga dos corpos de prova dos demais materiais com o material base polido, tem-se:

1. Material base polido ($\sigma_L = 55 \sigma_e$) x material base polido e nitretação ($\sigma_L = 66 \sigma_e$). A nitretação, através de introdução de tensão residual compressiva na camada subsuperficial do material base, aumentou o limite de resistência à fadiga em 20%.
2. Material base polido ($\sigma_L = 55 \sigma_e$) x material polido com shot peening ($\sigma_L = 55 \sigma_e$). A aplicação de shot peening na superfície dos corpos de prova, não trouxe ganho de resistência à fadiga comparado ao material base polido.

3. Material base polido ($\sigma_L = 55 \% \sigma_e$) x material base com concentrador e nitretação ($\sigma_L = 68 \% \sigma_e$). O limite de resistência à fadiga do material base com concentrador e nitretação, teve um aumento no limite de resistência à fadiga de 23,6% comparado ao material base polido.

Comparando o limite de resistência à fadiga do material base com concentrador e nitretação ($\sigma_L = 68 \% \sigma_e$) com o material base polido e nitretação ($\sigma_L = 66 \% \sigma_e$) nota-se um ligeiro aumento de 3,0% no limite de resistência à fadiga, demonstrando igual tendência nos resultados do material com 30HRc.

5.3 ANÁLISE DAS TENSÕES RESIDUAIS

Material com dureza de 30HRc

- Comparando os dados as tensões residuais das Tabelas 4.10 e 4.12 e Figuras 4.12 e 4.14, sendo material base polido e material base com concentrador, respectivamente, conclui-se que ao polir o material criou-se um campo de tensão residual compressiva e ao usinar o material criou-se um campo de tensão trativa, como era de se esperar. O que é bem caracterizado nas curvas $\sigma - N$ da Figura 4.6, onde o material base polido tem um limite de resistência à fadiga em alto ciclo maior que o material base com concentrador.

- O material base polido com shot peening, apresentou um perfil de tensões residuais em relação ao material base polido, um pouco menos compressivo, mas numa extensão de profundidade maior, como pode ser visto nas Tabelas 4.10 e 4.13 e Figuras 4.12 e 4.15. Este fato deveria levá-lo a um limite de resistência à fadiga maior do que o material base polido além de apresentar uma tendência da trinca se iniciar na subsuperfície ou no interior do corpo de prova.

O limite de resistência à fadiga em alto ciclo, para ambos ficou praticamente iguais, como pode ser visto nas curvas $\sigma - N$ da Figura 4.6. O efeito compressivo do bombardeamento de granalha na superfície do material, que o levaria a um maior

limite de resistência à fadiga em alto ciclo, foi compensado pela alta rugosidade criada, que muito provavelmente foi provocada pela alta intensidade de shot peening aplicada, causando concentradores de tensão na superfície do material.

O efeito dos concentradores pode ser comprovado também pela análise fractográfica da Figura 4.17 e 4.18, onde mostram as trincas se iniciando na superfície.

- Comparando o perfil de tensão residual das Tabelas 4.10 e 4.11 e Figuras 4.12 e 4.13, material base polido e material base polido e nitretação, respectivamente, pode-se ver tensão compressiva em ambos os materiais. Podemos notar também que o material base polido e nitretação tem um valor de tensão residual compressiva bem menor na superfície, mas esta tensão compressiva tem uma extensão de profundidade bem maior do que o material base polido.

Acreditamos que com o processo de nitretação estas tensões chegaram ao limite de escoamento do material, se rearranjando, e criando novas tensões, só que agora com intensidades menores mas com maior extensão de profundidade.

Esta distribuição mais extensa da tensão compressiva, causada pela nitretação, leva o material base polido e nitretação a ter um limite de resistência à fadiga maior do que o material base polido.

- A mesma comparação feita para o material base com concentrador e o material base com concentrador e nitretação, mostradas nas Tabelas 4.12 e 4.14 e Figuras 4.14 e 4.16, respectivamente, pode-se ver tensão trativa para o material base com concentrador e tensão compressiva para o material base com concentrador e nitretação.

O material base com concentrador ao ser nitretado deixa e ter tensões trativas e passa a ter tensões compressivas, e com uma extensão de profundidade maior.

Este fato, confere ao material base com concentrador e nitretação um limite de resistência à fadiga bem maior do que o do material base com concentrador.

A nitretação impede que a trinca por fadiga de alto ciclo se inicie na superfície do material nitretado, levando o início da trinca para o interior do material, o que normalmente leva a trinca a iniciar-se em inclusões ou defeitos.

Para o material base com concentrador e nitretação, cujas tensões residuais estão dadas na Tabela 4.14 e Figura 4.16, comparado ao material base polido e nitretação,



cujas tensões residuais estão dadas na Tabela 4.11 e Figura 4.13, conclui-se que as tensões residuais são compressivas em ambos, que a intensidade da tensão compressiva e a extensão de profundidade da tensão são maiores para o material base com concentrador e nitretação. Este campo compressivo maior e mais extenso para o material base com concentrador e nitretação, leva-o a um limite de resistência à fadiga de alto ciclo maior do que o do material base polido e nitretação, como pode ser visto na curva $\sigma - N$ da Figura 4.6.

Este campo de tensão compressiva provocada pela nitretação no material base polido e nitretação e no material base com concentrador e nitretação foi conseguido partindo de um campo compressivo e um campo trativo, respectivamente. Logo, o campo trativo é mais propício à nitretação que o campo compressivo, pois o material se rearranja, após escoar por tração, durante o processo de nitretação, e ao se rearranjar, cria tensões residuais compressivas com maior intensidade do que se o material já tivesse tensões compressivas. A nitretação não permite que a fadiga de alto ciclo se inicie na superfície do material, levando o início da trinca para o interior do material, o que normalmente leva a trinca a iniciar-se em inclusões ou defeitos.

Material com dureza de 39HRc

- As Tabelas 4.15 e 4.16 e Figuras 4.17 e 4.18 mostram o perfil das tensões residuais para o material base polido e nitretação e material base com concentrador e nitretação, respectivamente, onde se vê que as tensões residuais compressivas estão bem próximas uma das outras, estando as do material base com concentrador e nitretação um pouco acima das do material base polido e nitretação. Esta diferença pequena no campo compressivo, levou o material base com concentrador e nitretação a ter um comportamento ligeiramente melhor em fadiga de alto ciclo que o material base polido e nitretação. A nitretação ao criar um campo compressivo e extenso no material impede que ele inicie a trinca na superfície em fadiga de alto ciclo, levando o início da trinca para o interior do material, o que normalmente leva a trinca a iniciar-se em inclusões ou defeitos.



5.4 ANÁLISE FRACTOGRAFICA E METALOGRAFICA

5.4.1 Análise de falhas e fractografia

a) Material com dureza de 30HRc

As Figuras 4.19 e 4.20, mostram as superfícies de fratura do material base polido, que revelam aspectos característicos de fratura por fadiga, com nucleação de trinca na superfície e propagação para o núcleo do material. A Figura 4.19 mostra a fadiga se iniciando em um dos lados da superfície fraturada, em vários pontos, e se propagando até bem próximo da superfície do lado oposto onde houve a ruptura final. A Figura 4.20 mostra um ponto de iniciação da trinca, que houve um início prematuro da trinca, que pode ser comprovado pelo baixo número de ciclos que este corpo de prova se rompeu comparado à média do número de ciclos para esta carga, cerca de 30%.

As Figuras 4.21 a 4.23, revelam as superfícies de fratura de corpos do material base polido e nitretação. Todos os corpos de prova com este tratamento e ensaiados, apresentaram a nucleação da trinca partindo de uma inclusão, para fadiga de médio e alto ciclo. Observa-se, também, as trincas saindo de um único ponto, onde ela se iniciou, e propagou-se radialmente em relação a ele.

A nitretação gera uma camada branca de dureza elevada e uma camada de difusão do nitrogênio, de dureza entre a camada branca e o material base. Esta camada nitretada tem tensão compressiva e impede que a trinca se inicie na superfície do material do corpo de prova, empurrando-a para o interior do material do corpo de prova, que leva a trinca a procurar uma inclusão ou defeito para iniciar.

As Figuras 4.24 e 4.25, mostram esta inclusão ampliada. Estas inclusões são chamadas de “olho de peixe”, e da análise química por “EDS”, resultou o Al e o O como seus principais elementos.

As Figuras 4.26 e 4.27, mostram as superfícies de fratura de corpos de prova do material base polido com concentrador. Em ambas as figuras, vê-se ao redor da superfície fraturada, marcas da ferramenta de corte, que são os concentradores de tensão. Na Figura 4.24, vê-se as trincas iniciando e se propagando em vários pontos ao



redor da superfície fraturada. Característica de trincas se nucleando dos concentradores causados pela usinagem na região central reduzida ($R = 25\text{mm}$).

As Figuras 4.26 e 4.27 mostram a superfície fraturada dos corpos de prova do material base polido com shot peening. Não houve nucleação de trinca subsuperficial como era de se esperar, em nenhum dos corpos de prova shot peenado. As trincas nuclearam da superfície livre com shot peening para o interior do material.

Nas Figuras 4.28 e 4.29, mostram as superfícies fraturadas de corpos de prova de material base com concentrador e nitretação. Na Figura 4.29, temos a nucleação da trinca partindo de uma inclusão na subsuperfície. Esta é uma característica de material nitretado, onde a camada superficial fica com tensões compressivas, retardando o início da trinca. As trincas iniciam na inclusão e se propagam radialmente ao redor da mesma.

Na Figura 4.28, além de mostrar as marcas de usinagem na região de raio 25mm, mostra uma aparente falha de nitretação na superfície, além de, uma trinca na camada branca, provavelmente proveniente do rompimento frágil da mesma, na fratura do corpo de prova.

b) Material com dureza de 39HRC

Nas Figuras 4.30 e 4.31, mostram as superfícies fraturadas de corpos de prova de material base polido e nitretação. Todos os corpos de prova, em fadiga de médio e alto ciclo, apresentaram a nucleação da trinca partindo de uma inclusão.

Na Figura 4.30, vê-se uma marca em forma de círculo com um ponto central claro e uma auréola escura, e normalmente oposta à fratura final, este é o indício de trinca iniciando de uma inclusão.

A nitretação gera tensões compressivas na superfície do material do corpo de prova, empurrando o início da trinca para o interior do material do corpo de prova, que leva a trinca a procurar uma inclusão ou defeito para iniciar.

Na Figura 4.31, pode-se ver a trinca iniciando num ponto, ou seja, numa inclusão, e propagando radialmente ao seu redor. Esta Figura é a imagem vista na Figura 4.30 ampliada na região do olho de peixe.

5.4.2 Análise de falhas e metalografia

Na micrografia do material base com concentrador e nitretação, mostradas nas Figuras 4.34 e 4.35, pode ser observada uma microestrutura constituída de martensita revenida e camada branca entre 18 e 28 μ m de espessura.

A camada branca, também chamada zona de ligação, apresenta-se homogênea quanto à espessura e dentro dos valores normais. Esta camada apresenta algumas trincas que foram geradas pelo lascamento da camada branca por ocasião da ruptura final do corpo de prova ensaiado em flexão rotativa ou na preparação da amostra, o que é mais provável.

Imediatamente abaixo da zona de ligação, formou-se a zona de difusão do nitrogênio, que está caracterizada, pela formação de agulhas de nitretos e difusão de nitrogênio nos interstícios da matriz.

As Figuras 4.32 e 4.33, mostram as superfícies fraturadas de corpos de prova de material base com concentrador e nitretação. Todos os corpos de prova, em fadiga de médio e alto ciclo, apresentaram a nucleação da trinca partindo de uma inclusão.

Na Figura 4.32, vê-se uma marca pontual e ao seu redor uma parte escura que vai até próximo à superfície. Este é o olho de peixe e é o início da trinca.

A nitretação gera tensões residuais compressivas na superfície do material do corpo de prova, empurrando o início da trinca para o interior do material do corpo de prova, que leva a trinca a procurar uma inclusão ou defeito para iniciar.

Na Figura 4.33, pode-se ver a trinca iniciando numa inclusão e propagando-se radialmente ao seu redor.

A micrografia da Figura 4.36 mostra a camada branca relativamente espessa, sumindo e aparecendo muito fina próximo à trinca.

A micrografia da Figura 4.37 mostra a camada branca relativamente espessa, afinando e desaparecendo próximo à trinca principal. Mostra também uma trinca secundária que não levou a árvore à falha, e esta iniciou dentro da camada nitretada.

A micrografia da Figura 4.38 mostra a camada branca relativamente espessa, afastando e sumindo próximo à trinca principal. Mostra também uma trinca secundária



que não levou a árvore à falha, e esta iniciou dentro da camada nitretada. Esta trinca é oposta à outra secundária da Figura 4.37, em relação à trinca principal.

A micrografia da Figura 4.40 mostra a camada branca com falha onde iniciou a trinca principal e uma trinca secundária nascendo de um ponto onde há camada branca.

A micrografia da Figura 4.39 foi feita sem ataque de nital e são as trincas mostradas nas Figuras 4.36 e 4.37. Percebe-se nitidamente que além da trinca inicial, outras duas trincas secundárias iniciaram-se próximas dela.

A camada branca, na nitretação em banho de sal, pelo processo “Tenifer – Brasimet”, é o principal indício de que houve nitretação. Como há falta de camada branca onde iniciou a trinca principal e escacez de camada branca onde iniciou as trincas secundárias, conclui-se que houve falha no processo de nitretação, não atingindo a região crítica da árvore à falha.

5.5 ANÁLISE DA MICRODUREZA

O perfil de microdureza apresentado nas Tabelas 4.17 a 4.19 indicam que a dureza da zona de ligação ou camada branca é maior do que no material base.

Pode-se notar um perfil de dureza bem similar, tanto para o material base polido e nitretação, quanto para o material base com concentrador e nitretação mesmo sendo lotes feitos em datas distintas. Isto comprova a repetibilidade do processo “Tenifer” – Brasimet.

O material base polido e nitretação e material base com concentrador e nitretação, com dureza de 39HRc, apresentou um perfil de microdureza, conforme Tabela 4.20, maior do que o material base polido e nitretação e o material base com concentrador e nitretação, com dureza de 30HRc. Este aumento na microdureza se deve, provavelmente à diferença na composição química do dois aços, principalmente dos elementos Al, Cr, W e V, pois a dureza aumenta com o aumento destes elementos formadores de nitretos.



5.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS ESTATÍSTICOS

O parâmetro de forma ou inclinação de Weibull, β , é o mais importante parâmetro a ser analisado. Ele dá a inclinação da função de distribuição cumulativa de Weibull linearizada.

Quanto maior β menor a dispersão nos resultados dos valores de números de ciclos, e conseqüentemente, uma distribuição mais homogênea dos defeitos na microestrutura do material dos corpos de prova.

Levando em conta que a fadiga é um fenômeno de resultados, de número de ciclo ou vida, de alta dispersão, para um mesmo nível de carga e que o número de amostra para o mesmo nível de tensão foi pequeno, só serão analisados os resultados com valores de $\beta < 1$, ficando os $\beta \geq 1$ aceitos como estatisticamente corretos.

Os valores de $\rho_{0,05}$ e $\rho_{0,95}$, indicam o limite superior e inferior, respectivamente para o número de ciclos ou vida, com uma confiabilidade de 90% de que se os ensaios forem repetidos com as mesmas condições de material, tratamento térmico, tratamento superficial, etc, os resultados obtidos se encontrará entre estes limites. Pode-se ver pela análise das Tabelas 4.21 a 4.28, que quanto menor o β , maior o intervalo da confiabilidade, o que indica alta dispersão dos resultados.

Analizando os resultados das Tabelas 4.21 a 4.25, para material com 30HRc, temos:

- A Tabela 4.21 para o material base polido apresenta $\beta > 1$ para todos os níveis de tensão, logo os resultados são confiáveis.
- A Tabela 4.22 para o material base polido e nitretação apresenta $\beta > 1$ para todos os níveis de tensão, logo os resultados são confiáveis.
- A Tabela 4.23 para o material base com concentrador apresenta $\beta > 1$ para todos os níveis de tensão, logo os resultados são confiáveis. Este tratamento superficial, criando concentradores de tensão por riscos de usinagem, foi a condição que fornece os maiores β , ficando sempre acima de 4,2, o que mostra a homogeneidade deste tratamento e sua predominância sobre os outros defeitos.



- A Tabela 4.24 para o material base polido com shot peening apresenta $\beta > 1$ para todos os níveis de tensão, logo os resultados são confiáveis.

- A Tabela 4.25 para o material base com concentrador e nitretação apresenta $\beta < 1$ para os níveis de tensão de 755MPa e 716MPa.

Para o nível de tensão de 755MPa, com $\beta = 0,51740$, onde um corpo de prova rompeu com 3.700 ciclos e os outros dois com 68.200 e 71.100 ciclos, respectivamente, a análise fractográfica do corpo de prova relevou uma inclusão superficial, por onde iniciou-se a trinca.

Para o nível de tensão de 716MPa, com $\beta = 0,77642$, onde um corpo de prova rompeu com o menor de ciclos de 95.700 e o outro com o maior número de ciclos de 1.806.100, feito análise da fratura por microscópio eletrônico de varredura – MEV, constatou-se uma aparente falha na homogeneidade da camada branca, provavelmente causada pelo arame de amarração do corpo de prova para ser colocado no forno, que levou este corpo de prova a uma fratura prematura.

Se em ambos os casos, se eliminar este elo mais fraco e recalcular, encontra-se $\beta = 30,38040$ e $\beta = 1,01073$ para os níveis de tensão de 755MPa e 716MPa, respectivamente. Estes valores de β são maiores do que 1, logo são aceitos como estatisticamente corretos pelo critério inicial.

Analizando os resultados das Tabelas 4.26 a 4.28, para o material com 39HRc, temos:

- A Tabela 4.26 para o material base polido apresenta $\beta < 1$ para o nível de tensão de 643MPa. Como estes dados foram fornecidos gentilmente por Nascimento (1999), não se dispõe das fotos da fractografia da superfície fraturada para análise.

- A Tabela 4.27 para o material base polido e nitretação apresenta $\beta > 1$ para todos os níveis de tensão.

- A Tabela 4.28 para o material base com concentrador e nitretação apresenta $\beta > 1$ para todos os níveis de tensão.

5.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO EFEITO DAS INCLUSÕES NO MATERIAL NITRETADO

Analisando os resultados das Tabelas 4.29 a 4.32, vê-se que a relação entre σ' e σ_w , para todos os corpos de prova apresentados nas Tabelas, com exceção do corpo de prova 1K, onde não deu para calcular a $\sqrt{a}$, devido à inclusão estar na superfície e disforme, ela foi maior do que 1.

Se a relação entre σ' e σ_w é maior do que 1,20 significa que os valores obtidos nos ensaios estão acima dos valores encontrados pela predição.

A inclusão *não influenciou* de forma decisiva na resistência à fadiga.

5.8 ANÁLISE DA GEOMETRIA DA ÁRVORE

Conforme relatado num breve histórico no Capítulo 2, esta árvore em estudo teve várias alterações no tratamento do material e da superfície, bem como, nas suas dimensões. Todas estas alterações tinham o objetivo de aumentar sua vida em fadiga.

Pode-se ver na Figura 2.12 o perfil da árvore, mostrando a trinca e um escalonamento de três diâmetros. Pode-se ver na Figura 2.16 o perfil da árvore, onde os três diâmetros escalonados foram substituídos por um espaçador.

Com a criação deste espaçador e de um raio grande entre o diâmetro da árvore e o flange da árvore a trinca nunca mais ocorreu no diâmetro da árvore como ocorria antes da criação do espaçador. A trinca passou a ocorrer conforme Figura 2.15, iniciando do diâmetro maior terminando no diâmetro menor.

A causa provável é que com a retirada de material atrás do flange, o qual foi substituído por um espaçador, como pode ser visto nas Figuras 2.8 e 2.12, a secção resistente foi diminuída e elevou o nível de tensão na região do diâmetro maior como indicado na Figura 2.15, tornando esta região crítica a ponto de iniciar trinca por fadiga.

Este fato foi mais agravado com a falha no processo de nitretação citado no item 4.6.



6 CONCLUSÕES

6.1 CONCLUSÕES SOBRE O TRABALHO

Os resultados dos ensaios de fadiga por flexão rotativa claramente demonstram o efeito prejudicial dos concentradores de tensões, na vida em fadiga do aço ABNT 4340 forjado, com 30HRc.

O aço ABNT 4340 forjado, com 30HRc, com o tratamento termoquímico de nitretação, apresentou um excelente desempenho na resistência à fadiga em flexão rotativa.

O material base com concentrador e nitretação, com dureza de 30HRc e 39HRc, apresentaram uma ligeira melhora na vida em fadiga em flexão rotativa, comparado ao material base polido e nitretação.

O aumento da resistência à fadiga do material base polido com shot peening, com a intensidade usada neste estudo, na dureza de 30HRc e 39HRc, teve sua contribuição pouco significativa na vida em fadiga, comparado ao material base polido.

A nitretação em banho de sal, através da formação da camada branca, formada por nitretos de ferro, e pela difusão de nitrogênio, responsável pela formação de nitretos com os elementos de liga do material e por solução sólida intersticial na matriz, deixou o material com tensão residual compressiva numa larga faixa de profundidade e dureza elevada na superfície (camada branca), não permitindo o início da trinca na superfície, em fadiga de alto ciclo. Os corpos de prova ensaiados à flexão rotativa, com 30HRc e 39HRc, em fadiga de alto ciclo, apresentaram início de trinca no interior do material e iniciando-se numa inclusão.

A nitretação, no material base com concentrador e nitretação, tanto para 30HRc quanto para 39HRc, comparado ao material base polido e nitretação, mostrou que não há necessidade de polimento no material para a aplicação da nitretação, caso o acabamento superficial não seja mandatório, visto que seu desempenho em fadiga por flexão rotativa em alto ciclo foi melhor.

A micrografia dos corpos de prova de material com concentrador e nitretação, mostram uma camada branca homogênea e sem microtrincas. Garantindo uma característica de processo confiável.

A micrografia da região fraturada na árvore em estudo, revelou a falta de camada branca, onde se deu início da trinca principal, indicando que houve falha no processo de nitretação.

A análise dimensional comparativa da árvore em estudo, com a retirada de material da árvore e colocação do espaçador, mostra claramente que houve uma diminuição da seção resistente e o conseqüente aumento no nível de tensão, causando a mudança na posição da trinca.

A causa real da falha prematura da árvore foi a elevação no nível da tensão, causada pela retirada de material para colocação do espaçador, a fim de aliviar o concentrador de tensão, e a falta de nitretação na região crítica, causada por falha no processo de nitretação.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando as conclusões deste trabalho de pesquisa, sugere-se os seguintes trabalhos futuros:

- Fazer um levantamento de campo das cargas reais na árvore em estudo, e calcular os esforços por modelamento em elementos finitos.
- Estudar o efeito da nitretação em banho de sal em aço ABNT 4340 com marcas de usinagem e polido, em fadiga por flexão rotativa.
- Variar a profundidade da camada nitretada em banho de sal e a dureza do material base e mensurar os efeitos em fadiga por flexão rotativa.
- Variar a intensidade de shot peening no aço ABNT 4340 com dureza de 28/32HRC e 38/42HRC e mensurar os efeitos em fadiga por flexão rotativa.
- Estudar outros processos de nitretação, aplicados ao aço SAE 4340 e sua influência na resistência à fadiga por flexão rotativa.



REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8**: Test methods for tension testing of metallic materials, 1994a, p.60-80.

ANTUNES, I. C. R. **Influência do fator intensidade de tensão na propagação de trincas por fadiga no aço carbono manganês A516-70N - Soldado**. 1997. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Projetos e Materiais) – Faculdade de Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E-8M**: Standard test methods for tension testing of metallic materials, 1994a, p.81-100.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E-18**: Standard test methods for rochwell hardness and rockwell superficial hardness of metallic materials, 2000, p.1-14.

BAPTISTA, C. A. R. P. **Estudo da propagação da trinca por fadiga em um aço de baixo carbono submetido a tratamentos térmicos intercríticos**. 1993. 107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Projetos e Materiais), Faculdade de Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá, Universidade do Estadual Paulista, Guaratinguetá:

BLASTIBRÁS, tratamentos de metais Ltda.: informes técnicos. São Paulo, v.1., p.1.40.

BRANCO, C. M.; FERNANDES, A. A.; CASTRO, P. M. S. T. **Fadiga de estruturas soldadas**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1986, 290p.

BRASIMET, Influência da dimensões de peças nitretadas sobre o aumento da resistência à fadiga. Boletim Técnico, Tenifer-Mitteilungen nº14.

BUDINSKI, K. G. **Surface engineering for wear resistance**. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, 1988.

CARVALHO, A. L. M. **Comportamento mecânico das ligas de alumínio 7010 – T74 e 705051 - T74 de aplicação aeronáutica**. 1999. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Projetos e Materiais) - Faculdade de Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7ª. ed., São Paulo: **ABM**, 1986, p.96-114.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. p.178-214.

CORRÊA, S. R. **Avaliação da resistência à fadiga da liga Ti-6Al-4V soldada pelo processo TIG**. 2000. 82f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Faculdade de Engenharia Química de Lorena, Lorena.

COTTRELL, A. H. **Introdução à metalurgia**, 3ª ed., Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1976.

DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1981. 653p.

DEUTSCHER NORMEN - EN 55027: Spindle noses with centering taper, face plate and bayonet type fastening, accessories - dimensions, 1980.

ECKERSLEY, J. S. **Shot peening process controls ensure repeatable results**. Edited by Dr. A. Niku - Lari. Shot Peener, v.15, issue 2, 2001. p.4-7.

FUCHS, H. D.; STEPHENS, R. I. **Metal fatigue in engineering**. New York: Wiley Interscience, 1980, 318p.

GUAGLIANO, M.; VERGANI, L. Effect of nitriding on low - cycle fatigue propriedades. **Internacional Journal of Fatigue**, v. 19, p.67-73, 1997.

HASHIMOTO, T. M. **Efeito da concentração de tensões na fadiga com dano acumulado em flexão rotativa em liga Al-Mg-Si**. 1976. Dissertação (Mestrado em



Engenharia Mecânica) - Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos. 79p.

HASHIMOTO, T. M. **Fadiga do aço de baixo carbono com microestrutura bifásica**. Guaratinguetá, 1989. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica - Projetos e Materiais) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista. 160p.

JERONYMO, C. E., CRISTÓVÃO, H. M. Comportamento à fadiga de um conjugado epoxi-fibra de carbono – análise estatística de ensaio de fadiga. 1987. p.18-42. Trabalho de graduação (Engenharia Aeronáutica) – Centro Técnico Aeroespacial, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

KELLY, A., HARRIS, M. I. A tomada de decisão e a abordagem estatística da falha. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Petróleo, 1980, p.13-45.

KLESNIL, M., LUKAS, P. **Fatigue of metallic materials**. 2ed. Nova York: Elsevier Science Publishing Company, Inc. 1992, 270p.

KOCANDA, S. **Fatigue failure of metals**. Polônia: Sijthoff & Noordhoff. 1978, 368p.

LASSANCE, C. A. F. Como controlar operações de shot peening **Revista de Engenharia FAAP**, São Paulo, Dezembro 1984, Ano III, nº 5.

LEIFELD Co.. Spindelkasten 600SN, Nr 100600090000-1. Ahlen, 1970.

MEYERS, J. R., BOMBERGER, H. B., FROES, F. H. Corrosion behavior and use of titanium and its alloys. **Journal of metals**, v. 36, n.10, p.50-60, Oct., 1984.

MEYERS, M. A. , CHAWLA, K. K. **Princípios de Metalurgia Mecânica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.

METAL IMPROVEMENT COMPANY, INC., M. I. C., **Shot peening applications**. Technical Booklet, 7ª ed.

MIL-S-13165C, **Military specification shot peening of metals parts**, Dec., 1966.



MURAKAMI, Y., KAWAKAMI, K., DUCKWORTH, W. E. Quantitative evaluation of effects of shape and size of artificially introduced alumina particles on the fatigue strength of 1.5 Ni – Cr – Mo (En 24) steel. **International journal of fatigue**, v.13, n.6, p.487-499, Nov., 1991.

MONTEIRO, A.L.A. Um sistema para cálculo da resistência mecânica de materiais frágeis pelo uso do método estatística de Weibull. Guaratinguetá, 2001. Monografia de Especialização do Curso de Informática Empresarial. Faculdade de Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

NASCIMENTO, M. P. Determinação da vida em fadiga do aço ABNT 4340 revestido com cromo duro sobre níquel químico. 1999. 158p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Projetos e Materiais), Faculdade de Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

PASTOUKHOV, V. A. VOORWALD, H. J. C. **Introdução à mecânica da integridade estrutural**. São Paulo: Editora da Universidade Estadual Paulista, 1995. 192p.

PERES, M. P. **Estudo do efeito do tempo e da temperatura de desidrogenação na resistência à fadiga do aço ABNT 4340 que sofreu eletrodeposição de cádmio**. 1996. 157p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais), Departamento de Engenharia de Materiais, Faculdade de Engenharia Química de Lorena, Lorena.

PEREIRA, C. P. M., PERES, M. P., PASTOUKHOV, V.A. Experimental Investigation of fatigue crack propagation in 7475-T761 aluminum alloy. In: INTERNACIONAL CONFERENCE EXPERIMENTAL MECHANICS, 10, 1994, Lisboa. **Proceedings ... Lisboa**, v.10, p. 195-200.

PEREIRA, C. P. M., **Fadiga na Liga Al 7475-T761**. 1996. Tese (Doutor em Engenharia de Materiais), Faculdade de Engenharia Química de Lorena, Lorena.

PETERSON, R. E. **Stress concentration design factors**. New York: John Wiley, 5 ed., 1966, 154p.



PREVEY, P. S. **X-Ray diffraction characterization of residual stresses produced by shot peening**. Edited by Dr. A Niku - Lari. Shot peener, v.15, issue 2, p.4-8, 2001.

REED-HILL, R. E. **Princípios de metalurgia**. 2ed. Rio de Janeiro, 1982.

SILVA, E. M. R. **Análise, com abordagem estatística, da acumulação de dano do titânio sob condições de fadiga cíclica**, 1998. 104p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Faculdade de Engenharia Química de Lorena, Lorena.

SILVA, P. S. C. P. **Comportamento Mecânico e fratura de componentes e estruturas metálicas**. Universidade Federal do Paraná, 1999.

SHIGLEY, J. E. , MITCHELL, L. D. **Mechanical engineering design**. 4.ed. New York: McGraw-Hill, 1983.

SOUZA, R. C. **Estudo do comportamento em fadiga do aço ABNT 4340 revestimento com carreto de tungstênio pelo sistema HVOF / HP**. 1988. 152f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Projetos e Materiais) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

SOUZA, S. A. . **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. São Paulo: Edgard Blücher, 1974. p.130-56.

TIMOSHENKO, S. P., GOODIER, J. N. **Teoria da elasticidade**, 3.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980. p. 177-80.

TORRES, M. A. S. **Análise e modelamento do retardo na propagação de trincas por fadiga em carregamentos de amplitude variável para a liga de alumínio 2024 T3**. 1992. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Projetos e Materiais) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

TORRES, M. A. S. **Avaliação do efeito do shot peening na vida em fadiga do aço ABNT 4340 com ou sem revestimento de cromo duro**. 2002. 223f. Tese (Doutorado



em Engenharia Mecânica - Projetos e Materiais) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

WATANABE, T. M. **O jateamento com gralhas**. Indústria de fundição Tupy Ltda.

WILLEMS, N., EASLEY, J. T. , ROLFES, S. T. **Strength of materials**. New York: McGraw-Hill, 1981.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**. Trad. de E. Monteiro. Rio de Janeiro: Campus, 1984. p. 239-243.

VILLARES, Aços S. A. **Composição química de aços**. Catálogo Técnico.

VOORWALD, H. J. C. **Estatística de Weibull**. Guaratinguetá: FEG-UNESP. p.1-10 (Relatório técnico).

VOORWALD, H. J. C. **Análise sobre a influência de algumas variáveis no comportamento em fadiga por flexão rotativa em aços ABNT 4140 e ABNT 4340**. 1983. 157f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos.

VOORWALD, H. J. C. **Propagação da trinca por fadiga em chapas finas de liga de alumínio de alta resistência sob carregamento de amplitude variável**. 1988. 198f. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

VOORWALD, H. J. C., HASHIMOTO, T. M., ZANGRANDI, A. Influência de concentradores de tensões ABNT 8640 em fadiga de alto ciclo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 8, 1985, **Anais...** São José dos Campos, 1985. p. 809-812.

ZAHAVI, E., TORBILO, V. **Life expectance of machine parts: fatigue design**. CRC Press, Inc., Boca Raton, 1996.



CONTROLE DE QUALIDADE

RESUMO

Resumo de ensaios nº 4427, 11/01/01, Anexo 1

OBJETO DA REMISSÃO

Empresa: ALUMIN COMPONENTES SINDICATA S/A
Item: 24234
Data: 11/01/01
Ponto: 100
Descrição: FOLHA CORPO DE RESERVA

SUPLEMENTAÇÃO

Item: 24234
Descrição: FOLHA CORPO DE RESERVA
Data: 11/01/01
Ponto: 100
Descrição: FOLHA CORPO DE RESERVA

ANEXOS

ANEXO 1

Descrição: FOLHA CORPO DE RESERVA
Data: 11/01/01
Ponto: 100
Descrição: FOLHA CORPO DE RESERVA

CONCLUSÃO

Descrição: FOLHA CORPO DE RESERVA
Data: 11/01/01
Ponto: 100
Descrição: FOLHA CORPO DE RESERVA

ANEXO 2

Descrição: FOLHA CORPO DE RESERVA

Descrição: FOLHA CORPO DE RESERVA
Data: 11/01/01
Ponto: 100
Descrição: FOLHA CORPO DE RESERVA

Descrição: FOLHA CORPO DE RESERVA
Data: 11/01/01
Ponto: 100
Descrição: FOLHA CORPO DE RESERVA

ANEXO 3

Descrição: FOLHA CORPO DE RESERVA
Data: 11/01/01
Ponto: 100
Descrição: FOLHA CORPO DE RESERVA

BRASIMET**CONTROLE DE QUALIDADE****Resultados de ensaios Nº**

44627

17/04/01

Anexo A

DADOS DA REMESSAEmpresa: **MAXION COMPONENTES ESTRUTURAIS LTDA**

Nota Fiscal Nº: 244524

Data: 11/04/01

Peso: .100

Quantidade: 1

Descrição das Peças: **CORPO DE PROVA P/ ENSAIO****ESPECIFICAÇÕES**Material: **SAE 4340**Tratamento Térmico: **MEDMDUR - SERVICOS DE LABORATORIO**Dureza Superficial: **MIN a 650 HV0.2**

Dureza de Núcleo:

Profundidade da Camada: **0.20 a 0.30 mm LUPA**

Outras:

RESULTADOSOrdem de Serviço: **121324 Lote : 1**Dureza Superficial: **a 644 HV0.2**

Dureza de Núcleo:

Profundidade da Camada: **NHT HV 0.2**Outros: **CAMADA EM NHT 0.05-490***0.10-473***0.28-381****CONCLUSÃO**~~Foram atingidas suas especificações, conforme solicitado no documento de remessa.~~**BRASIMET**

DIV. TRAT. TÉRMICOS

UNIDADE: **BRASIMET COMERCIO E**O. S. Nº **121324**LOTE Nº **1****ENTOS E INSTRUÇÕES DE TRABALHO****FORME NORMA SÉRIE ISO-9002.**FIRMA: **MAXION COMPONENTES ESTRUTURAIS LTDA**PEÇA: **CORPO DE PROVA P/ ENSAIO**S/NF: **244524 - 01 / 1**PESO: **0,100**Nº PEÇAS: **1**CAMADA: *ver co*DUR. SUP.: **644 HV0.2**

DUR. NUC.:

RCIO E INDÚSTRIA S.A.**17 de Abril****de 2001**

ESTA ETIQUETA GARANTE A RASTREABILIDADE DO MATERIAL.

<http://www.brasimet.com.br>

SÃO PAULO (SP) Av. das Nações Unidas, 21.476
DIADEMA (SP) Rua 27 de Março, 91
GUARULHOS (SP) Rua Indubel, 115 - Jardim Cumbica
CAMPINAS (SP) R. Pedro Gianfrancisco, 200
CONTAGEM (MG) Via Sócrates M. Bittencourt, 1.300 - Cinco
SÃO LEOPOLDO (RS) Estrada do Socorro, 340 - Campina
JOINVILLE (SC) Rua Tuiuti, 3.575 - Aventureiro

CEP 04795-912
CEP 09941-650
CEP 07170-353
CEP 13065-195
CEP 32010-010
CEP 93135-390
CEP 89226-000

C.P. 22.531
C.P. 173
C.P. 251
C.P. 375

CEP 04798-970
CEP 09910-970
CEP 13001-970
CEP 93001-970

TEL. (11) 5525-6600
TEL. (11) 4070-7222
TEL. (11) 6432-5478
TEL. (19) 245-1011
TEL. (31) 351-0566
TEL. (51) 568-1177
TEL. (47) 467-1173

FAX (11) 5525-6855
FAX (11) 4071-1813
FAX (11) 6432-5330
FAX (19) 245-1634
FAX (31) 351-7934
FAX (51) 568-1277
FAX (47) 467-1264

BR - 4422 - 6 000 - 02/01 - Coppola

BRASIMET**CONTROLE DE QUALIDADE****Resultados de ensaios N°**

46323

18/06/01

Anexo B

DADOS DA REMESSAEmpresa: **MAXION COMPONENTES ESTRUTURAIS LTDA**

Nota Fiscal N° 252004

Data: 06/06/01

Peso: 2.440

Quantidade: 18

Descrição das Peças: **BARRA REDONDA C.P. A FLEXAO ROTATIVA DIAM.
8X12X160MM PC6902135****ESPECIFICAÇÕES**

Material: 4340

Tratamento Térmico: **NTN2B - NITRETACAO TENIFER**

Dureza Superficial:

Dureza de Núcleo:

Profundidade da Camada:

mm NHT

Outras:

RESULTADOS

Ordem de Serviço: 124905 Lote : 1

Dureza Superficial: 528 a 549 HV0.2

Dureza de Núcleo:

Profundidade da Camada: NHT 353 HV0.2

Outros: **CAMADA EM NHT 0.05-509/0.10-441/0.20-386/0.31-353****TESTE DE SULFATO DE COBRE OK.****CONCLUSÃO**

Foram atingidas suas especificações, conforme solicitado no documento de remessa.

**ENSAIOS EXECUTADOS ATRAVÉS DE PROCEDIMENTOS E INSTRUÇÕES DE TRABALHO
DO SISTEMA DE GARANTIA DA QUALIDADE CONFORME NORMA SÉRIE ISO-9002.****BRASIMET COMÉRCIO E INDÚSTRIA S.A.
CAMPINAS**

18 de Junho

de 2001

<http://www.brasimet.com.br>

SÃO PAULO (SP) Av. das Nações Unidas, 21.476
DIADEMA (SP) Rua 27 de Março, 91
GUARULHOS (SP) Rua Indubel, 115 - Jardim Cumbica
CAMPINAS (SP) R. Pedro Gianfrancisco, 200
CONTAGEM (MG) Via Sócrates M. Bittencourt, 1.300 - Cinco
SÃO LEOPOLDO (RS) Estrada do Socorro, 340 - Campina
JOINVILLE (SC) Rua Tuiuti, 3.575 - Aventureiro

CEP 04795-912
CEP 09941-650
CEP 07170-353
CEP 13065-195
CEP 32010-010
CEP 93135-390
CEP 89226-000

C.P. 22.531
C.F. 173
C.P. 251
C.P. 375

CEP 04798-970
CEP 09910-970
CEP 13001-970
CEP 93001-970

TEL. (11) 5525-6600
TEL. (11) 4070-7222
TEL. (11) 6432-5478
TEL. (19) 245-1011
TEL. (31) 351-0566
TEL. (51) 568-1177
TEL. (47) 467-1173

FAX (11) 5525-68
FAX (11) 4071-18
FAX (11) 6432-53
FAX (19) 245-16
FAX (31) 351-79
FAX (51) 568-12
FAX (47) 467-12

BR-4422 - 20.000 - 03/01 - Coppola

BRASIMET**CONTROLE DE QUALIDADE****Resultados de ensaios Nº**

46985

16/07/01

Anexo C

DADOS DA REMESSAEmpresa: **MAXION COMPONENTES ESTRUTURAIS LTDA**

Nota Fiscal Nº256476

Data: 11/07/01

Peso: .140

Quantidade: 1

Descrição das Peças: **CORPO DE PROVA *B4*VIA SEDEX*****ESPECIFICAÇÕES**Material: **4340**Tratamento Térmico: **MEDMDUR - SERVICOS DE LABORATORIO**

Dureza Superficial:

Dureza de Núcleo:

Profundidade da Camada:

mm NHT

Outras:

RESULTADOS

Ordem de Serviço: 126535 Lote : 1

Dureza Superficial: 644 HV 0.2

Dureza de Núcleo:

Profundidade da Camada: NHT 321 HV0.2

Outros: **CAMADA EM NHT 0.05-509***0.10-473***0.35-321****CONCLUSÃO**

Foram atingidas suas especificações, conforme solicitado no documento de remessa.

BRASIMET

DIV. TRAT. TÉRMICOS

FIRMA: **MAXION COMPONENTES ESTRUTURAIS LTDA**PEÇA: **CORPO DE PROVA *B4*VIA SEDEX***UNIDADE: **BRASIMET COMERCIO E**

O. S. Nº 126535

LOTE Nº 1

**ENTOS E INSTRUÇÕES DE TRABALHO
FORME NORMA SÉRIE ISO-9002.**

S / NF: 256476 - 01 / 1

PESO: 0,140

Nº PEÇAS: 1

CAMADA:

DUR. SUP.:

DUR. NUC.:

RCIO E INDÚSTRIA S.A.

16 de Julho

de 2001

ESTA ETIQUETA GARANTE A RASTREABILIDADE DO MATERIAL

<http://www.brasimet.com.br>

SÃO PAULO (SP) Av. das Nações Unidas, 21.476
DIADEMA (SP) Rua 27 de Março, 91
GUARULHOS (SP) Rua Indubel, 115 - Jardim Cumbica
CAMPINAS (SP) R. Pedro Gianfrancisco, 200
CONTAGEM (MG) Via Sócrates M. Bittencourt, 1.300 - Cinco
SÃO LEOPOLDO (RS) Estrada do Socorro, 340 - Campina
JOINVILLE (SC) Rua Tuiuti, 3.575 - Aventureiro

CEP 04795-912
CEP 09941-650
CEP 07170-353
CEP 13065-195
CEP 32010-010
CEP 93135-390
CEP 89226-000

C P. 22.531
C P. 173
C P. 251
C P. 375

CEP 04799-970
CEP 09910-970
CEP 13001-970
CEP 93001-970

TEL. (11) 5525-6600
TEL. (11) 4070-7222
TEL. (11) 6432-5478
TEL. (19) 245-1011
TEL. (31) 351-0566
TEL. (51) 568-1177
TEL. (47) 467-1173

FAX (11) 5525-681
FAX (11) 4071-181
FAX (11) 6432-531
FAX (19) 245-101
FAX (31) 351-79
FAX (51) 568-12
FAX (47) 467-12

BR-4422 - 20 000 - 03/01 - Coppola

BRASIMET**CONTROLE DE QUALIDADE****Resultados de ensaios Nº**

49026

26/09/01

Anexo D

DADOS DA REMESSA

Empresa: MAXION COMPONENTES ESTRUTURAIS LTDA

Nota Fiscal Nº: 265660

Data: 19/09/01

Peso: 5.040

Quantidade: 36

Descrição das Peças: CORPO DE PROVA DIAM. 12X8X160MM *B4*

ESPECIFICAÇÕES

Material: 4340

Tratamento Térmico: NTN2B - NITRETAÇÃO TENIFER

Dureza Superficial:

Dureza de Núcleo:

Profundidade da Camada:

mm NHT

Outras:

RESULTADOS

Ordem de Serviço: 130666 Lote : 1

Dureza Superficial: 766 a 841 HV0.2

Dureza de Núcleo:

Profundidade da Camada: NHT 412 HV0.2

Outros: CAMADA EM NHT 0.05-593***0.20-441***0.26-412

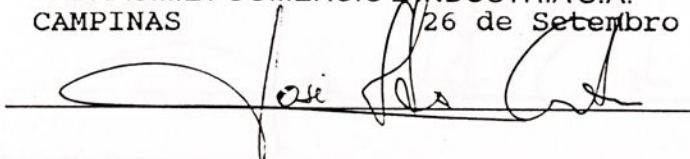
TESTE DE SULFATO DE COBRE OK.

CONCLUSÃO

Foram atingidas suas especificações, conforme solicitado no documento de remessa.

ENSAIOS EXECUTADOS ATRAVÉS DE PROCEDIMENTOS E INSTRUÇÕES DE TRABALHO DO SISTEMA DE GARANTIA DA QUALIDADE CONFORME NORMA SÉRIE ISO-9002.BRASIMET COMÉRCIO E INDÚSTRIA S.A.
CAMPINAS

26 de Setembro de 2001

<http://www.brasimet.com.br>

SÃO PAULO (SP) Av. das Nações Unidas, 21.476
DIADEMA (SP) Rua 27 de Março, 91
GUARULHOS (SP) Rua Indubel, 115 - Jardim Cumbica
CAMPINAS (SP) R. Pedro Gianfrancisco, 200
CONTAGEM (MG) Via Sócrates M. Bittencourt, 1.300 - Cinco
SÃO LEOPOLDO (RS) Estrada do Socorro, 340 - Campina
JOINVILLE (SC) Rua Tuiuti, 3.575 - Aventureiro

CEP 04795-912
CEP 09941-650
CEP 07170-353
CEP 13065-195
CEP 32010-010
CEP 93135-390
CEP 89226-000

C.P. 22.531
C.P. 173
C.P. 251
C.P. 375

CEP 04798-970
CEP 09910-970
CEP 13001-970
CEP 93001-970

TEL. (11) 5525-6600
TEL. (11) 4070-7222
TEL. (11) 6432-5478
TEL. (19) 245-1011
TEL. (31) 351-0566
TEL. (51) 568-1177
TEL. (47) 467-1173

FAX (11) 5525-6855
FAX (11) 4071-1813
FAX (11) 6432-5330
FAX (19) 245-1634
FAX (31) 351-7934
FAX (51) 568-1277
FAX (47) 467-1264

BR-4422 - 10.000 - 07/01 - Coppola

BRASIMET**CONTROLE DE QUALIDADE****Resultados de ensaios Nº**

48108

28/08/01

ANEXO E

DADOS DA REMESSA

Empresa: MAXION COMPONENTES ESTRUTURAIS LTDA

Nota Fiscal Nº: 261013

Data: 13/08/01

Peso: 9.880

Quantidade: 37

Descrição das Peças: BARRA REDONDA DIAM. 5/8"X160MM +02C.P

ESPECIFICAÇÕES

Material: 4340

Tratamento Térmico: ACBLS10A - TEMPERA E REVENIMENTO

Dureza Superficial: 38 a 40 HRC

Dureza de Núcleo:

Profundidade da Camada: mm

Outras:

RESULTADOS

Ordem de Serviço: 128392 Lote : 1

Dureza Superficial: 39 a 40 HRC

Dureza de Núcleo:

Profundidade da Camada:

Outros:

CONCLUSÃO

Foram atingidas suas especificações, conforme solicitado no documento de remessa.

ENSAIOS EXECUTADOS ATRAVÉS DE PROCEDIMENTOS E INSTRUÇÕES DE TRABALHO DO SISTEMA DE GARANTIA DA QUALIDADE CONFORME NORMA SÉRIE ISO-9002.BRASIMET COMÉRCIO E INDÚSTRIAS S.A.
CAMPINAS

28 de Agosto

de 2001

<http://www.brasimet.com.br>

SÃO PAULO (SP) Av. das Nações Unidas, 21.476
DIADEMA (SP) Rua 27 de Março, 91
GUARULHOS (SP) Rua Indubel, 115 - Jardim Cumbica
CAMPINAS (SP) R. Pedro Gianfrancisco, 200
CONTAGEM (MG) Via Sócrates M. Bittencourt, 1.300 - Cinco
SÃO LEOPOLDO (RS) Estrada do Socorro, 340 - Campina
JOINVILLE (SC) Rua Tuiuti, 3.575 - Aventureiro

CEP 04795-912
CEP 05941-650
CEP 07170-353
CEP 13065-195
CEP 32010-010
CEP 93135-390
CEP 89226-000

C.P. 22.531
C.P. 173
C.P. 251
C.P. 375

CEP 04798-970
CEP 09910-970
CEP 13001-970
CEP 93001-970

TEL. (11) 5525-6600
TEL. (11) 4070-7222
TEL. (11) 6432-5478
TEL. (19) 245-1011
TEL. (31) 351-0566
TEL. (51) 568-1177
TEL. (47) 467-1173

FAX (11) 5525-6855
FAX (11) 4071-1813
FAX (11) 6432-5330
FAX (19) 245-1634
FAX (31) 351-7934
FAX (51) 568-1277
FAX (47) 467-1264

BR-4422 - 8.000 - 06/01 - Cópia

26 OCT. 1958 01:13

Anexo F

[illegible][illegible]

Admiral

APÊNDICE

TABLE III
 β FUNCTION DATA

