

Carlos Alberto Carvalho Castro

ESTUDO DO COMPORTAMENTO À FADIGA DE  
METAIS DENTRO E FORA DA ÁGUA NA PRESENÇA  
DA PRESSÃO HIDROSTÁTICA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Alexandre Queiroz Bracarense, PhD.

(Universidade Federal de Minas Gerais)

Belo Horizonte

2007

**Para Glauca e Laura,  
presentes de DEUS nesta minha existência.**

## **Agradecimentos**

Agradeço inicialmente a DEUS pela vida;

Aos meus pais, Atair e Maria Aparecida pelo carinho e apoio;

Ao Professor Alexandre Queiroz Bracarense pelo apoio, orientação e confiança;

Aos Professores que nesse caminho tive o prazer de conhecer;

Aos colegas que propiciaram várias alegrias pelo convívio;

Aos colegas do GRSS, principalmente, Eduardo Lima, Ezequiel, Papatela, Leonardo, Alexandre Rizzuto, Fred, Guilherme, Zanata, Luciano, em especial ao Álvaro e Getúlio;

A Dona Margarida e o Sr. Geraldo pela amizade e carinho;

Ao CDTN/CNEN pelo apoio nos testes, principalmente ao Nirlando, Jéferson, Geraldo Scoralick, Wlamir, Paulo de Tarso, Eduardo Carvalho, Vagner e Nelson;

Ao CEFET-MG, principalmente ao Ismail, ao Nilton, Vanderlei, Joel, Edinho (Edson) e Denise pela colaboração;

Ao SENAI, principalmente, a Miriam e ao Cleiton José;

Ao Adão da Acesita pela ajuda prestada;

A CNPQ pelo apoio financeiro;

A todos, muito obrigado.

## Resumo

A fadiga é a forma mais comum de falha estrutural e, ao longo do tempo, tem sido um problema desafiador devido às solicitações impostas e ao tipo de carga aplicada.

Nesse trabalho é feito um estudo sobre os efeitos da fadiga do aço SAE A-36 em três ambientes: refrigerado, lâmina d'água e dentro da água na presença de pressão hidrostática com 5 atm.

Para isso, foi desenvolvida e construída uma máquina de fadiga flexo-rotativa voltada para condições específicas, com a finalidade de ensaiar em ambientes distintos e simular as condições de trabalho do aço. Isso é importante, pois não há confirmação da resistência à fadiga subaquática. Os testes de fadiga subaquática são realizados, normalmente, ao ar e não na água.

Com os resultados dos ensaios de fadiga foram levantadas as curvas S-N. Esses dados possibilitaram a construção das curvas S-N-P com 1%, 50% e 99% de probabilidade de falha para verificar o limite de resistência à fadiga para os ambientes. A metodologia empregada foi o modelo de regressão para dados de testes de vida acelerados.

Para avaliar o acúmulo de dano, utilizou alguns modelos conhecidos na literatura. Nessa linha, propõe um método para prever a vida útil de materiais submetidos à fadiga, considerando o número de ciclos e o dano acumulado em cada tensão aplicada.

Para complementação deste estudo foram realizadas análises de macrodureza, microdureza e MEV.

**PALAVRAS CHAVE:** fadiga, ensaio flexo-rotativa, curva S-N, curva S-N-P.

## **Abstract**

The fatigue is the most common form of structural failure and, throughout time, it has been a challenging problem due to the imposed solicitations and the kind of load applied.

In this work, the fatigue study effects of the SAE A-36 steel were studied in three different environments: cooled, water layer and inside the water in the presence of hydrostatic pressure with 5 atm.

For this, a rotating bending fatigue machine directed for specific conditions was developed and built with the purpose of being tested in distinct environments, simulating the work conditions of steel. This is important, therefore there is no confirmation of the resistance to the underwater fatigue. The underwater fatigue tests are normally carried out in contact with air and not water.

The S-N curves were obtained with the results of the fatigue tests. With this data, the S-N-P curves were made with a fault probability of 1%, 50% e 99% to verify the limit of resistance to the fatigue for the environments. The regression model was the methodology used for the data of the accelerated life tests.

To evaluate the cumulative damage, some known literature models were used. Following this idea, a method of foreseeing the life span of the materials submitted to the fatigue was proposed, considering the numbers of cycles and the cumulative damage in each applied stress.

To complement this study the macrohardness, microhardness and SEM analysis were carried out.

**KEY WORDS:** Fatigue, rotating bending, curves S-N, curves S-N-P.

# SUMÁRIO

SIMBOLOGIA .....	xx
<b>1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUÇÃO .....	1
1.2 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	2
1.4 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO .....	3
1.5 HIPÓTESES.....	3
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
2.1 ASPECTOS GERAIS .....	4
2.2 FADIGA.....	7
2.3 MÉTODO <i>S-N</i> (FADIGA DE ALTO CICLO).....	11
2.3.1 <i>Curva tensão – número de ciclos (S-N)</i> .....	12
2.3.2 <i>Fatores que modificam as curvas S-N</i> .....	14
2.3.2.1 <i>Tensões residuais</i> .....	15
2.3.3 <i>Limitações da curva S-N</i> .....	16
2.4 FADIGA CONTROLADA POR DEFORMAÇÃO - FADIGA DE BAIXO CICLO.....	17
2.4.1 <i>Ciclo tensão-deformação dos materiais</i> .....	18
2.4.2 <i>Curva <math>\epsilon_f \times N</math></i> .....	19
2.5 MÉTODO PARA LEVANTAMENTO DA CURVA <i>S-N</i> .....	20
2.5.1 <i>Método padrão</i> .....	20
2.5.2 <i>Método para levantamento da curva utilizando a tensão constante</i> .....	21
2.5.3 <i>Métodos para levantamento das curvas utilizando as probabilidades ou das curvas S-N-P</i> .....	22
2.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS DE FADIGA.....	23
2.6.1 <i>Determinação do limite de resistência à fadiga (<math>S_e</math>)</i> .....	23
2.6.2 <i>Modelos estatístico de regressão para dados de testes de vida acelerados</i> .....	24

2.6.3	<i>Descrição do modelo de regressão</i> .....	25
2.6.4	<i>Ajuste do modelo de regressão</i> .....	27
2.6.5	<i>Verificação do modelo</i> .....	28
2.7	EFEITO DO MEIO AMBIENTE .....	29
2.8	EFEITO DAS CONDIÇÕES DE ENSAIO .....	32
2.8.1	<i>Tipos de solicitações</i> .....	33
2.8.2	<i>Frequência de aplicações das cargas</i> .....	33
2.8.3	<i>Microestrutura do material</i> .....	33
2.9	TIPOS DE ENSAIOS DE FADIGA.....	34
2.9.1	<i>Ensaio de fadiga axial</i> .....	34
2.9.2	<i>Ensaio de fadiga por flexão em quatro pontos</i> .....	35
2.9.3	<i>Ensaio de Fadiga por flexão em três pontos</i> .....	35
2.9.4	<i>Ensaio de fadiga flexo-rotativa</i> .....	35
2.9.5	<i>Simulação numérica por elementos finitos</i> .....	37
2.10	ACÚMULO DE DANOS.....	37
2.10.1	<i>Fenômenos caracterizados pelo dano</i> .....	38
2.10.2	<i>Variáveis associadas ao dano</i> .....	38
2.10.3	<i>Leis elementares dos danos por fadiga</i> .....	39
2.10.4	<i>Teorias de acúmulo de danos</i> .....	41
2.10.4.1	<i>Teoria de acúmulo de danos de Palmgren-Miner</i> .....	41
2.10.4.2	<i>Teoria do acúmulo de danos de Corten-Dolan</i> .....	42
2.10.4.3	<i>Teoria do acúmulo de danos de Marin</i> .....	44
2.10.4.4	<i>Teoria das médias das tensões atuantes - Mansur</i> .....	44
2.11	INCERTEZA DE MEDIÇÃO.....	45
2.11.1	<i>Incerteza de medição nos valores das tensões</i> .....	46
<b>3.</b>	<b>MATERIAL E METODOLOGIA .....</b>	<b>47</b>
3.1	MÁQUINA DE ENSAIO FADIGA FLEXO-ROTATIVA .....	47
3.2	AQUÁRIO .....	50
3.3	CÂMARA HIPERBÁRICA.....	50
3.4	TIPO DE ÁGUA PARA A REALIZAÇÃO DOS TESTES .....	51

3.5	TESTES METALOGRAFICOS E MECÂNICOS .....	51
3.5.1	<i>Metalografia do material</i> .....	51
3.5.2	<i>Determinação das propriedades mecânicas</i> .....	52
3.5.2.1	Ensaio de tração .....	52
3.5.2.2	Ensaio de dureza.....	53
3.5.2.3	Ensaio de microdureza .....	53
3.6	VERIFICAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DA MÁQUINA DE ENSAIO FLEXO- ROTATIVA.....	54
3.6.1	<i>Corpos-de-prova</i> .....	54
3.6.1.1	Rugosidade nos corpos-de-prova para ensaio de fadiga.....	56
3.7	ENSAIOS DE FADIGA .....	56
3.7.1	<i>Ensaio de fadiga flexo-rotativa</i> .....	56
3.7.2	<i>Tensões atuantes no corpo-de-prova submetido à fadiga flexo-rotativa</i> .....	57
3.7.3	<i>Planejamento dos ensaios para o levantamento da curva S-N-P</i> .....	59
3.7.4	<i>Levantamento das curvas S-N-P</i> .....	60
3.7.5	<i>Determinação do limite de resistência à fadiga (<math>S_e</math>)</i> .....	60
3.8	INTRODUÇÃO DE DANOS EM CORPOS-DE-PROVA .....	61
3.8.1	<i>Ensaio de fadiga flexo-rotativa seguido por ensaio de tração com carregamento único</i> .....	61
3.8.2	<i>Acúmulo de danos em corpos-de-prova submetidos à fadiga flexo-rotativa</i> .....	62
3.8.2.1	Ensaio com cargas aplicadas no sentido crescente.....	62
3.8.2.2	Ensaio com cargas aplicadas no sentido decrescente.....	62
3.9	ANÁLISES FRATOGRÁFICAS .....	63
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>64</b>
4.1	TESTES PRELIMINARES .....	64
4.2	ENSAIOS PARA O AÇO ASTM A-36 .....	66
4.2.1	<i>Ensaio de tração</i> .....	66
4.2.2	<i>Ensaio de dureza</i> .....	67
4.2.3	<i>Ensaio de microdureza</i> .....	67
4.3	VERIFICAÇÃO DA RUGOSIDADE MÉDIA DOS CORPOS-DE-PROVA .....	68
4.4	ANÁLISE QUÍMICA DO MATERIAL.....	68

4.5	CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA DO AÇO A-36 .....	68
4.6	CURVAS S-N DO AÇO SAE A-36 .....	69
4.6.1	<i>Levantamento da curva S-N</i> .....	70
4.6.1.1	Ensaio refrigerado.....	70
4.6.1.2	Ensaio em lâmina d'água.....	70
4.6.1.3	Ensaio em água pressurizada a 5 atm .....	71
4.6.2	<i>Ajuste do modelo de regressão</i> .....	72
4.6.2.1	Ajuste do modelo de regressão para os corpos-de-prova refrigerados .....	72
4.6.2.2	Ajuste do modelo de regressão para os corpos-de-prova em lâmina d'água..	73
4.6.2.3	Ajuste do modelo de regressão para os corpos-de-prova em água pressurizados a 5 atm.....	74
4.7	DETERMINAÇÃO DAS CURVAS S-N-P PARA O AÇO A-36.....	75
4.8	ENSAIOS DE DUREZA EM CORPOS-DE-PROVA SUBMETIDOS AO ENSAIO DE FADIGA FLEXO- ROTATIVA .....	80
4.9	ENSAIOS DE MICRODUREZA EM CORPOS-DE-PROVA SUBMETIDOS AO ENSAIO DE FADIGA FLEXO-ROTATIVA.....	81
4.10	O ESTUDO DAS SUPERFÍCIES DOS CORPOS-DE-PROVA FRATURADOS.....	83
4.11	O ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS EM CORPOS-DE-PROVA SUBMETIDOS À FADIGA FLEXO-ROTATIVA.....	84
4.12	O ESTUDO DO DANO ACUMULADO PROVOCADO POR FADIGA FLEXO-ROTATIVA.....	84
4.13	CÁLCULO DO LIMITE DE RESISTÊNCIA À FADIGA UTILIZANDO O MODELO DE REGRESSÃO .....	84
4.14	VERIFICAÇÃO DAS CARGAS APLICADAS .....	87
4.15	HIPÓTESES.....	92
4.16	HIPÓTESES DE UM MODELO.....	95
4.17	APLICAÇÃO .....	96
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>97</b>

<b>6.</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>100</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>101</b>
<b>8.</b>	<b>ANEXO A.....</b>	<b>107</b>
8.1	SUPERFÍCIE DE FRATURA DOS CORPOS-DE-PROVA .....	107
8.1.1	<i>Análise fratógráficas de corpos-de-prova fraturados .....</i>	<i>110</i>
<b>9.</b>	<b>ANEXO B.....</b>	<b>116</b>
9.1	ENSAIOS DE TRAÇÃO EM CORPOS-DE-PROVA SUBMETIDOS À FADIGA FLEXO-ROTATIVA .....	116
9.1.1	<i>Limites de escoamento, resistência do material e ruptura utilizando uma tensão de 197 MPa.....</i>	<i>116</i>
9.1.2	<i>Limites de escoamento, resistência do material e ruptura utilizando uma tensão de 236 MPa.....</i>	<i>118</i>
9.1.3	<i>Estricção do material utilizando as tensões de 197 e de 236 MPa.....</i>	<i>119</i>
<b>10.</b>	<b>ANEXO C.....</b>	<b>121</b>
10.1	ESTUDO DO DANO ACUMULADO PROVOCADO POR FADIGA FLEXO-ROTATIVA.....	121
10.2	APLICAÇÕES DAS TEORIAS DO DANO .....	122
10.3	PROPOSTA DE UMA NOVA METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE DANO: ESTUDO DO DANO PROGRESSIVO .....	124
<b>11.</b>	<b>ANEXO D.....</b>	<b>129</b>
<b>12.</b>	<b>ANEXO E.....</b>	<b>133</b>
12.1	INCERTEZA DE MEDIÇÃO.....	133
12.1.1	<i>Incerteza de medição da rugosidade média .....</i>	<i>133</i>
12.1.2	<i>Incerteza de medição do número de ciclos – flexo-rotativa.....</i>	<i>133</i>
12.1.3	<i>Incerteza de medição das tensões de flexão .....</i>	<i>133</i>

12.1.4	<i>Incerteza de medição das tensões axiais</i> .....	134
12.1.5	<i>Incerteza de medição da dureza</i> .....	135
12.1.6	<i>Incerteza de medição da microdureza</i> .....	135
<b>13.</b>	<b>ANEXO F</b> .....	<b>136</b>
13.1	NÚMEROS DE CICLOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE FADIGA .....	136

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Plataforma offshore, [Cicilia, 2004].	4
FIGURA 2.2 - Interação fluido-estrutura.	5
FIGURA 2.3 – Representação esquemática mostrando o modelo da iniciação e propagação da trinca por fadiga, adaptado de (Rocha, 2005).	8
FIGURA 2.4 - Parâmetros utilizados nos ensaios fadiga, [Magnabosco, 2000].	9
FIGURA 2.5 - Exemplo de um carregamento variável composto por vários carregamentos constantes [Furtado, 2002].	10
FIGURA 2.6 - Comportamento cíclico em um material sob controle de tensão. Endurecimento cíclico.	11
FIGURA 2.7 - Comportamento cíclico em um material sob controle de tensão. Amolecimento cíclico.	12
FIGURA 2.8 - Carregamento típico de fadiga de alto ciclo [Ávila, 2005].	12
FIGURA 2.9 - Carregamento típico de fadiga térmica, [Mansur, 2003].	12
FIGURA 2.10 - Curvas S-N ou curvas de Wöhler.	13
FIGURA 2.11 - Exemplos de algumas curvas S-N, [Dieter, 1986].	14
FIGURA 2.12 - Comportamento cíclico sob controle de deformação - Amolecimento.	17
FIGURA 2.13 - Comportamento cíclico sob controle de deformação - Endurecimento.	18
FIGURA 2.14 - Laço de histerese para carregamento cíclico em um material elástico.	18
FIGURA 2.15 - Laço de histerese para carregamento cíclico em regime plástico.	19
FIGURA 2.16- Curva $\varepsilon \times 2N$	19

FIGURA 2.17 - Curvas do Método Padrão.....	20
FIGURA 2.18 - Curva <i>S-N</i> em escala log-log.....	21
FIGURA 2.19 - Levantamento da curva para tensão constante.....	22
FIGURA 2.20 - Representação estatística de dados de fadiga, curvas <i>S-N-P</i> . ....	23
FIGURA 2.21 - Comparação do ensaio de fadiga no ar e a vácuo no aço SAE 1020, (Sterverding, 1964).....	31
FIGURA 2.22 - Comparação das curvas produzidas com diferentes pressões aplicadas (Hudson, 1972).....	31
FIGURA 2.23 - Efeito de diferentes meio aquosos pulverizados sobre a resistência à fadiga de ferros fundidos [Maluf, 2002]. ....	32
FIGURA 2.24 - Esquema da aplicação de carga no corpo-de-prova. ....	36
FIGURA 2.25 - Seção transversal nominal e degradada. ....	39
FIGURA 2.26 - Evolução e acúmulo linear de dano. ....	40
FIGURA 2.27 - Evolução não linear do dano, mas com acúmulo linear.....	40
FIGURA 2.28 - Teoria do Palmgre-Miner [Domingues, 2003].....	42
FIGURA 2.29 - Curva <i>S-N</i> modificada por Corten-Dolan [Yang, 1996]. ....	43
FIGURA 3.1 - Máquina de fadiga flexo-rotativa vertical.....	47
FIGURA 3.2 - Esquema de aplicação de carga.....	48
FIGURA 3.3 – Esquema do disco e sensor ( <i>encoder</i> ) da máquina.....	49
FIGURA 3.4 – Contador digital.....	49
FIGURA 3.5 - Dispositivo de troca de corpo-de-prova. ....	50

FIGURA 3.6 – Aquário.....	50
FIGURA 3.7 - Câmara hiperbárica .....	51
FIGURA 3.8 - Esquema do corte dos corpos-de-prova para ensaio metalográfico.....	51
FIGURA 3.9 - Desenho do corpo-de-prova de tração .....	52
FIGURA 3.10 - Corpo-de-prova fabricado.....	52
FIGURA 3.11 - Corpo-de-prova utilizado em testes preliminares.....	55
FIGURA 3.12 - Dimensões do corpo-de-prova.....	55
FIGURA 3.13 - Foto do corpo-de-prova utilizado nos testes de fadiga flexo-rotativa.....	55
FIGURA 3.14 - Máquina de fadiga dentro da água.....	57
FIGURA 3.15 - Diagrama da força cortante e do momento fletor.....	59
FIGURA 4.1 - Testes com corpos-de-provas refrigerado utilizando 2 tensões.....	65
FIGURA 4.2 - Resíduos padronizados para o intervalo de confiança de 95%.....	65
FIGURA 4.3 - Comparativo dos ciclos obtidos em corpos-de-prova com refrigeração e em lâmina d'água com uma tensão de 297 MPa.....	66
FIGURA 4.4 – Microdureza do aço SAE A-36. Aumento 100 vezes.....	67
FIGURA 4.5 - Microestrutura - corte transversal: a) aumento de 200x; b) aumento de 500x.....	69
FIGURA 4.6 - Microestrutura - corte transversal: a) aumento de 200x; b) aumento de 500x.....	69
FIGURA 4.7 - Ensaio em corpos-de-prova refrigerados.....	70
FIGURA 4.8 - Ensaio em corpos-de-prova realizados em lâmina d'água.....	71
FIGURA 4.9 - Ensaio em corpos-de-prova em água pressurizado em 5 atm.....	71

FIGURA 4.10 - Probabilidades para resíduos padronizados - refrigerados.....	72
FIGURA 4.11 - Probabilidades para resíduos padronizados – lâmina d’água.....	73
FIGURA 4.12 - Probabilidades dos resíduos padronizados – pressurizado em água com 5 atm. ....	74
FIGURA 4.13 - Curvas S-N-P. Ensaio em corpos-de-prova refrigerados. ....	76
FIGURA 4.14 - Curvas S-N-P. Ensaio em corpos-de-prova em lâmina d’água. ....	76
FIGURA 4.15 - Curvas S-N-P. Ensaio em corpos-de-prova pressurizado a 5 atm.....	77
FIGURA 4.16 – Comparação entre as Curvas S-N-P com probabilidade de 50%. ....	79
FIGURA 4.17 – Redução da vida à fadiga entre os ambientes pressurizados a 5 atm e em lâmina d’água para a probabilidade de falha de 50 %. ....	79
FIGURA 4.18 – Variação da dureza para o aço ASTM A-36 submetido à fadiga flexo-rotativa para os três ambientes, variando a tensão aplicada. ....	80
FIGURA 4.19 – Comparação da dureza para o aço ASTM A-36 submetido à fadiga flexo-rotativa para os três ambientes. ....	81
FIGURA 4.20 – Variação da microdureza para o aço SAE A-36 submetido à fadiga flexo-rotativa para os três ambientes, variando a tensão aplicada. ....	82
FIGURA 4.21 – Comparação da microdureza para o aço SAE A-36 submetido à fadiga flexo-rotativa para os três ambientes. ....	83
FIGURA 4.22 – Comparações entre as pressões hiperbáricas.....	86
FIGURA 4.23 – Limites de resistência à fadiga para os três ambientes com a probabilidade de falha de 50%.....	87
FIGURA 4.24 – Corpo-de-prova instrumentado com extensômetro elétrico. ....	87
FIGURA 4.25 – Corpo-de-prova com extensômetro e revestido com massa plástica.....	88

FIGURA 4.26 – Resultados obtidos com o corpo-de-prova instrumentado com extensômetro.....	88
FIGURA 4.27 – Comparação da curva corrigida (extensômetro) em relação à curva levantada, com a probabilidade de falha de 50%.....	89
FIGURA 4.28 – Novas curvas S-N-P, para ensaios refrigerados com valores corrigidos.....	90
FIGURA 4.29 - Novas curvas S-N-P, para ensaios em lâmina d'água com valores corrigidos.....	90
FIGURA 4.30 - Novas curvas S-N-P, para ensaios em lâmina d'água com valores corrigidos.....	91
FIGURA 4.31 – comparação da água antes e depois do teste.....	93
FIGURA 4.32 – a) e b) presença de <i>pits</i> na lateral do corpo-de-prova perto da fratura; c) região da fratura, com <i>pit</i> seccionado.....	94
FIGURA 4.33 – Hipótese de um modelo para o ambiente pressurizado a 5 atm.....	95
FIGURA 8.1 – Superfície de fratura utilizando uma tensão de 278 MPa.....	107
FIGURA 8.2 – Superfície de fratura utilizando uma tensão de 256 MPa.....	107
FIGURA 8.3 – Superfície de fratura utilizando uma tensão de 236 MPa.....	108
FIGURA 8.4 – Superfície de fratura utilizando uma tensão de 197 MPa.....	108
FIGURA 8.5 – Superfície de fratura utilizando uma tensão de 160 MPa.....	109
FIGURA 8.6 – Linhas que nascem na superfície em direção ao centro no ambiente pressurizado.....	110
FIGURA 8.7 – Superfície de fratura MEV – ambiente refrigerado, lâmina d'água e pressurizado em água a 5 atm, utilizando uma tensão de 278 MPa.....	111
FIGURA 8.8 – Superfície de fratura MEV – ambiente refrigerado, lâmina d'água e pressurizado em água a 5 atm, utilizando uma tensão de 256 MPa.....	112
FIGURA 8.9 – Superfície de fratura MEV – ambiente refrigerado, lâmina d'água e pressurizado em água a 5 atm, utilizando uma tensão de 236 MPa.....	113

FIGURA 8.10 – Superfície de fratura MEV – ambiente refrigerado, lâmina d’água e pressurizado em água a 5 atm, utilizando uma tensão de 197 MPa. ....	114
FIGURA 8.11 – Superfície de fratura MEV – ambiente refrigerado, lâmina d’água e pressurizado em água a 5 atm, utilizando uma tensão de 160 MPa. ....	115
FIGURA 9.1 – Variação do limite de escoamento e de resistência do aço ASTM A-36, utilizando uma tensão de 197 MPa. ....	117
FIGURA 9.2 – Variação do limite de ruptura do aço ASTM A-36, utilizando uma tensão de 197 MPa. ....	117
FIGURA 9.3 – Variação do limite de escoamento e de resistência do aço SAE A-36, utilizando uma tensão de 236 MPa. ....	118
FIGURA 9.4 – Variação do limite de ruptura do aço SAE A-36, utilizando uma tensão de 236 MPa. ....	119
FIGURA 9.5 – Valores de estricção para a tensão de 197 MPa. ....	120
FIGURA 9.6 – Valores de estricção para a tensão de 237 MPa. ....	120
FIGURA 10.1 – Valores dos danos encontrados com a teoria de Palmgren-Miner. ....	122
FIGURA 10.2 – Valores dos danos encontrados com a teoria de Corten-Dolan. ....	123
FIGURA 10.3 – Valores dos danos encontrados com a teoria de Marin. ....	123
FIGURA 10.4 – Valores dos danos encontrados com a teoria de Mansur. ....	124
FIGURA 10.5 – Valores encontrados com a teoria proposta do dano. ....	126
FIGURA 10.6 – Comparação das teorias para uma probabilidade de falha de 1%. ....	126
FIGURA 10.7 – Comparação das teorias para uma probabilidade de falha de 50%. ....	127
FIGURA 10.8 – Comparação das teorias para uma probabilidade de falha de 99%. ....	127

## LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - Metodologia para ensaio de fadiga flexo-rotativa seguido por ensaio de tração, com carregamento único, com tensão de 236 MPa.....	61
TABELA 3.2 - Metodologia para ensaio de fadiga flexo-rotativa seguido por ensaio de tração, com carregamento único, com tensão de 197 MPa.....	61
TABELA 3.3 - Metodologia para acúmulo de dano utilizando tensões crescentes.....	62
TABELA 3.4 - Metodologia para acúmulo de dano utilizando tensões decrescentes.....	63
TABELA 4.1 - Resultados de ensaios de tração para o aço ASTM A-36.....	67
TABELA 4.2 - Composição química prevista para o aço ASTM A 36.....	68
TABELA 4.3 - Parâmetros das curvas que representam as equações de fadiga para ensaio refrigerado.....	77
TABELA 4.4 – Parâmetros das curvas que representam as equações de fadiga para ensaio em lâmina d’água.....	78
TABELA 4.5 – Parâmetros das curvas que representam as equações de fadiga para ensaio pressurizado a 5 atm.....	78
TABELA 4.6 - Parâmetros das curvas que representam as equações de fadiga para ensaio refrigerado.....	91
TABELA 4.7 - Parâmetros das curvas que representam as equações de fadiga para ensaio lâmina d’água.....	92
TABELA 4.8 - Parâmetros das curvas que representam as equações de fadiga para ensaio pressurizado a 5 atm.....	92
TABELA 10.1 – Acúmulo de dano utilizando tensões crescentes.....	121

TABELA 10.2 – Acúmulo de dano utilizando tensões decrescentes.....	121
TABELA 11.1 – Dureza em corpos-de-prova virgens.....	129
TABELA 11.2 – Dureza em corpos-de-prova refrigerados. ....	129
TABELA 11.3 – Dureza em corpos-de-prova lâmina d’água.....	130
TABELA 11.4 – Dureza em corpos-de-prova pressurizados em água a 5 atm. ....	130
TABELA 11.5 – Microdureza em corpos-de-prova virgens.....	131
TABELA 11.6 – Microdureza em corpos-de-prova refrigerados. ....	131
TABELA 11.7 – Microdureza em corpos-de-prova lâmina d’água.....	132
TABELA 11.8 – Microdureza em corpos-de-prova pressurizado em água a 5 atm. ....	132
TABELA 13.1 – Números de ciclos produzidos para o ambiente refrigerado .....	136
TABELA 13.2 – Números de ciclos produzidos para o ambiente lâmina d’água .....	137
TABELA 13.3 – Números de ciclos produzidos para o ambiente pressurizado a 5 atm.....	137

## Simbologia

$A$	Área total
$A_D$	Área com defeito
$b_o$	Intercepto de reta com o eixo das tensões na curva S-N-P
$b_i$	Coefficiente de inclinação da reta
$C$	Constante do material
$C_I$	Constante do material na curva S-N, escala log-log
$c$	Inclinação da reta na curva S-N-P semi-log
$D$	Dano
$d$	constante do material, para o aço 6,67
$F_{CP}$	Força aplicada no corpo-de-prova no ensaio de fadiga flexo-rotativa
$J$	Momento de inércia da seção transversal
$K_a$	Fator de superfície
$K_b$	Fator de tamanho
$K_c$	Fator de carga
$K_d$	Fator de temperatura
$K_e$	Fator de temperatura
$K_i$	Inclinação da reta na representação log-log da curva S-N
$l$	distância do apoio ao aplicador de força
$M_{ft}$	Momento fletor aplicado ao corpo-de-prova
$n$	Expoente ou parâmetro de encruamento do material
$N$	Vida útil (número de ciclos)
$N_f$	Número de ciclos que leva o material à falha na tensão $\sigma_i$
$n_i$	Número de ciclos aplicados ao material à tensão $\sigma_i$
$P$	Probabilidade
$R$	Coefficiente de determinação
$r$	raio
$Ra$	Rugosidade média ( $\mu\text{m}$ )
$R_c$	Resultado corrigido
$R_f$	Razão de tensão em fadiga
$RM$	Resultado da medição

$S_a$	Amplitude da tensão cíclica alternada, representada na curva $S-N$
$S_e$	Limite de resistência à fadiga de uma peça
$S_e'$	Limite de resistência à fadiga de uma peça
$T$	Tempo de falha
$t_l$	Tempo determinado para ocorrência de falha
$U$	Incerteza expandida
$u_c$	Incerteza combinada
$u_i$	Incerteza padrão
$x_o$	Limite de resistência a Fadiga para uma determinada probabilidade
$y$	diferença entre ( $x_i$ e $y_i$ )
$y'$	valor estimado no coeficiente de determinação
$y_t$	Variação total
$W_r$	Módulo de resistência da seção transversal de um corpo-de-prova

### *Símbolos Gregos*

$\beta$	Coeficiente dependente do material
$\beta_o$	Intercepto da linha de regressão
$\beta_l$	Coeficiente de inclinação da reta
$\delta D$	Variação do dano
$\Delta\sigma$	Variação da tensão alternada
$\varepsilon$	Erro aleatório de resíduos
$\varepsilon_f$	Deformação
$\mu_{(x)}$	Parâmetro de locação
$\Phi$	Percentil da distribuição normal padrão
$\Gamma$	Parâmetro de escala, correspondente ao desvio padrão
$\sigma$	Tensão
$\sigma_a$	Amplitude da tensão alternada
$\sigma_{a1}, \sigma_{a2}, \sigma_{a3}$	Amplitudes das tensões alternadas principais
$\sigma_c$	Limite de escoamento
$\sigma_m$	Tensão média
$\sigma_{max}$	Tensão alternada máxima
$\sigma_{min}$	Tensão alternada mínima

$\sigma_r$	Tensão cíclica aplicada ao corpo-de-prova
$\sigma_{res}$	Limite de resistência

## **Glossário**

CDTN – Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear

CEFET – Centro Federal de Ensino Tecnológico

SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais

# 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

## 1.1 Introdução

Devido à expansão das usinas hidrelétricas e petrolíferas, estudos relacionados à vida útil dos componentes metálicos estão em constante desenvolvimento nas universidades e indústrias para aperfeiçoar as tecnologias existentes [Maddox, 1998]. Essa medida busca garantir uma maior durabilidade das estruturas, para aumentar a competitividade das empresas e evitar acidentes que prejudiquem o meio ambiente e a economia.

As plataformas petrolíferas modernas são projetadas para suportar exposições aos esforços provocados por tempestades, furacões e grandes quantidades de ondas. Esses esforços aplicam um carregamento na estrutura favorecendo a falha por fadiga de algum componente da mesma.

Considera-se que a estimativa da vida útil de estruturas submetidas a esse fenômeno é de grande importância no projeto de uma obra ou equipamento para garantir a sua estabilidade [Taier, 2002]. Para isso, existe a necessidade de um estudo para a análise de estruturas sujeita a fadiga.

Para a determinação dos cálculos dessas estruturas, as cargas externas são determinadas separadamente para os efeitos locais (estrutura) e globais (ambientais), pois podem ocasionar falhas por fadiga [Piccinini, 2003]. Por exemplo, os efeitos da pressão hidrostática no chapeamento, enrijecedores de uma estrutura semi-submersível, são determinados pela ação direta da pressão na chapa do flutuador.

Além disso, deve-se verificar o colapso hidrostático analisando a possibilidade de um membro tubular ser deformado em face de ação da pressão hidrostática em conjunto com os demais esforços solicitantes [Pinho, 2001], que são fatores que contribuem para a ocorrência de fadiga subaquática.

Todas as solicitações que variam em intensidade e/ou direção provocam variações de tensões na estrutura e podem causar falhas por fadiga. As cargas vivas e ambientais são importantes nessa associação, pois possuem a maior parcela da carga na estrutura [Kiepper, 2004]. Deve considerar a

ação da pressão hidrostática em conjunto com os demais esforços para a falha por fadiga subaquática.

Como evidenciado, a fadiga é um fator importante a ser considerado em projeto. Diante dessa situação, algumas considerações devem ser feitas, como a amplitude da tensão alternada. Com a tensão alternada constante é possível trabalhar utilizando as curvas S-N-P, obtidas experimentalmente, e determinar a probabilidade de falha de um material.

Devido aos fatos relatados, é importante conhecer as propriedades mecânicas dos materiais utilizados nessas construções mecânicas, tais como: limite de ruptura, limite de elasticidade e a fadiga, pois estão em um ambiente diferente e na presença da pressão hidrostática.

Para esse trabalho será estudada a fadiga subaquática, utilizando ensaios por flexo-rotação em aço ASTM A-36 refrigerado, em lâmina d'água e na presença de uma pressão hidrostática de 5 atm.

## **1.2 Motivação do trabalho**

O fenômeno da fadiga subaquática deve ser estudado e trabalhado, pois os testes realizados em materiais normalmente são feitos ao ar, não retratando a real situação. No ambiente aquático, a peça está em um meio diferente, onde a densidade do meio é maior e na presença da pressão hidrostática. Esses dados podem interferir na resistência à fadiga do material.

Ressalta-se que a previsão da vida útil de estruturas submetidas à fadiga é de grande importância no projeto de uma obra ou equipamento. Portanto, existe a necessidade de um estudo para analisar esse fenômeno considerando o meio ambiente e outros fatores como a pressão hidrostática.

## **1.3 Objetivos**

Esse trabalho tem por objetivos:

- Projetar e construir uma máquina flexo-rotativa que possibilite ensaiar corpos-de-prova em diferentes ambientes (ar, água), na presença de pressão hidrostática e trabalhar com a tensão média nula.

- Estudar o comportamento dos ensaios de fadiga flexo-rotativa dos corpos-de-prova, obtidos do aço ASTM A-36 nos seguintes ambientes: refrigerado, em lâmina d'água e dentro da água na presença de pressão hidrostática de 5 atm.
- Analisar e comparar a vida útil das peças ensaiadas em diferentes ambientes e verificar os fenômenos envolvidos.

## **1.4 Contribuição do trabalho**

Esse trabalho contribuiu para o conhecimento da fadiga subaquática, pois estuda e verifica o comportamento do aço ASTM A-36 em diferentes ambientes e, principalmente, na presença de pressão hidrostática.

Uma outra contribuição é o equipamento de ensaio de fadiga flexo-rotativa que poderá ser utilizado para outros testes com outros materiais e em outras condições de trabalho.

A pesquisa servirá para ampliar o conhecimento na área subaquática e futuramente trabalhar com fadiga de solda subaquática.

## **1.5 Hipóteses**

Algumas hipóteses podem ser levantadas:

- A pressão hidrostática influenciando na vida em fadiga dos corpos-de-prova;
- A influência do meio ambiente no limite de resistência à fadiga;
- A ocorrência de somatório de forças atuando no corpo-de-prova.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Aspectos gerais

Nas últimas décadas, o avanço da tecnologia subaquática tornou os projetos inovadores em desafio para o desenvolvimento de estruturas costeiras e oceânicas para atender as mais diversas necessidades econômicas. Uma parcela significativa dessas estruturas, utilizadas principalmente pelas indústrias de gás e petróleo, estão imersas em ambientes aquáticos, sujeitas aos esforços hidrodinâmicos, conforme apresentado na Figura 2.1.

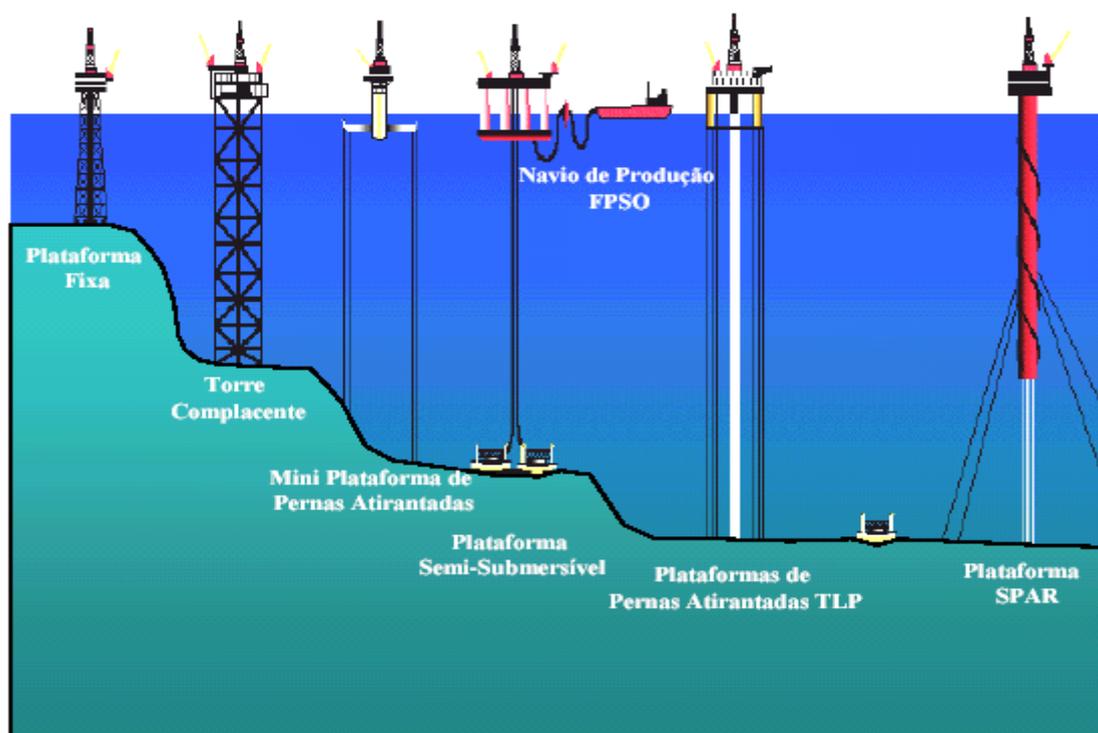


FIGURA 2.1 - Plataforma offshore, [Cicilia, 2004].

Nessa linha, podem ser mencionados usinas hidrelétricas, plataformas de exploração de petróleo, cais, píer, pontes, dutos de transporte de fluidos ou todo e qualquer elemento estrutural sujeito à interação fluido-estrutura. Devido ao ambiente, as estruturas são projetadas para suportar aos mais diversos tipos de solicitações de esforços, conforme apresentado na Figura 2.2, mantendo-se seguras para os operadores e para o meio ambiente por longos períodos. Para tanto, é de suma

importância que a manutenção e reparo de tais plataformas atendam às exigências das normas [Pinho, 2001].

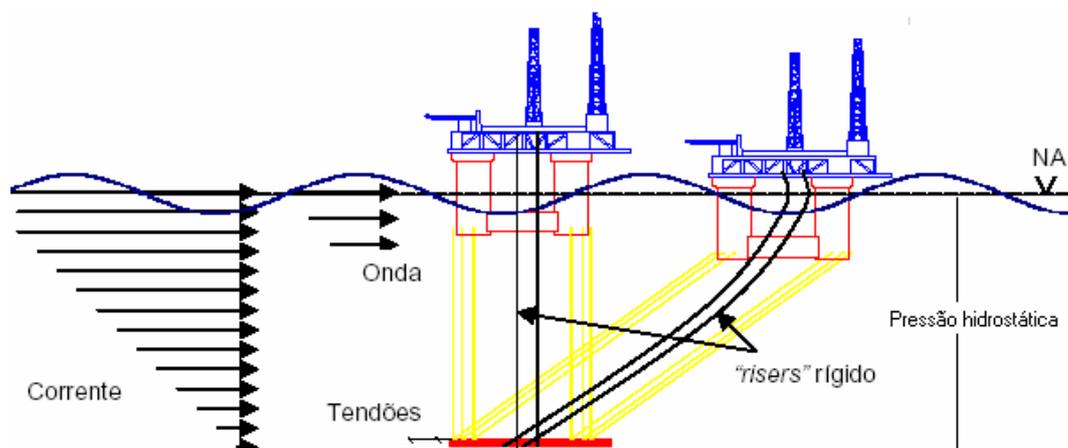


FIGURA 2.2 - Interação fluido-estrutura.

Os processos de reparo e manutenção dessas estruturas são complicados, exigindo procedimentos especiais, desenvolvidos e aplicados pela indústria petrolífera ao longo dos anos. Mesmo com a evolução alcançada, as técnicas de reparo implementadas não têm atendido as exigências das normas que as regem [Pessoa, 2003].

Em geral, uma estrutura é projetada para desempenhar a sua função com uma adequada segurança e economia. O colapso de uma estrutura sujeita as cargas pode ocorrer de duas formas diferentes [Taier, 2002]:

- Ocorrência de um alto nível de tensões que excede a capacidade de resistência do material, provocando falhas como, por exemplo, ruptura ou instabilidade de um componente estrutural;
- O colapso estrutural causado por dano acumulado produzido pela ação repetitiva de cargas variáveis, mesmo para níveis mais baixos de tensões aplicadas, gerando um processo de fadiga.

Taier (2002) estudou quatro juntas tubulares de uma plataforma offshore fixa. Esse estudo tinha como objetivo determinar a vida à fadiga das estruturas por meio de métodos numéricos (elementos finitos). Das juntas analisadas, duas apresentaram valores de vida à fadiga melhor que os

encontrados na literatura. Devido aos resultados encontrados, foi necessário aplicar outra metodologia, utilizando um plano de inspeção para a segurança de toda a plataforma.

Uma estrutura offshore estará sujeita, durante a sua vida útil, a vários tipos de cargas que podem ser classificadas como:

- Cargas permanentes: cargas gravitacionais não removíveis, tais como o peso da própria estrutura, peso permanente do lastramento, equipamentos, pressão hidrostática externa de natureza permanente, empuxo em plataformas flutuantes e reações da fundação em plataformas fixas [Taier, 2002]. Essas cargas são quase-estáticas (variam lentamente com o tempo);
- Cargas vivas: são associados com a operação e o uso normal da estrutura, como materiais armazenados, equipamentos, líquidos, operação de guindastes, helicópteros e amarração de flutuantes;
- Cargas de deformações: são associadas com deformação impostas tais como pré-tensões e variações de temperatura;
- Cargas ambientais: são devidas a vento, ondas, correntes, gelo, neve, terremoto e outras ações ambientais. As correspondentes reações em plataformas flutuantes são principalmente forças de inércia decorrentes das ações dinâmicas das ondas e ventos e forças de amarração devidas a correntes e ventos em regime permanente [Cecília,2004];
- Cargas de construção: são devidos as fases de fabricação, montagem, embarque, transporte e instalação;
- Cargas de remoção e reinstalação: são devidos a remoção, carregamento, transporte, modificações e reinstalação em plataformas que são relocadas para novas posições.

Pinho (2001) analisou o comportamento e as respostas dinâmicas não lineares de um *riser* rígido de produção para águas profundas, acoplado a uma plataforma offshore do tipo TLP (*Tension Leg Platform*). Por meio dos resultados numéricos, mostrou que a adoção de um sistema de controle passivo acoplado à TLP atenua a amplitude de movimento vertical (*heave*) do casco da plataforma e, conseqüentemente, reduz a variação de tração no *riser*, aumentando a vida útil à fadiga.

Cicilia (2004) estudou sobre tendões da TLP, considerando a ocorrência de múltiplos estados de mar durante a vida útil, a inclusão das forças de onda e a interação dinâmica dos esforços no tendão devidos às cargas ambientais (onda, vento e corrente). Porém, não considerou no seu trabalho a pressão como uma variável pertinente ao processo.

Lemos (2005) apresentou uma metodologia de análise à fadiga de *risers* flexíveis quando conectados a unidades de produção baseadas em navios. O ponto de partida foi uma representação tridimensional das condições ambientais. No seu trabalho considerou a análise dinâmica utilizando apenas duas abordagens: onda regular (também chamada de determinística) e estocástica (ou análise aleatória). Devido aos resultados encontrados na pesquisa, foi necessário trabalhar com a metodologia do Projeto Baseado em Resposta, pois os resultados apresentados são mais racionais e corretos para projeto.

Um outro efeito relacionado à fadiga é a pressão hidrostática atuante nos componentes de uma estrutura subaquática. Nesse caso, deve analisar a possibilidade de um membro tubular sofrer um colapso hidrostático.

## 2.2 Fadiga

O termo fadiga pode ser definido como um processo pelo qual mudanças progressivas e localizadas de natureza irreversível ocorrem no material sujeito a tensões ou deformações flutuantes. Esses esforços podem resultar em trincas ou na falha completa do material. [ASTM E-1823-96].

Fadiga mecânica é a degradação das propriedades mecânicas levando à falha do material ou de um componente sob carregamento cíclico [Meggiolaro e Castro, 2003].

Os primeiros estudos em relação ao comportamento de materiais metálicos a esforços cíclicos foram feitos por Wöhler em 1860, trabalhando com eixos de trens que estavam sujeitos a flexão rotativa. Os diagramas de Wöhler (curvas S - N), representam os resultados obtidos nos ensaios de fadiga, baseando no registro da tensão aplicada (S) em função do número de ciclos (N) para a ruptura [Mitchell, 2001]. A tendência observada da curva S x N, é a vida útil do material aumentar com a diminuição da tensão cíclica aplicada e abaixo de determinado valor não ser mais afetada. Essa tendência pode ser descrita pela equação abaixo:

$$N = C \cdot \sigma_r^n \quad (2.1)$$

Onde:  $N$  é a vida útil do elemento (número de ciclos);  $C$  a constante que depende do material;  $\sigma_r$  tensão cíclica aplicada ao corpo-de-prova;  $n$ : expoente também dependente do material.

Essa abordagem tradicional baseada nas curvas Wöhler para o teste de fadiga, não informa os tempos para o surgimento e para a propagação da trinca. Isto dificulta a compreensão do comportamento de estruturas que apresentam trincas, bem como a influência de suas dimensões na vida útil em fadiga [Ávila, 2005].

O mecanismo de formação de falha por fadiga em metais inicia com a formação de bandas de escorregamento [Sunder, 2005]. Essas são causadas pela movimentação de discordâncias no reticulado cristalino do metal, levando a formação de intrusões e extrusões, Figura 2.3. Como consequência, formam-se locais para nucleação de trincas, por acumularem grande deformação plástica localizada. Essas trincas propagam em cada ciclo de tensão até a instabilidade.

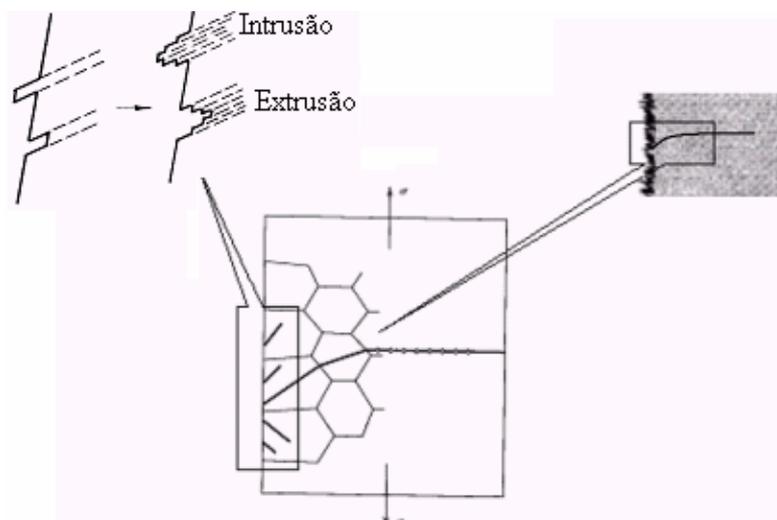


FIGURA 2.3 – Representação esquemática mostrando o modelo da iniciação e propagação da trinca por fadiga, adaptado de (Rocha, 2005).

Pequenas sobrecargas de tensão durante esses ciclos podem levar a liberação de discordâncias ancoradas, facilitando a movimentação, a nucleação ou a propagação de trincas [Suresh, 1998].

Na ausência de defeitos internos, a trinca de fadiga inicia na superfície livre do metal, pois os grãos cristalinos encontram na superfície menor restrição à deformação plástica. A ação de carregamento induz a formação de linhas de escorregamento facilitando a nucleação de trinca [Moia, 2001].

Para o estudo da degradação por fadiga é necessário desenvolver ensaios que apresentem ciclos típicos para cada situação. Devem-se conhecer as tensões atuantes no componente que será analisado: regular, irregular e/ou aleatória.

A Figura 2.4 apresenta um caso típico de tensões regulares (amplitude constante), onde verifica a tensão máxima,  $\sigma_{\max}$ , e a tensão mínima,  $\sigma_{\min}$ , aplicadas [Magnabosco, 2000]. Essa figura descreve um ciclo senoidal de tensão com carregamento cíclico definindo a variação de tensão,  $\Delta\sigma$  [Meyers *et al*, 1999]:

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (2.2)$$

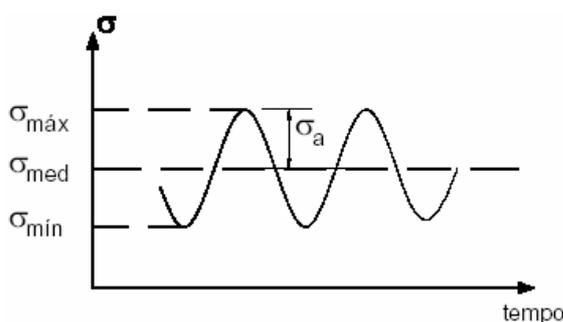


FIGURA 2.4 - Parâmetros utilizados nos ensaios fadiga, [Magnabosco, 2000].

A amplitude da tensão alternada ( $\sigma_a$ ) é a diferença entre a tensão máxima e mínima dividido por 2:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (2.3)$$

Ao comparar a variação da tensão ( $\Delta\sigma$ ) com a tensão alternada ( $\sigma_a$ ) tem-se:

$$\Delta\sigma = 2\sigma_a \quad (2.4)$$

A tensão média ( $\sigma_m$ ) é a média das tensões máxima e mínima e é dada por,

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (2.5)$$

A relação entre a tensão mínima ( $\sigma_{\min}$ ) e a tensão máxima ( $\sigma_{\max}$ ) é conhecida como razão de tensão em fadiga,  $R_f$ .

$$R_f = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (2.6)$$

O parâmetro  $R_f$  indica o tipo de carregamento ao qual o elemento está sujeito. Se o ciclo varia de carga nula para carga de tração, a sollicitação é repetida e  $R = 0$ . Caso ocorra a completa inversão de tração para compressão, a tensão média é nula,  $R = -1$  e o carregamento é totalmente reverso. Se houver somente carga de tração, a sollicitação é  $R > 0$ . Nesse trabalho como se trata de um regime reverso, a tensão média é nula. Isto ocorre devido ao tipo de ensaio que será utilizado.

Em amplitude variável, como na Figura 2.5, a análise de fadiga em metais submetidos a esses carregamentos torna mais complexa. Nessa ocorrência, é necessário desenvolver uma metodologia, para simplificar as sollicitações aplicadas, passando a representar várias combinações de carregamentos constantes [Furtado, 2002].

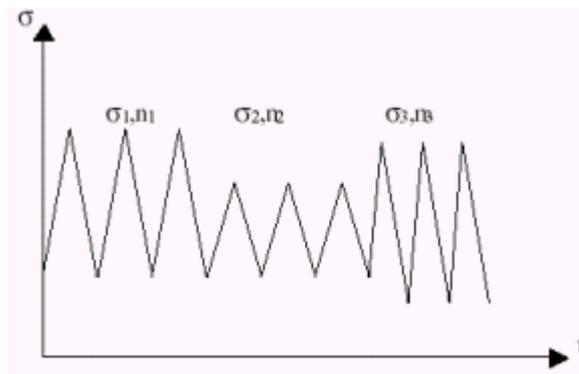


FIGURA 2.5 - Exemplo de um carregamento variável composto por vários carregamentos constantes [Furtado, 2002].

Os critérios de análise do comportamento de fadiga dos metais são baseados no controle da tensão ou no controle da deformação. O conceito da deformação-vida considera os efeitos da deformação plástica. Esses estudos são realizados pelos métodos de fadiga de alto ciclo e de baixo ciclo.

## 2.3 Método *S-N* (Fadiga de alto ciclo)

O método *S-N* é o estudo de fadiga por meio de diagrama *S-N*, plotado com a variação da tensão *versus* o número de ciclos. É denominado de alto ciclo, devido a grande quantidade de ciclos para a ocorrência da falha por fadiga. Os ensaios para determinação do diagrama *S-N* são feitos em corpos-de-prova ou em componentes da própria estrutura, conduzidos pela norma [ASTM E-466, 96], com carregamento totalmente reverso.

Alguns materiais sob condições constantes de carregamento exibem, em seus diagramas *S-N*, amplitude de tensão abaixo da qual o mesmo não está sujeito à falha por fadiga, independente do número de ciclos. Isso denomina limite de fadiga ou limite de *endurance*,  $S_e$ , e varia entre 35 a 50% do limite de ruptura do material,  $\sigma_u$ . Alguns metais, como alumínio e suas ligas, não apresentam esse limite definido, sendo estimado para romper o metal  $10^6$  a  $10^7$  ciclos [Suresh, 1998].

Os metais sob esforços cíclicos podem sofrer amolecimento ou endurecimento [Ponce, 2003]. Na Figura 2.6, observa que utilizando o mesmo nível de tensão, a deformação cíclica diminui, ocorrendo um endurecimento do metal. Em outra situação, se houver um aumento nas deformações durante os ciclos, o metal sofrerá um amolecimento cíclico, Figura 2.7.

Ressalta que o endurecimento e o amolecimento cíclico de um material ocorrem no início do ciclo e existe a estabilização depois de determinado número de ciclos. Há estruturas que apresentam fadiga de alto ciclo com tensões variáveis em relação ao tempo e a outros esforços, Figura 2.8. Há também fadiga envolvendo a variação de temperaturas conhecidas como fadiga térmica, Figura 2.9.

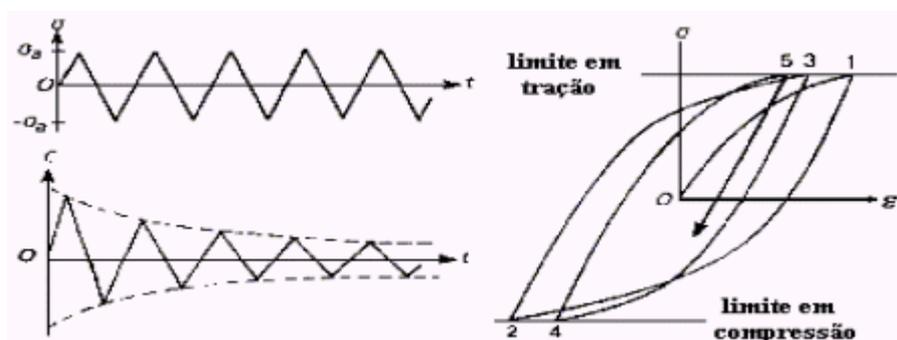


FIGURA 2.6 - Comportamento cíclico em um material sob controle de tensão. Endurecimento cíclico.

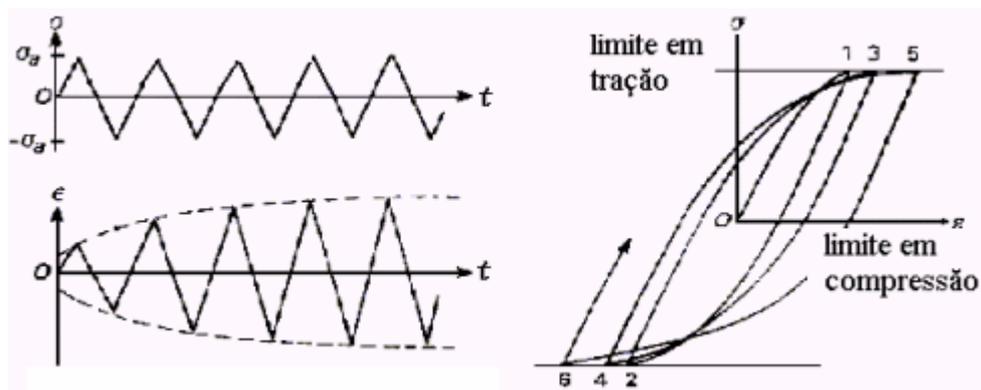


FIGURA 2.7 - Comportamento cíclico em um material sob controle de tensão. Amolecimento cíclico.



FIGURA 2.8 - Carregamento típico de fadiga de alto ciclo [Ávila, 2005].

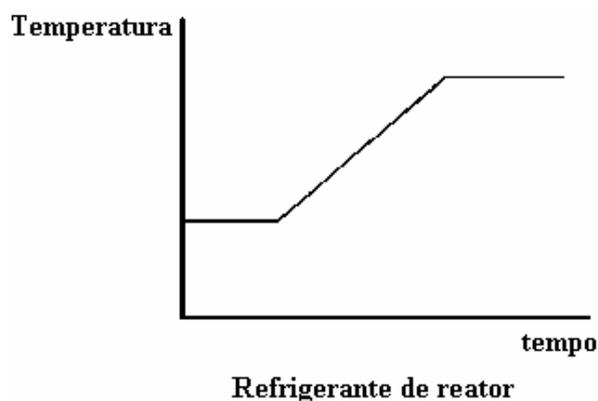


FIGURA 2.9 - Carregamento típico de fadiga térmica, [Mansur, 2003].

### 2.3.1 Curva tensão – número de ciclos ( $S-N$ )

O trabalho desenvolvido por Wöhler, em meados do século XIX, mostrou que um metal ao sofrer tensões alternadas falha em níveis de tensões bem abaixo do esperado. O método da tensão nominal

(curva S-N) foi o primeiro método desenvolvido para entender esse fenômeno e é ainda hoje largamente aplicado [Lemos, 2005].

Nessa curva, o número  $N$  para a fratura (ou  $\log$  de  $N$ ) é colocado nos eixos das abscissas e, no eixo das ordenadas os dados da tensão,  $S$ , podendo ser expressos por meio de logaritmo [Loren, 2005].

Assim, há três modos de construir o diagrama da curva S-N variando as escalas dos eixos cartesianos: S-N, S-logN e logS-LogN. A escala logarítmica facilita a comparação de dados, pois fornece as curvas de diferentes materiais com a mesma forma, além de diminuir a escala de  $N$ .

Pelo gráfico, Figura 2.10, nota que quanto menor o  $S_{\max}$  ( $\sigma_{\max}$ ) aplicado, maior é o número,  $N$ , suportado para romper o material. Verifica que para os aços, a curva apresenta um patamar que corresponde justamente ao limite de resistência à fadiga ( $S_e$ ) do material (curva A). Esse limite de fadiga representa o maior valor da amplitude da tensão alternada que não causará falha no material mesmo que seja infinito o número de ciclos [Bannantine *et al*, 1990].

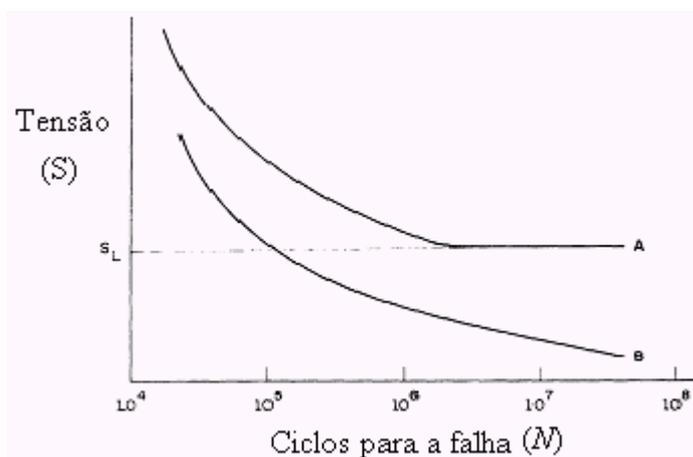


FIGURA 2.10 - Curvas S-N ou curvas de Wöhler.

As ligas não-ferrosas, como exemplo, uma liga de alumínio, não apresentam um limite de resistência à fadiga (curva B). Assim, os casos das falhas por fadiga ocorrerão em determinado número de ciclos dependendo da tensão aplicada. Na Figura 2.11, são plotadas algumas curvas de metais.

Ressalta-se que o limite de resistência à fadiga depende do tipo de ensaio. Geralmente as tensões aplicadas nos ensaios mais encontradas na prática são do tipo flexo-rotativa, torção ou tração-compressão [Souza, 1995].

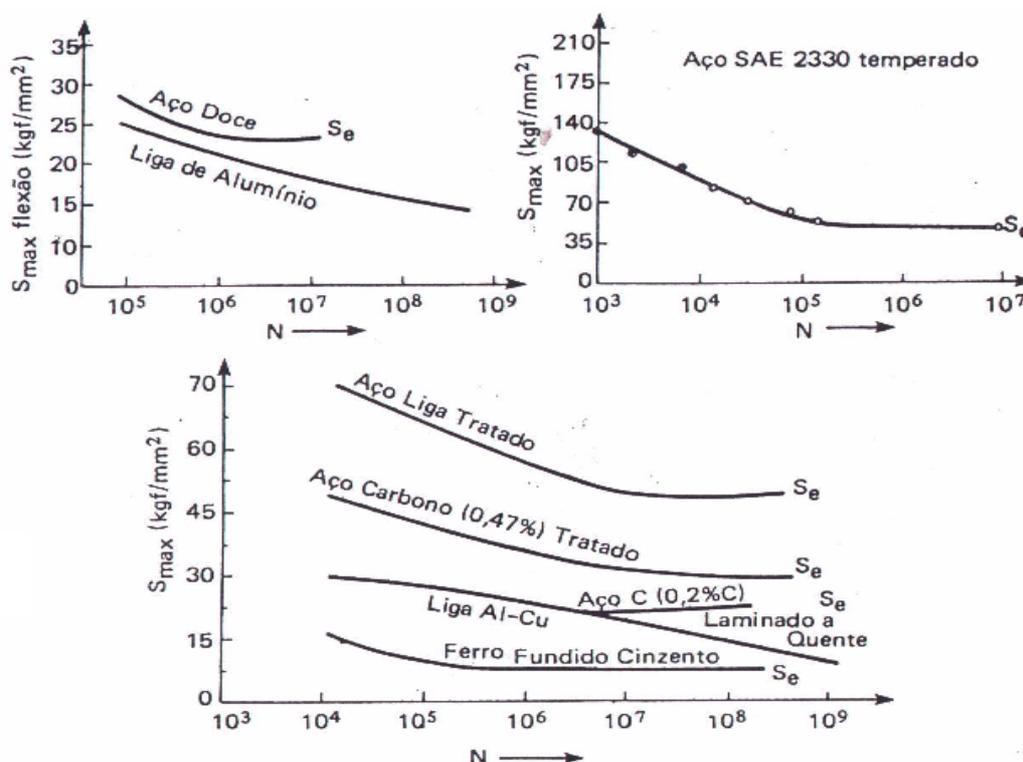


FIGURA 2.11 - Exemplos de algumas curvas  $S$ - $N$ , [Dieter, 1986].

### 2.3.2 Fatores que modificam as curvas $S$ - $N$

O ensaio de fadiga depende de algumas variáveis, tais como: as condições superficiais do corpo-de-prova, o seu tamanho, a carga solicitada, a temperatura, e a concentração de tensão influenciam no limite de resistência à fadiga  $Se'$ . Essas variáveis devem ser consideradas, pois são usadas para modificar e adaptar as condições reais da peça em estudo. Assim, se multiplicar o  $Se'$  pelos fatores dessas variáveis tem o limite de resistência à fadiga de peça,  $Se$  [Bannantine *et al*, 1990].

$$Se = Ka \times Kb \times Kc \times Kd \times Ke \times Se' \quad (2.7)$$

Cada fator  $K$  tem uma função de modificação definida por um valor numérico. Portanto, na Equação 2.7, são:

- Fator da superfície,  $K_a$ , praticamente todas as falhas por fadiga iniciam na superfície do componente, sendo as condições superficiais determinantes na vida em fadiga de um componente. Esse fator leva em consideração o acabamento da superfície, que no caso do corpo-de-prova é bem acabado.
- Fator de tamanho,  $K_b$ , associado ao diâmetro do corpo-de-prova. Se a peça tiver uma outra geometria, deve-se utilizar o conceito do diâmetro efetivo, obtido pelo volume do material, submetido a 95% da carga máxima para o mesmo volume do corpo-de-prova.
- Fator de carga,  $K_c$ , expressa a confiança esperada no limite de resistência à fadiga da peça. Para uma confiabilidade de 50%, o fator de confiabilidade é igual a 1.
- Fator de temperatura,  $K_d$ , quando uma peça for projetada para trabalhar com temperatura superior, é necessário uma correção na resistência à fadiga do material. Em geral, ocorre uma pequena queda da resistência à fadiga para temperaturas até 200 a 250 °C. Acima desse valor, a queda é mais acentuada. Ao realizar ensaio em temperaturas inferiores do ambiente, observa um aumento da resistência do material à fadiga.
- Fator de concentração de tensão,  $K_e$ , quando uma peça possui em sua geometria desvios que podem gerar concentradores de tensão, como: ângulos retos, cantos vivos, tratamentos térmicos e entalhes.

Além dos métodos discutidos, operações como: cementação, nitretação e têmpera superficial contribuem para uma melhoria superficial do material, pois geram tensões residuais de compressão na superfície da peça [Cetlin, 1990] contribuindo para o aumento da resistência à fadiga.

Yakoveleva (2004) trabalhou com três tipos de ligas (níquel, alumínio, e titânio) e constatou que não apenas o fator de concentração era importante, mas também a geometria da peça. Ambos podem inferir nos resultados dos testes de fadiga para diferentes frequências. Significando, uma diferença de cerca de 10% nos resultados experimentais.

### **2.3.2.1 Tensões residuais**

São aquelas que permanecem nas peças quando todas as solicitações externas são removidas. Elas modificam a curva S-N. Essas tensões aparecem freqüentemente em peças submetidas a diferentes

processamentos mecânicos (fundição, soldagem, laminação, forjamento, usinagem, têmpera, etc) e/ou térmicos. Uma das principais causas do aparecimento das tensões residuais é a ocorrência de deformações plásticas não uniformes na peça [Withers, 2001].

A tensão residual compressiva em relação à resistência por fadiga é muito similar ao comportamento das tensões estáticas presentes na superfície do material. A tensão estática compressiva na superfície é benéfica, pois aumenta a resistência à fadiga e retarda o surgimento de trincas [Metals Handbook, 1975].

Um exemplo típico é o aparecimento de tensões residuais próximo da superfície da uma peça submetida em processos de esmerilhamento ou jateamento com granalhas que causam o escoamento plástico do material próximo da superfície [Toyoda *et al*, 1990]. Neste caso, as tensões compressivas formadas junto à superfície da peça têm um efeito benéfico na resistência à fadiga.

Aguiar *et al* (1997) desenvolveram um trabalho para medir imperfeições geométricas, bem como as deformações residuais longitudinais e radiais em dutos. Os dutos foram enrolados em um carretel para armazenagem e posteriormente desenrolados para o seu lançamento na água. Após o processo de desenrolamento e retificação, observou que o processo de lançamento provocou um alívio de tensão residual. Contudo ocorreu uma perda de resistência, devido ao aumento das ovalizações observadas após a retificação.

Além das melhorias obtidas na resistência à fadiga por indução de tensões compressivas na superfície dos metais, o aumento da dureza superficial também contribui para o efeito [Dieter, 1986].

### **2.3.3 Limitações da curva S-N**

Apesar de sua grande utilização em engenharia, as curvas S-N apresentam algumas limitações [Filho, 2002]. Esse método não é capaz de separar as etapas de iniciação e de propagação da trinca, trazendo dificuldades na avaliação do comportamento de elementos mecânicos com entalhes acentuados e de estruturas com trincas.

A metodologia capaz de acompanhar o estágio da propagação da trinca é a da Mecânica da Fratura, por meio do monitoramento em ensaios realizados em corpos-de-prova pré-trincados.

Esse monitoramento da propagação das trincas não é questão de estudo nesse trabalho. A sua citação foi feita para exemplificar outro modelo de estudo que poderá ser abordado em trabalhos futuros para caracterização da fadiga.

## 2.4 Fadiga controlada por deformação - Fadiga de baixo ciclo

O método da fadiga controlada por deformação é o mais indicado para avaliar, quando as tensões são suficientemente altas para causar deformações plásticas no material que ocorre na fadiga de baixo ciclo.

Nesse caso, os gráficos são plotados em função da deformação específica e do número de ciclos. Os resultados são obtidos por testes realizados de acordo com a norma [ASTM E-606, 1998]. Esse método foi citado para exemplificar outra forma de estudo de fadiga, principalmente quando o número de ciclos obtidos é baixo.

Os materiais metálicos sob esforços cíclicos podem sofrer amolecimento, Figura 2.12, ou endurecimento, Figura 2.13, sendo demonstrado quando se controla a tensão mantendo-a constante. Na fadiga controlada por deformação, a função controladora, tem uma amplitude constante  $\epsilon_f$  e a tensão muda com o tempo [Bannantine *et all*, 1990].

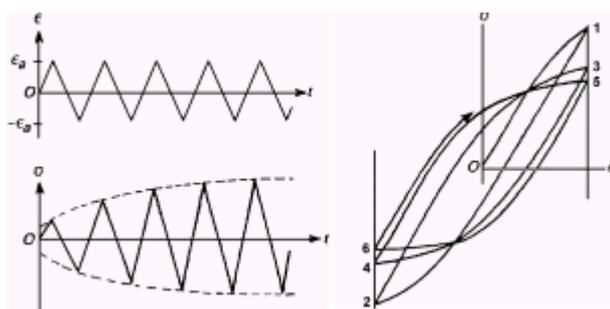


FIGURA 2.12 - Comportamento cíclico sob controle de deformação - Amolecimento.

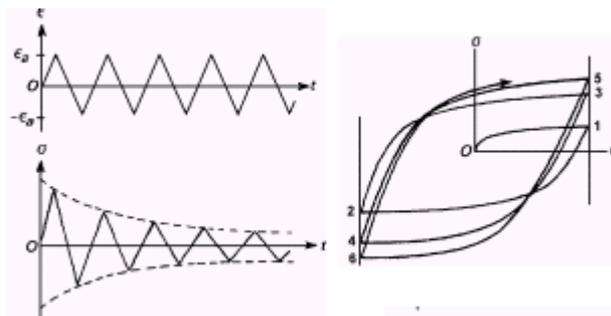


FIGURA 2.13 - Comportamento cíclico sob controle de deformação - Endurecimento.

### 2.4.1 Ciclo tensão-deformação dos materiais

No carregamento cíclico, em regime elástico, a tensão e a deformação estão relacionadas linearmente, Figura 2.14.

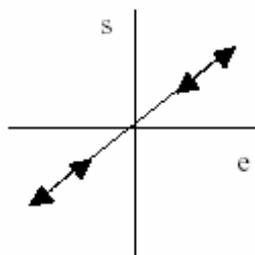


FIGURA 2.14 - Laço de histerese para carregamento cíclico em um material elástico.

Ao tratar as cargas cíclicas em regime plástico, as respostas são mais complexas, pois produz deformações plásticas, Figura 2.15. Nesse aspecto, a relação entre a tensão e a deformação deixa de ser linear, produzindo um laço de histerese para o carregamento.

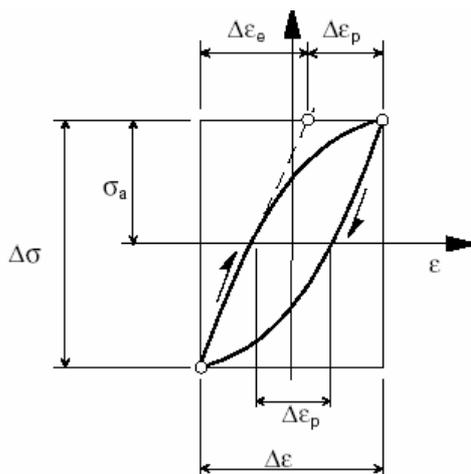


FIGURA 2.15 - Laço de histerese para carregamento cíclico em regime plástico.

Uma característica importante de um laço de histerese é que durante o carregamento não demonstra a tensão variando. Nessa aplicação é possível medir, a cada ciclo, a sua deformação plástica.

#### 2.4.2 Curva $\epsilon_f \times N$

A curva  $\epsilon_f \times N$  é construída por meio de ensaios com amplitude de deformação controlada, conforme apresentado na Figura 2.16.

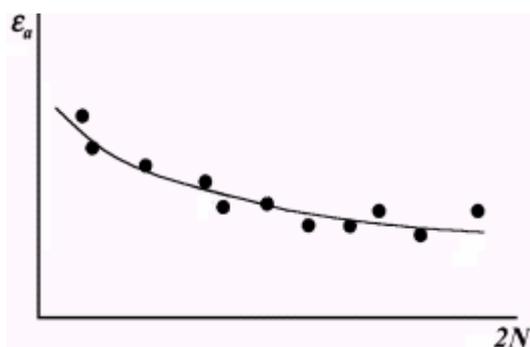


FIGURA 2.16- Curva  $\epsilon \times 2N$

Nessa figura, significa o número para ocorrer à falha, onde um ciclo é igual a dois reversos ( $2N$ ).

## 2.5 Método para levantamento da curva S-N

### 2.5.1 Método padrão

O método padrão é utilizado quando se possui poucos corpos-de-prova. Nesse caso, ensaia-se um ou dois corpos-de-prova para determinada tensão. Se no primeiro, atingir a vida útil preestabelecida, o próximo é ensaiado com uma tensão mais alta. Os valores obtidos são plotados em um gráfico S-N padrão e ajustados por uma curva média mais conservativa [Mansur, 2003].

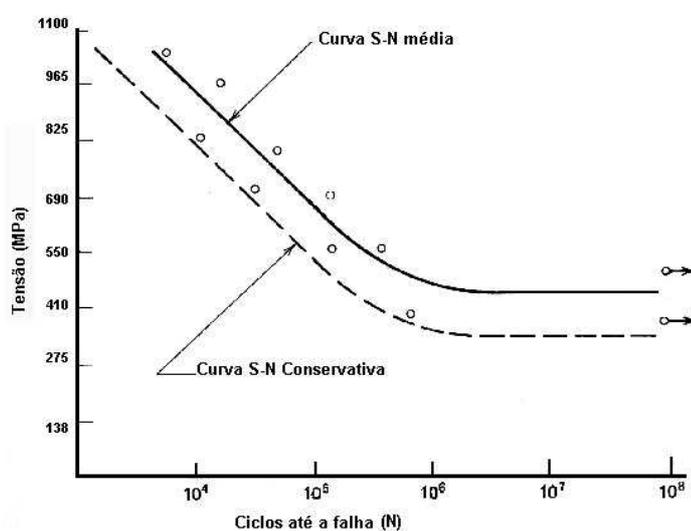


FIGURA 2.17 - Curvas do Método Padrão.

Nas curvas, a abscissa é o número de ciclos até a falha e a ordenada a tensão aplicada, podendo ser nas escalas logarítmicas, Figura 2.18.

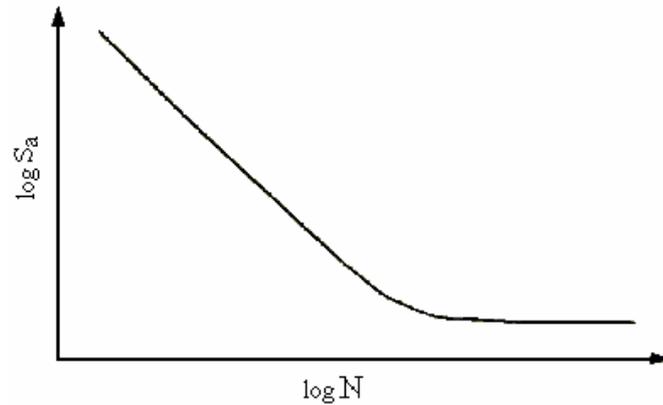


FIGURA 2.18 - Curva  $S-N$  em escala log-log.

A expressão analítica conhecida como equação de Wöhler é dada por:

$$S_a = b - c \times \log(N_i) \quad (2.8)$$

Onde  $b$  é o intercepto da reta com o eixo das tensões;  $c$  é a inclinação da reta;  $N_i$  é o número de ciclos e  $S_a$  é a amplitude da tensão alternada.

A expressão conhecida como equação de Basquin é dada por:

$$N_i = C_1 \times [S_a]^{K_i} \quad (2.9)$$

Onde  $C_1$  é uma constante do material;  $K_i$  é a inclinação da reta;  $N_i$  é o número de ciclos e  $S_a$  é a amplitude da tensão alternada. Utilizando estas equações é possível levantar o gráfico conhecendo essas variáveis.

### 2.5.2 Método para levantamento da curva utilizando a tensão constante

Esse método seleciona algumas tensões e ensaia vários corpos-de-prova, obtendo assim, para cada tensão diversos pontos no gráfico, conforme apresentado na Figura 2.19.

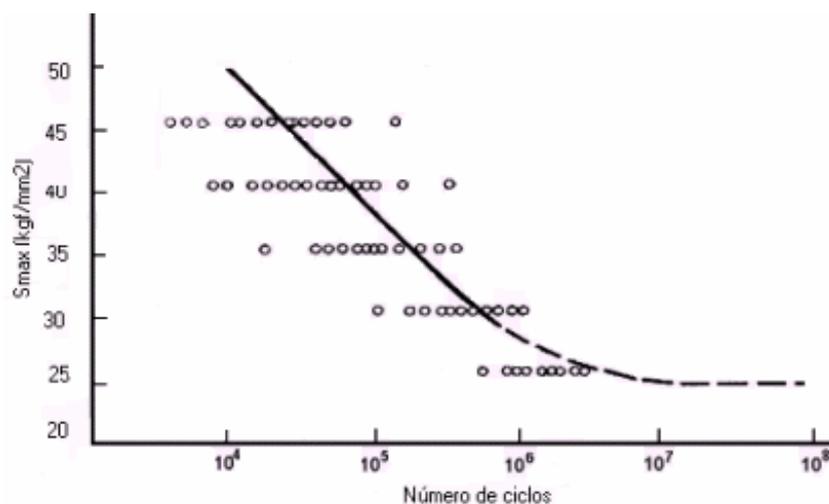


FIGURA 2.19 - Levantamento da curva para tensão constante.

O gráfico da Figura 2.19 é determinado aplicando uma tensão alta no corpo-de-prova correspondente ao número de ciclos,  $N$ , suportados até ocorrer à fratura [Souza, 1995]. Em seguida é traçado uma curva média que englobe todos os pontos.

Ensaio de laboratório mostram que existe uma considerável dispersão nos resultados obtidos nos ensaios de fadiga. Essa dispersão é tratada estatisticamente, utilizando a distribuição de Weibull ou a distribuição Log-normal. Para interpretar os resultados dos ensaios é necessária a construção de uma família de curvas S-N tendo a probabilidade de falha ( $P$ ) como parâmetro, sendo chamadas curvas S-N-P [Freitas e Colosimo, 1997].

### 2.5.3 Métodos para levantamento das curvas utilizando as probabilidades ou das curvas S-N-P

Nesse método, é necessária à construção de curvas S-N tendo a probabilidade da falha  $P$ , conhecidas como curvas de probabilidades constantes S-N-P, Figura 2.20. Estas curvas representam relações médias entre a vida de fadiga (número de ciclos) e a amplitude das tensões submetidas aos corpos-de-prova.

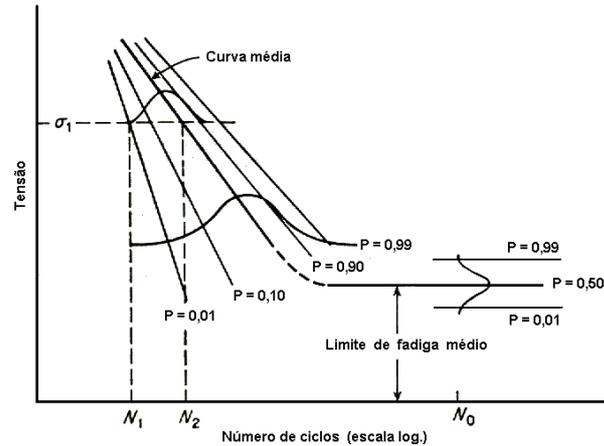


FIGURA 2.20 - Representação estatística de dados de fadiga, curvas  $S-N-P$ .

Para o estudo dessas curvas podem ser utilizados o método padrão e o método para levantamento da curva com tensão constante, ambos foram explicados anteriormente. Para os dados levantados do material, deve-se realizar análise estatística dos testes com a finalidade de verificar se os valores são coerentes com a metodologia adotada.

## 2.6 Análise estatística dos dados de fadiga

Para se obter dados significativos, vários ensaios de fadiga devem ser realizados. Os valores obtidos são tratados estatisticamente, pois mesmo com amostras padronizadas, o resultado mostra uma dispersão dos valores [Souza, 1995].

A dispersão deve-se às diferentes micro-irregularidades geométricas na superfície, com distintos concentradores de tensões que causam diferenças nas vidas em fadiga para o mesmo nível de tensão [Padilha, 2004]. Essas análises são realizadas pelos métodos e modelos para a determinação do limite de resistência a fadiga de um material.

### 2.6.1 Determinação do limite de resistência à fadiga ( $S_e$ )

Os valores obtidos em laboratório para o limite de fadiga, são utilizados como base para o dimensionamento de alguma peça. Contudo, dificilmente o valor de rompimento do material na prática, quando submetido a algum esforço repetitivo, é igual ao obtido em laboratório. Existem

inúmeras variáveis que influenciam nos valores práticos de ruptura por fadiga, desde o ambiente exposto, o formato da peça e o tipo de esforço solicitado.

Na literatura são encontrados métodos e modelos para a determinação de resistência à fadiga ( $S_e$ ) dos materiais, são eles: o método do Prot, o método up-and-down e o modelo de regressão para dados oriundos de testes de vida acelerados [Mansur, 2003].

Para o trabalho foi utilizado o modelo de regressão para dados oriundos de testes de vida acelerados e ajustes para a determinação do limite de resistência à fadiga.

### **2.6.2 Modelos estatístico de regressão para dados de testes de vida acelerados**

Um modelo estatístico é um modelo matemático que contém um erro aleatório, com alguma distribuição de probabilidade específica. Geralmente é utilizado para estimar os valores de uma das variáveis quando os valores das outras são conhecidos, sob determinadas condições (Martinez, 2002).

O teste de vida acelerada significa acelerar o aparecimento de falhas em testes realizados com produtos. Os resultados experimentais obtidos são conduzidos em condições estressantes e utilizados para estimar as condições em projeto. Isso pode ser aplicado em estudos de ocorrência de fadiga [Freitas e Colosimo, 1997].

Ao utilizar esse método, é possível encontrar modelos de regressão que descrevem o comportamento do tempo de falha por meio de duas componentes: uma determinística e outra probabilística [Freitas e Colosimo, 1997].

A componente determinística (relação tensão-resposta) não é capaz de explicar a variabilidade de valores encontrados para a variável resposta para um mesmo nível de tensão.

A componente probabilística do modelo determina a variabilidade inerente dos dados. Isso é feito ao assumir uma distribuição de probabilidade (log-normal ou Weibull) para o tempo de falha do material sob teste. Isto significa que, para cada nível de tensão, o tempo de falha segue uma mesma distribuição de probabilidade e o que difere um nível de tensão do outro são os valores dos parâmetros dessa distribuição, [Freitas e Colosimo, 1997].

### 2.6.3 Descrição do modelo de regressão

Esse modelo requer que sejam feitas algumas hipóteses. Uma delas é que a variabilidade é a mesma para cada nível de tensão, porém isso nem sempre é verdadeiro. Entretanto, muitas vezes quando trabalha em outra escala, por exemplo, na logarítmica, essa suposição torna-se aproximadamente válida [Mansur, 2003].

A distribuição log-normal é a que melhor descreve os tempos de vida cujos mecanismos de falha envolvem interações químicas, encontradas em um processo de corrosão e degradação de contatos. É também indicada para os mecanismos de falha por fadiga em materiais [Freitas e Colosimo, 1997].

A equação matemática que melhor descreve a relação entre a tensão ( $\sigma_a$ ) e o número de ciclos até a falha ( $N$ ) é a de regressão linear (curva de regressão), dada pela Equação 2.10 [Maluf, 2002]:

$$\log(N) = b_0 - b_1 \log(S) \quad (2.10)$$

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i \quad (2.11)$$

Onde,  $Y_i$  é o logaritmo de  $N$  e  $x_i$  é o logaritmo da tensão.

Na Equação 2.11,  $x_i$  é a variável independente,  $Y$  é a variável resposta,  $\beta_0$  é o intercepto da linha de regressão com o eixo  $y$ ,  $\beta_1$  é o coeficiente de inclinação da reta, ou coeficiente que mede o número de unidades em  $y$  e que muda para cada unidade da variável independente  $x$  (Martinez, 2002).

Normalmente, é utilizado para estas análises, um cálculo de confiabilidade para definir a probabilidade de falha em um determinado intervalo de tempo. Porém, nos cálculos de confiabilidade, geralmente é mais conveniente trabalhar com uma distribuição de probabilidades de falhas.

Os modelos utilizados na análise de dados de confiabilidade são construídos para o logarítmico do tempo de falha  $T$ , ou  $Y = \ln(T)$ . Nesses modelos, supõe que  $Y$  tem uma distribuição com parâmetro de locação  $\mu(x)$  e parâmetro de escala,  $\Gamma > 0$ .

É utilizada a notação  $\mu(x)$  para indicar que o parâmetro de locação da distribuição de  $Y$  depende da variável de estresse ( $x$ ), que é para o caso de fadiga à tensão alternada aplicada,  $\sigma_a$ .

Esse é o procedimento geral, qualquer que seja a distribuição admitida para  $Y$  (log-normal ou Weibull).

O modelo tem a seguinte forma geral [Freitas e Colosimo, 1997] e [Maluf, 2002]:

$$Y = \ln(T) = \beta_0 + \beta_1 x + \Gamma \varepsilon \quad (2.12)$$

Onde,  $T$  representa o tempo de falha,  $\beta_0 = \ln(A)$  e  $\beta_1 = w$  e  $A$  e  $w$  são parâmetros que dependem do material utilizado, do método de ensaio, da geometria e da característica dos corpos-de-prova.  $\Gamma$  (parâmetro de escala) corresponde ao desvio padrão, constante para todos os níveis de tensão e  $\varepsilon$  é um valor aleatório, denominado de erro aleatório ou resíduo padronizado e tem uma distribuição que independe da variável,  $x$ .

A Equação 2.12, pode ser escrita como:

$$Y = \mu_{(x)} + \Gamma \varepsilon \quad (2.13)$$

Onde

$$\mu_{(x)} = \beta_0 + \beta_1 x \quad (2.14)$$

Nota que a Equação 2.12 representa um modelo de regressão linear simples, quando se supõe  $Y = \ln(T)$ , com distribuição normal (gaussiana), com média (parâmetro de locação)  $\mu_{(x)} = \beta_0 + \beta_1 x$  e variância (parâmetro de escala)  $\Gamma^2$ .

Após a estimativa dos parâmetros, é necessário que utilize algum método para verificar a adequação do modelo. Os procedimentos para estimar os parâmetros do modelo e verificar a adequação do mesmo são encontrados em Freitas e Colosimo (1997) e Mansur (2003), podendo ser assim descritos:

1. Obter os dados experimentais de um teste de vida acelerada.

2. Estimar os parâmetros do modelo, segundo a distribuição de probabilidade log-normal.
3. Verificar a adequação do modelo, validando-se as hipóteses associadas ao mesmo.
4. Utilizar a função de confiabilidade  $R(T) = P(T \geq t)$  correspondente à distribuição log-normal, encontrado por meio de cálculo inverso,  $x_0$ , correspondendo a um valor de  $R(T) = 50\%$ . Onde  $R(T) = P(T \geq t)$  é a probabilidade de que o tempo até a falha do material seja maior do que um tempo  $t$  determinado.
5. O valor obtido no item anterior é o limite de resistência à fadiga do material.

Após a estimativa é necessário fazer um ajuste para verificar o modelo proposto.

#### **2.6.4 Ajuste do modelo de regressão**

Em análise, um modelo de interesse pode ser a reta de regressão da população (modelo linear da população) que pode não ser conhecida. Portanto, deve ser estimada com base nos dados amostrais, obtendo uma reta de regressão [Maluf, 2002].

O ajuste para esse modelo considera a distribuição dos valores em log-normal. Em seguida, é utilizada a função de confiabilidade da distribuição log-normal e feito o cálculo inverso para estabelecer o limite de resistência à fadiga para o aço.

Existe uma relação entre as distribuições log-normal e normal. Como o nome sugere o logaritmo natural de uma variável com distribuição log-normal, com parâmetro  $\mu$  e  $\sigma$ , tem uma distribuição normal com média  $\mu$  e desvio padrão  $\sigma$ . Esses dados da distribuição log-normal podem ser analisados segundo uma distribuição normal, se o trabalho realizado for com o logaritmo natural ao invés de seus valores originais.

A função de confiabilidade da log-normal é dada por:  $R(T) = P(T \geq t)$ , sendo a probabilidade do tempo até a falha do metal, seja maior do que um tempo  $t$  determinado [Freitas e Colosimo, 1997] e é dada pela Equação 2.15.

$$\hat{R}(T) = \Phi \left\{ - \left[ \frac{\ln(t) - \mu}{\hat{\Gamma}} \right] \right\} \quad (2.15)$$

Onde,

$$\mu = \beta_0 - \hat{\beta}_1 x_0 \quad (2.16)$$

Assim:

$$\hat{R}(T) = \Phi \left\{ - \left[ \frac{\ln(t) - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_0}{\hat{\Gamma}} \right] \right\} \quad (2.17)$$

Onde  $\Phi$  é o percentil da distribuição normal padrão, com uma normal com média zero e desvio padrão log-normal igual a 1. Os parâmetros:  $\hat{\beta}_0$ ,  $\hat{\beta}_1$ , e  $\hat{\Gamma}$  são estimados pelo modelo,  $t$  é o tempo de vida de interesse e  $x_0$  é o nível de tensão.

A partir da expressão para  $\hat{R}(T)$  da log-normal, estabelece o cálculo inverso da seguinte forma:

$$x_0 = \frac{1}{\hat{\beta}_1} \left[ \Phi^{-1} \hat{\Gamma} + \ln(t) - \hat{\beta}_0 \right] \quad (2.18)$$

Onde,  $\Phi^{-1}$  é o valor de  $z$  (normal padrão) correspondente ao percentil de interesse.

O cálculo para o limite de resistência à fadiga é feito utilizando o valor  $x_0$  para o qual se tem  $R(T) = 50\%$ . Essa é a probabilidade de que os corpos-de-prova venham a falhar, após um número de ciclos estimado. Esse valor é usado na verificação das estimativas obtida pelo método cálculo direto utilizando a distribuição log-normal (Método de modelos de regressão para dados oriundos de testes de vida acelerada).

### 2.6.5 Verificação do modelo

Uma das ferramentas mais significativas para verificação da adequação de um modelo de regressão é a análise dos resíduos. Com essa análise, é possível averiguar se as suposições sobre os resíduos do modelo são satisfatórias, isto é, verificar se as suposições de igualdade de variância, de

normalidade e de independência são cumpridas. Essas validades podem ser verificadas por meio de gráficos [MARTINEZ, 2002].

Outra forma muito usual de verificar a adequação de um modelo de regressão é por meio do coeficiente de determinação,  $R^2$ . No entanto, a análise dos resíduos deve ser efetuada, pois esta técnica é superior à de  $R^2$  [Maluf, 2002].

O valor de  $R^2$  pode ser determinado de diversas formas, uma delas é dada pela seguinte equação:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_t - y)^2}{\sum (y - y')^2} \quad (2.19)$$

Onde,  $y_t$  é chamada de variação total. A diferença entre o valor de um ponto  $y (x_i, y_i)$  e seu valor estimado  $y'$  na curva é a distância entre o ponto  $y$  e a reta de regressão e conhecida como variação não explicada pela reta de regressão.

O valor de  $R^2$  varia entre 0 e 1. Quando o modelo é adequado, os valores obtidos de  $R^2$  são próximos de 1. Se o modelo não é adequado, são obtidos valores pequenos ( $R^2 \approx 0$ ). Apesar disso, um valor alto de  $R^2$  não necessariamente implica que os dados estejam bem ajustados pelo modelo [Maluf, 2002]. Portanto, deve construir o gráfico dos resíduos para se confirmar à adequação do modelo.

Portanto, o método de verificação da adequação do modelo ajustado é baseado na análise dos seus resíduos. Portanto, o melhor modelo é o que apresenta, graficamente, pontos alinhados em torno de uma linha reta [Freitas e Colosimo, 1997].

## 2.7 Efeito do meio ambiente

Uma outra variável no processo de fadiga é a influencia exercida pelo meio ambiente. Geralmente, a realização do ensaio em atmosfera controlada causa a redução ou aumento no limite de fadiga. Por exemplo, um material ferroso ensaiado em atmosfera salina ou ácida, seu limite decresce ao ponto de até desaparecer. Entretanto, no caso de um material ser ensaio em ambiente extremamente básico, esse pode apresentar um aumento de seu limite de fadiga [Dieter, 1986].

Ebara *et all* (1990) verificaram que um material quando submetido a tensões cíclicas e a ação corrosiva, sofre uma redução maior de suas propriedades. Isto pode ser explicado, uma vez que o efeito químico ocasiona a aceleração da propagação da trinca de fadiga e as tensões cíclicas aceleram a corrosão do material. Os ensaios foram feitos em máquina flexo-rotativa em ambiente com concentração de NaCl variada. Constatou que a concentração do sal é outro fator a ser considerado para o limite de resistência à fadiga.

A velocidade do ensaio é outro parâmetro que deve ser considerado em ambientes corrosivos: quanto maior a velocidade, menor a influência da corrosão na diminuição do limite de fadiga e dos *pits* formados [Hahin, 1990].

Os *pits* são um tipo de ataque corrosivo localizado, sendo uma forma de corrosão localizada. Os *pits* não tendo forma regular, possuem partes extremamente pontiaguda agindo como concentradores de tensão, e por conseqüência, locais preferenciais para nucleação de trincas por corrosão por fadiga [Filho, 2006].

Ao realizar ensaio de fadiga em corpos-de-prova no vácuo, observar que o ambiente atmosférico também influencia na fadiga, uma vez que os resultados obtidos são ligeiramente maiores [Padilha, 2004].

Steverding (1964) desenvolveu uma máquina para ensaio flexo-rotativo de fadiga para trabalhar no vácuo e constatou ao ensaiar vários materiais que os valores obtidos, para o limite de resistência à fadiga nesse ambiente, eram maiores que ao ar. Isso foi associado com a presença do oxigênio e da afinidade que o mesmo tem com o metal. Na Figura 2.21 é possível ver a comparação entre os dois ambientes.

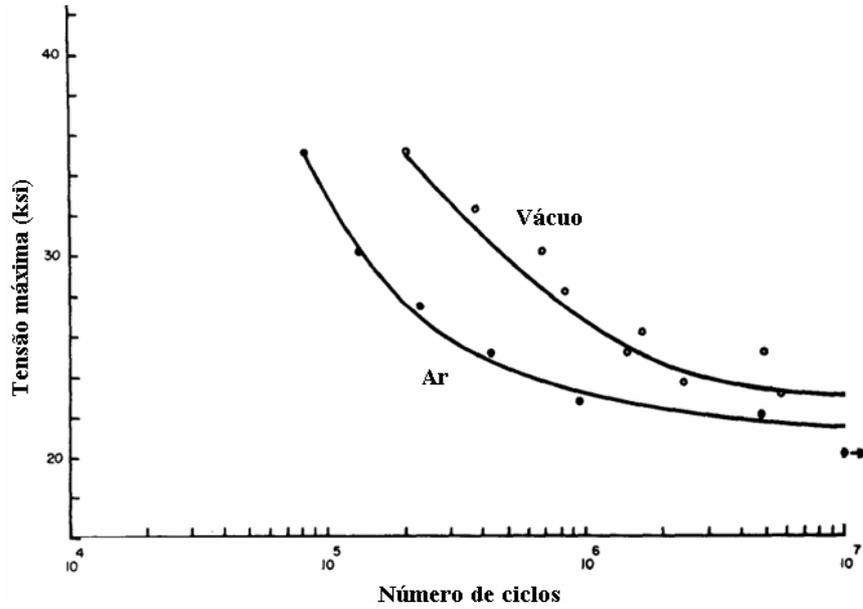


FIGURA 2.21 - Comparação do ensaio de fadiga no ar e a vácuo no aço SAE 1020, (Sterverding, 1964).

Hudson (1972) comparou cinco níveis diferentes de pressão atmosférica utilizando ensaios axiais. Constatou que quanto menor a pressão atmosférica aplicada, maior a resistência do material à fadiga. Nessa análise, a propagação da trinca por fadiga foi, significativamente, menor ao trabalhar com pressões baixas. Esse estudo serviu para mostrar a variação da vida útil dos materiais em diferentes pressões, conforme apresentado na Figura 2.22.

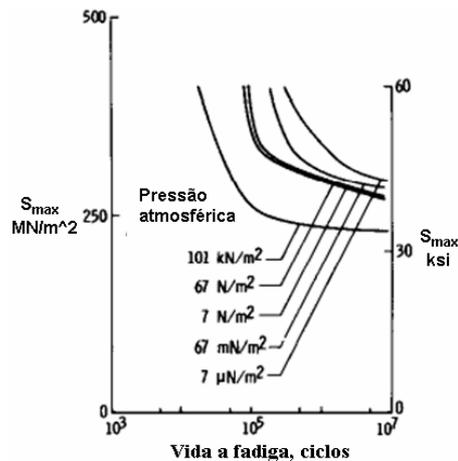


FIGURA 2.22 - Comparação das curvas produzidas com diferentes pressões aplicadas (Hudson, 1972).

Como as falhas por fadiga ocorrem depois de determinado tempo, a ação do meio pode ocasionar a aceleração da nucleação e propagação de trinca. A Figura 2.23 ilustra a redução na resistência à fadiga devido à exposição em meio com água, soluções aquosas de bórax, carbonato de sódio e óleo solúvel pulverizados. No meio mais agressivo, o bórax, a resistência à fadiga sofreu redução de 28%. Apenas o cromato de potássio, um inibidor, impede qualquer perda significativa na resistência à fadiga devido à exposição em um meio aquoso [Maluf, 2002].

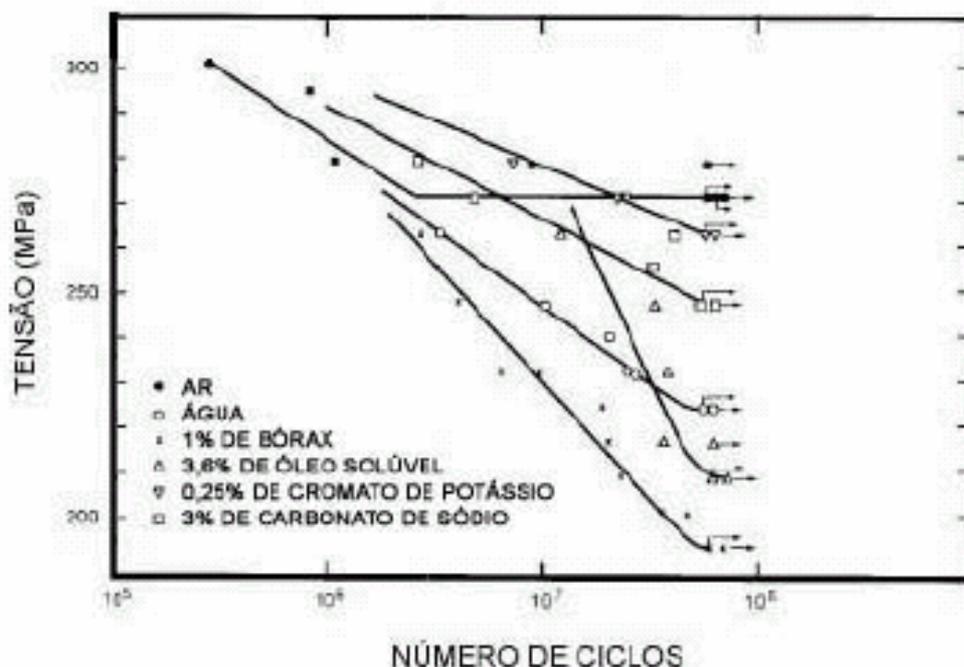


FIGURA 2.23 - Efeito de diferentes meio aquosos pulverizados sobre a resistência à fadiga de ferros fundidos [Maluf, 2002].

No caso do presente trabalho, o meio ambiente atuante não compreende apenas o ar, mas também a água e a presença da pressão hidrostática. Essa análise é importante, pois, normalmente, esses fatores não são considerados nos ensaios de fadiga flexo-rotativa. Portanto, devem-se considerar esses fatores e verificar as suas influências no limite de resistência à fadiga.

## 2.8 Efeito das condições de ensaio

Além das condições já citadas, o ensaio de fadiga depende de outras variáveis para a realização dos testes, tais como:

- Tipo de sollicitação aplicado - constante ou variável;
- A frequência de aplicação das cargas ou tensões máximas;
- As propriedades mecânicas e metalúrgicas que caracterizam o comportamento do material.

### **2.8.1 Tipos de sollicitações**

Os testes de fadiga podem ser de: tração, compressão, torção e flexo-rotativa. Como cada teste tem o seu modo específico de carregamento para a realização dos ensaios, o limite de resistência à fadiga está diretamente relacionado com o tipo de sollicitação [Souza, 1995].

### **2.8.2 Frequência de aplicações das cargas**

Foi verificado em diversos estudos que a velocidade de ensaio não tem grande influência na resistência à fadiga dos aços para a mesma sollicitação, até 10.000 ciclos por minuto ou 167 Hz. Com frequências mais altas, acontece um pequeno aumento no limite de resistência à fadiga [Souza, 1995].

Existem dois fatores que podem contribuir para esse comportamento da frequência: a quantidade de deformação plástica e a corrosão. Em relação à primeira, surge a partir dos ciclos aplicados. No outro, o efeito corrosivo da atmosfera reduz a resistência à fadiga de alguns materiais e espera maior redução a frequências baixas [Mansur, 2003]. Em frequências mais altas, existe menos tempo, durante cada ciclo de esforço, para que apareça o dano por corrosão na peça ensaiada.

A importância do efeito da frequência depende da sensibilidade do material ao meio ambiente. Se o material for muito sensível, o efeito é grande e vice-versa. A combinação de um material sensível ao meio ambiente, com baixas frequências de carga, pode produzir condições favoráveis para a propagação da trinca [Ávila, 2005].

### **2.8.3 Microestrutura do material**

A microestrutura do material tem grande influência no comportamento da curva S-N. Neste contexto existem fatores que alteram as propriedades de fadiga do material, como: não

homogeneidade, estrutura dos grãos, composição química, inclusões, fases presentes no sistema, endurecimento e além de tratamentos térmicos, alteram as propriedades de fadiga do material [Dieter, 1986].

Com a influência desses fatores tem-se uma distribuição de tensão não uniforme na microestrutura. Com isso, os locais onde os níveis de tensões são altos, tornam os principais pontos para iniciação da fadiga.

## 2.9 Tipos de ensaios de fadiga

Dos ensaios mecânicos, os mais aplicados para o teste de fadiga são: tração-compressão (axial), quatro pontos, três pontos, flexo-rotativa, torção e flexão.

Um outro recurso utilizado são as simulações numéricas. As suas vantagens estão na diminuição dos custos e do tempo para simular os efeitos esperados.

### 2.9.1 Ensaio de fadiga axial

O ensaio é realizado normalmente em uma máquina de tração que possui um programa específico para controlar a frequência e a carga aplicada durante o teste de fadiga.

Balzer e Sehitoglu [1997] desenvolveram uma câmara pressurizada para ensaios de fadiga axial, utilizando uma máquina servo-hidráulica. Essa câmara tinha a função revestir e pressurizar o corpo-de-prova, empregando certos tipos de líquidos. Os experimentos mostraram que a pressão aplicada influenciava nos resultados, pois combinava com a tensão axial gerando uma tensão maior distribuída no corpo-de-prova.

Hiroshio *et all* (1994) desenvolveram um estudo para explicar o crescimento da trinca por fadiga, usando o fator de intensidade de tensão,  $\Delta K$ , com testes acelerados em vários ambientes, principalmente na água do mar e em outros líquidos. Para propagação das trincas utilizaram corpos-de-prova tipo CT e realizados em célula com fluido contínuo, com vazão de  $0,03\text{m}^3/\text{h}$ . Em relação à fadiga, em ambientes aquosos, chegaram à hipótese de que o crescimento da trinca ocorre devido à presença do hidrogênio que migra para o interior da estrutura. Verificou que não há diferença entre os valores de  $da/dN$  para **meios aquosos**, mas há significativa diferença para os valores ao ar.

Em outro teste realizado com parafina líquida, óleo hidráulico, 1, 1, 2-tricloro-1, 2, 2-trifluoretileno e ar, constataram que o crescimento da trinca por fadiga nesses meios, apresentava valores de  $da/dN$  bem próximos. As discussões dos resultados relatam que o hidrogênio presente nesses meios é baixo, sem muita influência nos valores de propagação da trinca [Hiroshio *et al*, 1994].

### **2.9.2 Ensaio de fadiga por flexão em quatro pontos**

O ensaio de fadiga por flexão em quatro pontos é utilizado na propagação de trincas superficiais, devido ao tipo de distribuição de tensões. Nesse tipo de carregamento, as tensões máximas são concentradas na superfície do corpo-de-prova entre dois apoios centrais, onde o momento é máximo.

Braz (1999) utilizou para a análise da propagação de trincas curtas superficiais, o ensaio por fadiga em soldas de alta resistência e baixa liga. Identificou que para diferentes composições microestruturais havia uma taxa de crescimento específica da trinca.

### **2.9.3 Ensaio de Fadiga por flexão em três pontos**

A vantagem desse ensaio sobre o de flexão a quatro pontos é a utilização de cargas mais elevadas. A desvantagem reside na necessidade da linha de aplicação de carga, do ponto de máxima tensão e da trinca estejam alinhados, pois a tensão máxima ocorre entre os apoios e terá o maior valor no centro. Por isso, necessita de grande precisão na localização da aplicação da carga.

Filho (2002) utilizou em seu trabalho envolvendo fadiga em *raisers*, ensaios do tipo flexão em três pontos. O objetivo do seu trabalho foi monitorar a propagação da trinca nas três regiões da solda: metal de base, metal depositado e zona termicamente afetada e determinar as curvas de fadiga. Observou que defeitos internos na junta soldada alteram a taxa de propagação da trinca.

### **2.9.4 Ensaio de fadiga flexo-rotativa**

Em máquinas de ensaios de fadiga flexo-rotativa, todas as fibras do corpo-de-prova estão sujeitas a uma sollicitação alternada pura. Nesse caso especial de sollicitação, a tensão média,  $\sigma_{méd}$ , é nula e a amplitude de tensão,  $\sigma_a$ , é igual à máxima tensão aplicada [Ávila, 2005].

Nesse ensaio, a região em rotação entre as partes submetidas à flexão fica sujeita a um momento fletor ao longo de todo o seu comprimento. Desse modo, qualquer ponto da superfície sofre uma reversão de tensão completa. Nesse caso, quando o corpo-de-prova está com compressão máxima na posição superior, na posição inferior vai estar com tração máxima. O ciclo é repetido na frequência de rotação da máquina e a tensão segue uma lei senoidal [Padilha, 2004].

Mansur (2003) fez um estudo utilizando o ensaio de fadiga flexo-rotativa e evidenciou o dano de fadiga nas propriedades do aço SAE 8620 realizados ao ar e refrigerados com água. Nos testes realizados ao ar ensaiou 72 corpos-de-prova e para refrigerados 20 corpos-de-prova e levantou às curvas S-N-P. Constatou que os corpos-de-prova refrigerados tinham uma menor variação nas propriedades do material, devido ao efeito da temperatura gerada durante o ensaio. As cargas foram aplicadas em dois pontos do corpo-de-prova conforme apresentado na Figura 2.24.

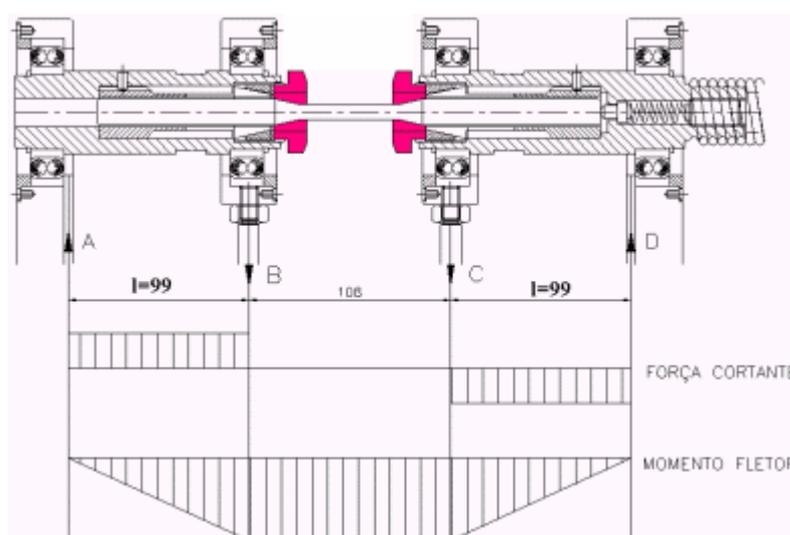


FIGURA 2.24 - Esquema da aplicação de carga no corpo-de-prova.

Em seu trabalho foi possível verificar também a variação nos valores dos limites de escoamento, de resistência de ruptura em função do número de ciclos em relação à aplicação das tensões.

Maluf (2002) levantou as curvas S-N utilizando 5 níveis de tensões para cada ensaio (sem entalhe, entalhados e entalhe roleteado) e 5 corpos-de-prova para cada tensão. Os resultados demonstram claramente o quão nocivo é o efeito do entalhe sobre o limite de fadiga. Em outra situação, os corpos-de-prova tiveram seu entalhe roleteado. O efeito do entalhe foi praticamente eliminado e ocorreu o aumento do limite de fadiga, quando comparado com o sem entalhe. Essa mudança de

desempenho ocorreu em virtude da introdução de tensões residuais compressivas que contrapuseram às tensões trativas aplicadas.

Júnior (2006), em seu trabalho analisou a fadiga térmica do aço inoxidável austenítico utilizando ensaio flexo-rotativo. Verificou que a fadiga térmica alterava significativamente as curvas S-N-P do material reduzindo o número de ciclos para a falha sob o mesmo nível de tensão e que o módulo de tenacidade diminuía com o dano térmico aplicado.

Além de ensaios mecânicos, simulações numéricas são aplicadas para o estudo da fadiga.

### **2.9.5 Simulação numérica por elementos finitos**

Elementos finitos (EF) é um método numérico largamente utilizado para simular alguns dos problemas de engenharia, onde a solução analítica é desconhecida ou difícil de obter. O método permite, por exemplo, estudar as tensões em peças mecânicas, as barragens, o fluxo de calor, e a pressão. Basicamente, esses tipos de análises baseiam na solução de um problema, onde são estabelecidas equações diferenciais parciais dentro de um determinado domínio e suas variáveis. Essas equações devem satisfazer as condições de restrições para as variáveis e suas derivadas na fronteira do domínio [Miranda, 2003].

No trabalho desenvolvido por Kiepper (2004) realizou a modelagem em duas e três dimensões do seguimento tubo flexível-enrijecedor. O objetivo foi analisar uma estrutura estática e compará-la com o programa desenvolvido pela COPPE / Petrobrás. Os resultados apresentaram uma concordância satisfatória na simulação do modelo. Nesse seguimento, demonstrou uma modelagem por elementos finitos do ensaio de fadiga e comparou com os testes realizados em escala real, no aparato de fadiga do Núcleo de Estruturas Oceânicas (NEO). Após a correlação, verificou uma boa concordância com os valores experimentais obtidos pelos sensores instalados no aparato.

### **2.10 Acúmulo de danos**

Seja um material submetido a tensões cíclicas, mesmo que estas tensões estejam abaixo do seu limite de ruptura, haverá um acúmulo de danos afetando a integridade física do componente, devido à ciclagem contínua. O acúmulo de danos conduz a formação de trincas que podem se propagar levando o material à fratura [Rocha, 2005].

O trabalho pioneiro que introduziu o conceito de dano foi elaborado por Kachanov em 1958 [Proença, 2000]. Procurou justificar a ruptura, precocemente observada de metais, em regime de deformação lenta, como consequência da existência de defeitos no material. Para consideração do dano, definiu uma variável escalar do material livre de defeitos,  $D=0$ . Enquanto,  $D=1$  corresponde a um estado de completa perda de integridade da estrutura interna do material.

### 2.10.1 Fenômenos caracterizados pelo dano

Nos últimos anos, os modelos de dano têm sido amplamente aceitos como alternativa para a simulação de comportamentos constitutivos dos materiais que apresentam perda de rigidez com a evolução da fissuração interna. Fisicamente, a degradação das propriedades mecânicas do material é resultado do surgimento e crescimento de micro defeitos, entre eles, micro poros, micro fissuras, e cavidades. Esses fatores associados com tensões aplicadas cíclicas são favoráveis ao aumento do dano por fadiga [Fatemi, 1998].

A mecânica do dano fundamenta-se num modelo constitutivo para materiais com defeitos em sua microestrutura. A particularidade do formalismo está no conjunto de hipóteses admitidas: os processos irreversíveis possuem um número finito de variáveis internas, o estado em que encontra o meio e a resposta que possa apresentar quando solicitada. Dependem exclusivamente dos valores atuais das variáveis internas [Gonçalves, 2003].

Segundo Proença (2000) não se pode considerar que o dano seja mensurável diretamente, pois procedimentos voltados para tal fim não são viáveis. Porém, é possível quantificá-lo de forma indireta, ao medir a redução progressiva de uma propriedade mecânica global, como por exemplo, o módulo de elasticidade.

### 2.10.2 Variáveis associadas ao dano

O modelo de dano supõe que o comportamento mecânico dos micro-poros e das micro-fissuras independem da orientação e dependem de uma variável escalar chamada variável de dano (ou de degradação),  $D$ . Assim, para um, a variável de dano é dada por:

$$D = \frac{A_D}{A} \quad (2.20)$$

Onde,  $A_D$  é área com defeitos (fissuras) e  $A$  é a área total (nominal) da seção transversal, como apresentada na Figura 2.25.

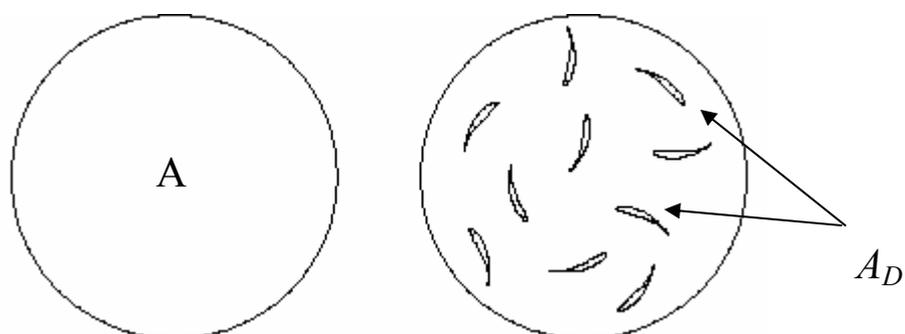


FIGURA 2.25 - Seção transversal nominal e degradada.

### 2.10.3 Leis elementares dos danos por fadiga

Enquanto Kachanov (1958) assumiu  $D$  como uma variável de natureza escalar, estudos posteriores levaram à proposição de quantidades tensoriais para descrever o dano. Mais recentemente Lemaitre & Chaboche formalizou a chamada Mecânica do Dano em Meios Contínuos (“Continuum Damage Mechanics”) com base numa metodologia fundamentada em um processo irreversível [Proença, 2000].

Sibaja (2003) apresentou um trabalho para estimar o crescimento de dano por fadiga. Utilizou as cargas cíclicas, em plataformas marítimas esbeltas, no modelo da mecânica do dano contínuo. Ressalta que para a formulação do modelo de dano por fadiga, o número de ciclos fez parte da análise numérica. Os resultados indicaram que pode ocorrer um colapso por fadiga da plataforma dependendo do dano provocado.

Em um ensaio de fadiga, a evolução linear do dano é expressa pela Equação 2.21.

$$D = \frac{n_i}{N_f} \quad (2.21)$$

Onde,  $n_i$  é o número de ciclos a que um material está submetido à tensão  $\sigma_i$  e  $N_f$  é o número de ciclos que leva o material à fratura na mesma tensão. Na Figura 2.26, mostra a evolução linear do dano e o acúmulo linear.

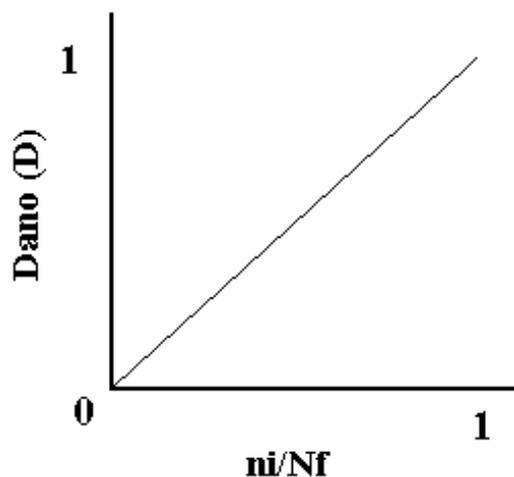


FIGURA 2.26 - Evolução e acúmulo linear de dano.

A regra de acúmulo linear se aplica ainda para a evolução não linear do dano. Se o ensaio é realizado a dois níveis de tensão, a Figura 2.27 representa a evolução não linear do dano. O aumento do dano é introduzido pelo número de ciclos. A Equação 2.22, representa a forma e o gráfico do modelo [Mansur, 2003].

$$\delta D = \frac{n_i}{N_f} \quad (2.22)$$

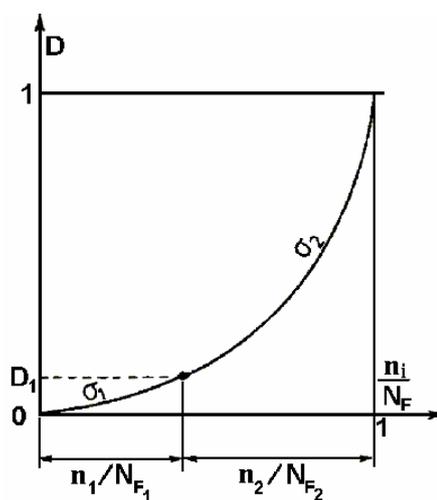


FIGURA 2.27 - Evolução não linear do dano, mas com acúmulo linear.

Pelo gráfico,  $D_1$  representa o estado de dano no fim de  $\sigma_1$ . A evolução do dano prossegue no segundo nível de tensão  $\sigma_2$  a partir do mesmo estado. A Equação 2.23 representa a soma das frações do dano.

$$\frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} < 1 \quad (2.23)$$

## 2.10.4 Teorias de acúmulo de danos

Um processo acumulativo de dano pode produzir falha no material devido a carregamentos cíclicos gerando fadiga [Lennon and Prendergast, 2004]. Desde a década de 40, os trabalhos e teorias propostas estão se somando para um conhecimento melhor do problema. Nesse aspecto, são apresentadas algumas teorias referentes ao acúmulo de dano.

### 2.10.4.1 Teoria de acúmulo de danos de Palmgren-Miner

Palmgren-Miner foram um dos primeiros a expor uma teoria de acúmulo de danos. É uma teoria linear que, por sua simplicidade e aplicabilidade, é utilizada para o estudo do dano.

Os processos propostos por Palmgren-Miner admitem que o dano referente a cada solicitação possa ser quantificado em termos de quociente entre o número de ciclos ( $n$ ) aplicados e o número de ciclos ( $N$ ) necessários para causar a falha [Domingues, 2003]. Em seguida, admite-se que a fratura por fadiga ocorra quando a soma dos quocientes dos danos relativos, a cada solicitação, seja igual à unidade, 1, conforme a Equação 2.24.

$$\sum D_i = \frac{n_i}{N_i} \geq 1 \quad (2.24)$$

Onde,  $n_i$  é o número de ciclos aplicados ao componente sob uma tensão  $\sigma_i$  e  $N_i$  é o número de ciclos obtidos da curva S-N-P, sob a tensão  $\sigma_i$ .

A Figura 2.28, ilustra esta situação sobre a curva S-N de um dado material. Nesse exemplo, supõe que já existiram as duas primeiras solicitações sem ocorrer ruptura. Ao aplicar a terceira solicitação, a ruptura ocorreria quando o número de ciclos satisfizesse a seguinte igualdade:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} = 1 \quad (2.25)$$

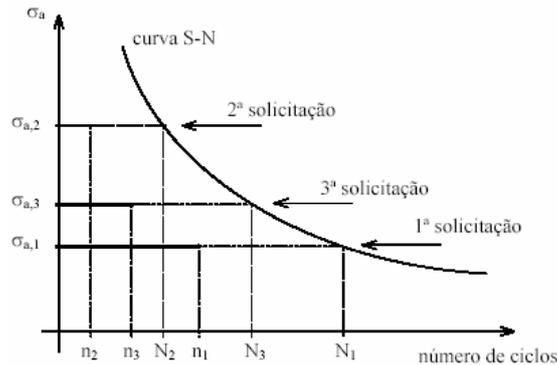


FIGURA 2.28 - Teoria do Palmgre-Miner [Domingues, 2003].

Segundo Mansur (2003) as principais deficiências desta teoria são as independências do nível de tensão, da seqüência do carregamento e a desconsideração da interação dos danos.

Segundo a equação, verifica que não é relevante à ordem de aplicação dos ciclos de tensão, por exemplo, não seria importante aplicar o ciclo  $n_3/N_3$ , antes do ciclo  $n_1/N_1$ . No entanto, a experiência demonstra que a ordem de aplicação dos ciclos de tensões é de grande importância na resistência à fadiga. A aplicação de um ciclo de tensões com maior amplitude em primeiro lugar causa mais dano do que a aplicação inicial de um ciclo com menor amplitude de tensões [Correia, 2001].

#### 2.10.4.2 Teoria do acúmulo de danos de Corten-Dolan

Corten-Dolan desenvolveram uma teoria um pouco mais complexa em relação à teoria do dano proposta por Palmgren-Miner e incorpora seis hipóteses baseadas na nucleação da fadiga, no dano e na sua propagação [Farrar, 1999] e [Mansur, 2003]:

- O período de nucleação (possivelmente um pequeno número de ciclos) é necessário para iniciar os danos em fadiga;

- O número de núcleos de danos cresce com o aumento da tensão;
- Os danos, para uma dada amplitude de tensão, aumentam com o crescimento do número de ciclos;
- A taxa de danos por ciclos cresce com a tensão crescente;
- O dano total que leva o componente à falha é uma constante para todos os históricos que podem ser aplicados;
- O dano continua a ser propagado em níveis de tensão menores que o mínimo de tensão necessário para iniciar os mesmos.

A expressão para o dano acumulado é dada pela Equação 2.26

$$D = \left(\frac{n_1}{N_1}\right) + \left(\frac{n_2}{N_1}\right) \times \left(\frac{\sigma_{2a}}{\sigma_{1a}}\right)^d + \left(\frac{n_3}{N_1}\right) \times \left(\frac{\sigma_{3a}}{\sigma_{1a}}\right)^d + \dots + \left(\frac{n_i}{N_1}\right) \times \left(\frac{\sigma_{ia}}{\sigma_{1a}}\right)^d \quad (2.26)$$

Onde,  $n_i$  é o número de ciclos aplicados ao componente sob uma tensão  $\sigma_{ia}$ ,  $N_1$  é o número de ciclos obtidos da curva S-N-P para a maior amplitude de tensão, e assim sucessivamente. Tendo  $\sigma_{1a} > \sigma_{2a} > \dots > \sigma_{na}$ , sendo  $d$  uma constante do material, igual a 6,67 para o aço. A falha do componente ocorre quando  $D=1$ .

Essa teoria é baseada na modificação da curva S-N, que é simplesmente uma rotação no sentido horário da curva S-N original em torno de um ponto correspondente ao mais alto nível do histórico do carregamento, conforme apresentado na Figura 2.29.

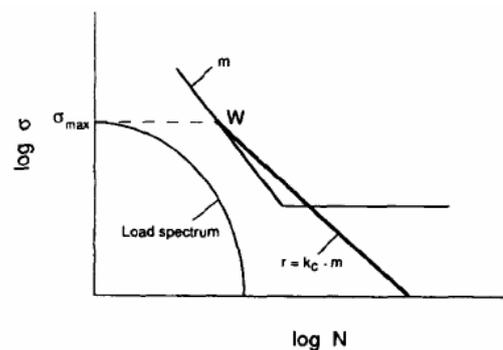


FIGURA 2.29 - Curva S-N modificada por Corten-Dolan [Yang, 1996].

### 2.10.4.3 Teoria do acúmulo de danos de Marin

A teoria de Marin (1962) propõe uma relação entre os danos em função do número de ciclo e a mudança na curva do S-N causada pelo acúmulo de danos. Pode-se observar que a teoria tem expoentes iguais a  $d$  semelhantemente à teoria de Corten-Dolan [Farrar, 1999]. A teoria é baseada numa família de curvas de danos constantes, onde a curva S-N-P para o material livre de danos é a curva de danos constantes igual a 1 para a falha. A expressão do dano acumulado é dada pela Equação 2.27.

$$D = \left(\frac{n_1}{N_1}\right) + \left(\frac{n_2}{N_2}\right) \times \left(\frac{\sigma_{a2}}{\sigma_{a1}}\right)^q + \left(\frac{n_3}{N_3}\right) \times \left(\frac{\sigma_{a3}}{\sigma_{a1}}\right)^q + \dots + \left(\frac{n_i}{N_i}\right) \times \left(\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a1}}\right)^q \quad (2.27)$$

Onde,  $q = y - x$ ,  $y = d$  (da teoria de Corten-Dolan), os números de ciclos são retirados da curva S-N-P e o valor de  $x$  é dado pela equação 2.28.

$$x = \frac{(\log N_1 - \log N_2)}{(\log \sigma_{a2} - \log \sigma_{a1})} \quad (2.28)$$

### 2.10.4.4 Teoria das médias das tensões atuantes - Mansur

Mansur (2003) propôs uma nova metodologia, que considera a história das tensões passadas. Em seu trabalho descreve que o dano total é obtido pela soma de danos parciais  $D_i$ . Cada parcela do dano  $D_i$  é obtida pela relação entre o número de ciclos  $n_i$  sob uma tensão alternada aplicada  $\sigma_i$  e a vida esperada  $N_i$ . A partir da segunda parcela, o número de ciclos é multiplicado pela média aritmética das tensões aplicadas. A sua descrição esta apresentada na Equação 2.29.

$$D = \sum_{i=1}^n D_i = D_1 + D_2 + D_3 + \dots \quad (2.29)$$

$$D = \frac{n_1 \times \sigma_1}{N_1 \times \sigma_1} + \frac{n_2 \times \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}\right)}{N_2 \times \sigma_2} + \frac{n_3 \times \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}\right)}{N_3 \times \sigma_3} + \frac{n_4 \times \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4}{4}\right)}{N_4 \times \sigma_4} + \dots \quad (2.30)$$

A proposta desta teoria é considerar a média aritmética das tensões atuantes na danificação dos materiais, provocada por fadiga. Nessa teoria,  $n_i$  é o número de ciclos que o corpo-de-prova foi

submetido à tensão alternada  $\sigma_I$ ,  $N_I$  é o número de ciclos correspondente à vida do componente sob esta tensão, retirado das curvas S-N-P, e assim sucessivamente.

## 2.11 Incerteza de medição

É o parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentalmente atribuídos a um mensurando [INMETRO, 2003].

Em geral, o mensurando ( $Z$ ) não é medido diretamente, e sim determinado de  $n$  outras grandezas de entrada  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ . Tais grandezas de entrada são correções (ou fatores de correção), grandezas de influências ou quantidades que são fontes de variabilidade. A estimativa do mensurando ( $Z$ ) é obtida usando as estimativas das grandezas de entrada  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ . Considerando várias grandezas de medição independentes:

$$Z = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (2.38)$$

Esse item foi introduzido para que se possa avaliar a incerteza que acompanha os resultados das principais grandezas mecânicas aqui utilizadas.

A incerteza  $u_y$ , considerando grandezas independentes, pode ser expressa por:

$$u_y^2 = \left[ \left( \frac{\partial f}{\partial x_1} \times ux_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial x_2} \times ux_2 \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial x_3} \times ux_3 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial f}{\partial x_n} \times ux_n \right)^2 \right] \quad (2.39)$$

O resultado da medição é expresso como:

$$RM = R_c + U \quad (2.40)$$

Onde,  $RM$  é o resultado da medição,  $R_c$  é resultado corrigido e  $U$  a incerteza expandida. O valor de  $U = k \times u_c$ , onde  $u_c$  é a incerteza combinada (incerteza padrão de uma medição quando o resultado é obtido de valores de diversas outras grandezas). A incerteza padrão  $u_i$  é a incerteza de um resultado de medição expresso com um desvio padrão. O valor de  $k = 1$  para 68% de confiança e o valor de  $k = 2$  para 95,45% de confiança, quando o número de medições que foi levantada à incerteza é maior

que 100 e a distribuição de probabilidade que rege os valores são a distribuição normal [Mansur, 2003].

### 2.11.1 Incerteza de medição nos valores das tensões

Para as tensões axiais tem-se [Mansur, 2003]:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{b \times h} \quad (2.41)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial F} = \frac{1}{b \times h}; \quad \frac{\partial \sigma}{\partial b} = -\frac{F}{b^2 \times h}; \quad \frac{\partial \sigma}{\partial h} = -\frac{F}{bh^2} \quad (2.42)$$

$$u^2(\sigma_{ax}) = \left[ \left( \frac{\partial \sigma}{\partial F} \times u(F) \right)^2 + \left( \frac{\partial \sigma}{\partial b} \times u(b) \right)^2 + \left( \frac{\partial \sigma}{\partial h} \times u(h) \right)^2 \right] \quad (2.43)$$

Para as tensões de flexão tem-se:

$$\sigma = \frac{32 \times F \times L}{\pi \times D^3} \quad (2.44)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial F} = \frac{32 \times L}{\pi \times D^3}; \quad \frac{\partial \sigma}{\partial L} = \frac{32 \times F}{\pi \times D^3}; \quad \frac{\partial \sigma}{\partial D} = -\frac{96 \times F \times L}{\pi \times D^4} \quad (2.45)$$

$$u^2(\sigma) = \left[ \left( \frac{\partial \sigma}{\partial F} \times u(F) \right)^2 + \left( \frac{\partial \sigma}{\partial L} \times u(L) \right)^2 + \left( \frac{\partial \sigma}{\partial D} \times u(D) \right)^2 \right] \quad (2.46)$$

O conhecimento dessas incertezas é importante, pois são valores que acompanham os resultados que serão levantados.

### 3. MATERIAL E METODOLOGIA

#### 3.1 Máquina de ensaio fadiga flexo-rotativa

Visto os objetivos desse trabalho: construir uma máquina de fadiga flexo-rotativa vertical portátil, conforme apresentado na Figura 3.1, avaliar o comportamento estrutural do aço ASTM A-36 após solicitação flexo-rotativa em ambientes refrigerado, em lâmina d'água e em água pressurizado a 5 atm.

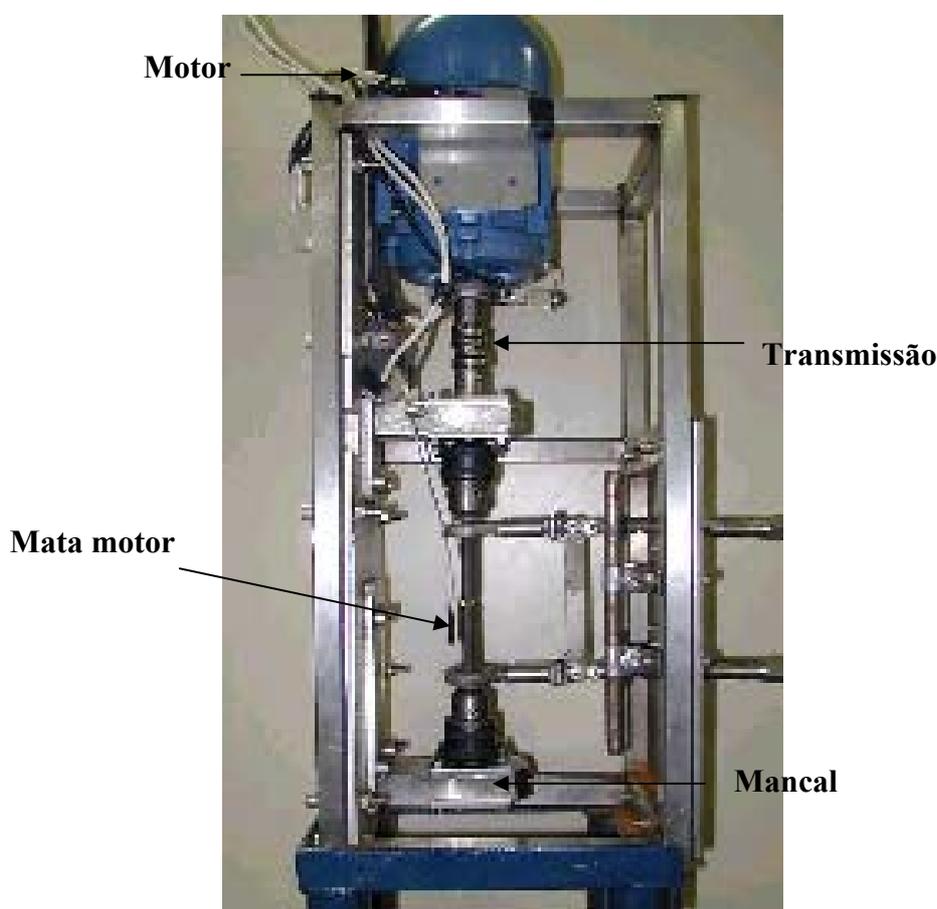


FIGURA 3.1 - Máquina de fadiga flexo-rotativa vertical.

A sua idealização ocorreu a partir de modelos conhecidos, porém com modificações essenciais para o desenvolvimento do trabalho, tais como: a posição vertical da máquina, tendo o motor na parte

superior para evitar o contato com a água durante o ensaio e o seu tamanho, dimensionada para os ensaios dentro do tanque hiperbárico existente no LRSS.

O sistema de aplicação de força foi projetado para atuar na posição horizontal. A força aplicada é distribuída em dois pontos no corpo-de-prova, simultaneamente. A Figura 3.2 mostra, esquematicamente, o sistema de aplicação de cargas.

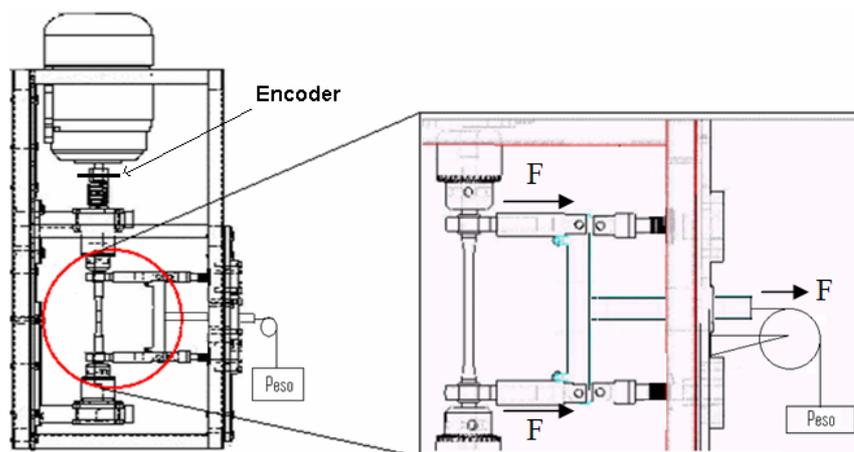


FIGURA 3.2 - Esquema de aplicação de carga.

Um motor elétrico de potência 0,5 cv com 3425 rpm produz as rotações que são transmitidas por um eixo acoplado a uma mola. Nos componentes de contato metal-metal foi colocada uma manta de borracha como isolamento para amortecer as vibrações.

A base da máquina é composta de duas partes: o sistema de fixação do corpo-de-prova e a localização do motor. Entre o motor e a base colocou várias camadas de borracha. Isso visa à diminuição das vibrações oriundas do motor.

Foi usado um sistema de disco e sensor (*encoder*) evidenciado na Figura 3.2 e mostrado na Figura 3.3, para auxiliar na contagem do número de ciclos. O disco possui pequena abertura transparente que ao passar pelo sensor deixa a luz do emissor passar e é reconhecida pelo detector, gerando um sinal. Esse sinal é convertido em pulso, que representa um ciclo e é armazenado no contador digital, Figura 3.4.

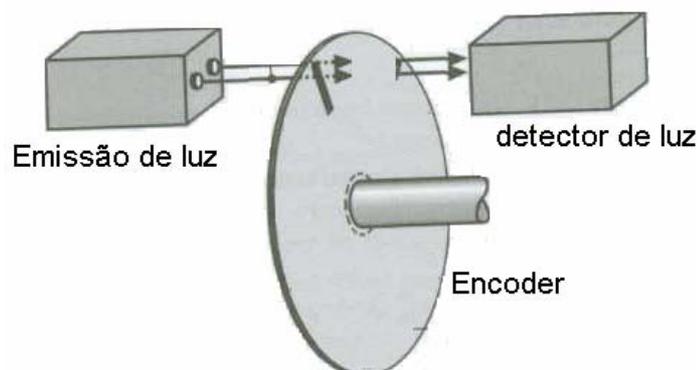


FIGURA 3.3 – Esquema do disco e sensor (*encoder*) da máquina.



FIGURA 3.4 – Contador digital.

O equipamento projetado ainda possui:

- Um sistema de refrigeração de corpos-de-prova, que permite a realização de ensaios em temperaturas praticamente constantes independentes da carga aplicada.
- Um dispositivo para a troca do corpo-de-prova, que se move facilitando a sua retirada e a colocação de um novo, conforme apresentado na Figura 3.5.

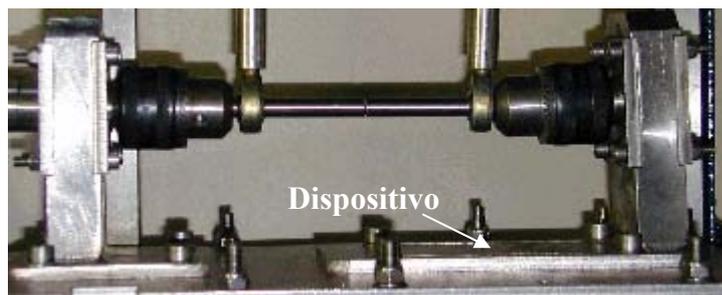


FIGURA 3.5 - Dispositivo de troca de corpo-de-prova.

## 3.2 Aquário

Para realizar os testes refrigerados e em lâmina d'água, foi utilizado um aquário de 800 x 800 x 1000 mm com capacidade de 600 litros, como apresentado na Figura 3.6.



FIGURA 3.6 – Aquário.

## 3.3 Câmara hiperbárica

Para os testes dentro d'água na presença de pressão hidrostática com 5 atm, uma câmara hiperbárica, com capacidade para simular profundidades de até 150 m ou 15 atm, foi utilizada, Figura 3.7. A máquina flexo-rotativa vertical foi colocada dentro da câmara para a realização dos ensaios.

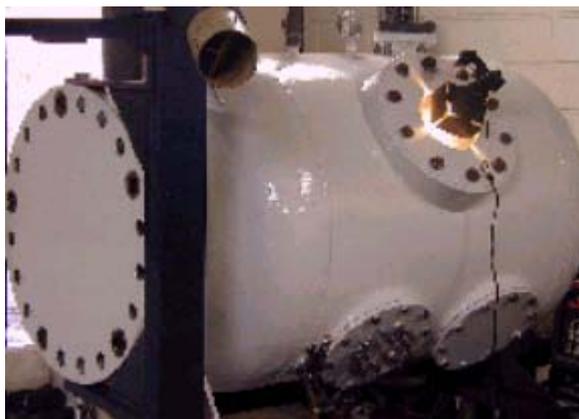


FIGURA 3.7 - Câmara hiperbárica

### 3.4 Tipo de água para a realização dos testes

Foi utilizada água comum para a realização dos testes. Essa escolha destina a garantir a reprodutibilidade dos testes, afim de que seja possível uma comparação dos resultados obtidos para os três ambientes.

### 3.5 Testes metalográficos e mecânicos

#### 3.5.1 Metalografia do material

As amostras analisadas do material foram retiradas do sentido transversal e longitudinal, como apresentado na Figura 3.8.

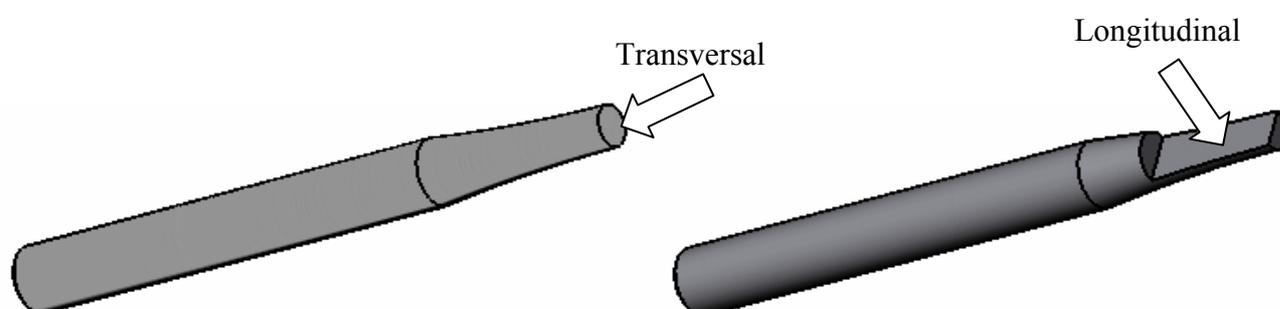


FIGURA 3.8 - Esquema do corte dos corpos-de-prova para ensaio metalográfico.

### 3.5.2 Determinação das propriedades mecânicas

Para a caracterização das propriedades mecânicas dos aços realizaram ensaios de: tração, dureza, e microdureza nos materiais em estado de entrega e após serem submetidos aos testes de fadiga dentro e fora d'água.

#### 3.5.2.1 Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram realizados no CDTN, em temperatura ambiente, segundo a norma [ASTM E-8M, 2000]. A máquina universal de ensaios utilizada é da marca Instron- TDML, com capacidade de 100 KN e velocidade do cabeçote de 2 cm/min. O desenho e foto do corpo-de-prova são mostrados nas Figuras 3.9 e 3.10, respectivamente.

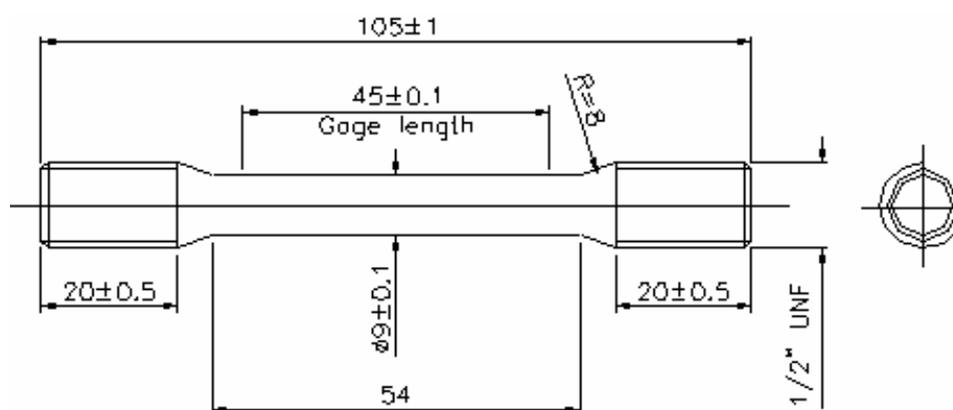


FIGURA 3.9 - Desenho do corpo-de-prova de tração

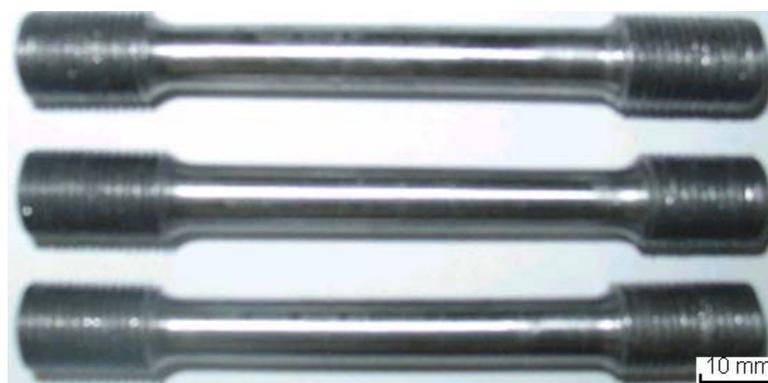


FIGURA 3.10 - Corpo-de-prova fabricado.

No ensaio de tração, a redução de área, o limite de resistência, o limite de escoamento e o alongamento total são determinados e é possível calcular a tenacidade do material, pois é a capacidade do material absorver energia até a ruptura.

O trabalho de Miscow (2003) relata que quanto maior a tenacidade melhor a contribuição para o retardamento do processo de fratura de um determinado material.

### **3.5.2.2 Ensaios de dureza**

Os ensaios de dureza Vickers foram realizados segundo a norma ASTM, E 92-82 em uma máquina Reicherter com carga de ensaio de 5 kg e penetrador pirâmide de diamante com ângulo de 136°.

As medições de dureza ocorreram em corpos-de-prova que foram submetidos aos três ambientes e depois de ensaiados à fadiga. A área analisada foi à região da fratura.

Para o preparo das amostras, a região fraturada foi embutida e passada nas lixas de 80, 200, 400 e 600. Após esse procedimento, realizou três medidas, partindo do centro do corpo-de-prova para a superfície e feito uma média dos pontos. Os corpos-de-prova virgens foram medidos, com a finalidade de comparar com os ambientes.

### **3.5.2.3 Ensaios de microdureza**

Um equipamento de microdureza modelo Mitutoyo MVK-01 com carga de ensaio de 0,5 kg e penetrador pirâmide de diamante com ângulo de 136° foi utilizado. O objetivo do ensaio é verificar a dureza dos constituintes da microestrutura.

Os testes foram realizados em corpos-de-prova virgens e após passar pelos três ambientes. A metodologia inclui as mesmas citadas para o ensaio de dureza, acrescentando a lixa de 1200 e polimento com pasta de alumina na metodologia de preparo da amostra.

## **3.6 Verificação do funcionamento da máquina de ensaio flexo-rotativa**

Para a verificação do funcionamento da máquina de ensaio de fadiga foram realizados vários testes, um deles com 16 corpos-de-prova do aço SAE 1020. Ensaiou duas tensões específicas, 222 e 297 MPa, com o corpo-de-prova refrigerado para averiguar se o sistema estava funcionando corretamente.

Em seguida, realizou outros testes com aço SAE 1045, pois devido a sua composição química, trata de um material com maior resistência mecânica. Para esse material, utilizaram-se 11 corpos-de-prova e apenas uma única tensão, 297 MPa. A finalidade foi analisar o seu comportamento quando refrigerado com água e lâmina d'água.

Os ensaios dentro da água e refrigerados realizaram dentro do aquário de 600 litros. Os ensaios iniciais serviram para verificar o comportamento do equipamento em relação aos ambientes expostos: no ar e na água.

Para o trabalho, o aço escolhido para o levantamento das curvas S-N foi o ASTM A-36 [ASTM A/36 36M-00a], adquirido no mercado em barras circulares de diâmetro de 1/2", onde se retirou os corpos-de-prova. Esse tipo de aço é muito utilizado em estruturas subaquáticas, por se tratar de um material que é classificado como um aço carbono de média resistência mecânica.

### **3.6.1 Corpos-de-prova**

A geometria do corpo-de-prova, normalmente, é determinada em função do tipo de solicitação que o material é submetido. Além disso, depende das normas que regulam o ensaio de fadiga.

Para os testes iniciais, os aços utilizados para os corpos-de-prova foram o ASTM 1020 e o ASTM 1045. A sua usinagem segue o desenho da Figura 3.11.

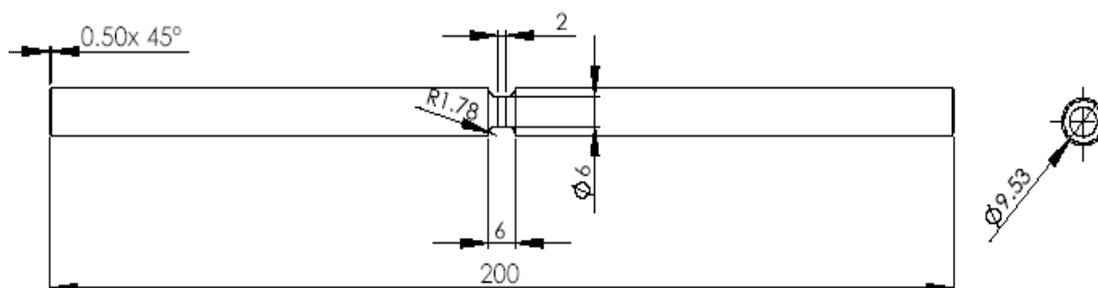


FIGURA 3.11 - Corpo-de-prova utilizado em testes preliminares.

Para o aço ASTM A-36, os corpos-de-prova foram usinados utilizando uma máquina com controle numérico para garantir as medidas. As dimensões são de 200 mm de comprimento e na região central o diâmetro de 6,0 mm, como apresentados nas Figuras 3.12 e 3.13.

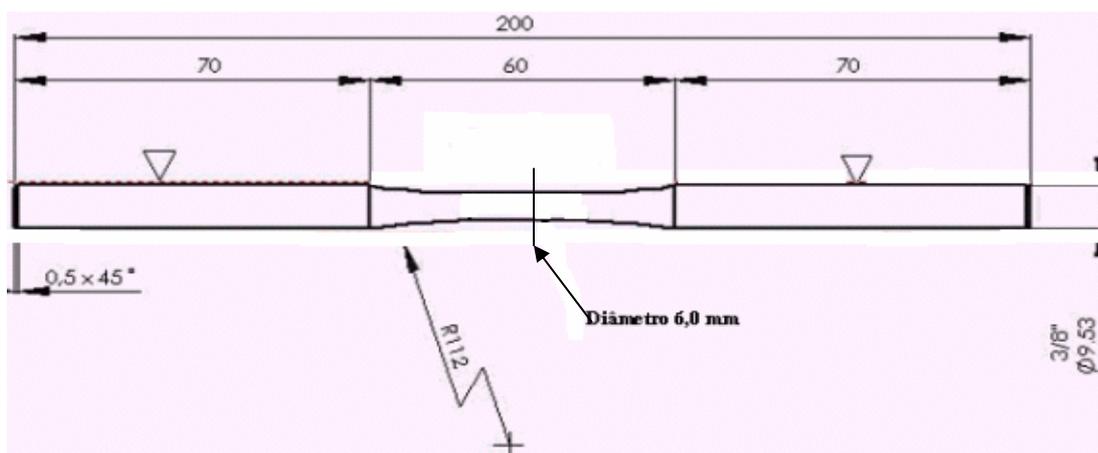


FIGURA 3.12 - Dimensões do corpo-de-prova.



FIGURA 3.13 - Foto do corpo-de-prova utilizado nos testes de fadiga flexo-rotativa.

A geometria e acabamento superficial do corpo-de-prova, aço ASTM A-36, basearam na norma [ASTM E 466-96, 1996]. Todos submeteram ao mesmo procedimento de fabricação.

### 3.6.1.1 Rugosidade nos corpos-de-prova para ensaio de fadiga

Para a medida da rugosidade utilizou um aparelho rugosímetro da Mitutoyo SJ. 201 P.

A parte selecionada para estudo da rugosidade é a região central, que é a de interesse para o ensaio de fadiga. Salienta que as medidas são feitas no sentido longitudinal e para garantir maior confiabilidade dos resultados analisou 5 corpos-de-prova, escolhidos aleatoriamente e feitas 25 leituras em cada um.

O conhecimento da rugosidade tem como objetivo avaliar as condições superficiais das amostras dos corpos-de-prova. A sua medida é conhecida a partir do momento que o apalpador normalizado percorre o comprimento de amostragem selecionada *cut off*. É recomendado pela norma que os rugosímetros devam medir 5 comprimentos de amostragem e indicar o valor médio [NBR 6405/1988].

## 3.7 Ensaios de fadiga

### 3.7.1 Ensaios de fadiga flexo-rotativa

Os corpos-de-prova, Figura 3.12 foram ensaiados na máquina de fadiga flexo-rotativa para verificar o número de ciclos necessários para ocorrer a sua ruptura. O ensaio ocorreu com o corpo-de-prova girando a uma determinada velocidade e com aplicação de cargas para provocar a fadiga do mesmo.

A tensão aplicada está diretamente relacionada com o peso empregado. Os pesos disponíveis no equipamento são: 44,72; 38,38; 19,43; 18,67; 9,43; 5,29; 3,76; 2,36; 0,79; 0,49 N. Para determinados valores de tensão empregou-se o somatório de alguns dos pesos descritos.

Para os ensaios refrigerados, após os corpos-de-prova serem fixados na máquina sem a aplicação de carga, ou seja,  $F_{cp}=0$ . Aplica-se o peso necessário para ter a tensão desejada. Em seguida, liga a água e acionar o motor dando início ao ensaio de fadiga. Ressalta-se que o ensaio foi realizado com água corrente.

Para os ensaios em lâmina d'água (feitos dentro do aquário), Figura 3.14, ou na pressão hidrostática com 5 atm (feito dentro do tanque hiperbárico), após posicionar a máquina e prepará-la com os pesos necessários, completa-se o recipiente com água. No caso do tanque, pressuriza para alcançar a pressão desejada. Em seguida, aciona o motor dando início ao teste de fadiga. Ao romper o corpo-de-prova, a máquina desliga automaticamente.

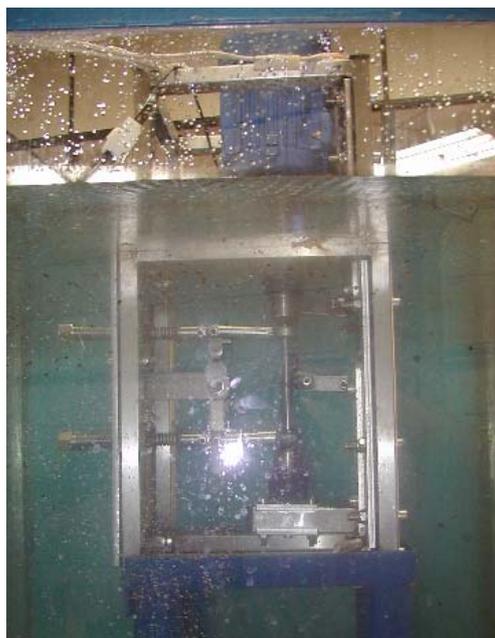


FIGURA 3.14 - Máquina de fadiga dentro da água.

### 3.7.2 Tensões atuantes no corpo-de-prova submetido à fadiga flexo-rotativa

Nesse tipo de máquina, durante o ensaio, ocorre um momento fletor no corpo-de-prova. A cada rotação, o momento é aplicado nas fibras externas e ao completar uma rotação inteira, fica submetida a um ciclo completo de tração e compressão.

O corpo-de-prova possui uma seção transversal circular e é alinhada na máquina flexo-rotativa. A tensão aplicada ao corpo-de-prova é dada pelas expressões seguintes:

$$\sigma = \frac{M_{ft}}{W_r} \quad (3.1)$$

Onde,  $M_{ft}$  é o momento fletor e  $W_r$  o módulo de resistência da seção transversal. O momento fletor máximo  $M_{ft}$  é dado por:

$$M_{ft} = \frac{F_{CP}}{2} l \quad (3.2)$$

Onde,  $\frac{F_{CP}}{2}$  é a força atuante nos dois pontos equidistantes do corpo-de-prova e  $l = 90 \text{ mm}$  é a distância do apoio ao ponto de aplicação de  $\frac{F_{CP}}{2}$ . O módulo de resistência para a seção circular é:

$$W_r = \frac{J}{r} = \frac{\pi r^3}{4} \quad (3.3)$$

Onde,  $J$  é o momento de inércia da seção transversal e  $r$  é o raio da mesma, baseados nas Equações de 3.1 a 3.3, obtém:

$$\sigma = \frac{2F_{cp} l}{\pi r^3} \quad (3.4)$$

Onde  $\sigma$  é a tensão que se deseja aplicar ao corpo-de-prova.

Para a aplicação das tensões foi necessário garantir todas as medidas, principalmente às distâncias dos apoios, de ambos os lados.

A Figura 3.15, apresenta os diagramas de esforços atuantes na distribuição das cargas e no momento aplicado. O momento é constante no corpo-de-prova entre as fixações e não existe força de cisalhamento, apenas o momento fletor. Os pontos A e D são os apoios e, B e C são os pontos de aplicação das cargas na máquina. O corpo-de-prova é fixo em dois pontos na máquina.

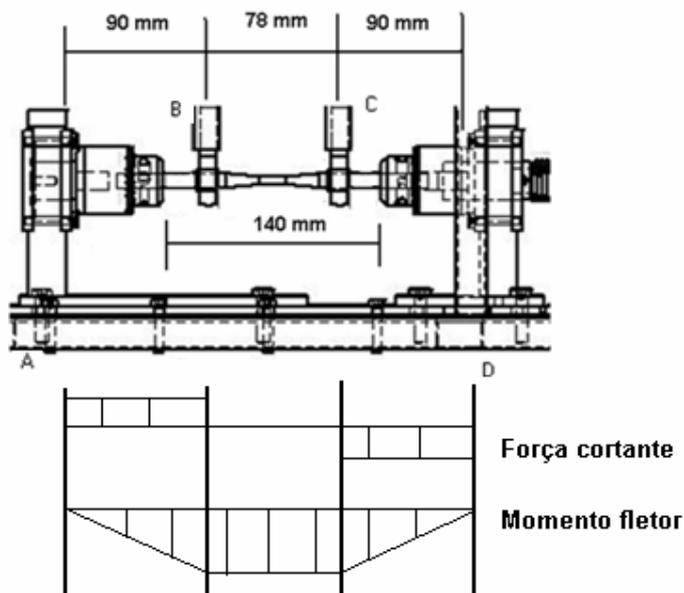


FIGURA 3.15 - Diagrama da força cortante e do momento fletor.

### 3.7.3 Planejamento dos ensaios para o levantamento da curva *S-N-P*

O Plano Experimental escolhido para a realização dos ensaios foi o Plano de Compromisso [Freitas e Colosimo, 1997; Mansur, 2003; Junior, 2006]. Nesse plano são utilizados três níveis de tensão: alto, intermediário e baixo.

O nível alto é escolhido por considerações práticas. Os níveis intermediário e baixo são escolhidos para minimizar a variância assintótica do estimador 100P%, relativo ao percentil da distribuição do tempo de vida útil do corpo-de-prova. Existe o compromisso de que a proporção de alocação (proporção de corpos-de-prova que deverão ser submetidos a testes em cada nível de tensão) seja sempre na proporção 4: 2: 1, para os níveis baixo, intermediário e alto, respectivamente.

O levantamento tradicional da curva S-N-P apresenta uma desvantagem em relação ao Plano de Compromisso. Essa desvantagem se deve ao fato dele usar o mesmo número de corpos-de-prova em todos os níveis de tensão [Mansur, 2003]. Quando se utiliza níveis mais baixos de tensão, a probabilidade de ocorrer uma falha é bem menor. Isto faz com que a precisão dos valores obtidos nos níveis mais baixos seja menor. Ao aumentar o número de corpos-de-prova nos níveis mais baixos, contribui para uma estimativa mais precisa do resultado.

No presente trabalho, utilizaram-se cinco níveis de tensões, sendo dois por interpolação linear, com exceção do ensaio refrigerado que foram sete níveis. Para os três ambientes utilizaram-se as mesmas tensões com a finalidade de comparar os resultados.

Os ensaios do ASTM A-36 foram distribuídos da seguinte forma: alta, intermediária e baixa, assim:

- Tensão 1 (alta) – 4 corpos-de-prova.
- Tensão 3 (intermediária) – 8 corpos-de-prova.
- Tensão 5 (baixa) – 16 corpos-de-prova.

As duas interpolações foram realizadas para compor um maior número de tensões:

- Tensão 2 (interpolação entre alta e intermediária) – 6 corpos-de-prova.
- Tensão 4 (interpolação entre intermediária e baixa) – 10 corpos-de-prova.

Essa metodologia foi usada para levantar as curvas S-N para os três ambientes.

### **3.7.4 Levantamento das curvas S-N-P**

No estudo levantou as curvas S-N-P para os ambientes propostos no trabalho. Nessas curvas são apresentadas três probabilidades de falha distintas, 1%, 50% e 99%, utilizando a distribuição Log-normal.

### **3.7.5 Determinação do limite de resistência à fadiga ( $S_e$ )**

A determinação do limite de resistência à fadiga, utilizou:

- O levantamento das curvas S-N-P para os ambientes em estudo;
- E o modelo de regressão para dados oriundos de testes de vida acelerados, empregado em estudos de confiabilidade.

### 3.8 Introdução de danos em corpos-de-prova

A introdução de danos nos corpos-de-prova, ensaiados na máquina de fadiga flexo-rotativa, visa verificar a região mais solicitada. A parte selecionada que sofre o carregamento e ocorre o acúmulo de dano é a região central.

#### 3.8.1 Ensaio de fadiga flexo-rotativa seguido por ensaio de tração com carregamento único.

Após o ensaio de fadiga flexo-rotativa, corpos-de-prova não rompidos foram submetidos ao ensaio de tração para verificar o dano provocado nas propriedades mecânicas do material.

Nessa metodologia realizaram-se 16 ensaios, com tensões específicas de 236 e 197 MPa para os ambientes refrigerados e lâmina d'água. Cada ensaio submeteu o corpo-de-prova a um determinado número de ciclos como indicados nas tabelas 3.1 e 3.2. O número de ciclos foi inferior ao seu valor de fratura.

TABELA 3.1 - Metodologia para ensaio de fadiga flexo-rotativa seguido por ensaio de tração, com carregamento único, com tensão de 236 MPa.

<i>Tensão (MPa)</i>	<i>Ambiente</i>	<i>Número de Ciclos</i>			
		<i>CP-01</i>	<i>CP-02</i>	<i>CP-03</i>	<i>CP-04</i>
236	Refrigerado	100000	150000	200000	250000
236	Lâmina	100000	150000	200000	250000

TABELA 3.2 - Metodologia para ensaio de fadiga flexo-rotativa seguido por ensaio de tração, com carregamento único, com tensão de 197 MPa.

<i>Tensão (MPa)</i>	<i>Ambiente</i>	<i>Número de Ciclos</i>			
		<i>CP-01</i>	<i>CP-02</i>	<i>CP-03</i>	<i>CP-04</i>
197	Refrigerado	150000	225000	300000	375000
197	Lâmina	150000	225000	300000	375000

Deve-se destacar que o corpo-de-prova não é do mesmo padrão empregado nos testes convencionais de tração. O teste serve para comparar o dano provocado medindo as propriedades mecânicas do material, virgem e depois de ensaiado.

### 3.8.2 Acúmulo de danos em corpos-de-prova submetidos à fadiga flexo-rotativa

Para a verificação do acúmulo de danos, estudaram-se algumas das teorias existentes e que propõem um novo método de quantificação do dano.

Para os testes de acúmulo de dano, os números de ciclos aplicados corresponderam a 30% do previsto para o corpo-de-prova romper com uma determinada tensão, considerando uma probabilidade de falha de 1%. Para isso, utilizou apenas corpos-de-prova refrigerados e as cargas aplicadas foram no sentido crescentes ou decrescentes para cada situação.

#### 3.8.2.1 Ensaio com cargas aplicadas no sentido crescente

Os ensaios refrigerados foram realizados em 4 corpos-de-prova. A Tabela 3.3 apresenta a tensão aplicada no sentido crescente e o número de ciclos correspondentes.

TABELA 3.3 - Metodologia para acúmulo de dano utilizando tensões crescentes.

<i>Ordem de aplicação (carga)</i>	<i>Tensão (MPa)</i>	<i>Ciclos Aplicados (n)</i>
1	176	122735
2	197	67261
3	236	22012
4	278	12413 ou falha

#### 3.8.2.2 Ensaio com cargas aplicadas no sentido decrescente

Os testes, também, foram realizados em 4 corpos-de-prova. A Tabela 3.4 apresenta a tensão aplicada no sentido decrescente e o número de ciclos correspondentes.

TABELA 3.4 - Metodologia para acúmulo de dano utilizando tensões decrescentes.

<i>Ordem de aplicação (carga)</i>	<i>Tensão (MPa)</i>	<i>Ciclos Aplicados (n)</i>
1	278	12413
2	236	22012
3	197	67261
4	176	122735 ou falha

### **3.9 Análises fratográficas**

A análise fratográficas pela técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) teve a finalidade de observar as morfologias das superfícies de fratura. As observações foram realizadas nos testes:

- Refrigerados;
- Lâmina d'água;
- Pressurizado a 5 atm.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo, são apresentados os resultados em duas etapas:

- A primeira mostra os resultados dos testes preliminares de verificação do funcionamento do equipamento de fadiga flexo-rotativa feitos em lâmina d'água e refrigerada.
- A segunda mostra os resultados e discussões dos testes realizados nos ambientes: refrigerado, lâmina d'água e dentro do tanque hiperbárico com pressão hidrostática de 5 atm.

### 4.1 Testes preliminares

Os testes preliminares serviram para verificar o funcionamento da máquina.

O primeiro teste foi verificar o comportamento da máquina, sem aplicação da carga até 2.000.000 de ciclos. Constatou que a máquina funcionou corretamente.

Um outro teste realizado foi o sistema de aplicação da carga. Nos testes iniciais, a força era aplicada por molas, com constante elástica conhecida. Verificou que o tipo de aplicação poderia dar algum problema, devido ao encruamento das molas durante os ensaios. A opção foi trabalhar com peso morto, pois a aplicação da força seria estável.

Inicialmente, os aços utilizados foram o SAE 1020 e o 1045, para a preparação dos corpos-de-prova. O seu modelo está demonstrado na Figura 3.11.

Para o aço SAE 1020 ensaiaram os corpos-de-prova refrigerados com água, em duas tensões específicas de 222 e 297 MPa. A Figura 4.1, mostra o levantamento do número de ciclos.

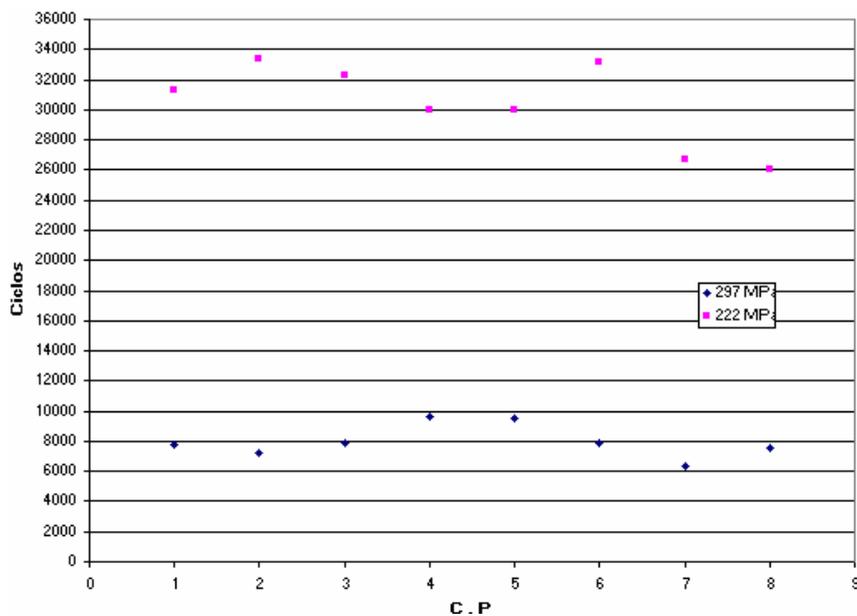


FIGURA 4.1 - Testes com corpos-de-provas refrigerado utilizando 2 tensões.

Para verificar se os valores encontrados estavam dentro de uma margem de confiança empregou o modelo de análise de resíduo e seu o resultado está apresentado na Figura 4.2.

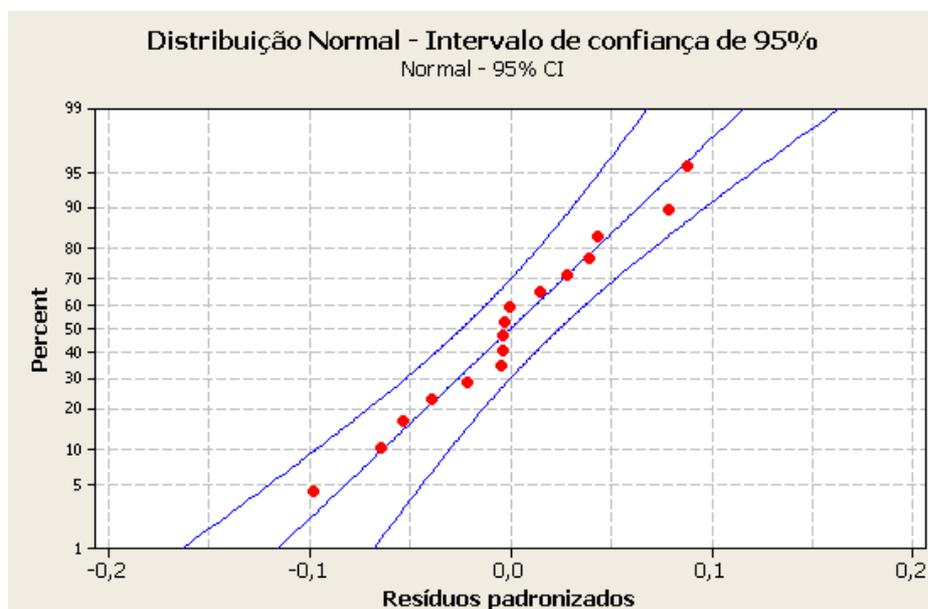


FIGURA 4.2 - Resíduos padronizados para o intervalo de confiança de 95%.

As análises estatísticas dos resultados preliminares indicam que o valor dos resíduos quando colocada em um gráfico de distribuição normal aproxima de uma reta e estão dentro da faixa de 95% de confiança.

Depois dos ensaios do aço ASTM 1020, planejou fazer outro teste com aço mais resistente e optou pelo ASTM 1045, para verificar o seu comportamento em ambiente refrigerado e em lâmina d'água. Esses testes utilizaram apenas a tensão de 297 MPa, como apresentado na Figura 4.3.

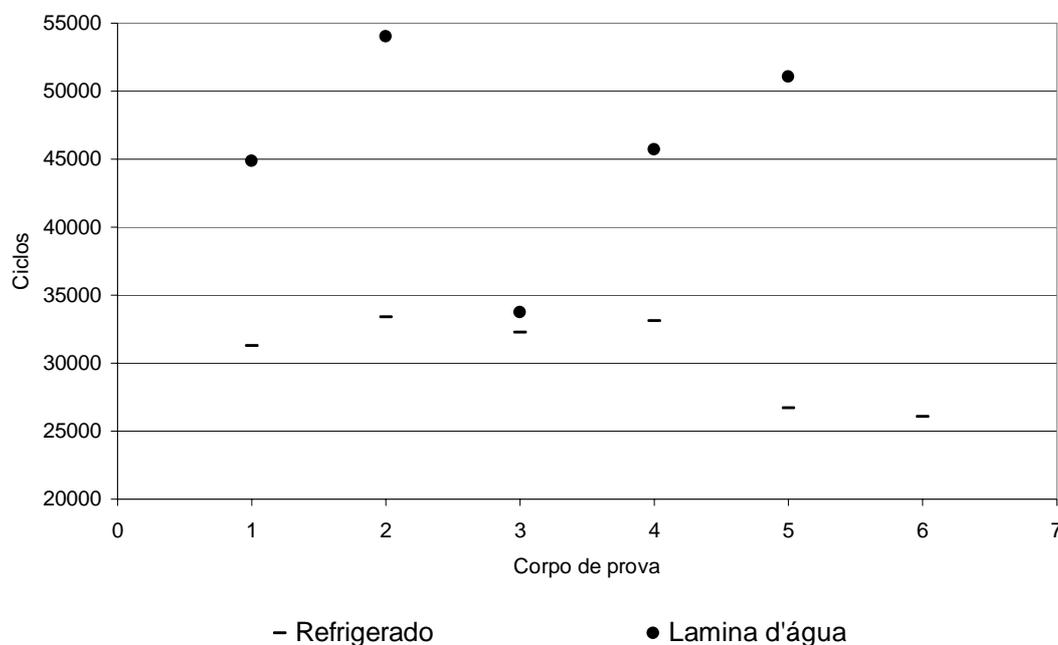


FIGURA 4.3 - Comparativo dos ciclos obtidos em corpos-de-prova com refrigeração e em lâmina d'água com uma tensão de 297 MPa.

Pelos testes realizados com aço ASTM 1045, constatou-se que ao utilizar uma tensão de 297 MPa em ambiente em lâmina d'água obteve um número de ciclos maior. Isto pode ter ocorrido pelo fato de todo o corpo-de-prova estar em contato com a água e a temperatura do ensaio ser mais uniforme.

Nos testes realizados nos dois metais, constatou que os corpos-de-prova apresentaram pontos de oxidação na fratura.

## 4.2 Ensaios para o aço ASTM A-36

### 4.2.1 Ensaios de tração

Os resultados obtidos dos ensaios de tração do aço ASTM A-36 estão indicados na tabela 4.1. Foram ensaiados 3 corpos-de-prova virgens.

TABELA 4.1 - Resultados de ensaios de tração para o aço ASTM A-36.

<i>Limite de Escoamento - <math>\sigma_{0,2}</math> (MPa)</i>	<i>Limite de Resistência à Tração (MPa)</i>	<i>Deformação Total (%)</i>	<i>Redução de Área (%)</i>	<i>Limite de Ruptura (MPa)</i>
324 ± 8	453 ± 5	26 ± 2	66 ± 4	319 ± 6

Ao usar esses dados do aço, constatou-se pelo ensaio de tração que o limite de escoamento, limite de resistência à tração e a deformação estão dentro dos limites propostos pela Norma ASTM A36/A 36M.

#### 4.2.2 Ensaios de dureza

O valor médio encontrado para a Dureza Vickers no aço SAE A-36 virgem, obtido em seis corpos-de-prova foi de  $124,3 \pm 2,3$  Vickers. Os valores medidos se encontram no ANEXO D e a incerteza associada no ANEXO E.

#### 4.2.3 Ensaios de microdureza

O valor médio encontrado para a microdureza no aço SAE A-36 virgem, obtido em seis corpos-de-prova foi de  $134,56 \pm 3,80$  Vickers, sendo que os valores variaram de 125,64 a 142,07, conforme apresentado no ANEXO D e a sua incerteza está no ANEXO E. A microdureza foi usada para avaliar durezas de fases e microconstituintes presentes na microestrutura. Na Figura 4.4 apresenta alguns pontos medidos nas amostras.

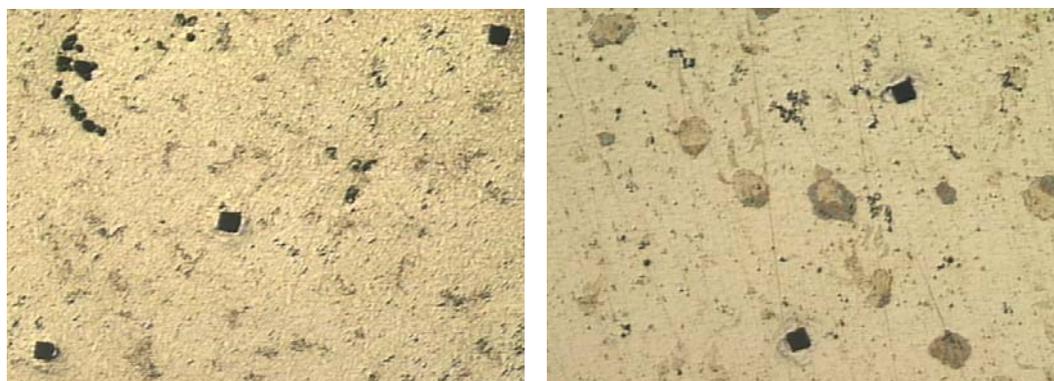


FIGURA 4.4 – Microdureza do aço SAE A-36. Aumento 100 vezes.

### 4.3 Verificação da rugosidade média dos corpos-de-prova

As medidas foram realizadas em 5 corpos-de-prova, escolhidos aleatoriamente.

A rugosidade média ( $Ra$ ) encontrada foi de CP-01 = 0,27, CP-02 = 0,29, CP-03 = 0,29, CP-04 = 0,27 e CP = 0,28  $\mu\text{m}$ . A média variou de  $\pm 0,01 \mu\text{m}$ . A incerteza associada da rugosidade está no ANEXO E.

### 4.4 Análise química do material

Com as amostras retiradas das barras de aço ASTM A-36 realizou-se a análise química utilizando o método de Espectrometria óptica e o seu resultado é mostrado na Tabela 4.2

TABELA 4.2 - Composição química prevista para o aço ASTM A 36.

C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)	Al (%)	V (%)
0,17	0,23	0,62	0	0,01	0,013	0,027	0,018	<0,3	<0,1	<0,1

Os valores encontrados na composição química estão dentro da faixa média que caracteriza o tipo do aço [ASTM A 36/A 36M-00a]. Os valores estão registrados no Certificado de Análise Química 64/2006.

### 4.5 Caracterização metalográfica do aço A-36

As amostras analisadas apresentaram uma microestrutura de aço com grãos de ferrita (parte mais clara) e a outra estrutura é a perlita (parte mais escura). Isto foi observado em cortes transversais e longitudinais, como mostrados nas Figuras 4.5 e 4.6, respectivamente.

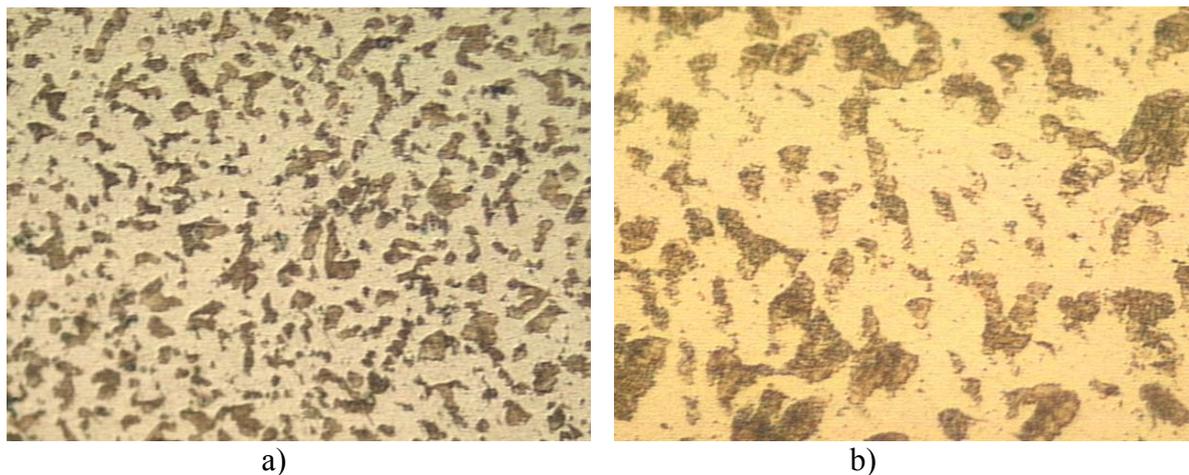


FIGURA 4.5 - Microestrutura - corte transversal: a) aumento de 200x; b) aumento de 500x.

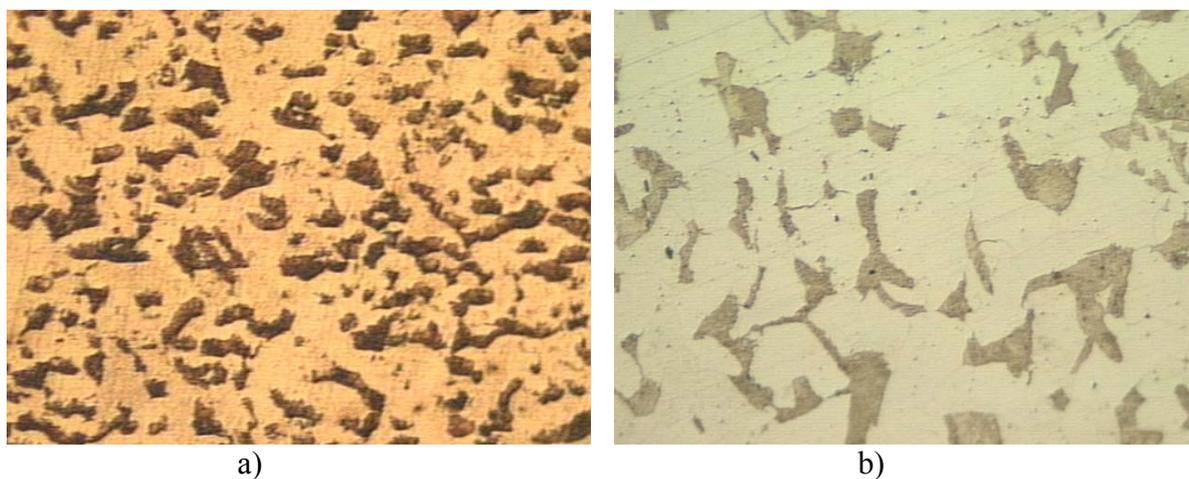


FIGURA 4.6 - Microestrutura - corte transversal: a) aumento de 200x; b) aumento de 500x.

## 4.6 Curvas S-N do aço SAE A-36

Para o levantamento das curvas S-N, foram utilizados 5 níveis de tensão alternada para os ensaios em lâmina d'água e em água pressurizado a 5 atm. Para o ambiente refrigerado foram usados 7 níveis de tensão, pois não se conhecia qual era a melhor tensão para fazer os ensaios.

## 4.6.1 Levantamento da curva S-N

### 4.6.1.1 Ensaio refrigerado

Para o levantamento da curva S-N, os resultados obtidos com os ensaios de fadiga flexo-rotativa para o ambiente refrigerado, estão mostrados na Figura 4.7.

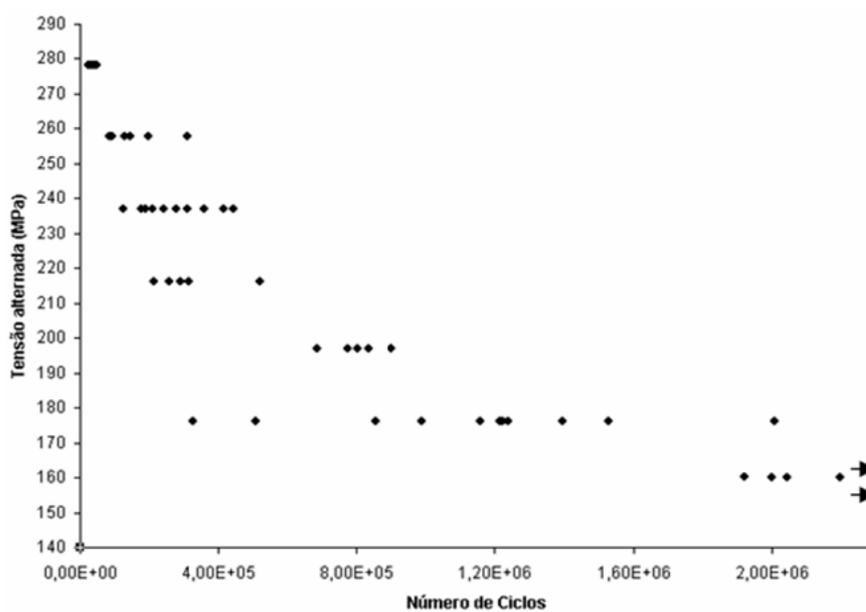


FIGURA 4.7 - Ensaios em corpos-de-prova refrigerados.

### 4.6.1.2 Ensaio em lâmina d'água

Para o levantamento da curva S-N obteve os resultados dos ensaios de fadiga flexo-rotativa dos corpos-de-prova em lâmina d'água, como mostrados na Figura 4.8.



## 4.6.2 Ajuste do modelo de regressão

Para validação dos resultados obtidos foi necessária uma verificação do ajuste do modelo de regressão base. O ajuste foi feito para os corpos-de-prova refrigerados, lâmina d'água e em água sob pressão hiperbárica de 5 atm. No caso, a distribuição estatística estudada foi a Log-normal.

### 4.6.2.1 Ajuste do modelo de regressão para os corpos-de-prova refrigerados

A estimação dos parâmetros desse modelo e a verificação dos mesmos foram feitas utilizando os *softwares* MINITAB, versão 13 e Microsoft Excel, 2000. Na Figura 4.10, são apresentados os valores dos resíduos padronizados e, em seguida os valores das variáveis.

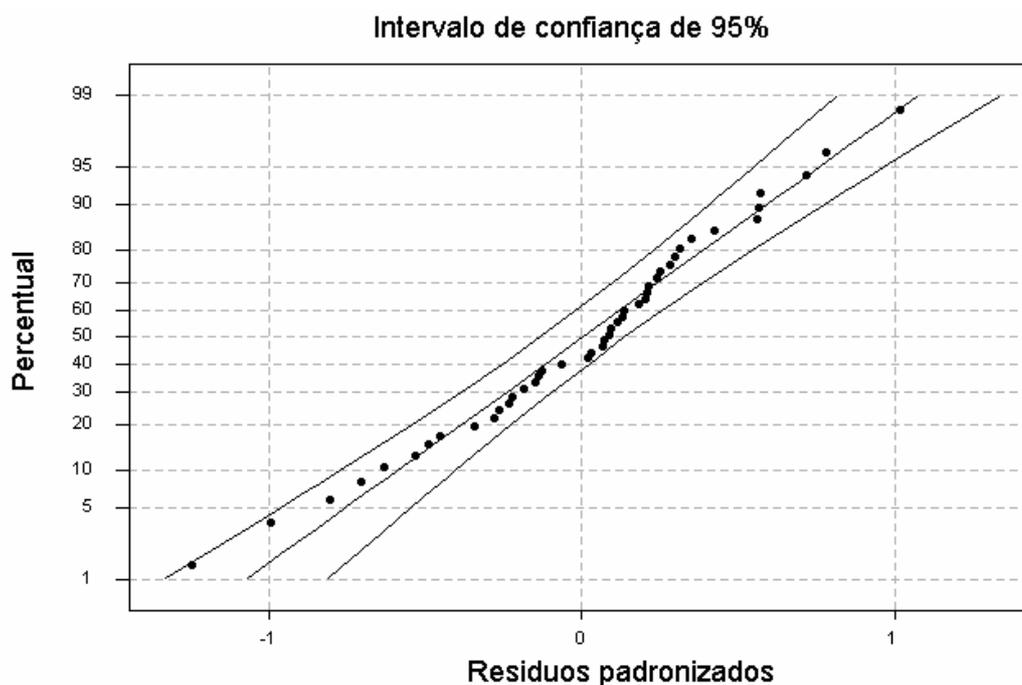


FIGURA 4.10 - Probabilidades para resíduos padronizados - refrigerados.

Os resultados obtidos pelo gráfico foram:

- Intercepto = 19,02899,
- Coeficiente da variável preditora = -0,02874,
- Parâmetro de escala da distribuição Log-normal = 0,43843.

O modelo obtido segundo o resultado acima é o seguinte:

$$Y = \ln(T) = 19,02899 - 0,02874x + 0,43843\varepsilon \quad (4.1)$$

Onde,  $T$  tem uma distribuição Log-normal com parâmetros  $\mu(x)$  (que depende do valor de  $x =$  nível de tensão) e  $\Gamma = 0,43843$ .

A análise estatística dos resultados indica que o valor dos resíduos (valores ajustados – valores observados), colocados em um gráfico de distribuição normal, aproxima-se de uma reta e estão dentro da faixa de 95% de confiança e sem nenhuma configuração que demonstre comportamento insatisfatório. O modelo em questão é adequado para o estudo, conforme mostrado na Figura 4.10.

#### 4.6.2.2 Ajuste do modelo de regressão para os corpos-de-prova em lâmina d'água

O resíduo do modelo para a lâmina d'água é apresentado na Figura 4.11.

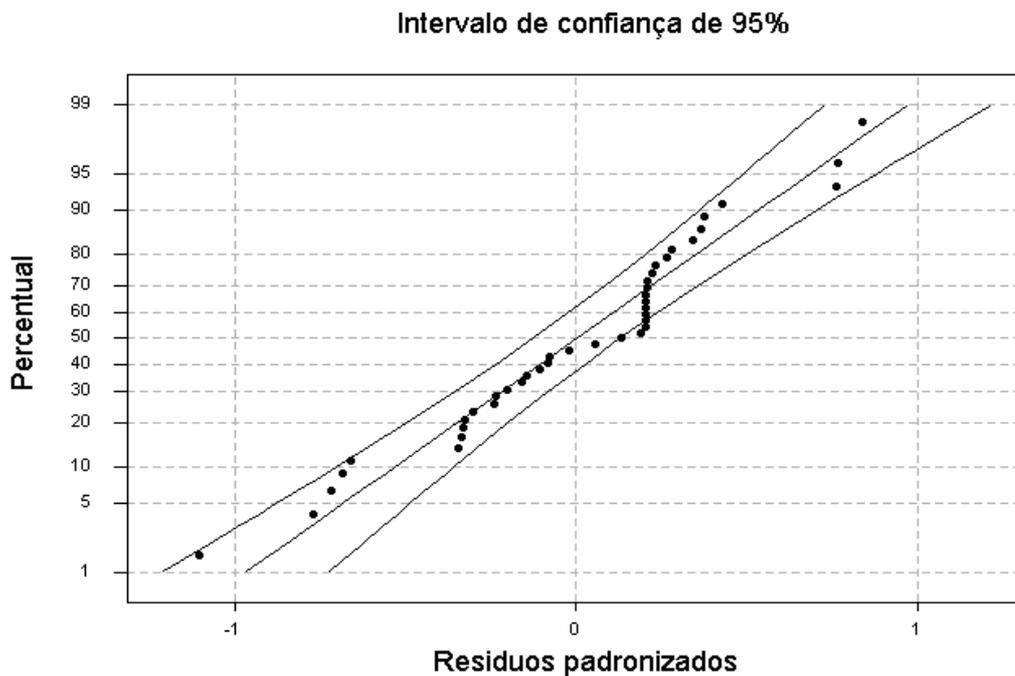


FIGURA 4.11 - Probabilidades para resíduos padronizados – lâmina d'água.

Os resultados obtidos pelo gráfico foram:

- Intercepto = 17,94569,

- Coeficiente da variável preditora = -0,02274,
- Parâmetro de escala da distribuição Log-normal = 0,42077.

O modelo obtido segundo o resultado é o seguinte:

$$Y = \ln(T) = 17,94569 - 0,02274x + 0,420773\varepsilon \quad (4.2)$$

Sendo que,  $T$  tem uma distribuição Log-normal com parâmetros  $\mu(x)$  e  $\Gamma = 0,42077$ .

Os resultados indicam que o valor dos resíduos aproxima-se de uma reta e estão dentro da faixa de 95% de confiança, mesmo tendo dois valores que ficaram fora da curva. O modelo é satisfatório devido ao número de testes realizados.

#### 4.6.2.3 Ajuste do modelo de regressão para os corpos-de-prova em água pressurizados a 5 atm

Ao utilizar a mesma metodologia, o resíduo do modelo é apresentado na Figura 4.12.

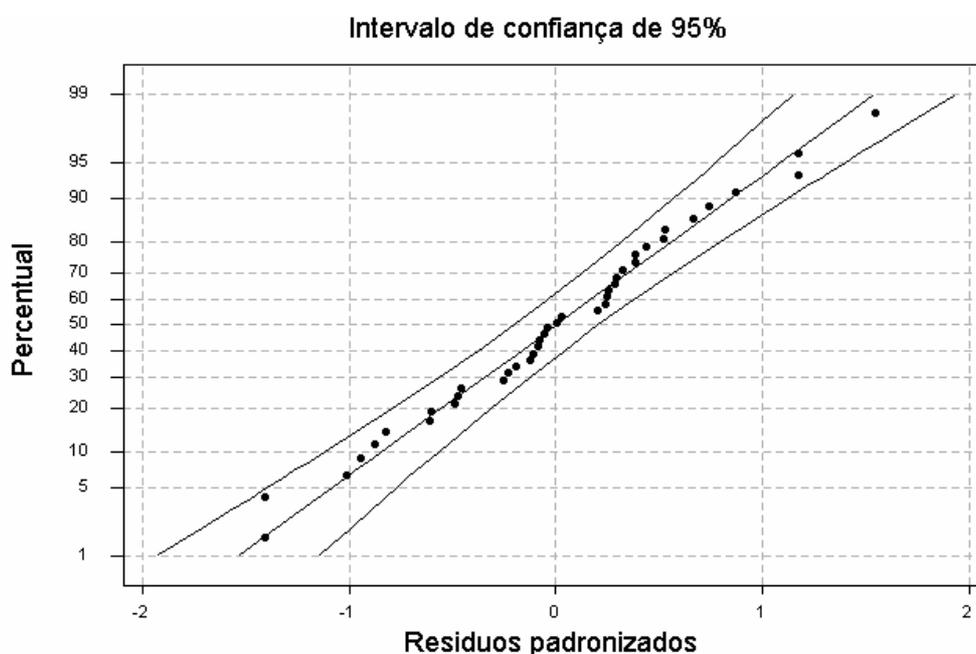


FIGURA 4.12 - Probabilidades dos resíduos padronizados – pressurizado em água com 5 atm.

Os resultados obtidos foram:

- Intercepto = 13,51672,
- Coeficiente da variável preditora = -0,01042,
- Parâmetro de escala da distribuição Log-normal = 0,73778.

O modelo obtido pelo gráfico é o seguinte:

$$Y = \ln(T) = 13,51672 - 0,01042x + 0,73778\varepsilon \quad (4.3)$$

Sendo,  $T$  tem uma distribuição Log-normal com parâmetros  $\mu(x)$  e  $\Gamma = 0,73778$ .

Os resultados em água pressurizada a 5 atm indicam que os valores dos resíduos aproximam de uma reta e estão dentro da faixa de 95% de confiança. O modelo é adequado, mesmo obtendo números de ciclos abaixo dos outros dois ambientes.

A incerteza associada à medição do número de ciclos está no ANEXO E.

## 4.7 Determinação das curvas S-N-P para o aço A-36

Para a determinação das curvas S-N-P são consideradas as probabilidades de falhas distintas, no caso desse trabalho 1%, 50% e 99%. As curvas são obtidas utilizando os resultados dos ensaios de fadiga flexo-rotativa para os três ambientes.

O levantamento dessas curvas S-N-P foi feito utilizando a distribuição Log-normal, como apresentadas nas Figuras 4.13 a 4.15. A diferença entre essas curvas S-N-P e as Figuras 4.7 a 4.9 é o modelo estatístico utilizado.

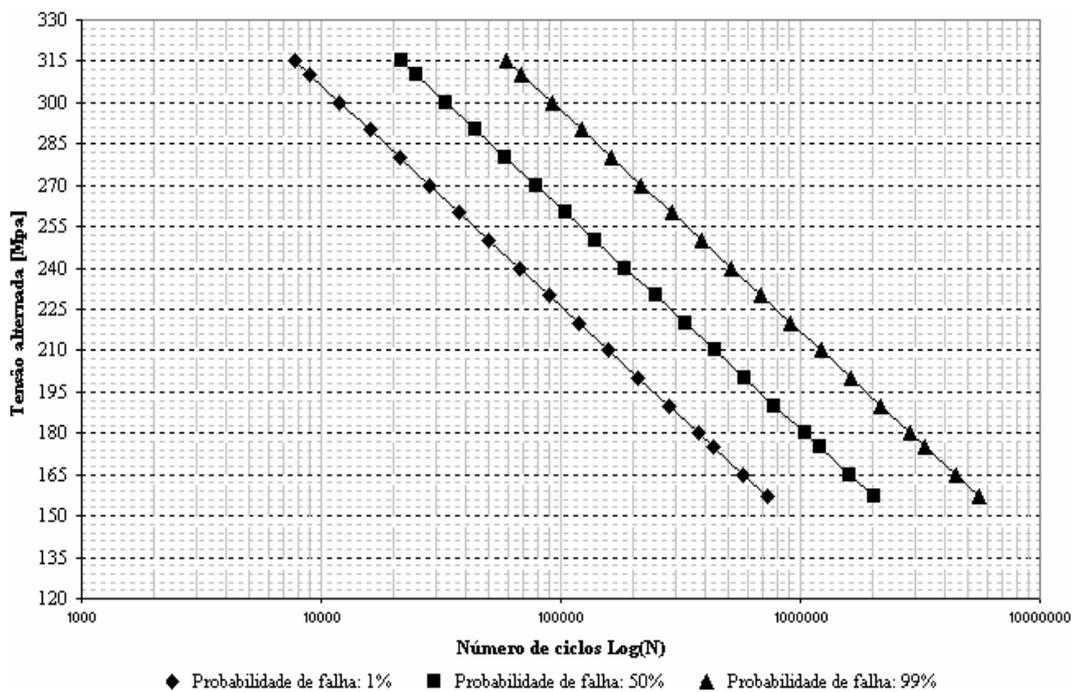


FIGURA 4.13 - Curvas S-N-P. Ensaios em corpos-de-prova refrigerados.

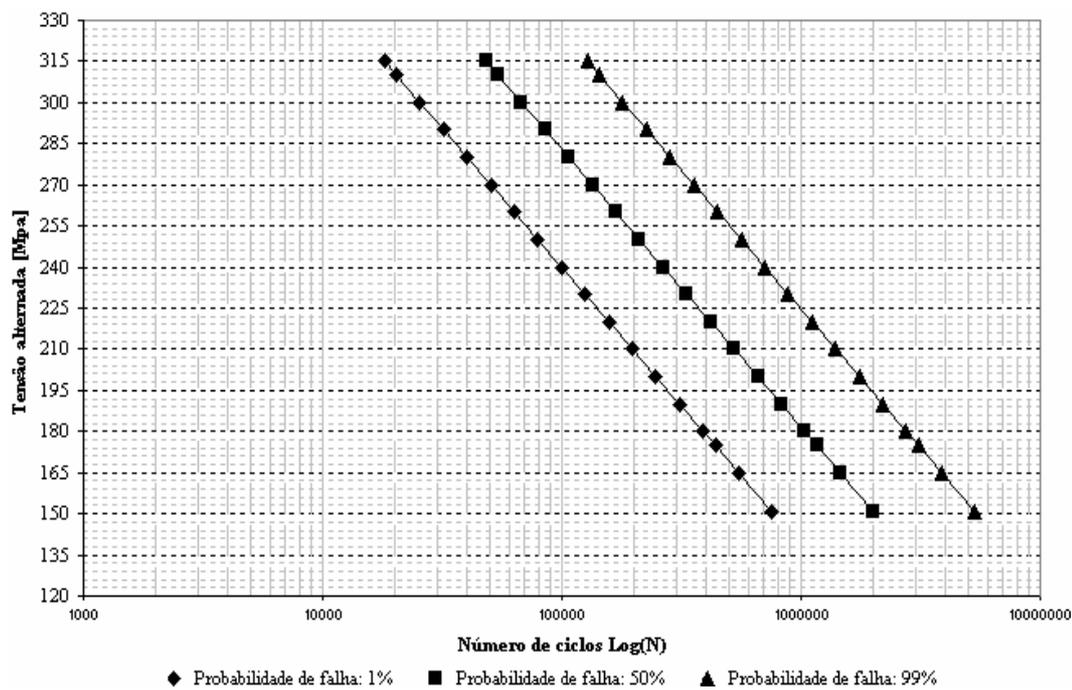


FIGURA 4.14 - Curvas S-N-P. Ensaios em corpos-de-prova em lâmina d'água.

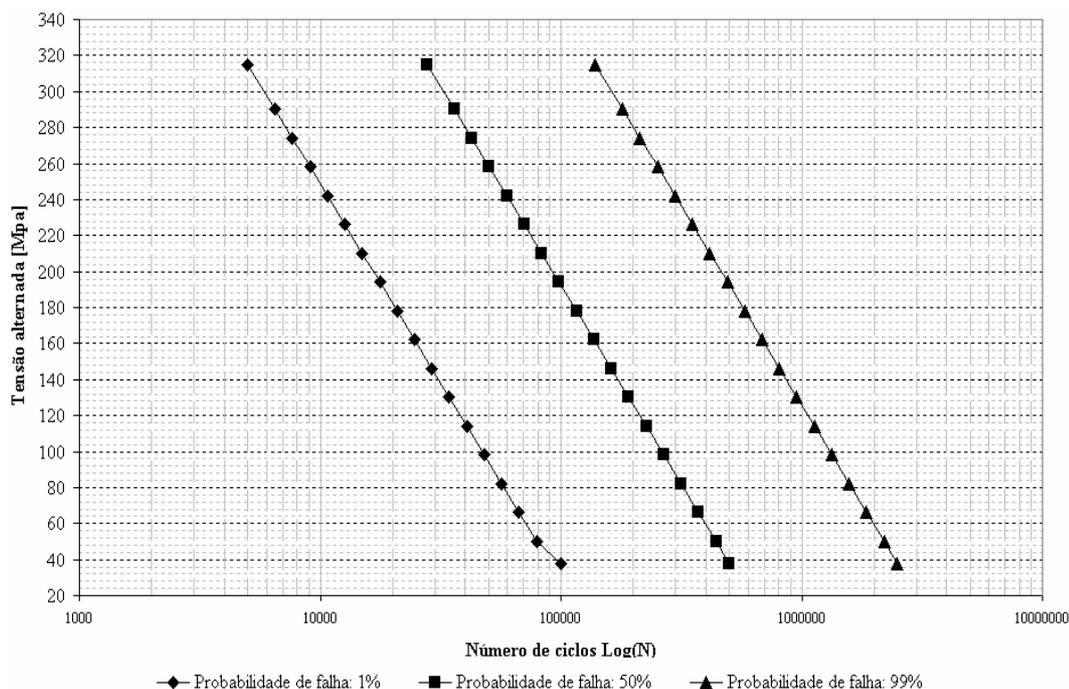


FIGURA 4.15 - Curvas S-N-P. Ensaios em corpos-de-prova pressurizado a 5 atm.

Pelas curvas obtidas é possível conhecer os parâmetros envolvidos como: coeficiente linear da reta ( $a$ ), coeficiente angular ( $b$ ), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o intervalo de confiança obtido nos ajustes das equações das curvas S-N-P para os ensaios de fadiga flexo-rotativa, mostrados na Tabelas 4.3 a 4.5. Esses parâmetros foram determinados pelos *softwares* ORIGIN e Microsoft Excel.

TABELA 4.3 - Parâmetros das curvas que representam as equações de fadiga para ensaio refrigerado.

Parâmetros	Ensaios refrigerados		
	1%	50%	99%
$a$	626,72	662,22	697,72
$b$	-80,131	-80,131	-80,131
$R^2$	1	1	1
Intervalo de Confiança	0,95	0,95	0,95

TABELA 4.4 – Parâmetros das curvas que representam as equações de fadiga para ensaio em lâmina d'água.

<i>Parâmetros</i>	<i>Ensaio em lâmina d'água</i>		
	<i>1%</i>	<i>50%</i>	<i>99%</i>
<i>a</i>	746,16	789,20	832,25
<i>b</i>	-101,26	-101,26	-101,26
<i>(R<sup>2</sup>)</i>	1	1	1
<i>Intervalo de Confiança</i>	0,95	0,95	0,95

TABELA 4.5 – Parâmetros das curvas que representam as equações de fadiga para ensaio pressurizado a 5 atm.

<i>Parâmetros</i>	<i>Ensaio Pressurizados a 5 atm</i>		
	<i>1%</i>	<i>50%</i>	<i>99%</i>
<i>a</i>	1143,3	1297,70	1452,20
<i>b</i>	-221,07	-221,07	-221,07
<i>(R<sup>2</sup>)</i>	1	1	1
<i>Intervalo de Confiança</i>	0,95	0,95	0,95

A equação que descreve a curva de fadiga é idealizada por:

$$\sigma_a = a + b \times \log[N] \quad (4.4)$$

logo,

$$N = 10^{\frac{\sigma_a - a}{b}} \quad (4.5)$$

A Figura 4.16 compara os valores obtidos para a probabilidade de falha de 50% para os três ambientes. Observa que a curva do ambiente pressurizado a 5 atm possui um deslocamento para a esquerda e uma inclinação muito diferente em relação às outras duas curvas. O deslocamento indica a redução da vida à fadiga do material.

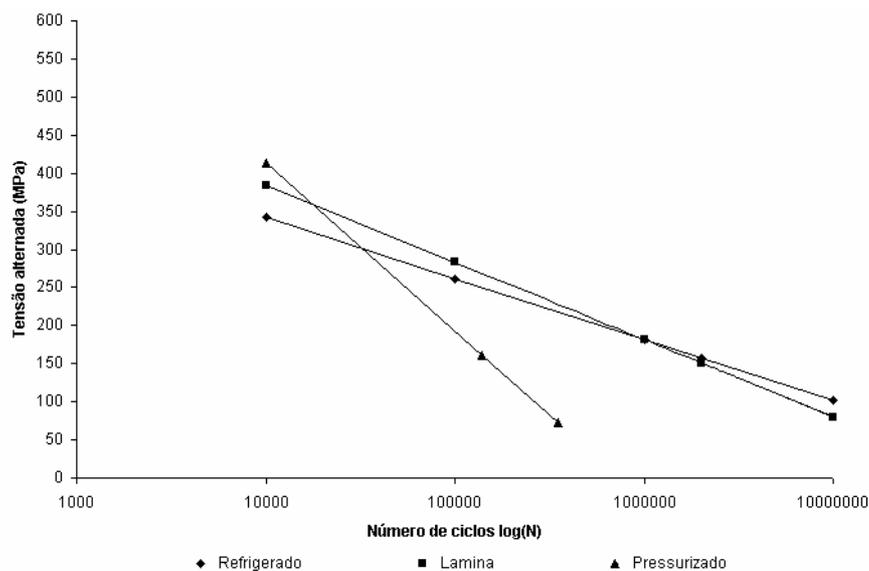


FIGURA 4.16 – Comparação entre as Curvas S-N-P com probabilidade de 50%.

A Figura 4.17 indica a porcentagem de decaimento da vida à fadiga entre as curvas pressurizadas a 5 atm em lâmina d'água com probabilidade de falha de 50%, este valor é dado por:

$$\% \text{ Redução} = 1 - (N_{\text{pressurizados}} / N_{\text{lâmina}}) \quad (4.6)$$

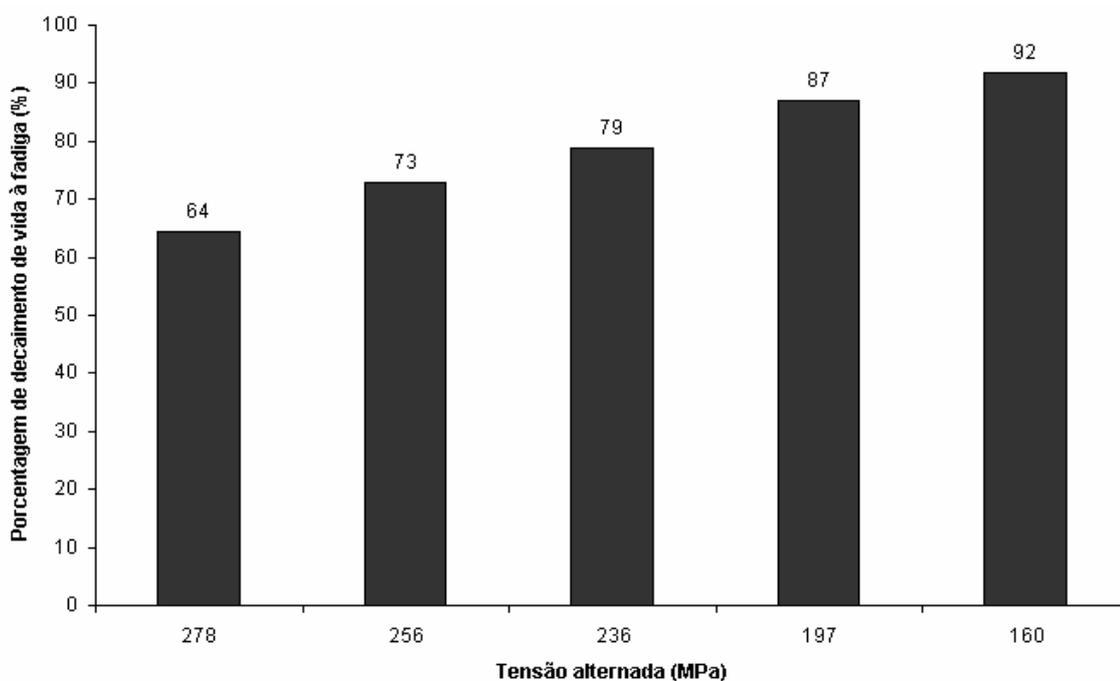


FIGURA 4.17 – Redução da vida à fadiga entre os ambientes pressurizados a 5 atm e em lâmina d'água para a probabilidade de falha de 50 %.

Nota, pelo gráfico, que quanto maior a tensão aplicada, menor é a redução da vida à fadiga. Isso pode estar ocorrendo devido ao endurecimento cíclico do material, obtido pelo tipo de ensaio.

#### 4.8 Ensaios de dureza em corpos-de-prova submetidos ao ensaio de fadiga flexo-rotativa

Na Figura 4.18 apresentam os dados levantados para a dureza em corpos-de-prova submetidos às tensões 160, 197, 236, 256 e 278 MPa para os ambientes: refrigerado, em lâmina d'água e dentro da água pressurizado a 5 atm. A dureza foi medida na região da fratura. No ANEXO D, verifica os valores medidos da dureza.

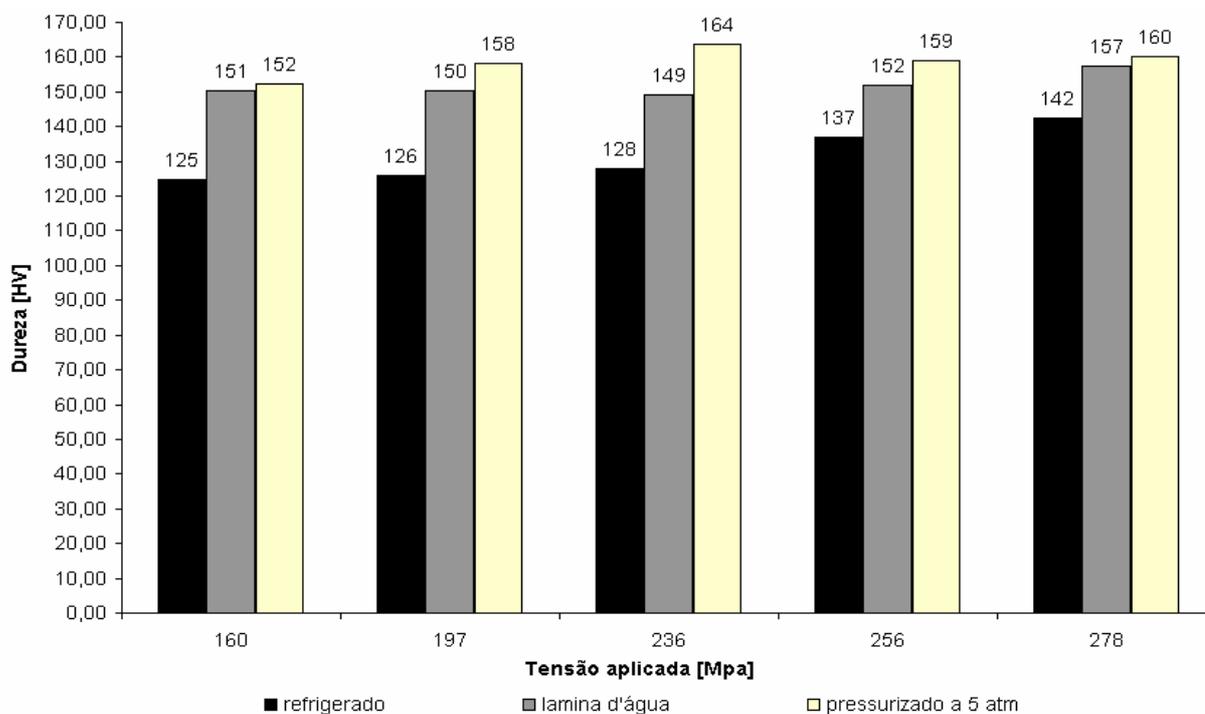


FIGURA 4.18 – Variação da dureza para o aço ASTM A-36 submetido à fadiga flexo-rotativa para os três ambientes, variando a tensão aplicada.

Foi realizada uma comparação do metal virgem, refrigerado, lâmina d'água e pressurizado em água a 5 atm. Essa comparação se fez utilizando as médias das durezas e os resultados são apresentados na Figura 4.19.

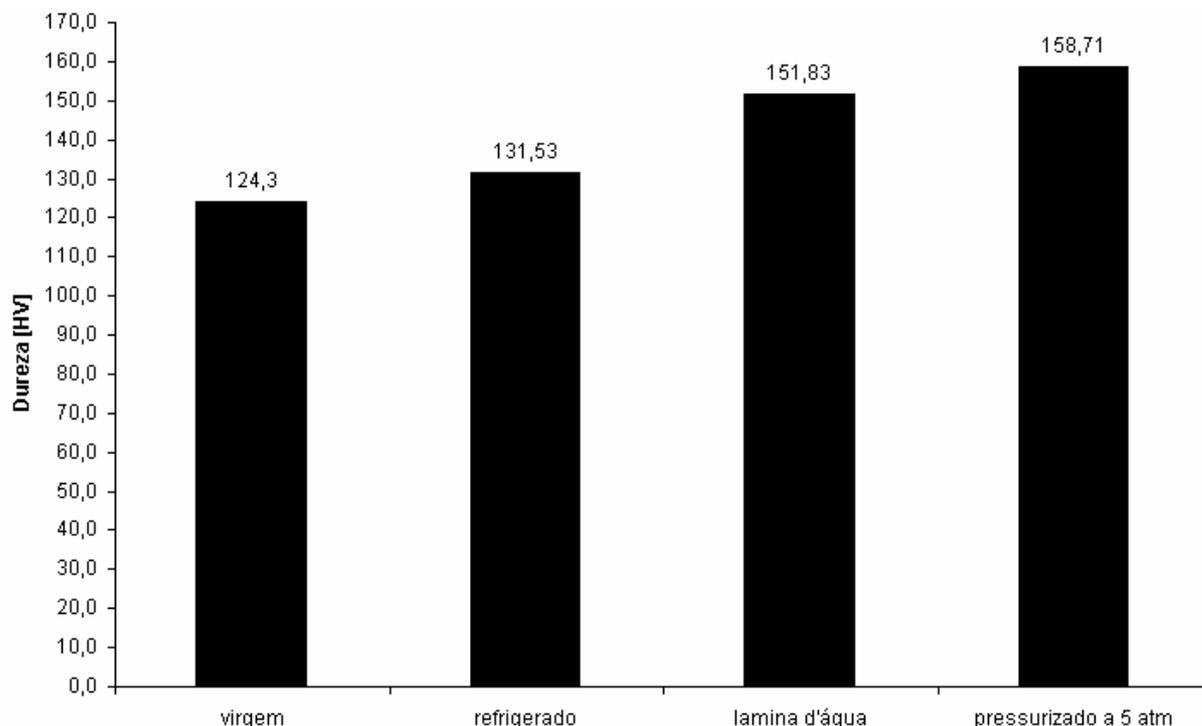


FIGURA 4.19 – Comparação da dureza para o aço ASTM A-36 submetido à fadiga flexo-rotativa para os três ambientes.

Pela Figura 4.18 observa que ocorreu um leve aumento da dureza quando a tensão aumenta. Isso pode ser explicado pelo encruamento que o material sofre devido ao ensaio flexo-rotativo.

Observa uma tendência de aumento de dureza, nos três ambientes, em relação ao material virgem, Figura 4.19. A água que circula a área superficial do corpo-de-prova deixa a temperatura praticamente uniforme durante os ensaios em lâmina d'água e pressurizado a 5 atm.

#### **4.9 Ensaios de microdureza em corpos-de-prova submetidos ao ensaio de fadiga flexo-rotativa**

Na Figura 4.20, apresentam os dados levantados para a microdureza em corpos-de-prova submetidos às tensões 160, 197, 236, 256 e 278 MPa, para os ambientes refrigerados, lâmina d'água e dentro da água aplicado a uma pressão de 5 atm. No ANEXO D, estão os valores medidos da microdureza.

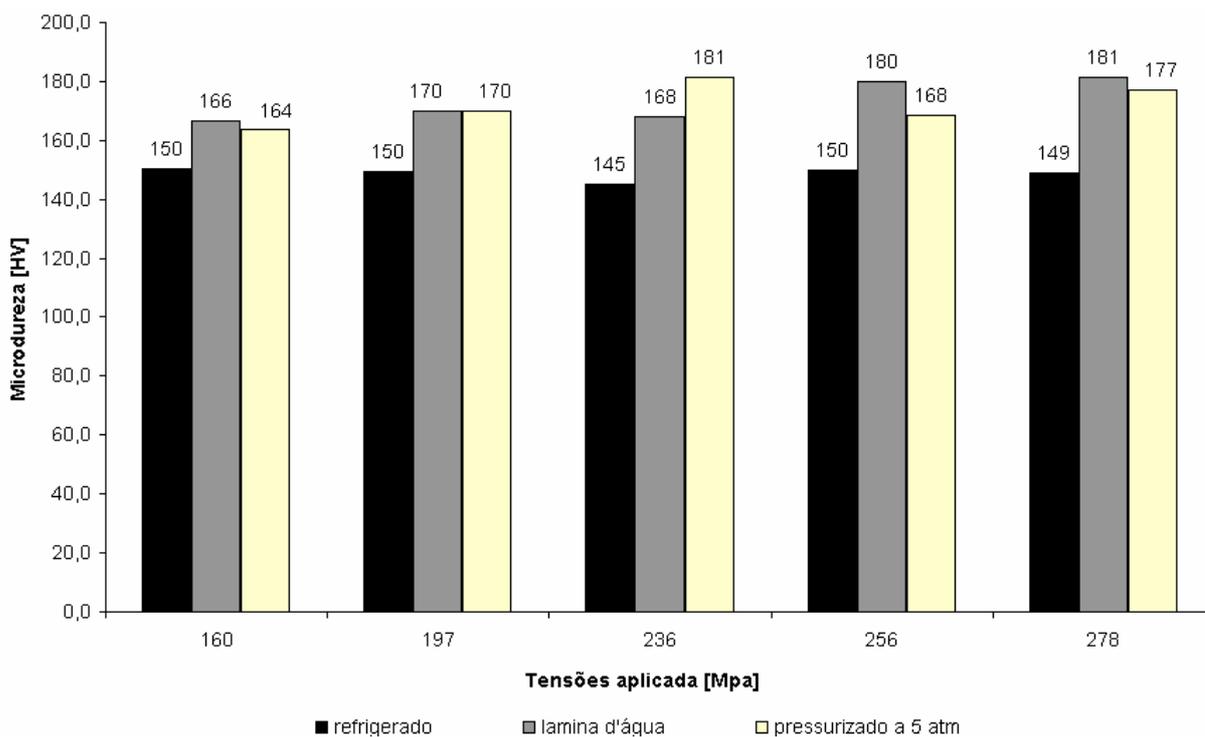


FIGURA 4.20 – Variação da microdureza para o aço SAE A-36 submetido à fadiga flexo-rotativa para os três ambientes, variando a tensão aplicada.

Na Figura 4.20, constat'a a mesma tendência observada na análise de dureza, e um aumento da microdureza quando as tensões são altas.

Na Figura 4.21, realizou uma comparação dos ambientes em relação ao material virgem. Nessa comparação, utilizou as médias das microdurezas obtidas nas tensões aplicadas nos ambientes especificados.

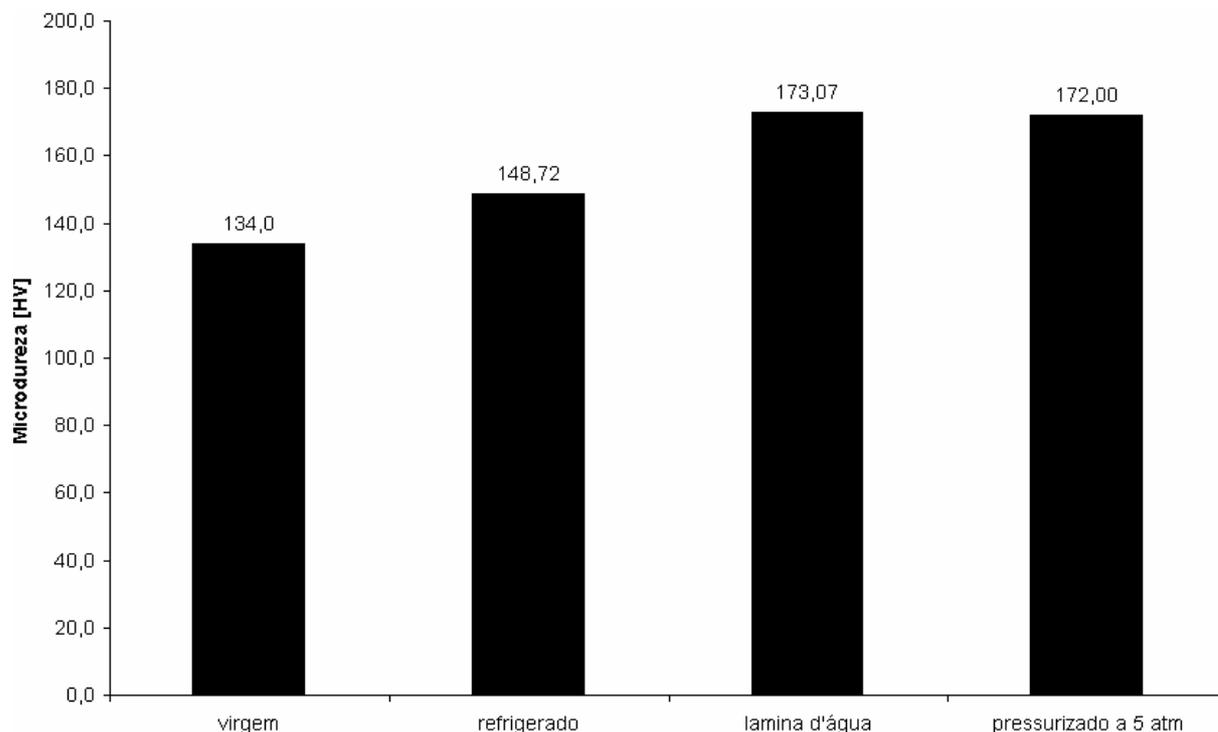


FIGURA 4.21 – Comparação da microdureza para o aço SAE A-36 submetido à fadiga flexorotativa para os três ambientes.

Observou que existe influência dos ambientes, contribuindo para o aumento da microdureza em relação ao material virgem. No caso, a água pode estar contribuindo para esse aumento por manter a temperatura do teste praticamente constante e, também, pelo número de ciclos aplicados até a fratura.

#### 4.10 O estudo das superfícies dos corpos-de-prova fraturados

Foram estudadas as superfícies de fratura de corpos-de-prova testados nos três ambientes. A sua análise está demonstrada no ANEXO A. Observou-se que as fraturas nos ambientes pressurizado eram diferentes em relação aos outros ambientes.

#### **4.11 O estudo das propriedades mecânicas em corpos-de-prova submetidos à fadiga flexo-rotativa**

Nessa parte do trabalho analisou as propriedades mecânicas do aço SAE A- 36, utilizando ensaio de tração, após o ensaio de fadiga flexo-rotativa. As tensões alternadas aplicadas foram de 197 e 236 MPa para os ambientes refrigerados e lâmina d'água.

As propriedades mecânicas levantadas foram: Limite de Escoamento, Limite de Resistência, Limite de Ruptura e Estricção. Os seus resultados são apresentados no ANEXO B. Esse estudo serviu para comparar o dano adquirido pelas tensões aplicadas e os seus respectivos números de ciclos.

#### **4.12 O estudo do dano acumulado provocado por fadiga flexo-rotativa**

Para o estudo do dano acumulado, aplicou determinado número de ciclos correspondentes a 30% do previsto para o corpo-de-prova romper com uma probabilidade de falha de 1%.

Os ensaios realizaram no ambiente refrigerado com cargas crescentes e decrescentes. Os resultados referentes ao dano acumulado são mostrados no ANEXO C. Verificou que o dano acumulado depende do número de ciclos e do tipo de carga aplicada.

#### **4.13 Cálculo do limite de resistência à fadiga utilizando o modelo de regressão**

Com os dados experimentais obtidos no levantamento da curva S-N-P calculou-se o limite de resistência à fadiga utilizando o modelo de regressão. Com esses valores, mais a função de confiabilidade da distribuição Log-normal e o cálculo inverso, encontrou-se o valor de  $x_0$ , mostrado na Equação 2.18.

Com os valores obtidos nos ajustes das curvas S-N-P para os ambientes, item 4.6.2.1, aplica-se ( $\beta_0 = 19,02899$ ,  $\beta_1 = -0,02874$ ,  $\Gamma = 0,43843$ ,  $\phi^{-1} = 0$ ) para ensaios refrigerados e tem-se:

$$x_0 = \frac{1}{-0,02874} [0 \times 0,43843 + \ln(2 \times 10^6) - 19,02899] = 157MPa$$

Para lâmina d'água, item 4.6.2.2, aplica-se ( $\beta_0 = 17,94569$ ,  $\beta_1 = -0,02274$ ,  $\Gamma = 0,420773$ ,  $\phi^{-1} = 0$ ):

$$x_0 = \frac{1}{-0,02274} [0 \times 0,420773 + \ln(2 \times 10^6) - 17,94569] = 151MPa$$

Esse valor é o  $x_0$ , Limite de Resistência à Fadiga, onde se tem  $R(T) = 50\%$ , ou seja, a probabilidade de falha dos corpos-de-prova após 2.000.000 ciclos é de 50%.

Para o ambiente pressurizado com água a 5 atm, item 4.6.2.3, aplica ( $\beta_0 = 13,51672$ ,  $\beta_1 = -0,01042$ ,  $\Gamma = 0,73778$ ,  $\phi^{-1} = 0$ ), mas devido aos valores obtidos da curva S-N, adotou 500.000 ciclos como a probabilidade de falha de 50% para os corpos-de-prova.

$$x_0 = \frac{1}{-0,01042} [0 \times 0,73778 + \ln(500.000) - 13,51672] = 38MPa$$

Em relação aos valores obtidos, Hahin (1994) fez uma pesquisa e relata que o aço SAE A-36 tem um Limite de Resistência à Fadiga ao ar de 23 Ksi (158,58 MPa) utilizando-se ensaio flexo-rotativo. O valor encontrado no trabalho está de acordo com os valores encontrados na literatura.

Ao se basear nos trabalhos de Sterverding (1964) e Hudson (1972) verifica que o limite de resistência à fadiga é influenciado pela pressão atmosférica aplicada. Isso pode estar associado ao que ocorre no ensaio pressurizado a 5 atm com água.

Devido aos resultados obtidos pelo ensaio pressurizado com água a 5 atm, realizaram-se dois testes em outro ambiente, refrigerado, para verificar se estava tendo algum problema com a máquina flexo-rotativa. A tensão escolhida para estes testes foi de 256 MPa. Os números de ciclos obtidos até a fratura foram de 78775 e 102750 ciclos. Esses valores não demonstraram nenhuma inconsistência, pois estão dentro dos valores esperados na curva S-N-P do seu respectivo ambiente, considerando uma probabilidade de falha de 50%.

Para confirmar ainda mais, testes adicionais foram realizados variando a pressão hidrostática. As pressões utilizadas nesses testes foram de 2 e 7 atm, e comparou-se com a curva de 5 atm, como apresentado na Figura 4.22.

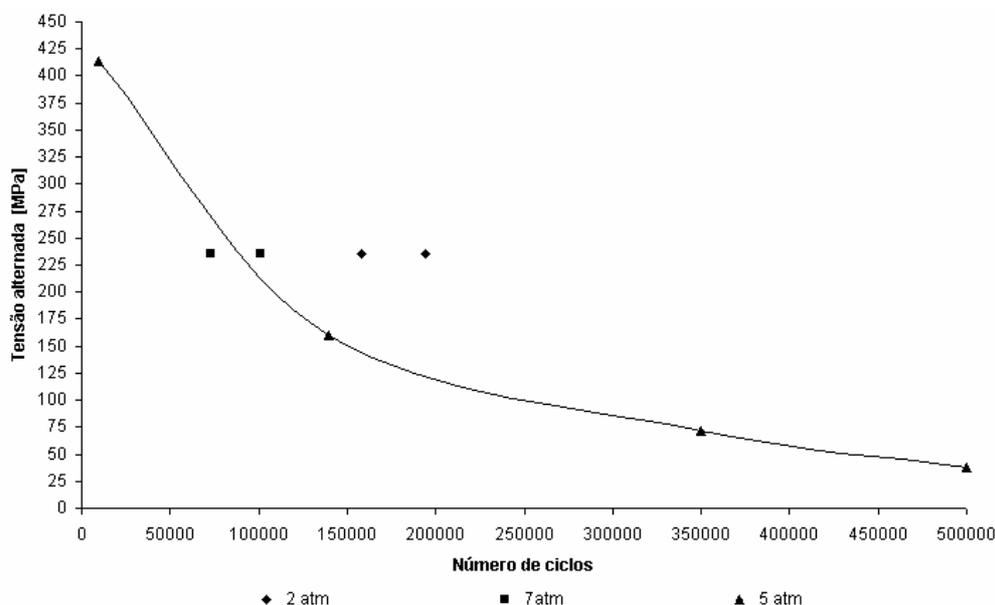


FIGURA 4.22 – Comparações entre as pressões hiperbáricas.

Os resultados desses testes indicaram que variando a pressão hidrostática ocorreu uma diferença no número de ciclos. Ressalta-se que o número de ciclos encontrado para a pressão de 7 atm, está dentro dos valores da curva S-N-P do ensaio de 5 atm.

Na Figura 4.23, foram plotadas as curvas S-N, até atingir os limites de resistência à fadiga para os três ambientes, considerando uma probabilidade de falha de 50%. No caso do ambiente pressurizado com água a 5 atm, adotou-se 500.000 ciclos para a falha do corpo-de-prova, devido aos valores obtidos nas fraturas dos corpos-de-prova.

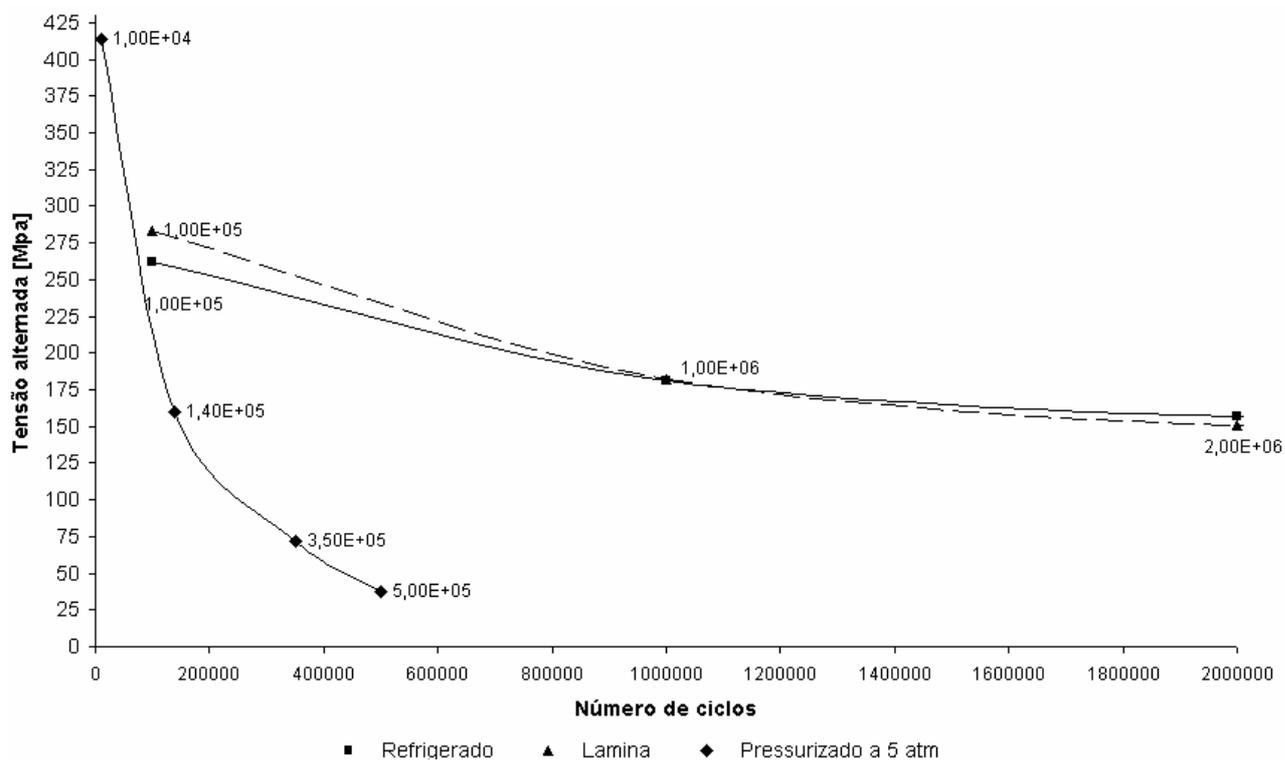


FIGURA 4.23 – Limites de resistência à fadiga para os três ambientes com a probabilidade de falha de 50%.

Pelo gráfico apresentado, nota-se uma brusca mudança, no comportamento da curva para o ambiente pressurizado em água a 5 atm. Devido a estes resultados, gerou-se uma dúvida em relação aos dados obtidos. Foi levantada a questão, se os efeitos da pressão e da água estavam influenciando no funcionamento da máquina de fadiga flexo-rotativa e no corpo-de-prova, fazendo diminuir a resistência à fadiga do material.

#### 4.14 Verificação das cargas aplicadas

Para verificar se os valores obtidos no ensaio pressurizado eram similares aos obtidos nas outras condições, realizaram-se testes com extensômetro elétrico no corpo-de-prova, Figura 4.24.



FIGURA 4.24 – Corpo-de-prova instrumentado com extensômetro elétrico.

O corpo-de-prova foi revestido por massa plástica para não danificar o extensômetro elétrico devido à água e a pressão hidrostática.

Após a montagem na máquina, Figura 4.25, os pesos foram aplicados. Os testes foram realizados no tanque hiperbárico com água pressurizada a 5 atm e o outro sem água e sem pressão. Os resultados foram comparados com o valor teórico, como apresentado na Figura 4.26.



FIGURA 4.25 – Corpo-de-prova com extensômetro e revestido com massa plástica.

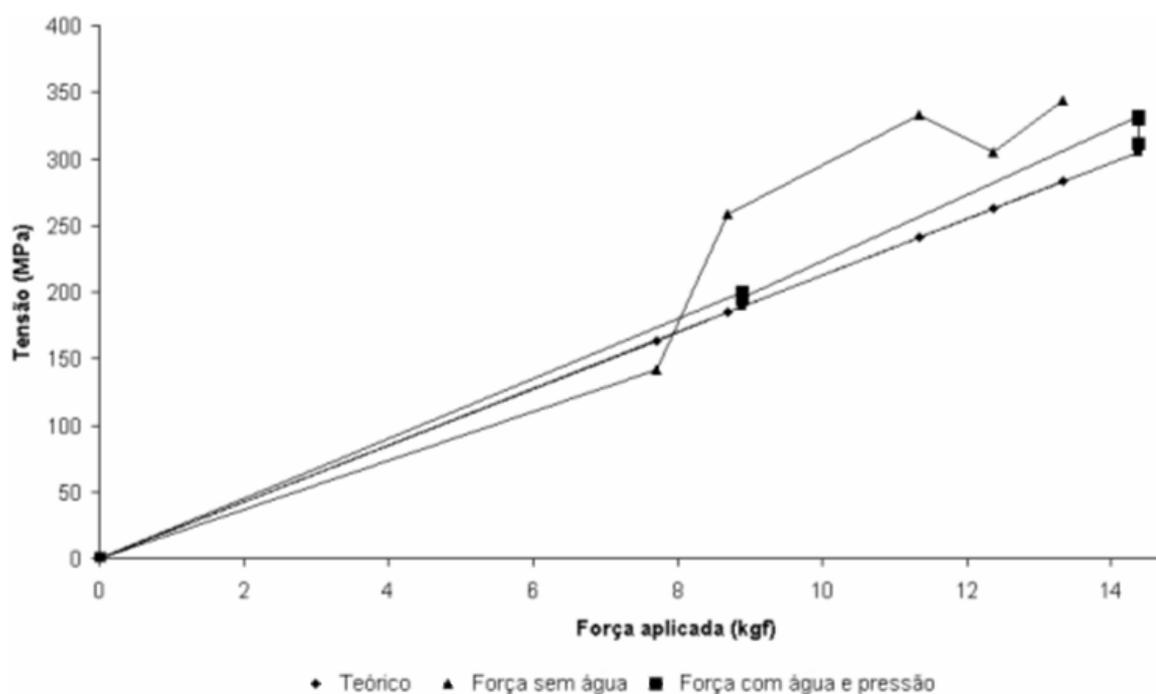


FIGURA 4.26 – Resultados obtidos com o corpo-de-prova instrumentado com extensômetro.

Os testes com extensômetro elétrico identificaram que, na presença da água e da pressão hidrostática, os valores medidos das tensões estão mais próximos do teórico. Neste caso, a máquina teve um desempenho satisfatório nesse ambiente, pois, a água e a pressão contribuíram para comportamento da máquina durante o ensaio. Para o teste sem água, nota que os valores medidos afastam da curva teórica. Isso pode estar associado com a esbelteza da máquina de fadiga flexo-rotativa, para testes com cargas mais elevadas.

Devido a essas diferenças fez-se uma correção nas tensões aplicadas em relação aos valores obtidos nos testes do extensômetro, e o gráfico comparativo das tensões está demonstrado na Figura 27.

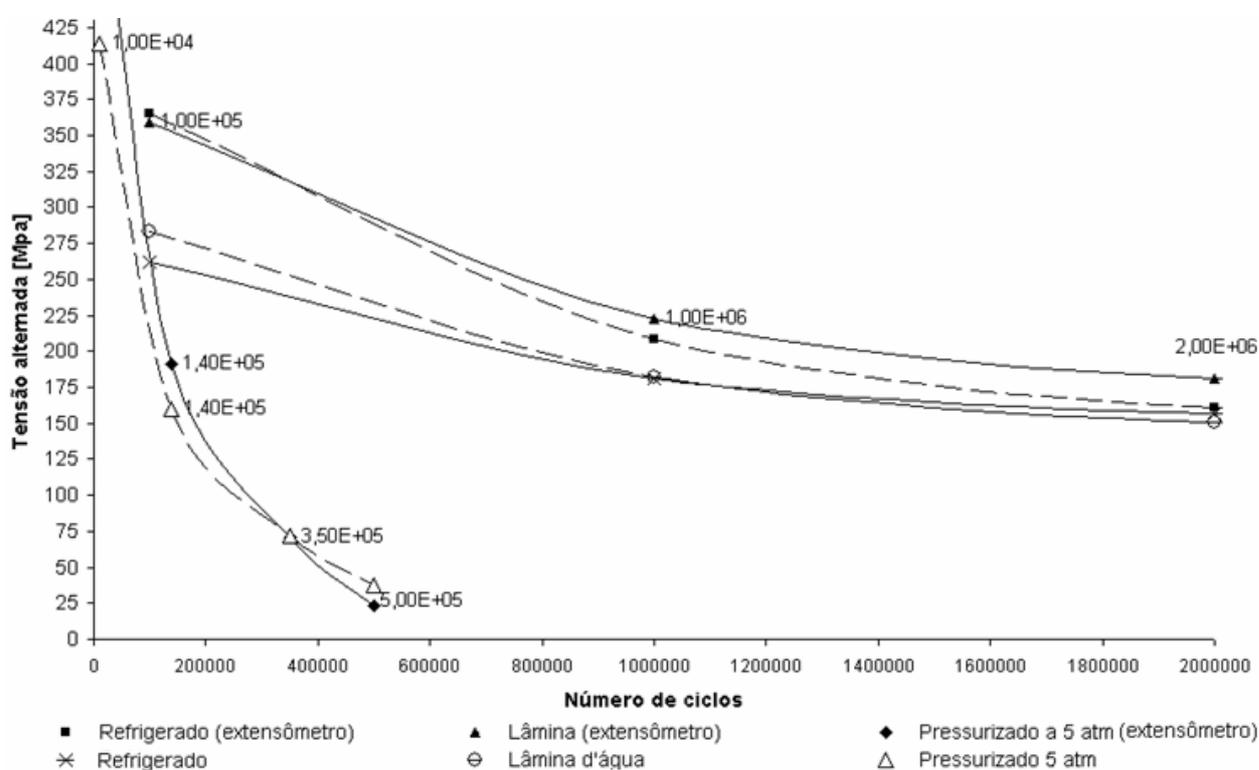


FIGURA 4.27 – Comparação da curva corrigida (extensômetro) em relação à curva levantada, com a probabilidade de falha de 50%.

Para correção dos valores, foram plotados novamente as curvas S-N-P dos ambientes refrigerados e lâmina d'água, conforme apresentado nas Figuras 4.28 a 4.30, respectivamente.

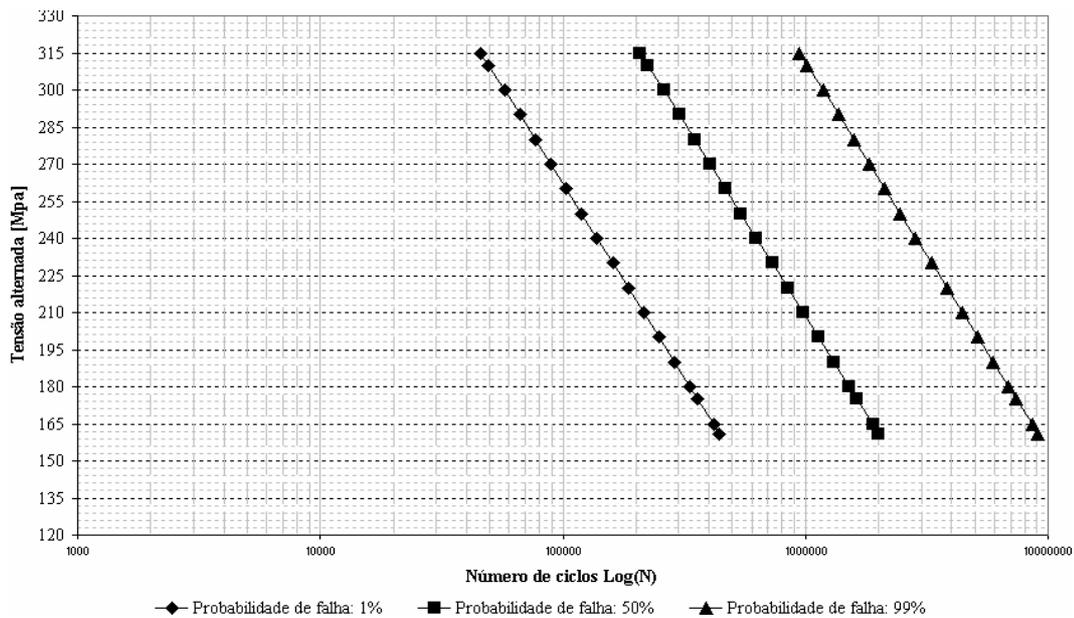


FIGURA 4.28 – Novas curvas S-N-P, para ensaios refrigerados com valores corrigidos.

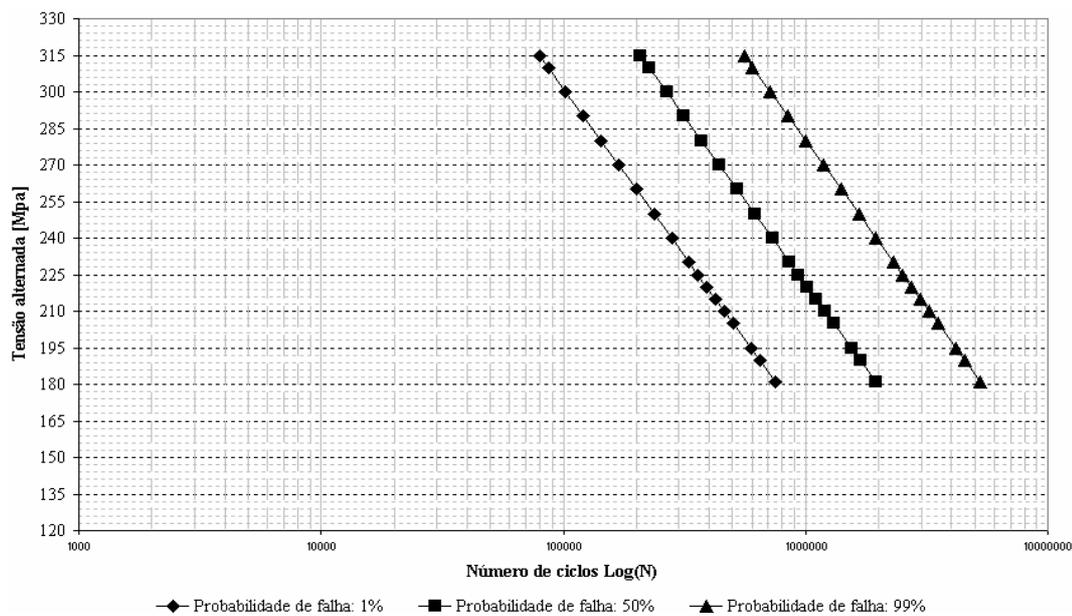


FIGURA 4.29 - Novas curvas S-N-P, para ensaios em lâmina d'água com valores corrigidos.

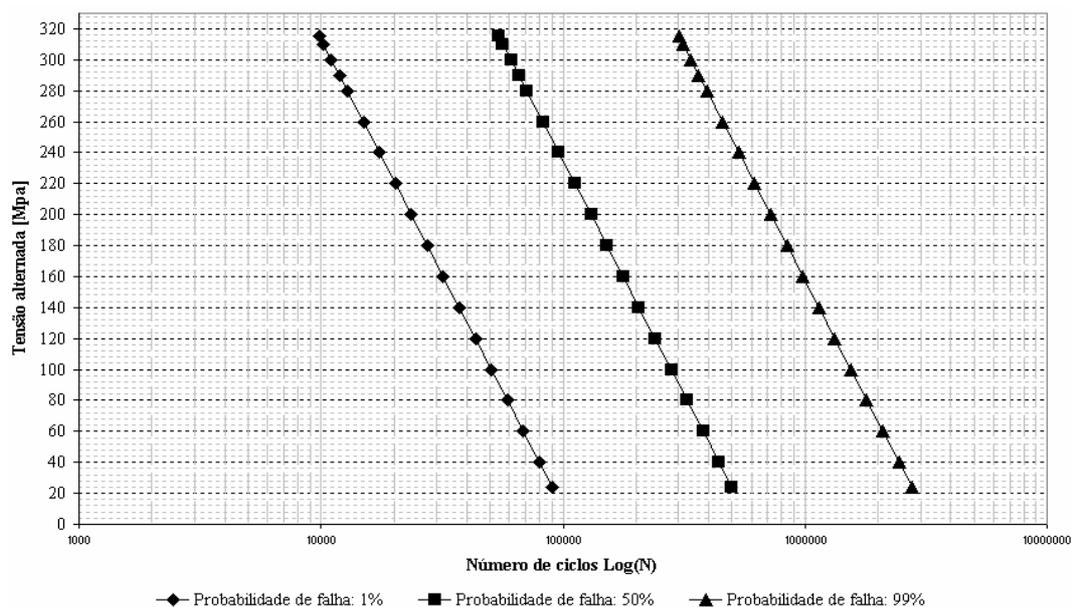


FIGURA 4.30 - Novas curvas S-N-P, para ensaios em lâmina d'água com valores corrigidos.

Nas tabelas 4.6 e 4.8 são descritos os parâmetros para descrever as curvas dos ambientes refrigerado e em lâmina d'água.

TABELA 4.6 - Parâmetros das curvas que representam as equações de fadiga para ensaio refrigerado.

Parâmetros	Ensaio refrigerado		
	1%	50%	99%
<i>A</i>	1045,30	1148,20	1251,10
<i>B</i>	-156,62	-156,62	-156,62
$(R^2)$	1	1	1
Intervalo de Confiança	0,95	0,95	0,95

TABELA 4.7 - Parâmetros das curvas que representam as equações de fadiga para ensaio lâmina d'água.

<i>Parâmetros</i>	<i>Ensaio em lâmina d'água</i>		
	<i>1%</i>	<i>50%</i>	<i>99%</i>
<i>A</i>	1104,60	1046,50	988,39
<i>B</i>	-137,40	-137,40	-137,40
<i>(R<sup>2</sup>)</i>	1	1	1
<i>Intervalo de Confiança</i>	0,95	0,95	0,95

TABELA 4.8 - Parâmetros das curvas que representam as equações de fadiga para ensaio pressurizado a 5 atm.

<i>Parâmetros</i>	<i>Ensaio Pressurizados a 5 atm</i>		
	<i>1%</i>	<i>50%</i>	<i>99%</i>
<i>A</i>	1522,70	1747,3	1972
<i>B</i>	-302,43	-302,43	-302,43
<i>(R<sup>2</sup>)</i>	1	1	1
<i>Intervalo de Confiança</i>	0,95	0,95	0,95

Os dados obtidos pelas tabelas são os valores corrigidos, para os ambientes refrigerados e lâmina d'água. Isso foi necessário, devido aos valores medidos pelo extensômetro elétrico.

Pelos ensaios realizados, constataram-se que algumas hipóteses poderiam estar envolvidas no ambiente pressurizado para as ocorrências das fraturas bruscas.

## 4.15 Hipóteses

Devido aos resultados obtidos no ambiente pressurizado a 5 atm, procurou-se explicações para a ocorrência precoce da fratura.

Uma das observações trata do comportamento da água ao final do teste, pois a mesma aparentava “leitosa” (cor branca) que aos poucos voltava a seu estado natural. Isso deve-se ao ar dissolvido na água pelo aumento da pressão, conforme Figura 4.31.

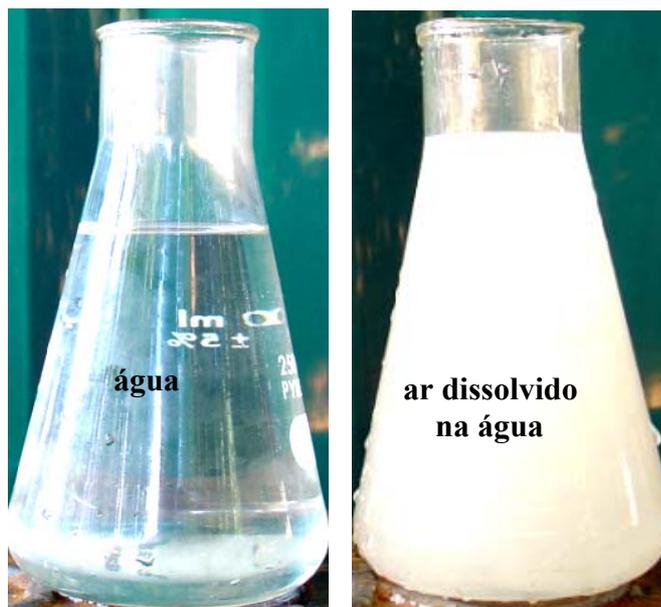


FIGURA 4.31 – comparação da água antes e depois do teste.

Um das hipóteses levantadas é que o ar dissolvido, ou bolhas de ar, na água poderiam contribuir para a diminuição da resistência à fadiga, principalmente o  $O_2$ , agente responsável pela oxidação. Isso foi notado ao final do teste, pois a região da fratura apresentou oxidada e com ruptura precoce.

Uma outra hipótese trata do fenômeno de cavitação, atuante na ocorrência de uma depressão formada pela movimentação e turbulência dos fluídos em uma superfície metálica. Isso acontece, devido ao colapso das bolhas de ar presentes que são explodidas na superfície, pelas ondas de choques do líquido com o metal, pela velocidade imposta ao teste e pela pressão atuante. Salienta-se que a cavitação expõe o material ao desgaste corrosivo. Constata que a pressão tem um papel importante, pois nos ensaios em lâmina d'água não ocorreu às rupturas precoces, mesmo estando dentro da água.

Para essas hipóteses, foi realizada uma análise na estrutura do corpo-de-prova fraturado, pois alguns indícios poderiam ajudar na qualificação do problema. Para isso, utilizou-se o MEV para verificar a superfície do material, conforme Figura 4.32.

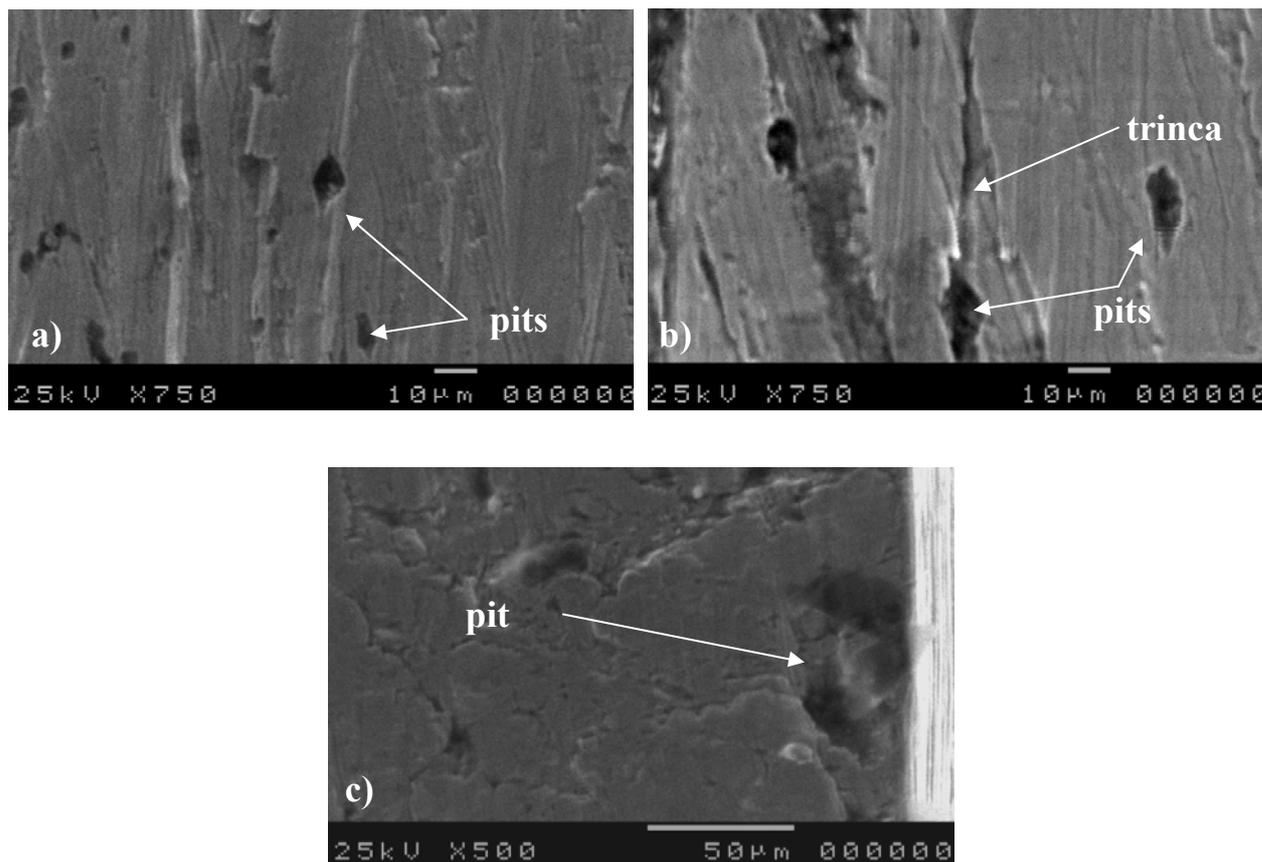


FIGURA 4.32 – a) e b) presença de *pits* na lateral do corpo-de-prova perto da fratura; c) região da fratura, com *pit* seccionado.

As análises mostraram indícios de um processo de corrosão, com a presença de *pits* na lateral do corpo-de-prova que poderiam ser causados pelo próprio ambiente, ou pela presença do oxigênio dissolvido na água ou pelo processo de cavitação acelerando o processo de fratura. Na Figura 4.32-b, nota-se uma trinca originária de um *pit*. Na Figura 4.32-c, verifica um *pit* seccionado pela fratura. Os *pits* são concentradores de tensões e podem contribuir para a diminuição da resistência à fadiga.

Pelas análises, constata que não há apenas um agente neste processo envolvendo a fratura brusca e severa no ambiente pressurizado a 5 atm. E não se pode afirmar qual é o principal mecanismo causador desse problema.

## 4.16 Hipóteses de um modelo

Pelos resultados encontrados, elaborou-se hipóteses de um modelo para tentar visualizar os fenômenos que acontecem no ambiente pressurizado a 5 atm em água, conforme apresentado na Figura 4.33.

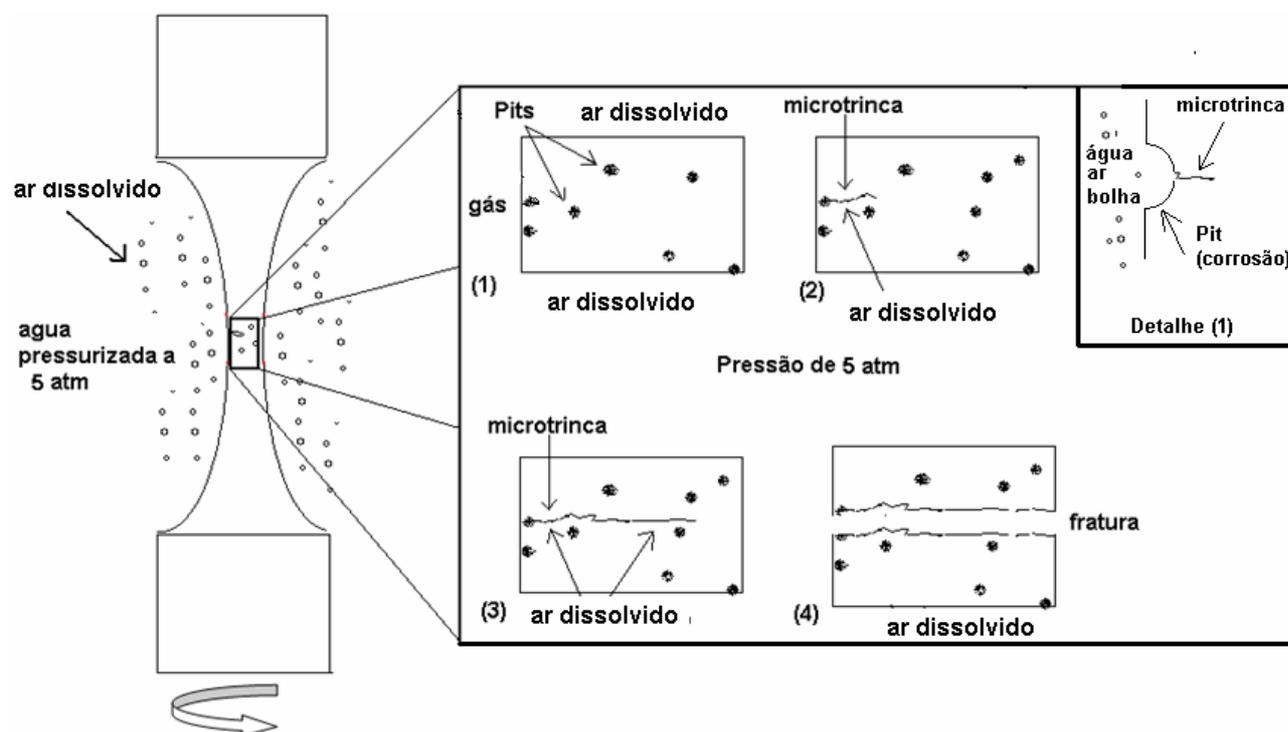


FIGURA 4.33 – Hipótese de um modelo para o ambiente pressurizado a 5 atm.

No modelo têm-se:

1. Formação de *pits*, devido à corrosão acelerada pelos gases dissolvidos (oxigênio), ao ensaio de fadiga flexo-rotativa, e / ou auxiliado pelo processo de cavitação. Início da microtrinca.
2. Propagação da microtrinca.
3. Propagação da trinca, acelerada pelo ambiente, pelo ensaio, pela cavitação e pela oxidação.
4. Ocorrência da fratura precoce e formação de regiões oxidadas.

## 4.17 Aplicação

Esse trabalho pode ser aplicado:

- Nas estruturas que estejam em superfícies expostas à água do rio, lagoa ou o mar, como plataformas ou usinas hidrelétricas.
- Nessas estruturas, próximas da superfície, estarão mais propícias à ocorrência de solicitações de esforços mais intensos e maior quantidade de ar dissolvido, devido aos movimentos das correntes e ventos. Portanto no fundo do mar, rios ou lagoas estas ocorrências serão menores.
- Portanto, devido aos resultados observados, devem-se estudar os fenômenos naturais e as solicitações impostas para o comportamento da fadiga dos materiais no ambiente aquático.

## 5. CONCLUSÃO

Verificou que a máquina de fadiga projetada e construída, para ensaio na posição vertical, funciona em ambiente com ou sem a presença de água, conforme testes realizados nos aços ASTM 1020 e ASTM 1045.

Existe uma dispersão considerável nos dados de fadiga, isto é, uma variação do valor do número de ciclos medidos para vários corpos-de-prova ensaiados sob a mesma tensão. O espalhamento nos resultados é consequência da sensibilidade do ensaio de fadiga a uma variedade de parâmetros e de materiais que são difíceis de serem controlados de uma maneira precisa.

Os resultados obtidos, em fadiga, para o levantamento das curvas S-N-P em ensaios refrigerados, em lâmina d'água e pressurizado com água a 5 atm, seguem estatisticamente a mesma distribuição Log-normal.

Foi observada nas curvas S-N-P, uma pequena diferença nos limites de resistência à fadiga para ensaios refrigerados e lâmina d'água. Isso pode ser explicado pelo fato de toda a área do corpo-de-prova está imersa em água e a temperatura ser praticamente constante retardando a abertura da trinca.

Para os ensaios pressurizados com água a 5 atm, devido ao número de ciclos baixos obtidos, considerou uma probabilidade de falha de 500.000 ciclos.

Os testes com extensômetro, no ambiente pressurizado a 5 atm dentro da água, constataram que os valores das tensões estão mais próximos do teórico, contribuindo para o comportamento da máquina durante o ensaio. No teste sem água, os valores medidos se afastam da curva teórica. Isso pode estar associado com a esbelteza da máquina de fadiga flexo-rotativa, para testes com cargas mais elevadas. Devido a essas diferenças fez-se uma correção nas tensões aplicadas em relação aos valores obtidos nos testes do extensômetro, conforme Figura 4.26.

No trabalho foram levantadas duas hipóteses para explicar essas diferenças obtidas nos ensaios pressurizados a 5 atm:

- Uma delas associada ao ar dissolvido, ou bolhas de ar, na água que poderiam contribuir para a diminuição da resistência à fadiga. Isso foi notado ao final do teste, pois a região da fratura apresentou oxidada, com *pits* reduzindo o número de ciclos para a nucleação da trinca. Verifica-se também que o efeito da tensão tem um efeito na vida à fadiga do material;
- A outra, trata do fenômeno de cavitação que ocorre pela movimentação e turbulência dos fluidos em uma superfície metálica. Isso acontece devido ao colapso das bolhas de ar na superfície do metal, pressão e velocidade do teste. Salienta-se que a cavitação expõe o material ao desgaste corrosivo e auxilia na formação de *pits*.

Constata que a pressão tem um papel importante, pois nos ensaios em lâmina d'água não ocorreu às rupturas precoces, mesmo estando dentro da água, ao contrario do ensaio em água pressurizado a 5 atm.

Observou-se um aumento de dureza e microdureza nos três ambientes em relação ao material virgem. Isso pode estar associado ao tipo de ensaio, ao número de ciclos e o sistema de refrigeração do corpo-de-prova.

Para os resultados obtidos no ensaio de flexo-rotativa seguida pelo ensaio de tração, verificou que o dano provocado influencia no limite de escoamento, de ruptura, de resistência e na estrição em comparação com um material virgem.

Para a ruptura, nota-se uma variação no seu limite, principalmente em ambiente refrigerado. No caso do teste em lâmina, observa que ocorreram variações, mas os pontos ficaram abaixo do valor de referência.

Com relação aos valores apresentados sobre estrição, observa que estão abaixo da referência (virgem), exceto para o último ciclo do refrigerado para ambos os ambientes que tiveram uma pequena variação.

Nota-se que a fratura obtida nos testes foi diferente. No MEV não foi possível identificar os tipos de fraturas obtidas nos ensaios, devido à presença da oxidação.

Em relação ao acúmulo de dano, os resultados mais satisfatórios para a previsão de vida do material são obtidos para os valores referentes a 50% de probabilidade de falha da curva *S-N-P*. Para a

probabilidade de falha de 99%, todas as teorias Mansur, Palmgren-Miner, Corten-Dolan, Marin e a proposta do Dano Progressivo fornecem valores inferiores a 1 indicando que não ocorreu a fratura, o que não corresponde à realidade.

Finalmente, o estudo proposto do Dano Progressivo demonstrou adequada a sua aplicação para cálculos de danos, pois são considerados todo o carregamento e o dano produzido.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O trabalho desenvolvido sugere os seguintes temas para estudos futuros:

- Verificar as hipóteses levantadas.
- Verificar a metodologia estudada, para outros tipos de materiais.
- Estudar a previsão da fadiga considerando a mecânica da fratura.
- Desenvolver um dispositivo axial de aplicação de força para verificar o crescimento de trinca, dentro da água pressurizada.
- Utilizar uma frequência mais baixa e comparar com os resultados obtidos no teste pressurizado a 5 atm em água.
- Estudar a resistência à de fadiga do aço SAE A-36 utilizando uma pressão hidrostática menor e maior que 5 atm.
- Verificar se existe um ponto de inflexão no ambiente pressurizado a 5 atm que modifica a curva com aplicações diferentes de cargas.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, L. A. D.; ESTEFEN, S. F. **Influence of Residual Strains and Initial Geometrical Imperfections on the Collapse Pressure of Submarine Pipelines**. 16th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Yokohama, pp. 90-95, 1997.

ASTM A 36/A 36M – 00a. **Standard Specification for Carbon Structural Steel**, 2000.

ASTM E-606. **Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing**, 1998.

ASTM, E 466-96. **Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Test of Metallic Materials**, 1996.

ASTM, E 1823-96. **Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture testing**, 1996.

ASTM, E-8M. **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**, 2000.

ASTM, E 92-82. **Standard Test Methods for Vickers hardness of Metallic Materials**, 1997

ÁVILA, G. G. **Cálculo de Fadiga de Risers Rígidos através da Mecânica da Fratura**, Dissertação de Mestrado, UFRJ, pp. 237, 2005.

BANNANTINE, J. A.; COMER, J.; HANDROCK, J. **Fundamentals of Fatigue Analysis**, pp. 273, 1990.

BALZER, M.; SEHITOGLU, H. **A New Apparatus for Studying Mechanical Behavior Under Pressure**, University Illinois, SACE Social Science Collections, 1997.

BRAZ, M. H. P. **Propriedades de fadiga de soldas de alta Resistência e Baixa Liga com Diferentes Composições Microestruturais**, Dissertação de Mestrado, USP São Carlos, pp. 118, 1999.

CETLIN, P. R., SILVA, P. S. P. **Análise de Fraturas**, Associação Brasileira de Metais, ABM, 1990.

- CICILIA, F. B. **Cr terio de Projeto Baseado em Confiabilidade para o Sistema de Tendões de uma TLP**, Disserta o de Mestrado, UFRJ, pp.198, 2004.
- CORREIA, V. F. **Org os de Maquina –M27, Texto de Apoio**, Escola Náutica Infante D. Henrique, pp73, 2000/2001.
- DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**, Third Ed., pg. 348-431, 1986.
- EBARA, R.; YAMADA, T.; KAWAN, H. **Corrosion Fatigue Process of 12 Cr Stainless Steel**, ISIJ International, Vol. 30, No. 7, pp. 535-539, 1990.
- DOMINGUES, J. S. **Org os de Máquina – Fadiga – ISEP** (Instituto Superior de Engenharia do Porto), Portugal, pp. 1-25, 2003.
- FARRAR, C. R.; Duffey, T.; Cornwell, P. J.; Bement, M. T. **A Review Of Methods For Developing Accelerated Testing Criteria**, IMAC-99, Los Alamos National, 1999.
- FATEMI, A., YANG, L. **Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials**, Int. J Fatigue Vol. 20. No. I, pp. Y-34, 1998.
- FILHO, F. M. F. **Propaga o de Trincas de Fadiga em Juntas Soldadas Circunferenciais de Aço API 5L Grau X-65 para Utiliza o em Risers Rígidos**, Tese de Doutorado, UFRJ, pp.173, 2002.
- FILHO, N. N. A. **Estudo do Meio Corrosivo na Resistência   Fadiga do Aço Estrutural SAE 8620**, Disserta o de Mestrado, CDTN, pp. 130, 2006.
- FURTADO, E. P. **Avalia o de Fadiga Através da Análise Termo-Elástica Bidimensional Usando o Método dos Elementos de Contorno**, Disserta o de Mestrado, UFRJ, pp. 99, 2002.
- FREITAS, M. A.; COLOSIMO, E. A. **Confiabilidade: Análise de Tempo de Falha e Testes de Vida Acelerados**. Volume 12, pp. 309, 1997.
- GONÇALVES, R. **Análise de Propaga o de Fissuras Por Fadiga em Concreto Pelo MEF Mediante a Mec nica do Dano Contínuo**, Disserta o de Mestrado, UFSCar, pp.116, 2003.

- HAHIN, C. **Effects of Corrosion and Fatigue on the Load Carrying Capacity of Structural and Reinforcing Steel**, Physical Research Report No. 108, Illinois Department of Transportation, pp.114, 1994.
- HIROSHIO, Y, J. K.; SOYA, I.; OKAMOTO, K. **Fatigue Crack Growth in a High Tensile and Several Other Environments Strength Steel in Seawater**, ISIJ International, pp 451-459, 1994.
- HUDSON, C. M. **Investigation of the Vacuum Environment on the Fatigue and Fracture Behavior of 7075-T6**, J. Vac. Sci. Technol., Vol 9, n° 6, 1972.
- INMETRO, **Ferramentas Básicas Para a Garantia da Qualidade**, pp.27, 2003.
- INMETRO (LAFOR- **Laboratório de Força e Dureza**). Material obtido via internet. <http://www.inmetro.gov.br/laboratórios/servicos>, de 15/10/2006.
- JÚNIOR, A. A. **Avaliação Experimental dos Efeitos da Fadiga Térmica nas Propriedades Mecânicas de um Aço Inoxidável Austenítico**, Tese de Doutorado, UFMF, pp.129, 2006.
- KIEPPER, B. O. **Análise Estrutural Estática, Via Elementos Finitos, do Segmento Tubo Flexível-Enrijecedor**, Dissertação de Mestrado, UFRJ, pp 103, 2004.
- LEMOS, C. A. D. **Análise de fadiga em risers Flexíveis**, Tese de Doutorado, UFRJ, pp 265, 2005.
- LENNON, A. B.; PRENDERGAST, P.J. **Modelling Damage Growth And Failure in Elastic Materials with Random Defect Distributions**, Mathematical Proceedings of the Royal Irish Academy, 104A (2), 155-171, 2004.
- LOREN, S.; LUNDSTROM, M. **Modelling Curved S-N Curves**, Fatigue Fract Mater Struct 28, pp. 437-443, 2005.
- MADDOX, S. J.; RAZMJOO, G. R. **Fatigue Performance of Large Girth Welded Steel Tubes**, 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE, 1998.

- MAGNABOSCO, R. **Técnicas de Ensaio para Previsão da Vida em Fadiga de Liga de Alumínio AA7175**, LabMat - FEI - Faculdade de Engenharia Industrial, 2000.
- MALUF, O. **Influência do Roletamento no Comportamento em Fadiga de um Ferro Fundido Nodular Perlítico**, Dissertação de Mestrado, USP São Carlos, pp 154, 2002.
- MANSUR, T. R. **Avaliação e Desenvolvimento de Modelos de Determinação de acúmulo de Danos por Fadiga em um Aço Estrutural**, Tese de Doutorado, UFMG, pp 185, 2003.
- MARTÍNEZ, E. M. **Statistical design and orthogonal polynomial model to estimate the tensile fatigue strength of wooden finger joints**, International Journal of fatigue, pp.237-243, june 2002.
- MEGGIOLARO, M. A., CASTRO, J. T. P. **Fatigue life prediction of oil ducts under service loads**. Rio Pipeline, Conference & Exposition, IBP388\_03, 2003.
- METALS HANDBOOK. **Failure Analysis and Prevention**, Vol. 10. American Society for Metals- 8ª ed. – Metals Park, Ohio, 1975.
- MIRANDA, A. C. O. **Propagação de Trincas por Fadiga em Geometrias 2D Complexas sob Cargas Cíclicas Variáveis**, Tese de Doutorado, PUC-Rio, pp.125, 2003.
- MISCOW, G. F; MIRANDA, P. E. V. **Análise do Comportamento em Tração Uniaxial e Fadiga de Liga de Alumínio D16T**, Jornadas SAM/ CONAMET/ SIMPOSIO MATERIA 2003.
- MITCHELL, M. R. **Fatigue analysis for design**. I Seminário Internacional de fadiga, SAE Brasil São Bernardo do Campo – SP p. 1-29, 31 de outubro de 2001.
- MOIA, D. G. **Previsão da Vida em Fadiga de Materiais Metálicos Parte I: Estudo Preliminar da vida em fadiga do aço ABNT1016 recozido**, FEI, pp.1-41, 2001.
- NBR 6405/1988. **Rugosidade das superfícies**, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- PADILHA, R. Q. **Influência na Vida em Fadiga da espessura das Camadas de Níquel e Cromo Duro em Aço ABNT 4340**. Tese de Doutorado, pp.176, 2004.

- PESSOA, E. C. P. **Estudo Comparativo do Desempenho de Eletrodos Revestidos comerciais E6013, E7018 E E7024 em Soldagem Subaquática molhada**, Dissertação de Mestrado, 2003.
- PICCININI, F. C. **Um Estudo do Carregamento Hidrodinâmico sobre estruturas Oceânicas Esbeltas**, Dissertação de Mestrado, FURG, pp. 107, 2003.
- PINHO, A. L. S. **Redução de Tensões em Risers Rígidos de Plataformas TLP**, COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, XI, pp.102, 2001.
- PONCE, A. S. **Previsão da vida em fadiga da liga AA7175-T1 Parte I: Curvas tensão-deformação cíclicas**, FEI, pp. 1-51, 2003.
- PROENÇA, P. B. **Introdução a Mecânica do Dano e Fraturamento: Elementos de Mecânica do Dano em Meios Contínuos**, São Carlos, pp.1-19, 2000.
- ROCHA, P. C. F. **Estudo dos Efeitos no Comportamento em Fadiga das Camadas de Níquel Eletrolítico, Processo Sulfamato, em Aços de Alta Resistência**, Dissertação de Mestrado, USP-Guaratinguetá, pp.103, 2005.
- SIBAJA, A. R., RAMÍREZ, T. M. **Estimación de Danõ por Fatiga Mediante Mecánica Del dano continuo**, Ingenierías, Vol. VI, N<sup>o</sup> 21, Out-Dezembre - 2003.
- SUNDER, R. **Fatigue as a Process of Ciclic Brittle Microfracture**, Fatigue Fract Engng Mater Struct 28, pp. 289-300, 2005.
- SILVEIRA, N. P. P. **Simulação de Propagação de Trincas com o Uso do Método dos Elementos de Contorno**, Tese de Doutorado, UFRJ, pp 87, 2003.
- SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**, pp. 172-200, 1995.
- SUNDER, R. **Fatigue as a Process of Ciclic Brittle Microfracture**, Fatigue Fract Engng Mater Struct 28, pp. 289-300, 2005.
- STEVERDING, B. **Vaccum Fatigue Tester**, The Review os Scientific Instruments, volume 35, number 5, 1964.

SURESH, S. **Fatigue of Materials**, 2 ed, Cambridge, Cambridge University Press, 1998.

TAIER, R. **Análise de Fadiga em Juntas Tubulares de Plataforma Offshore Fixa Através de Modelos em Elementos Finitos**. Dissertação de Mestrado, UFOP, pp. 159, 2002.

TOYODA, T.; KANAZAWA, T.; MATSUMOTO, K. **A Study of inclusion Causing Fatigue Cracks in Steels for Carburized and Shot-Peened Gears**, Japan, JSAE Review Vol. 11, No. 1, 1990.

YAKOVLEVA, T. Y.; MATOKHNYUK, L. E. **Prediction of Fatigue Characteristics of Metals at Different Loading Frequences, Strength of Materials**, Vol. 36, No. 4, 2004.

YANG, Q. J. **Fatigue test and reliability design of gears**, Int. J. Fatigue Vol. 18, No. 3, pp. 171-177, 1996.

WITHERS, P. J; BHADESHIA, H. K. D. H. **Residual stress Part 2 – Nature and origins**, Materials Science and Technology, Vol. 17, April 2001.

## 8. ANEXO A

### 8.1 Superfície de fratura dos corpos-de-prova

As Figuras 8.1 a 8.5, apresentam as superfícies de fratura nos três ambientes.

Na Figura 8.1, a tensão aplicada foi de 278 MPa. Ressaltam-se as marcas de propagação (A) obtidas durante o processo de fadiga até a fratura final (B).

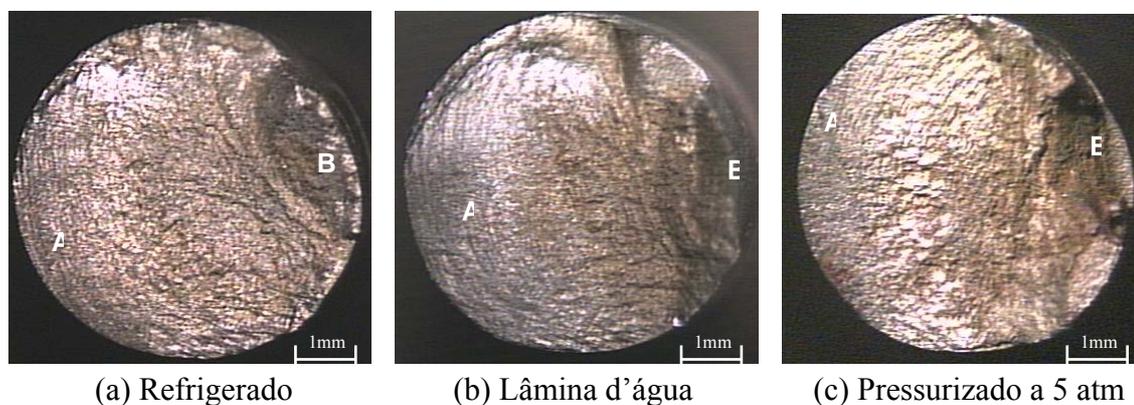


FIGURA 8.1 – Superfície de fratura utilizando uma tensão de 278 MPa.

Na Figura 8.2, com a tensão alternada de 256 MPa. Observa que, no ambiente pressurizado a 5 atm, a fratura final resultante foi mais brusca em relação aos outros dois casos. Isso pode ser um indicativo da ação da pressão hidrostática ou ar dissolvido na água.

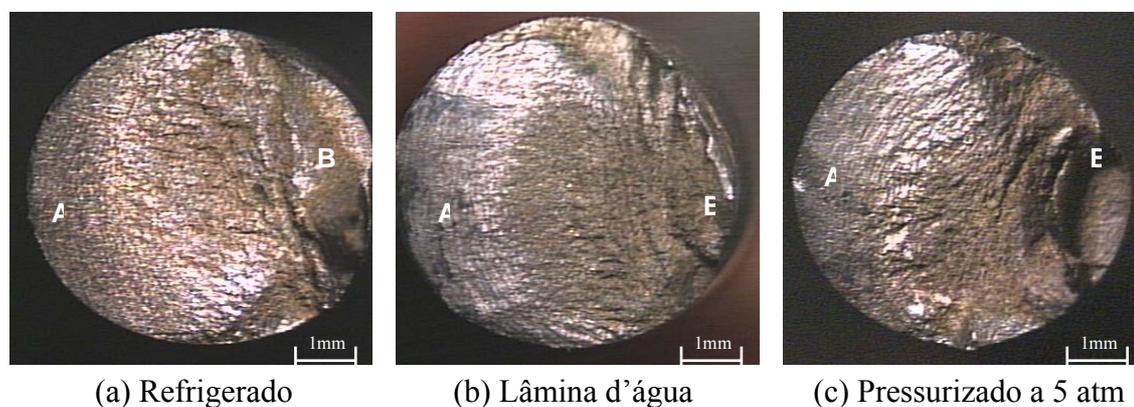


FIGURA 8.2 – Superfície de fratura utilizando uma tensão de 256 MPa.

Na Figura 8.3, a tensão aplicada foi de 236 MPa. Verifica que, nos três ambientes, as marcas de propagação (A) obtidas e a fratura final (B) estão bem caracterizadas.

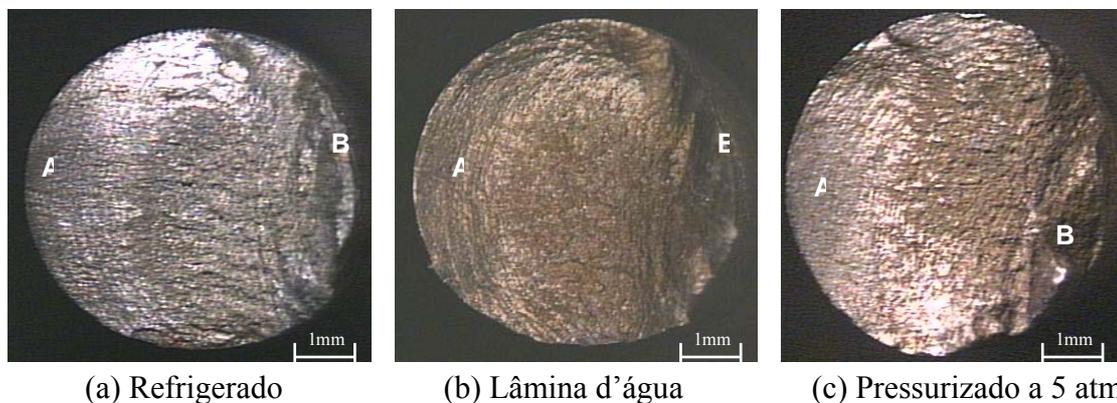


FIGURA 8.3 – Superfície de fratura utilizando uma tensão de 236 MPa.

Na Figura 8.4, a tensão aplicada foi de 197 MPa e verifica as regiões (A) e (B) nas fraturas.

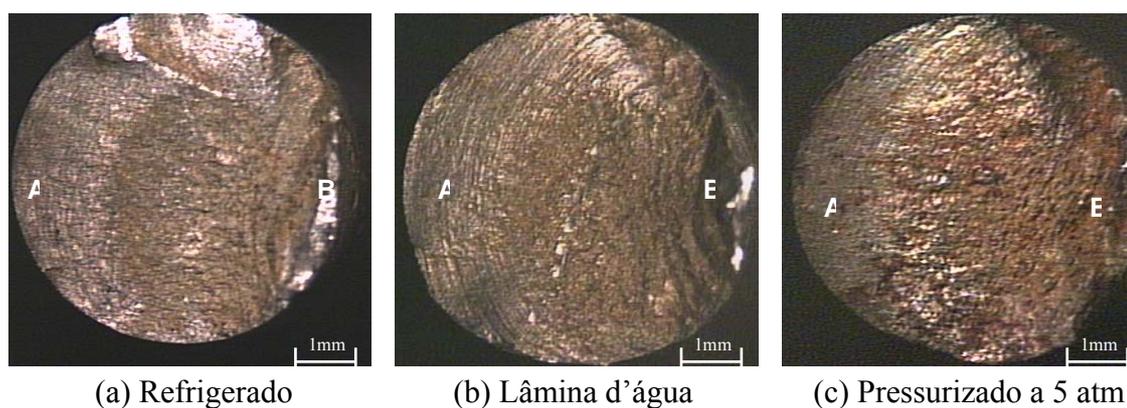


FIGURA 8.4 – Superfície de fratura utilizando uma tensão de 197 MPa.

Na Figura 8.5, a tensão aplicada foi de 160 MPa. Um dos detalhes observados foram as fraturas obtidas, principalmente no ambiente pressurizado a 5 atm, pois apresentaram aspectos diferentes em relação aos outros ambientes.

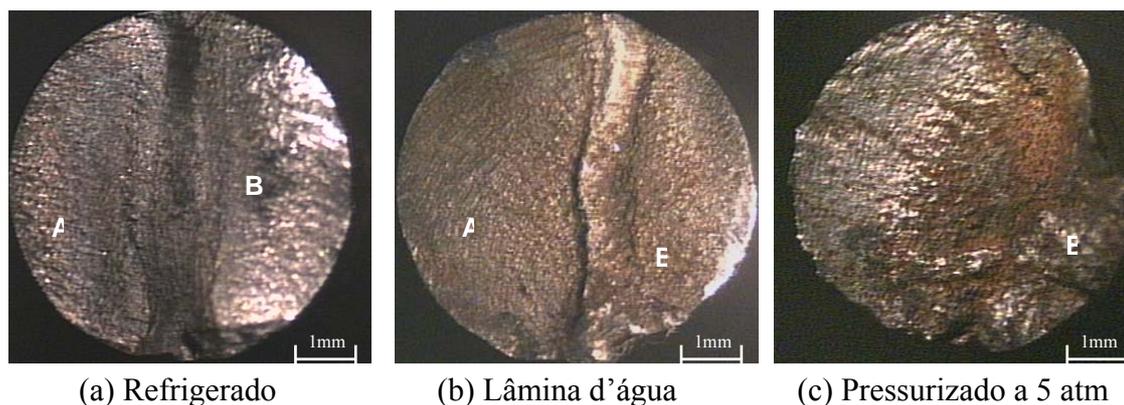


FIGURA 8.5 – Superfície de fratura utilizando uma tensão de 160 MPa.

Pelas figuras apresentadas, é possível observar que as marcas de propagação até a fratura final são mais visíveis no ambiente de lâmina d'água, principalmente nas tensões de 278, 256, 236, 197 MPa. Constata a presença de oxidação na região fraturada nos três ambientes testados.

Ao utilizar uma tensão mais baixa, 160 MPa, pressurizado a 5 atm, as superfícies de fraturas foram diferentes e os números de ciclos obtidos são inferiores em comparação aos outros ambientes. Nesse caso, há indicação que a pressão hidrostática, o ar dissolvido e a água aceleram a ocorrência da fratura.

Na Figura 8.6, realizada em ambiente pressurizado a 5 atm, observa a superfície de fratura diferente dos outros casos. Um outro detalhe são as linhas que nascentes na superfície em direção ao centro.

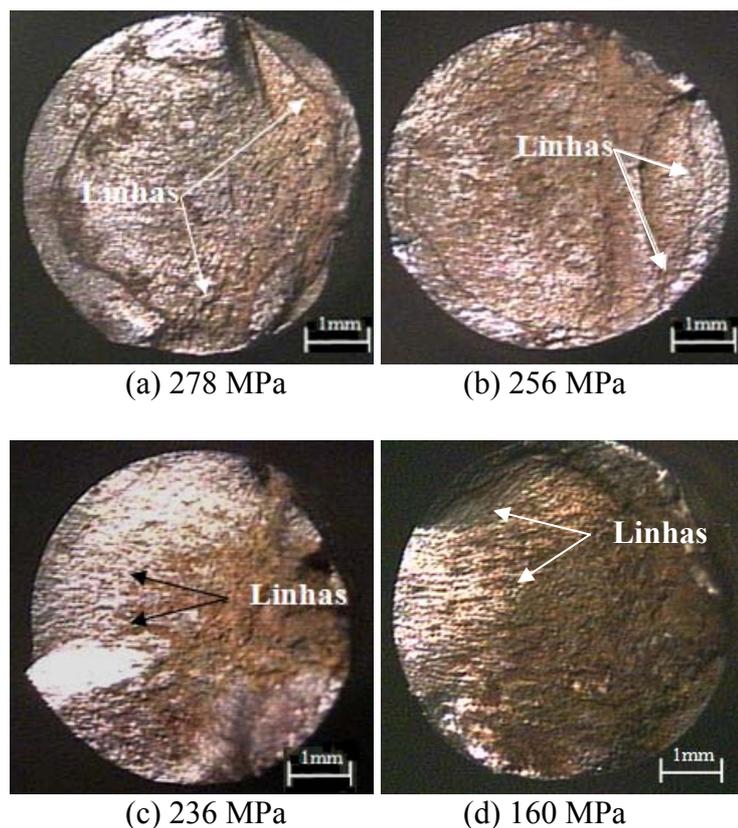


FIGURA 8.6 – Linhas que nascem na superfície em direção ao centro no ambiente pressurizado.

### 8.1.1 Análise fratógráficas de corpos-de-prova fraturados

Nessa etapa do trabalho, analisou as amostras envolvendo os ambientes: refrigerado, lâmina d'água e pressurizado a 5 atm. As tensões utilizadas foram 278, 256, 236, 197 e 160 MPa.

Nas Figuras 8.7, são apresentadas amostras de MEV em ambiente refrigerado, em lâmina d'água e pressurizado a 5 atm em água, utilizando uma tensão de 278 MPa, nas regiões fraturadas.

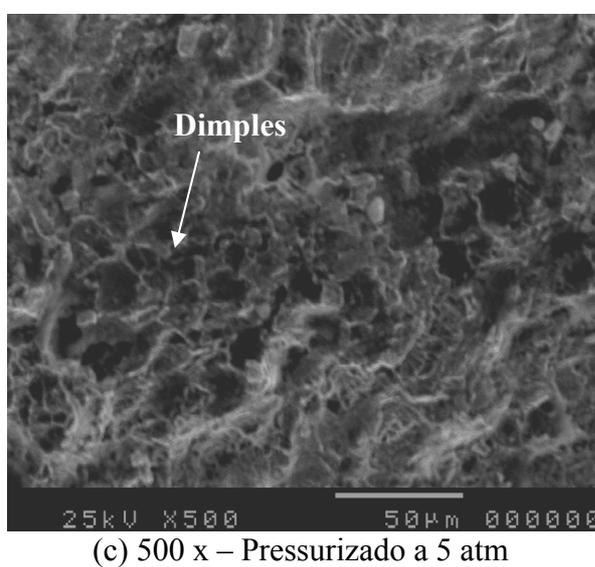
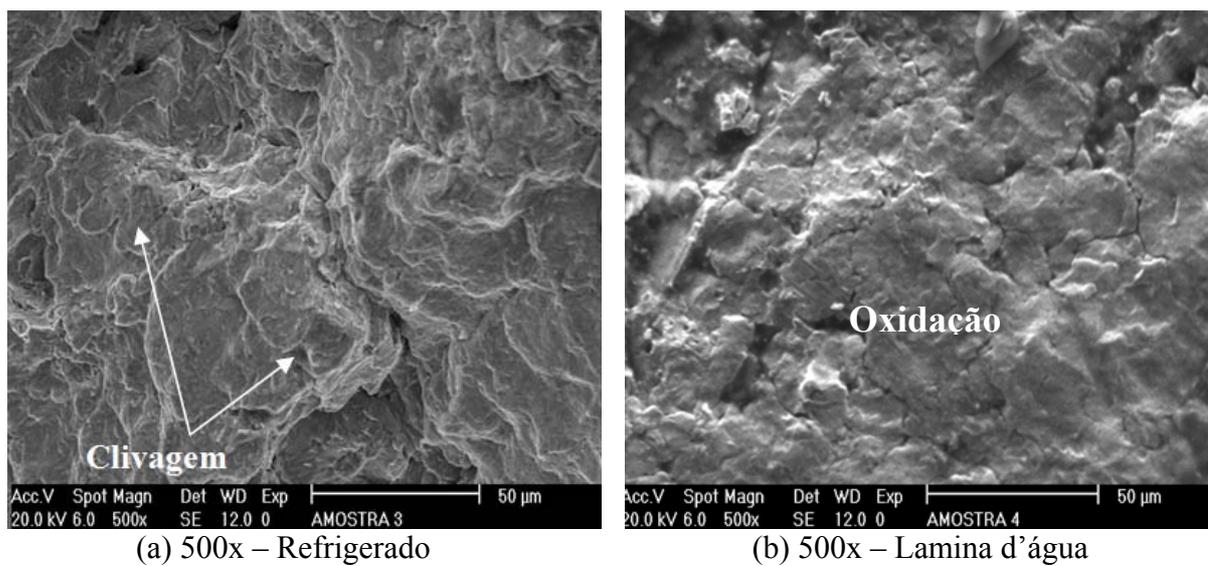


FIGURA 8.7 – Superfície de fratura MEV – ambiente refrigerado, lâmina d'água e pressurizado em água a 5 atm, utilizando uma tensão de 278 MPa.

Nas Figuras 8.8, são mostradas as amostras de MEV em ambiente refrigerado, em lâmina d'água e pressurizado a 5 atm em água, utilizando uma tensão de 256 MPa.

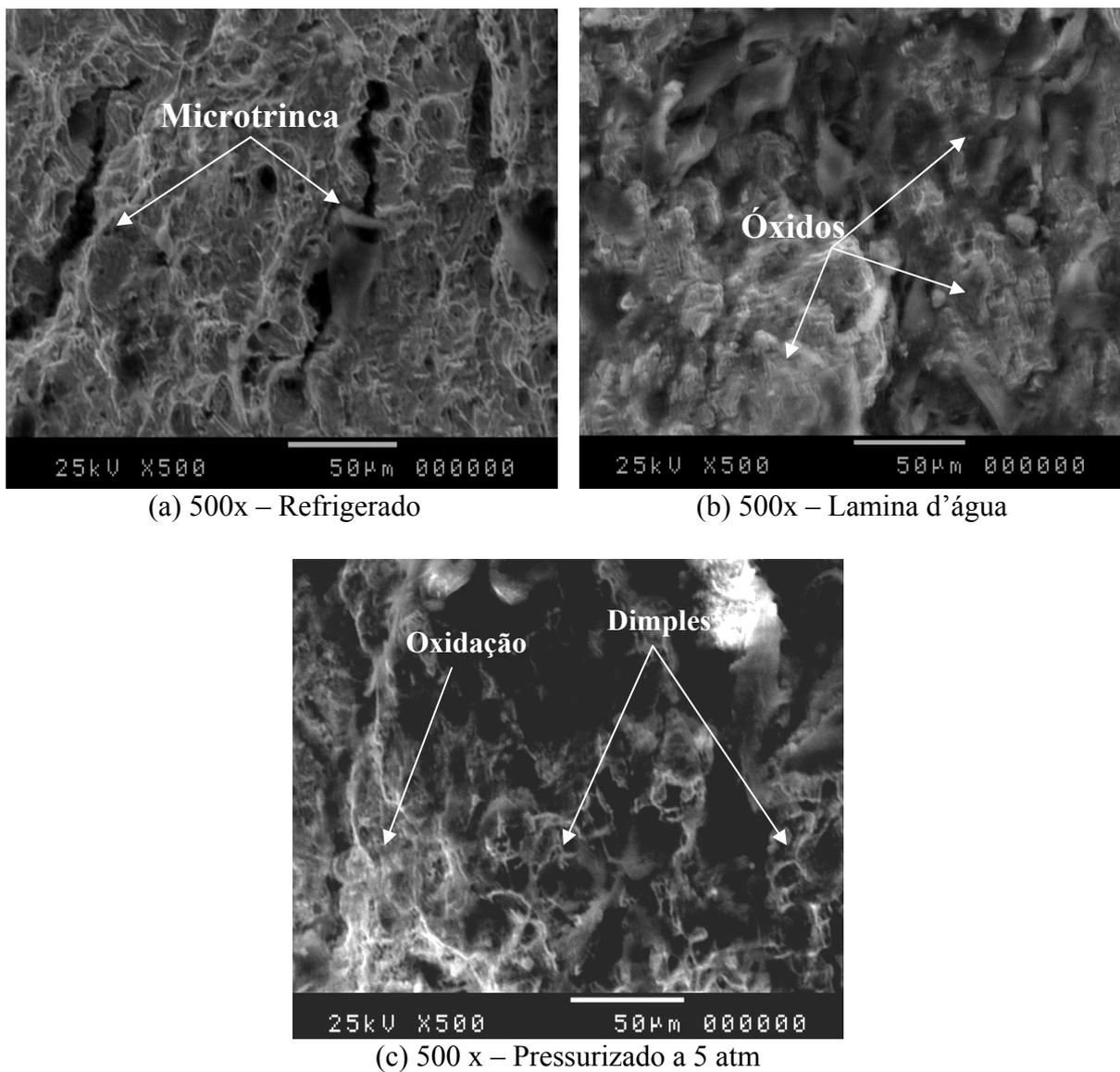


FIGURA 8.8 – Superfície de fratura MEV – ambiente refrigerado, lâmina d'água e pressurizado em água a 5 atm, utilizando uma tensão de 256 MPa.

Nas Figuras 8.9, são apresentadas as amostras de MEV em ambiente refrigerado, em lâmina d'água e pressurizado a 5 atm utilizando uma tensão de 236 MPa.

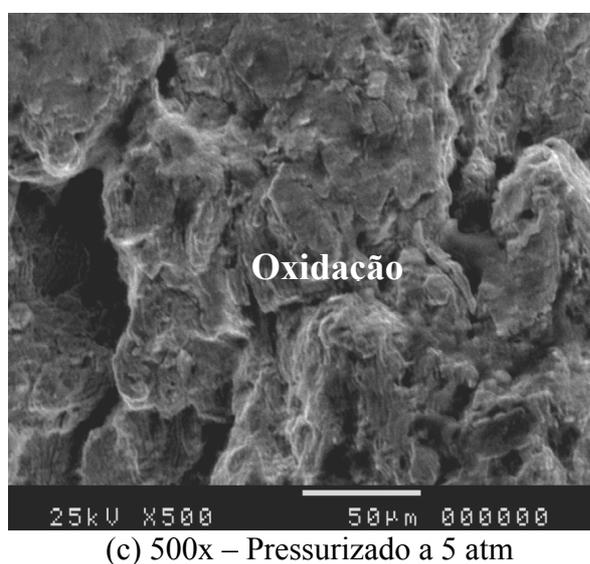
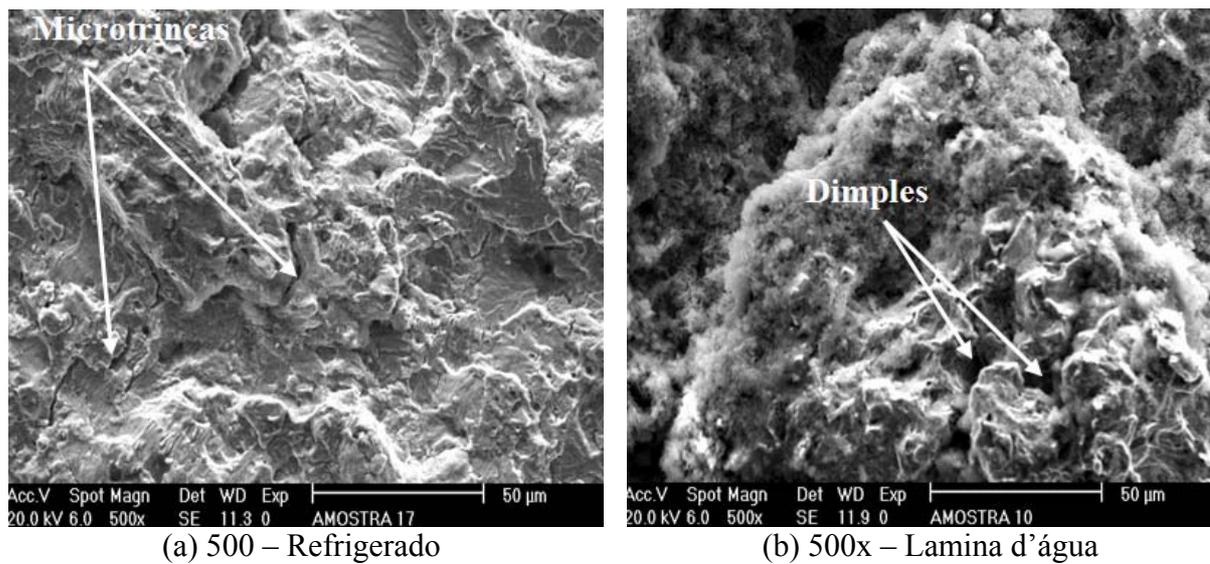


FIGURA 8.9 – Superfície de fratura MEV – ambiente refrigerado, lâmina d'água e pressurizado em água a 5 atm, utilizando uma tensão de 236 MPa.

Nas Figuras 8.10, são apresentadas às amostras de MEV em ambiente refrigerado, em lâmina d'água e pressurizado a 5 atm em água, utilizando uma tensão de 197 MPa.

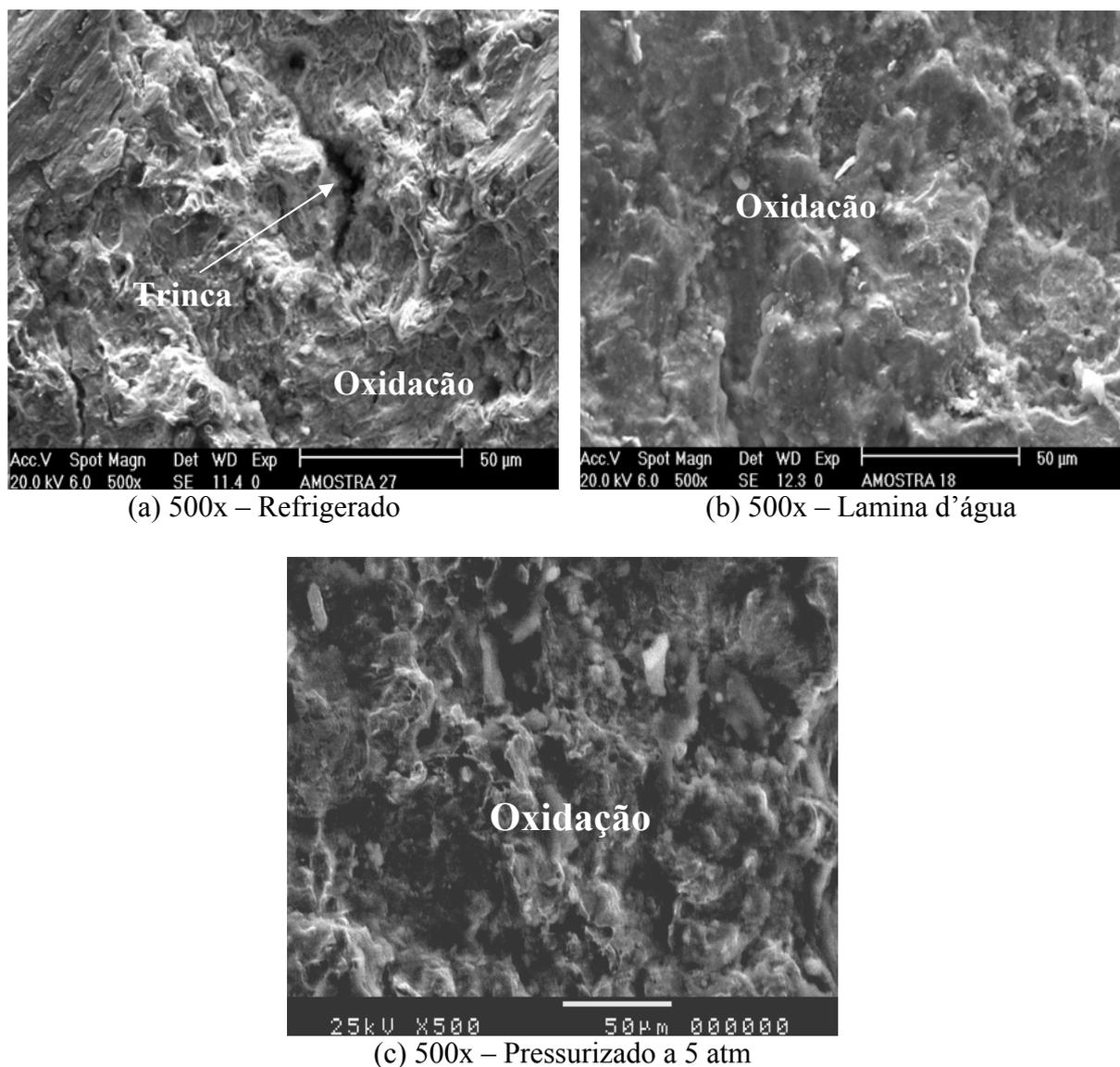


FIGURA 8.10 – Superfície de fratura MEV – ambiente refrigerado, lâmina d'água e pressurizado em água a 5 atm, utilizando uma tensão de 197 MPa.

Nas Figuras 8.11, são apresentadas às amostras de MEV em ambiente refrigerado e em lâmina d'água e pressurizado a 5 atm em água, utilizando uma tensão de 160 MPa.

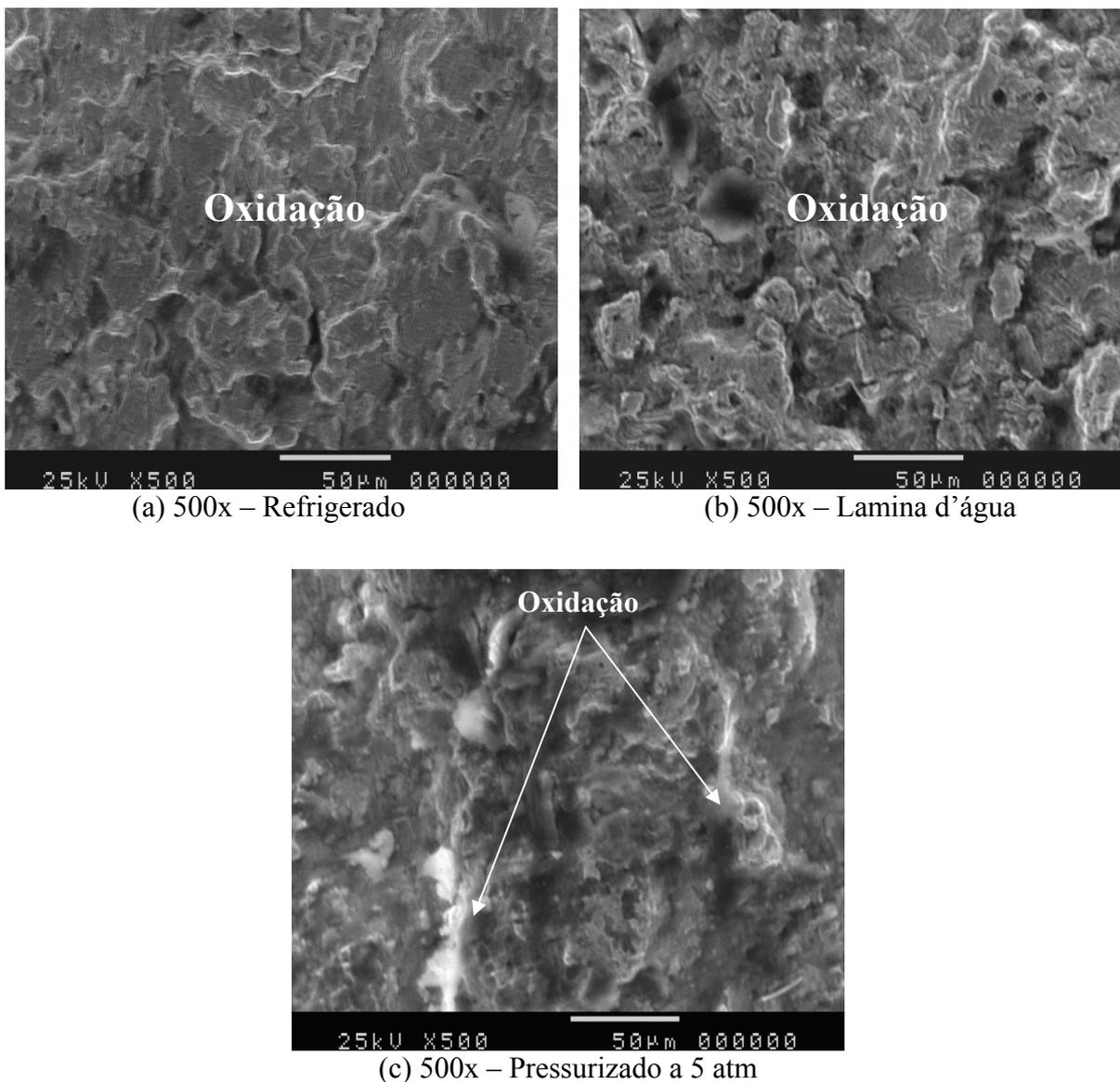


FIGURA 8.11 – Superfície de fratura MEV – ambiente refrigerado, lâmina d'água e pressurizado em água a 5 atm, utilizando uma tensão de 160 MPa.

Pelas figuras, observa que há diferenças entre os ambientes, mas não há um mecanismo específico do tipo de fratura. Isso pode ter origens na tensão alternada aplicada, no tipo de ensaio e a na presença da água. No caso do ambiente pressurizado, os aspectos das fraturas foram diferentes dos outros dois casos (pressurizado e lâmina) o que pode indicar a influência da pressão hidrostática ou do ar dissolvido na água. Um outro detalhe importante são os pontos de oxidação presentes na fratura do corpo-de-prova.

## **9. ANEXO B**

### **9.1 Ensaios de tração em corpos-de-prova submetidos à fadiga flexo-rotativa**

Os resultados apresentados se referem aos corpos-de-prova ensaiados a um determinado número de ciclos em duas tensões específicas de 197 e 236 MPa para a caracterização do acúmulo de dano no material.

Em seguida, ensaiados em máquina de tração para verificação das propriedades mecânicas: limite de escoamento, limite de ruptura, limite de resistência e estricção. Esses testes foram realizados em corpos-de-prova virgens para comparar os resultados.

Ressalta-se que foram ensaiados 18 corpos-de-prova, sendo 2 para material virgem (como referência), 8 para tensão de 197 MPa e 8 para a tensão de 236 MPa. Os ensaios foram divididos em refrigerados e em lâmina d'água. Esse teste não foi realizado para o ambiente pressurizado á água a 5 atm, pois os valores obtidos nas curvas S-N foram inferiores e não seria possível comparar com os outros dois ambientes.

#### **9.1.1 Limites de escoamento, resistência do material e ruptura utilizando uma tensão de 197 MPa**

Nas Figuras 9.1 e 9.2, os corpos-de-prova foram submetidos a uma tensão de 197 MPa nos ambientes refrigerados e lâmina d'água.

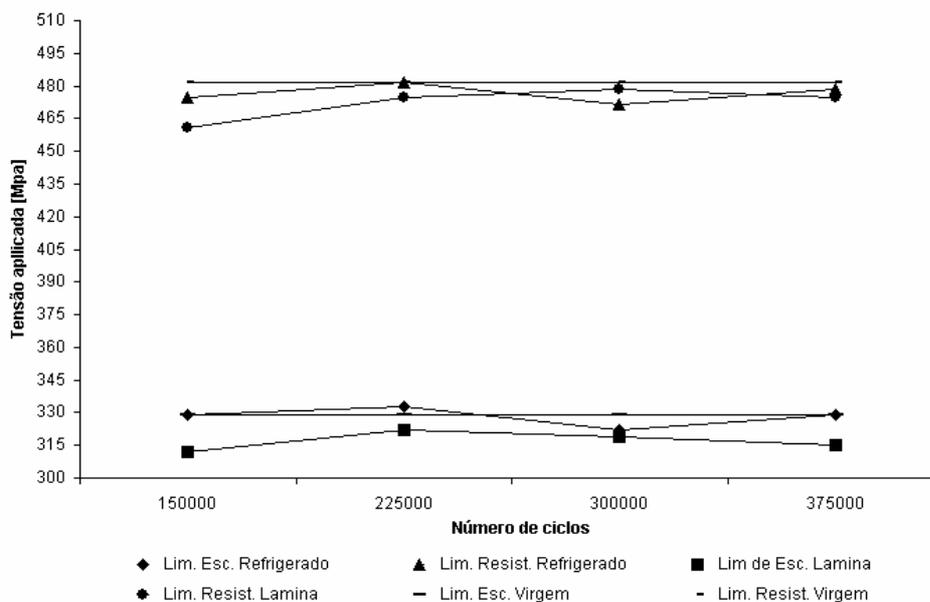


FIGURA 9.1 – Variação do limite de escoamento e de resistência do aço ASTM A-36, utilizando uma tensão de 197 MPa.

Na Figura 9.1, nota-se que houve uma pequena variação no limite de resistência do material resultando num valor abaixo do estabelecido como referência (virgem) para os dois testes, com exceção de apenas um ponto (refrigerado – 225000 ciclos). Pelos resultados obtidos, verifica a influência do dano acumulado.

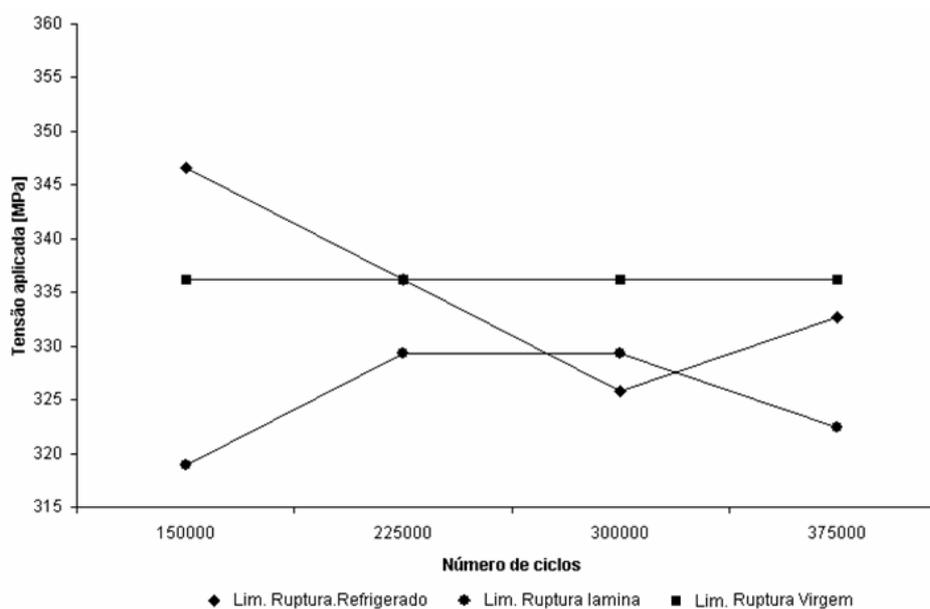


FIGURA 9.2 – Variação do limite de ruptura do aço ASTM A-36, utilizando uma tensão de 197 MPa.

Para o limite de ruptura, Figura 9.2, nota-se uma variação principalmente em ambiente refrigerado. Isso pode ter ocorrido em função de uma variação de temperatura durante os testes e pelo número de ciclos aplicados. No caso do teste em lâmina, os pontos ficaram abaixo do valor de referência (virgem).

### 9.1.2 Limites de escoamento, resistência do material e ruptura utilizando uma tensão de 236 MPa.

Nas Figuras 9.3 e 9.4, os corpos-de-prova foram submetidos a uma tensão de 236 MPa, nos ambientes refrigerados e lâmina d'água.

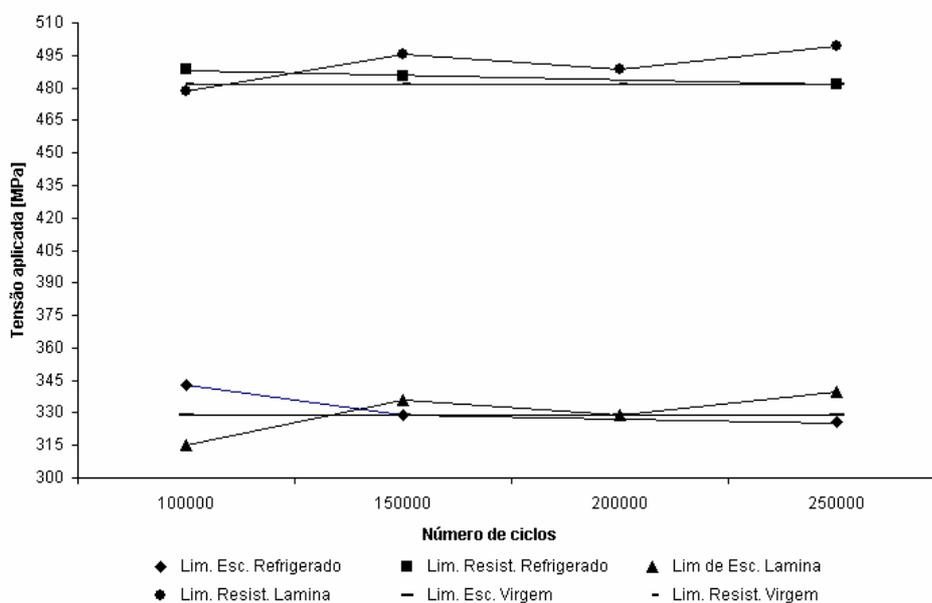


FIGURA 9.3 – Variação do limite de escoamento e de resistência do aço SAE A-36, utilizando uma tensão de 236 MPa.

Na Figura 9.3 houve uma pequena variação no limite de resistência do material em relação ao material virgem. No caso do limite de escoamento, os valores se alternaram em relação ao valor de referência, com uma variação média de 15 MPa para os dois ambientes.

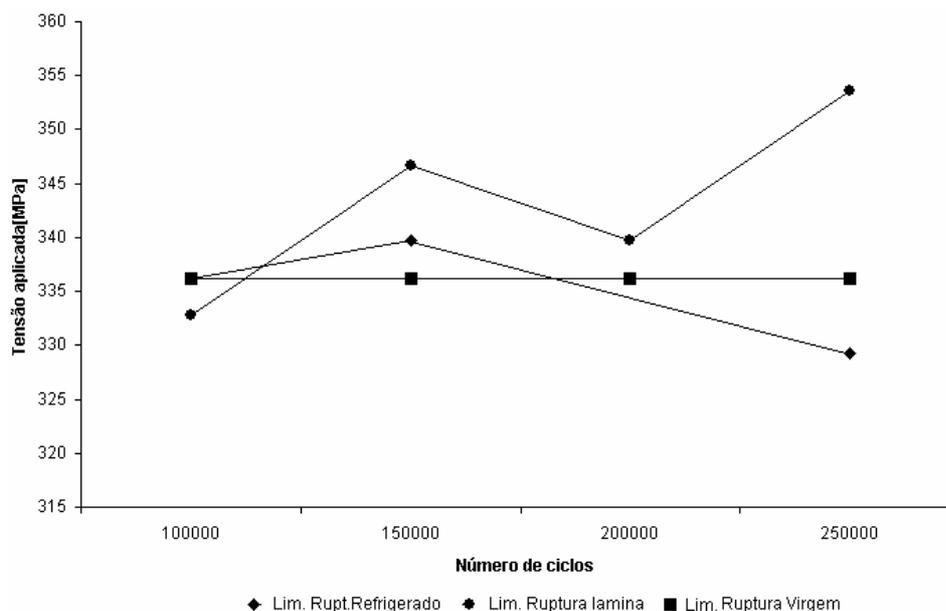


FIGURA 9.4 – Variação do limite de ruptura do aço SAE A-36, utilizando uma tensão de 236 MPa.

No caso do limite de ruptura, houve uma variação principalmente em lâmina d'água. Observa-se que o limite de ruptura sofreu um acréscimo de mais de 17 MPa relação ao material virgem.

As variações observadas (limite de escoamento, limite de resistência e limite de ruptura) estão relacionadas ao fenômeno de encruamento e amolecimento do material, causados pela tensão alta.

### 9.1.3 Estricção do material utilizando as tensões de 197 e de 236 MPa.

Nas Figuras 9.5 e 9.6, são traçados os gráficos dos valores para a estricção do material. Isso é uma maneira de medir a ductilidade do material. Os testes foram realizados com as tensões de 197 e 236 MPa, respectivamente.

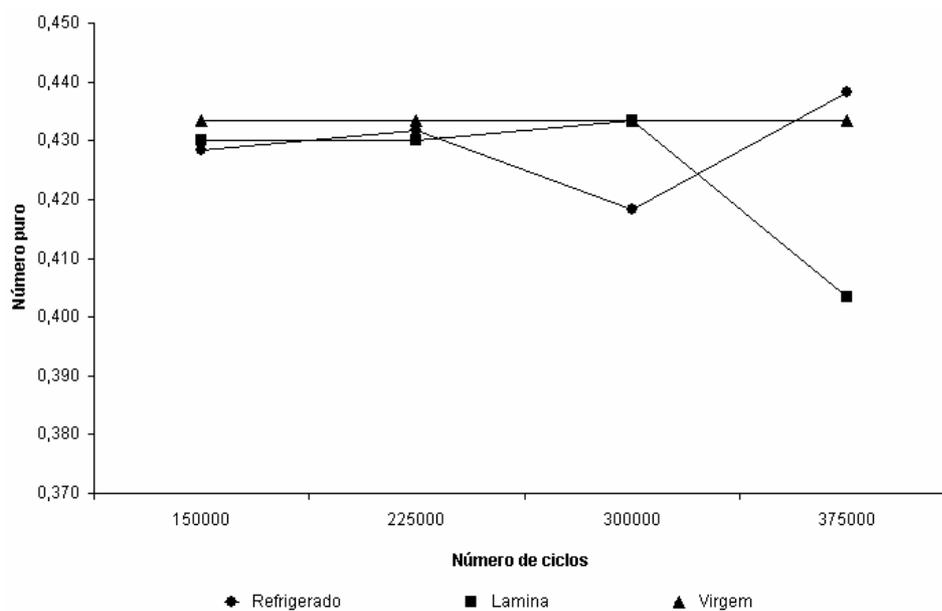


FIGURA 9.5 – Valores de estrição para a tensão de 197 MPa.

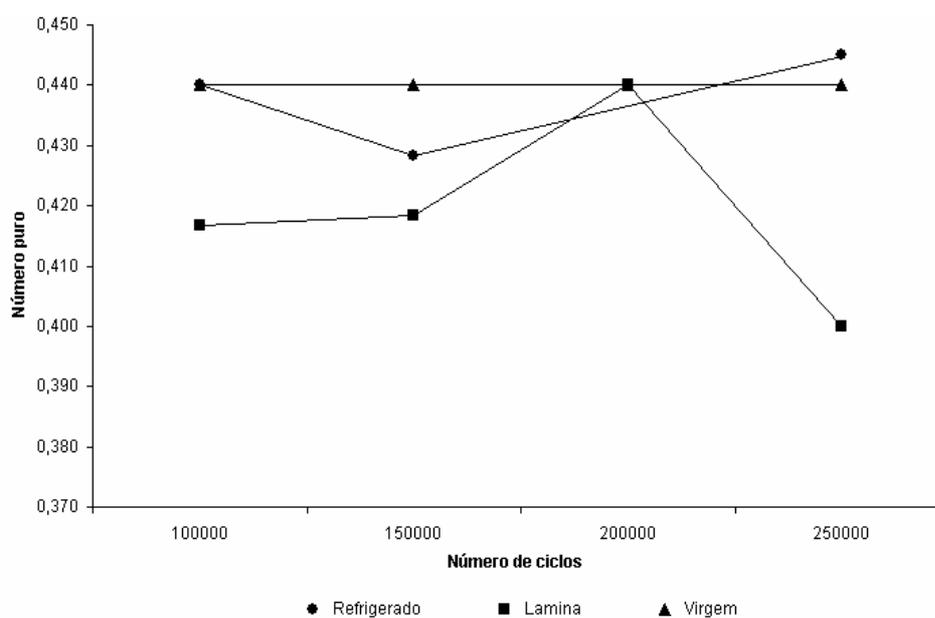


FIGURA 9.6 – Valores de estrição para a tensão de 237 MPa.

Nos dois gráficos, verifica que os resultados são bem próximos e inferiores ao valor de referência (virgem), exceto para o último ciclo do refrigerado para ambos os ambientes.

## 10. ANEXO C

### 10.1 Estudo do dano acumulado provocado por fadiga flexo-rotativa

Nas Tabelas 10.1 e 10.2, são apresentadas as tensões aplicadas e os números de ciclos correspondentes para danificar o material, utilizando o ensaio de fadiga flexo-rotativa.

TABELA 10.1 – Acúmulo de dano utilizando tensões crescentes.

<i>Corpo-de-prova</i>	<i>Número de Ciclos para a Tensão aplicada</i>			
	<i>176 MPa</i>	<i>197 MPa</i>	<i>236 MPa</i>	<i>278 MPa</i>
<i>1</i>	122735	67260	22009	28543
<i>2</i>	122733	67261	22014	35089
<i>3</i>	122733	67264	22012	98034
<i>4</i>	122738	67266	22008	68552

TABELA 10.2 – Acúmulo de dano utilizando tensões decrescentes.

<i>Corpo-de-prova</i>	<i>Número de Ciclos para a Tensão aplicada</i>			
	<i>278 MPa</i>	<i>236 MPa</i>	<i>197 MPa</i>	<i>176 MPa</i>
<i>1</i>	6614	22012	67258	882087
<i>2</i>	6607	22020	67264	953921
<i>3</i>	6615	22016	67260	562056
<i>4</i>	6610	22010	67267	691525

Para esse estudo, os números de ciclos aplicados correspondem a 30% do previsto para o corpo-de-prova romper-se, com uma determinada tensão aplicada e probabilidade de falha de 1%. Ressalta

que o último nível de tensão aplicada ao corpo-de-prova é levado à ruptura. O ambiente escolhido para esse estudo foi o refrigerado e as cargas aplicadas foram crescentes e decrescentes.

## 10.2 Aplicações das teorias do dano

O trabalho propôs estudar as teorias de Palmgren-Miner, Corten-Dolan, Marin e a teoria das médias das tensões atuantes proposta por Mansur (2003) utilizando os valores das tabelas 10.1 e 10.2. Os resultados são apresentados nas figuras 10.1 a 10.4.

Na Figura 10.1, são apresentados os resultados para o estudo do dano utilizando a teoria de Palmgren-Miner.

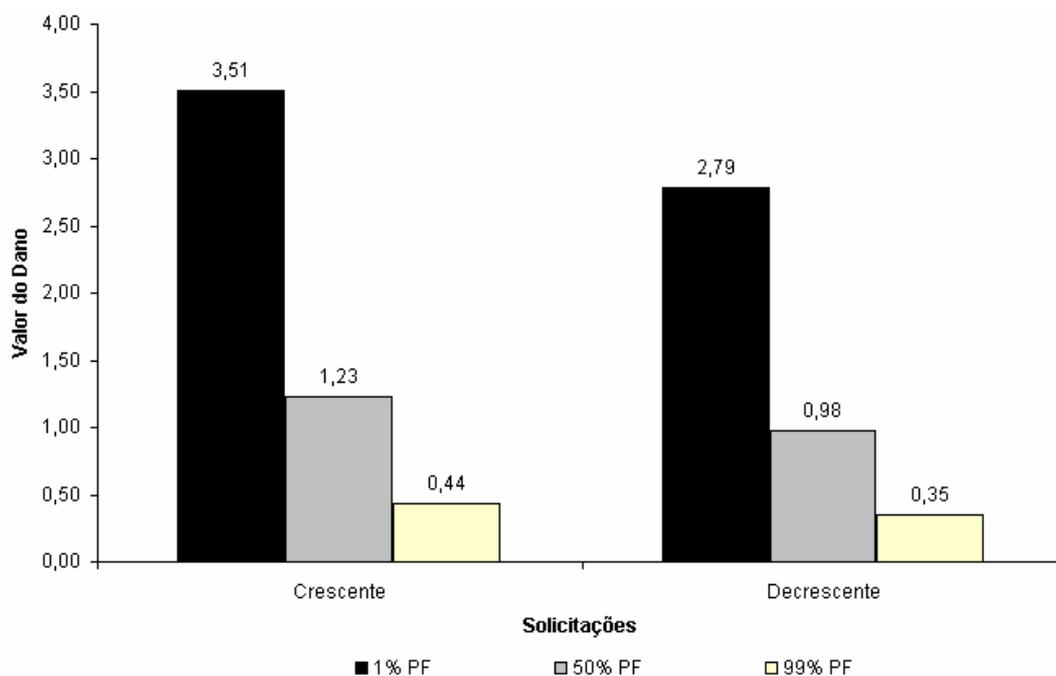


FIGURA 10.1 – Valores dos danos encontrados com a teoria de Palmgren-Miner.

Na Figura 10.2, são apresentados os valores encontrados dos danos quando se utiliza a teoria de Corten-Dolan.

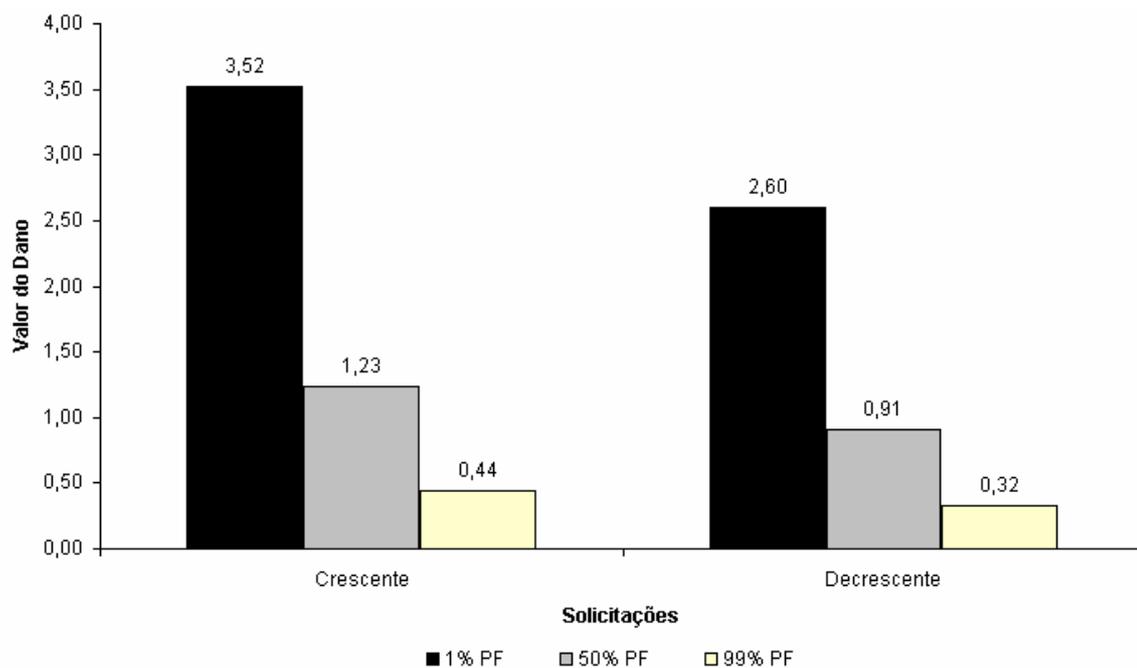


FIGURA 10.2 – Valores dos danos encontrados com a teoria de Corten-Dolan.

Na Figura 10.3, apresentam os valores dos danos quando se utiliza a teoria de Marin.

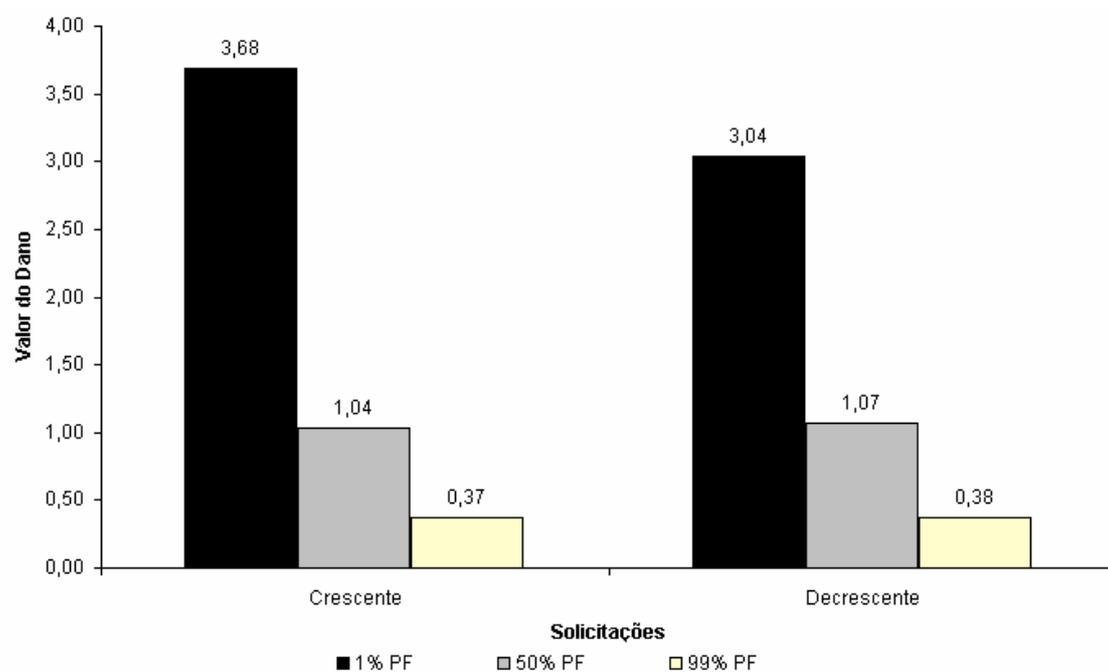


FIGURA 10.3 – Valores dos danos encontrados com a teoria de Marin.

Na Figura 10.4, apresentam-se os valores dos danos quando se utiliza a teoria de das médias das tensões atuantes proposta por Mansur (2003).

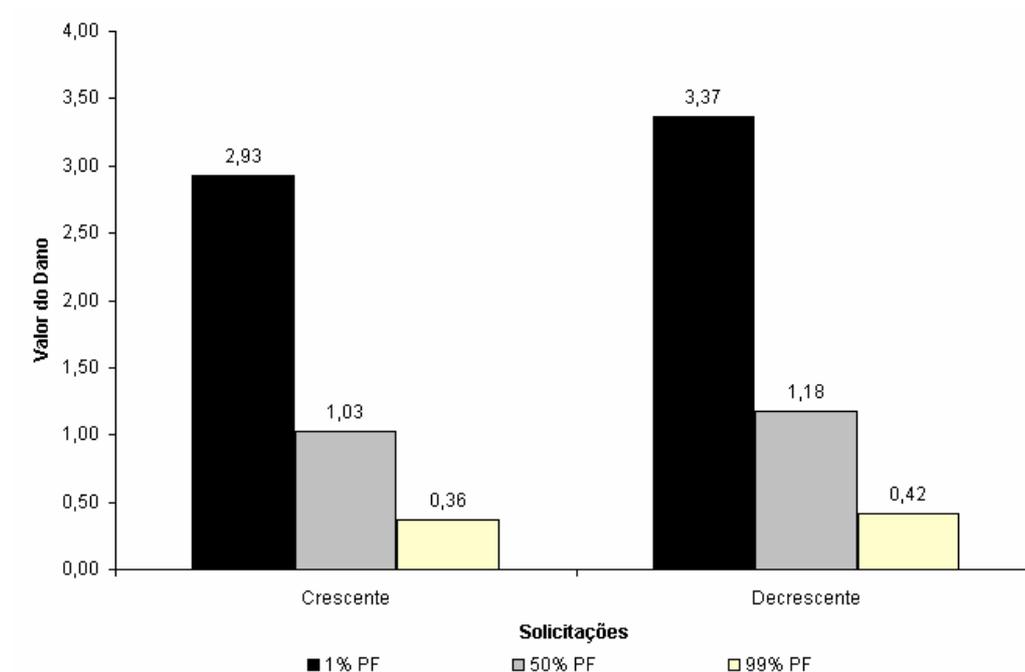


FIGURA 10.4 – Valores dos danos encontrados com a teoria de Mansur.

### 10.3 Proposta de uma nova metodologia para cálculo de dano: Estudo do Dano Progressivo

Após estudos teóricos e verificações experimentais das teorias de acúmulo de dano de Palmgren-Miner, Corten-Dolan e de Marin, observou-se que nenhuma delas levava em consideração a história das tensões passadas, ou seja, de cada parcela aplicada.

A metodologia proposta por Mansur (2003), para se prever a vida de materiais submetidos à fadiga, considera o histórico do acúmulo do dano, a partir das tensões médias aplicadas para cada parcela, durante a vida do componente em estudo.

A proposta desta nova metodologia prevê que o dano total é obtido da soma de danos parciais  $D_i$  de cada parcela das tensões aplicadas. Cada parcela do dano  $D_i$  é obtida pela relação entre o número de ciclos  $N_i$  sob uma tensão alternada aplicada  $\sigma_i$  e a vida esperada  $N_i$ . A partir da segunda parcela, o número de ciclos é multiplicado pelo expoente das diferenças das tensões (atual e passada), dividida

pela tensão atual e multiplicado pelos danos acumulados das parcelas anteriores e assim sucessivamente. Na tentativa de propor um estudo que considere os históricos dos danos envolvidos em cada parcela, propõem o seguinte, de acordo com a Equação 10.1.

$$D = \sum_{i=1}^n Di = D1 + D2 + D3 + \dots \quad (10.1)$$

$$D = \frac{n_1 \times \text{Exp}\left(\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\sigma_1}\right)\right)}{N_1} + \frac{n_2 \times \text{Exp}\left(\left(\frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_2}\right) \times D_1\right)}{N_2} + \frac{n_3 \times \text{Exp}\left(\left(\frac{\sigma_3 - \sigma_2}{\sigma_3}\right) \times D_1 \times D_2\right)}{N_3} +$$

$$+ \frac{n_4 \times \text{Exp}\left(\left(\frac{\sigma_4 - \sigma_3}{\sigma_4}\right) \times D_1 \times D_2 \times D_3\right)}{N_4} + \frac{n_n \times \text{Exp}\left(\left(\frac{\sigma_n - \sigma_{n-1}}{\sigma_n}\right) \times D_{n-1} \times D_{n-2} \times D_{n-3} \times \dots\right)}{N_n} \quad (10.2)$$

Nesta teoria,  $n_i$  é o número de ciclos que o corpo-de-prova submetido à tensão alternada  $\sigma_i$ ,  $N_i$  é o número de ciclos correspondente à vida do componente sob esta tensão, retirado das curvas S-N-P, e assim sucessivamente.

Na Figura 10.5, são apresentados os resultados do Dano Progressivo, realizados em corpos-de-prova submetidos ao ensaio de fadiga flexo-rotativa.

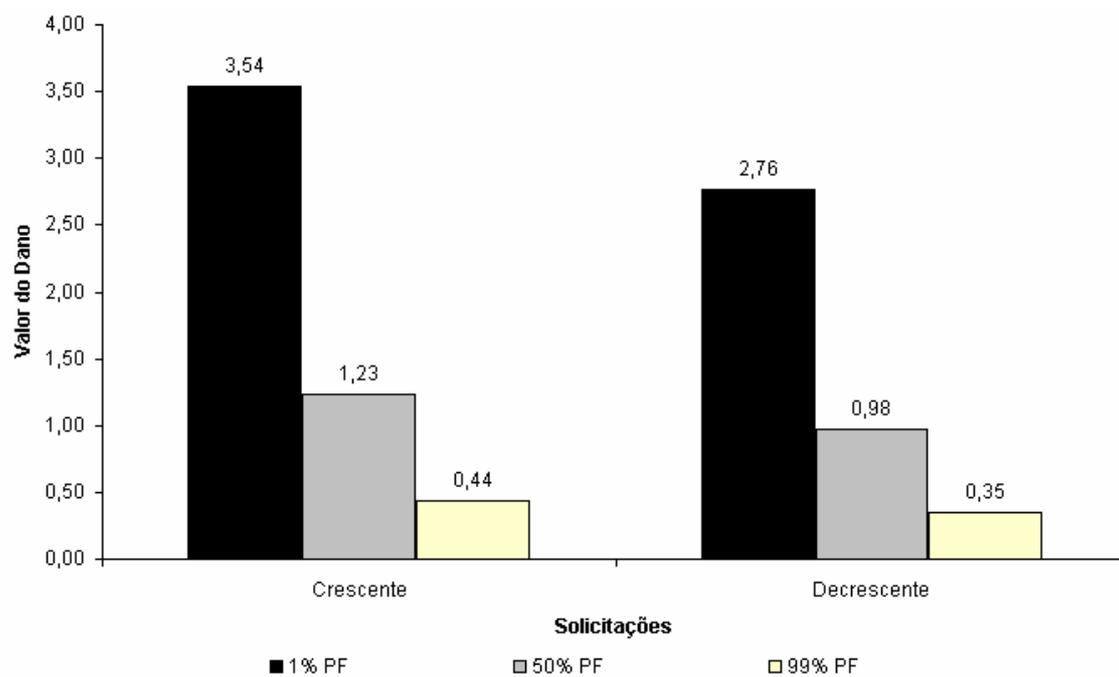


FIGURA 10.5 – Valores encontrados com a teoria proposta do dano.

Nas Figuras 10.6 a 10.8, apresentam-se todas as teorias discutidas com a finalidade de comparar os seus resultados, considerando as probabilidades de falha de 1%, 50% e 99%.

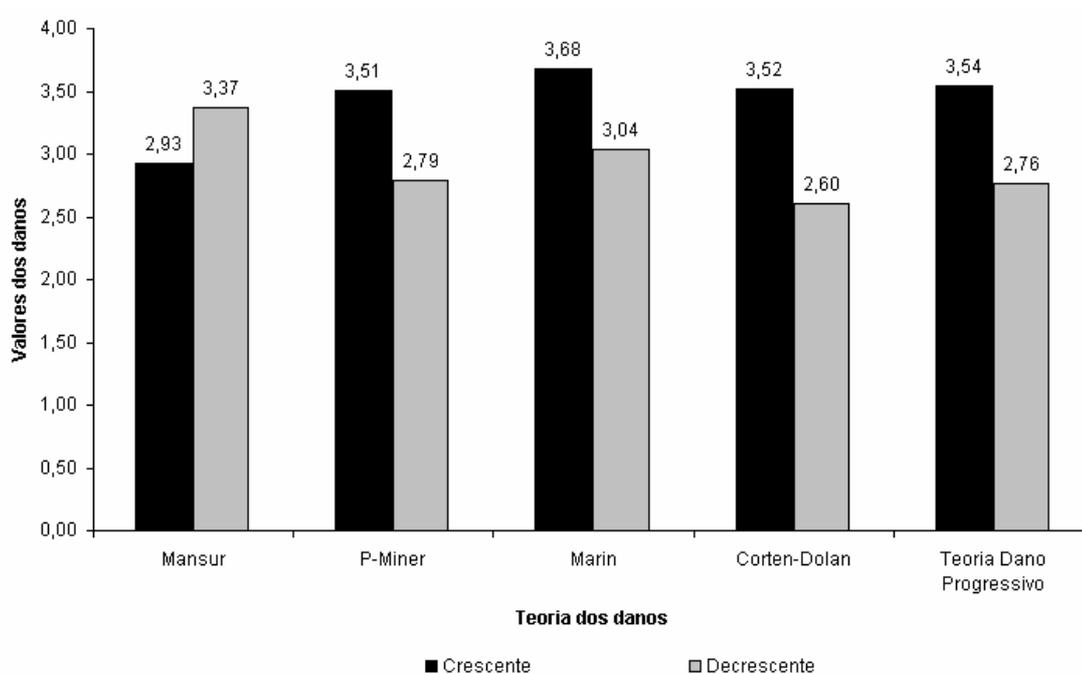


FIGURA 10.6 – Comparação das teorias para uma probabilidade de falha de 1%.

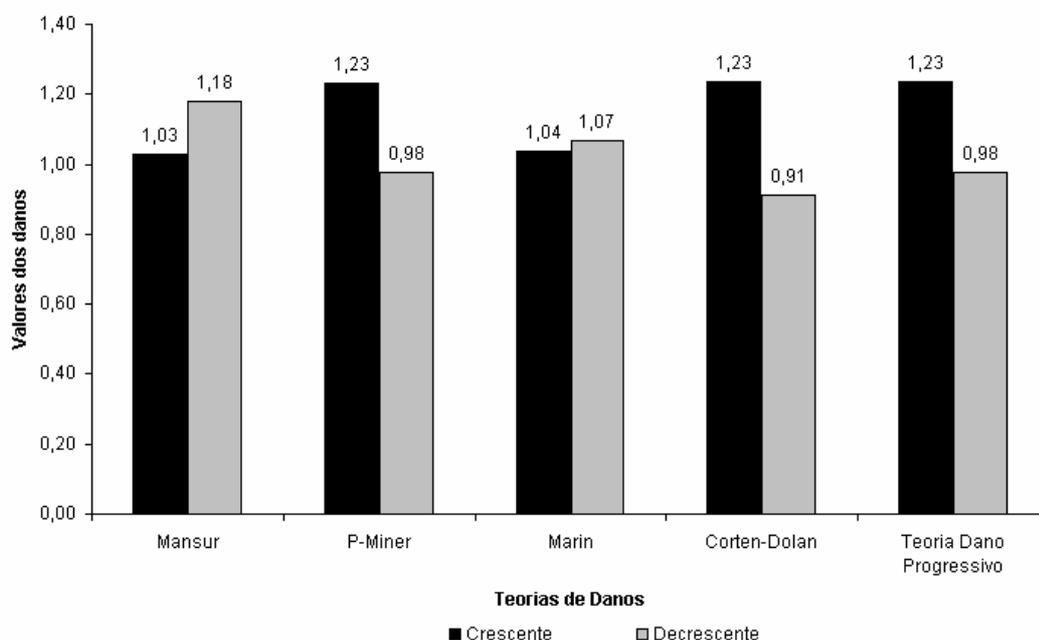


FIGURA 10.7 – Comparação das teorias para uma probabilidade de falha de 50%.

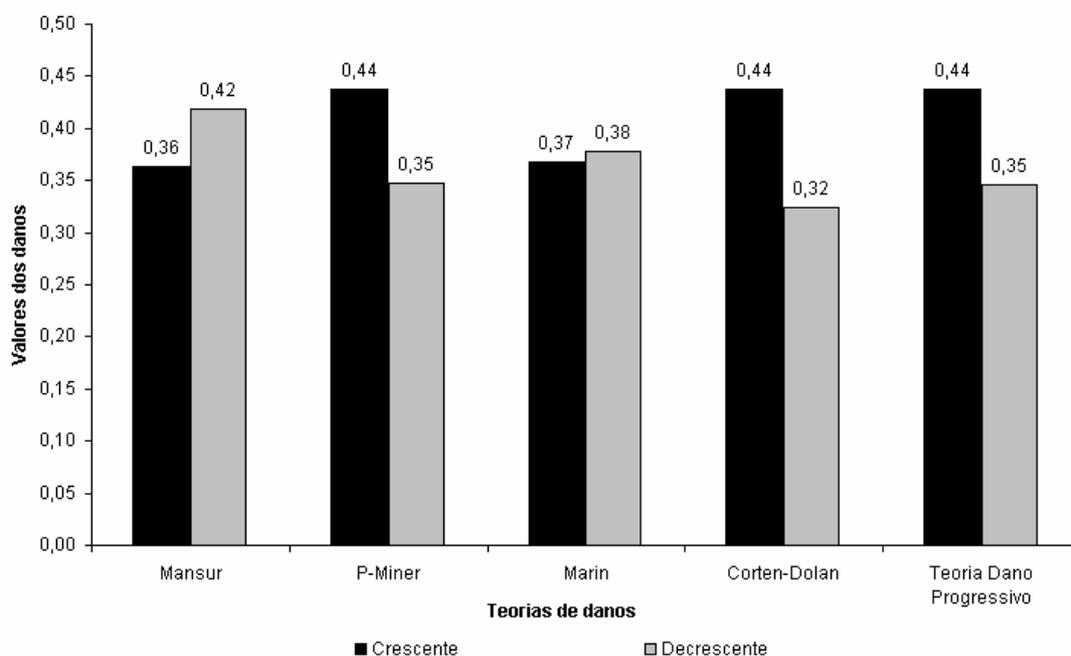


FIGURA 10.8 – Comparação das teorias para uma probabilidade de falha de 99%.

Na Figura 10.6, nota-se que os valores obtidos pelas teorias de Mansur, Palmgrem-Miner, Corten-Dolan, Marin e o estudo do Dano Progressivo, apresentam valores maiores que 1. Isso indica que os corpos-de-prova falharam com a probabilidade de 1% previstas nas curvas S-N-P.

Na Figura 10.7, são relatados os valores encontrados com a probabilidade de 50% de falha. Observa-se que as teorias de Mansur, Palmgren-Miner, Marin, Corten-Dolan e Dano Progressivo tiveram bons resultados. Mas nas teorias de Mansur e Marin os valores foram mais satisfatórios para ensaios com tensões crescentes. Com tensão decrescente, os valores obtidos pelas teorias de Palmgren-Miner, Marin e Dano Progressivo foram mais próximos de 1. A teoria de Corten-Dolan obteve a maior oscilação entre os valores crescentes e decrescentes.

Para os resultados obtidos com a probabilidade de falha de 99%, Figura 10.8, de acordo com a curva S-N-P, as teorias discutidas Mansur, Palmgren-Miner, Corten-Dolan, Marin e o estudo do Dano Progressivo forneceram valores inferiores a 1. Isto indica que não ocorreu a fratura nos corpos-de-prova submetidos à fadiga, o que não é verdadeiro, pois os mesmos sofreram fraturas.

Em relação ao carregamento, constata-se que há uma pequena diferença em relação à sua aplicação, sejam eles crescentes ou decrescentes para as teorias de Mansur, Palmgren-Miner, Marin e Dano Progressivo. Para a teoria de Corten-Dolan, os valores obtidos foram mais dispersos, em relação às probabilidades de falhas de 1%, 50% e 99%, ou seja, foi mais sensível ao carregamento proposto.

## 11. ANEXO D

Nas Tabelas 11.1 e 11.4 são apresentados às medidas das durezas dos corpos-de-prova virgens e os que sofreram fadiga nos ambientes estudados.

TABELA 11.1 – Dureza em corpos-de-prova virgens.

<i>Corpo-de-prova</i>	<i>Medida 1</i>	<i>Medida 2</i>	<i>Medida 3</i>
1	119,1	120,8	120,8
2	124,4	125,4	120,8
3	127,2	124,4	122,6
4	122,6	124,4	126,3
5	127,2	125,4	129,1
6	124,4	122,6	129,1

TABELA 11.2 – Dureza em corpos-de-prova refrigerados.

<i>Tensão</i>	<i>Corpo-de-prova</i>	<i>Medida 1</i>	<i>Medida 2</i>	<i>Medida 3</i>
278	1	136,1	129,1	134,0
278	2	159,6	131,0	150,8
278	3	143,7	143,7	146,0
256	1	125,4	125,4	122,6
256	2	149,5	127,2	133,0
256	3	158,3	148,3	144,9
236	1	126,3	125,4	128,1
236	2	128,1	127,2	124,4
236	3	121,7	120,8	126,3
197	1	126,3	123,5	126,3
197	2	124,4	127,2	126,3
197	3	123,5	125,4	124,4
160	1	123,5	123,5	127,2
160	2	127,6	124,8	125,0
160	3	122,1	123,5	128,0

TABELA 11.3 – Dureza em corpos-de-prova lâmina d'água.

<i>Tensão</i>	<i>Corpo-de-prova</i>	<i>Medida 1</i>	<i>Medida 2</i>	<i>Medida 3</i>
278	1	146,0	148,3	180,0
278	2	147,1	155,7	172,0
278	3	174,0	177,0	150,8
256	1	149,5	154,5	152,0
256	2	155,7	147,1	146,0
256	3	138,2	149,5	152,0
236	1	165,0	144,9	142,6
236	2	127,2	154,5	155,7
236	3	157,0	144,9	146,0
197	1	153,3	131,0	125,4
197	2	135,1	136,0	129,1
197	3	168,0	172,0	164,0
160	1	153,2	144,9	158,3
160	2	132,0	147,1	152,0
160	3	150,8	144,9	169,0

TABELA 11.4 – Dureza em corpos-de-prova pressurizados em água a 5 atm.

<i>Tensão</i>	<i>Corpo-de-prova</i>	<i>Medida 1</i>	<i>Medida 2</i>	<i>Medida 3</i>
278	1	182,0	142,6	154,5
278	2	162,0	142,6	143,7
278	3	147,1	175,0	192,0
256	1	188,0	152,0	150,8
256	2	169,0	187,0	152,0
256	3	154,5	140,4	164,0
236	1	154,5	172,0	146,0
236	2	144,9	146,0	172,0
236	3	188,0	174,0	171,0
197	1	165,0	138,2	136,1
197	2	148,3	141,5	185,0
197	3	147,1	147,1	175,0
160	1	140,4	164,0	138,2
160	2	138,2	148,3	180,0
160	3	146,0	142,6	172,0

Nas Tabelas 11.5 e 11.8 são apresentados as medidas das microdurezas dos corpos-de-prova virgens e os que sofreram fadiga nos ambientes estudados.

TABELA 11.5 – Microdureza em corpos-de-prova virgens.

<i>Corpo-de-prova</i>	<i>Medida 1</i>	<i>Medida 2</i>	<i>Medida 3</i>
1	142,07	141,30	137,46
2	133,48	132,32	125,64
3	136,85	135,41	131,14
4	137,68	134,14	137,85
5	134,63	135,80	139,67
6	136,62	137,27	135,61

TABELA 11.6 – Microdureza em corpos-de-prova refrigerados.

<i>Tensão (MPa)</i>	<i>Corpo-de-prova</i>	<i>Medida 1</i>	<i>Medida 2</i>	<i>Medida 3</i>
278	1	140,45	141,45	143,39
278	2	144,72	152,05	166,46
278	3	147,19	142,50	162,51
256	1	147,57	144,44	161,15
256	2	141,70	139,57	166,88
256	3	146,32	151,87	166,38
236	1	148,27	138,53	151,99
236	2	142,62	143,99	146,45
236	3	137,53	137,21	143,57
197	1	142,07	141,31	137,46
197	2	143,29	145,04	163,67
197	3	145,25	151,73	159,19
160	1	153,20	146,68	150,62
160	2	142,32	143,00	151,00
160	3	152,00	158,00	160,00

TABELA 11.7 – Microdureza em corpos-de-prova lâmina d'água.

<i>Tensão</i>	<i>Corpo-de-prova</i>	<i>Medida 1</i>	<i>medida 2</i>	<i>medida 3</i>
278	1	162,61	156,00	174,63
278	2	179,93	206,69	212,77
278	3	178,32	185,61	170,22
256	1	138,52	139,20	162,73
256	2	167,41	186,91	193,20
256	3	170,35	180,11	173,24
236	1	173,84	152,41	147,46
236	2	182,95	189,51	194,19
236	3	159,23	151,44	168,38
197	1	178,51	165,52	153,52
197	2	163,11	165,35	181,66
197	3	170,10	154,18	134,46
160	1	154,06	159,89	154,06
160	2	188,75	148,30	164,95
160	3	161,37	176,24	209,79

TABELA 11.8 – Microdureza em corpos-de-prova pressurizado em água a 5 atm.

<i>Tensão</i>	<i>Corpo-de-prova</i>	<i>Medida 1</i>	<i>Medida 2</i>	<i>Medida 3</i>
278	1	190,00	179,50	161,50
278	2	168,00	164,30	179,90
278	3	173,30	172,60	184,20
256	1	150,10	156,30	166,80
256	2	156,70	155,80	159,20
256	3	153,10	171,20	216,70
236	1	178,90	184,50	208,00
236	2	158,00	163,60	160,20
236	3	196,80	186,50	212,80
197	1	152,30	167,20	176,40
197	2	156,30	197,00	216,40
197	3	179,70	169,20	175,20
160	1	147,70	151,50	175,30
160	2	155,10	156,30	157,60
160	3	164,90	192,60	211,20

## 12. ANEXO E

### 12.1 Incerteza de medição

Para estabelecer a estimativa de incerteza de medição, é necessário identificar as variáveis que contribuem para incerteza e seus valores, pois trata de uma característica inerente de erros aleatórios e/ou sistemáticos, ou de variáveis específicas do processo de medição ou do tipo de equipamento utilizado.

#### 12.1.1 Incerteza de medição da rugosidade média

O aparelho portátil digital Mitutoyo SJ. 201 P, responsável pela medição da rugosidade média ( $Ra$ ) possui incerteza de  $0,01 \mu\text{m}$ , segundo a capacidade da unidade de leitura, fornecida pelo manual do fabricante.

#### 12.1.2 Incerteza de medição do número de ciclos – flexo-rotativa

Na máquina projetada e construída de ensaios de fadiga flexo-rotativa observou-se que a incerteza associada é de aproximadamente 1 ciclo. Isto é observado ao romper o corpo-de-prova, pois o motor, responsável pela rotação, é desligado automaticamente.

#### 12.1.3 Incerteza de medição das tensões de flexão

Para a verificação da incerteza associada à flexão, considerou-se o maior valor de tensão aplicada para a realização dos ensaios que foi de 278 Mpa, correspondente a uma força de 6665 gf.

$$F = 6665gf \pm 0,5\% ;$$

$$D = 6 \pm 0,01mm ;$$

$$L = 90 \pm 2mm .$$

$$U(95,45\%;\infty)(F) = 0,5\% = 33,32gf \rightarrow u(68\%;\infty)(F) = \frac{33,32}{2} = 16,66gf$$

O valor de 0,5% esta associado com a resolução da balança digital de 0,1g e a sua imprecisão.

$$U(95,45\%;\infty)(D) = 0,01mm \rightarrow u(68\%;\infty)(D) = \frac{0,01}{2} = 0,005mm$$

$$U(95,45\%;\infty)(L) = 2mm \rightarrow u(68\%;\infty)(L) = \frac{2}{2} = 1mm$$

Aplicando os valores na equação de  $u^2(\sigma)$  tem-se:

$$u^2(\sigma) = \left[ \left( \frac{32 \times 90}{\pi \times 6^3} \times 16,66 \right)^2 + \left( \frac{96 \times 6665 \times 90}{\pi \times 6^4} \times 0,005 \right)^2 + \left( \frac{32 \times 665}{\pi \times 6^3} \times 1 \right)^2 \right]$$

$$u^2(\sigma) = 108796 \left( \frac{gf}{mm^2} \right)^2 ; \quad u(\sigma) = 329,83 \frac{gf}{mm^2}$$

Expandindo para 95,45%, tem-se:  $U(95,45\%)(\sigma) = u(\sigma) \times 2 = 329,83 \times 2 = 659,66 \frac{gf}{mm^2}$ . Portanto,

em termos de MPa tem-se que a incerteza da máxima tensão de flexão é 6,59 MPa, ou seja

$$U_{FLEXÃO} = \pm 6,59 MPa .$$

#### 12.1.4 Incerteza de medição das tensões axiais

As tensões axiais foram obtidas por aplicação de força em corpos-de-prova, utilizando-se a máquina Instron TDML, de 10 toneladas. Foi escolhido um valor típico para a determinação da incerteza. A força típica escolhida foi a que corresponde ao dobro do Limite de Resistência, aproximadamente 20.000 N [Mansur, 2003].

De acordo com relatório de calibração desta máquina, a incerteza associada ao fundo de escala é 1200 N para 100.000 N, o que corresponde a 240 N para a força típica selecionada. A incerteza do micrômetro utilizado para medição das dimensões dos corpos-de-prova é de 0,01 mm.

O valor de incerteza está de acordo com a norma do INMETRO (LAFOR - Laboratório de Força e Dureza), ou seja, na escala de máquina de ensaios até 1000 kN para tração, a incerteza associada é de  $\pm 0,12\%$ .

$$U(95,45; \infty)(F) = 24kgf \rightarrow u(68\%; \infty)(F) = \frac{24}{2} = 12kgf$$

$$U(95,45; \infty)(b) = 0,01mm \rightarrow u(68\%; \infty)(b) = \frac{0,01}{2} = 0,005mm$$

$$U(95,45; \infty)(h) = 0,01mm \rightarrow u(68; \infty)(h) = \frac{0,01}{2} = 0,005mm$$

$$u^2(\sigma_{ax}) = \left[ \left( \frac{1 \times 12}{8 \times 2} \right)^2 + \left( \frac{-2000 \times 0,005}{8^2 \times 2} \right)^2 + \left( \frac{-2000 \times 0,005}{2^2 \times 8} \right)^2 \right]$$

$$u(\sigma_{ax}) = 8,2MPa$$

$$U(95,45)(\sigma_{ax}) = u(\sigma_{ax}) \times 2 = 8,2 \times 2 = 16,4MPa$$

### 12.1.5 Incerteza de medição da dureza

O valor da incerteza estimada dos valores em uma máquina Reicherter com carga de ensaio de 5 kg e penetrador pirâmide de diamante com ângulo de  $136^\circ$  é de  $\pm 5\%$  do valor lido.

### 12.1.6 Incerteza de medição da microdureza

O equipamento de microdureza modelo Mitutoyo MVK-01 com carga de ensaio de 0,5 kg e penetrador pirâmide de diamante com ângulo de  $136^\circ$  tem uma incerteza associada de  $\pm 4\%$  do valor medido. Esse valor considera as variáveis que entram na medição da microdureza.



TABELA 13.2 – Números de ciclos produzidos para o ambiente lâmina d'água

<i>Tensão [Mpa]</i>	<i>Ciclos</i>	<i>Tensão [Mpa]</i>	<i>Ciclos</i>
278	134786	197	1507621
278	171713	197	633505
278	80171	197	343816
278	57835	197	991091
278	96435	160	1514753
256	177680	160	1286502
256	167120	160	1726717
256	264530	160	2017474
256	154295	160	2007832
236	671485	160	2008511
236	207606	160	2037957
236	623766	160	757724
236	383404	160	1864196
236	365486	160	2001327
197	574343	160	1205273
197	498128	160	2000000
197	233458	160	2133584
197	354689	160	2000000
197	508928	160	2000000
197	1014586	160	2000000
197	555778		

TABELA 13.3 – Números de ciclos produzidos para o ambiente pressurizado a 5 atm

<i>Tensão [Mpa]</i>	<i>Ciclos</i>	<i>Tensão [Mpa]</i>	<i>Ciclos</i>
278	69185	236	58339
278	22433	236	34478
278	14841	236	24660
278	52630	236	49091
256	32622	236	27742
256	108115	197	147275
256	123495	197	308250
256	51597	197	59423
256	65311	197	127124
256	40958	197	308250
256	31530	197	85625
256	49262	160	205500
236	52231	160	34250
236	60165	160	193512
236	81800	160	171250
236	298717	160	34250
236	55941	160	205500
236	58510	160	237905
236	123414	160	188375
236	65055	160	58225

