



# **DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**ENSAIOS DE FADIGA SOB CONDIÇÕES DE *FRETTING*  
COM O CABO CAA 397,5 MCM - IBIS**

**TÂNIA MARIA DE OLIVEIRA SERRA HORTÊNCIO**

Brasília, Setembro de 2009

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ENSAIOS DE FADIGA SOB CONDIÇÕES DE *FRETTING*  
COM O CABO CAA 397,5 MCM - IBIS**

**TÂNIA MARIA DE OLIVEIRA SERRA HORTÊNCIO**

**ORIENTADOR: JOSÉ ALEXANDER ARAÚJO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS**

**PUBLICAÇÃO: ENM. DM – 141/09  
BRASÍLIA/DF, 28 SETEMBRO DE 2009**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ENSAIOS DE FADIGA SOB CONDIÇÕES DE *FRETTING*  
COM O CABO CAA 397,5 MCM - IBIS**

**TÂNIA MARIA DE OLIVEIRA SERRA HORTÊNCIO**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
MESTRE EM CIÊNCIAS MECÂNICAS.**

**APROVADA POR:**

---

**Prof. Dr. José Alexander Araújo, PhD (ENM-UnB)  
(Orientador)**

---

**Prof. Dr. Jorge Luiz de Almeida Ferreira, PhD (ENM-UnB)  
(Examinador Interno)**

---

**Prof. Dr. Luís Augusto Conte Mendes Veloso ( Depto Eng. Civil UFPA)  
(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, 28 DE SETEMBRO DE 2009**

## FICHA CATALOGRÁFICA

HORTÊNCIO, TÂNIA MARIA DE OLIVEIRA SERRA

Ensaio de Fadiga sob Condições de *Fretting* com o Cabo CAA 397,5 MCM - IBIS [Distrito Federal] 2009.

xvii, 101 p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2009).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Fadiga por *fretting*

2. Curva de *Wöhler*

3. Cabo condutor

4. Linha de transmissão

I. ENM/FT/UnB

II. ENM.DM-141/09

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

HORTÊNCIO, T. M. O. S.,(2009). Ensaio de Fadiga sob Condições de *Fretting* com o Cabo CAA 397,5 MCM - IBIS. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM.DM-141/09, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 101 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Tânia Maria de Oliveira Serra Hortêncio.

TÍTULO: Ensaio de Fadiga sob Condições de *Fretting* com o Cabo CAA 397,5 MCM - IBIS.

GRAU: Mestre

ANO: 2009

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Tânia Maria de Oliveira Serra Hortêncio  
Rua T-47 n° 111 apt°1701 Setor Oeste  
74.140-120 - Goiânia - GO - Brasil  
Correio Eletrônico: [tania.hortencio@gmail.com](mailto:tania.hortencio@gmail.com)



## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Luiz e Elcy, verdadeiros heróis, exemplos de paciência, perseverança e empreendedorismo, meus maiores incentivadores.

Aos meus filhos, Lucas e Juliana e ao meu esposo Idalino, meus grandes amores, pela compreensão e carinho.

Aos meus irmãos Juneca, Manoel, Túlia e ao meu sobrinho Gustavo, meus grandes amigos, pela alegria de viver em família e de forma especial ao meu irmão Marco Antônio que com certeza, mesmo não estando aqui entre nós, está muito feliz por esta minha conquista.

Ao Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Alex, pela sua orientação e incentivo em todas as etapas deste trabalho.

À CELG Distribuição S.A, pela viabilização desta pesquisa, através do projeto P&D intitulado “Efeito da carga de pré-esticamento na resistência à fadiga de cabos condutores de energia”, em especial aos engenheiros Rafael Murolo, Claret, Gonçalo e Rafael Nielson.

Aos professores Aida, Daniel e Jorge, e ao Leo, que se tornaram grandes amigos durante o desenvolvimento desta pesquisa, pela competência, dinamismo e presteza.

Ao eng<sup>o</sup> Carlos Luiz, companheiro durante o período das aulas e das viagens à Brasília.

A equipe do Setor de Engenharia de Linhas de Transmissão da CELG D, pelo empreendedorismo, determinação e eficiência no desempenho das atividades de projeto e obras de linhas de transmissão, principalmente na minha ausência.

À Deus, minha grande inspiração.

## DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, Luiz e Elcy,  
Aos meus filhos Lucas e Juliana,  
Ao meu esposo Idalino*

*“Se eu pudesse deixar algum presente a você, deixaria aceso o sentimento de amar a vida dos seres humanos. A consciência de aprender tudo que foi ensinado pelo tempo a fora. Lembraria os erros que foram cometidos para que não mais se repetissem. A capacidade de escolher novos rumos. Deixaria para você se pudesse, o respeito àquilo que é indispensável: além do pão, o trabalho. Além do trabalho, a ação. E, quando tudo mais faltasse, um segredo: o de buscar no interior de si mesmo a resposta e a força para encontrar a saída”.*

*Mahatma Gandhi*

## RESUMO

O presente trabalho é de natureza experimental e, visa apresentar uma contribuição sobre o estudo da estimativa de vida útil de cabos condutores de energia elétrica, tendo como referência a análise da resistência à fadiga por *fretting*. Em particular, o levantamento de dados preliminares que possibilitem a determinação da curva de durabilidade (Curva de *Wöhler* ou S-N) da montagem do cabo CAA 397,5 MCM - IBIS, com o grampo de suspensão monoarticulado, assim como, identificar as características associadas ao aspecto e posicionamento das falhas encontradas neste tipo de cabo. Testes a uma mesma amplitude de tensão foram conduzidos, observando-se a ruptura do primeiro, segundo e terceiro fio de alumínio e registrando-se o número de ciclos experimentado pela montagem até o instante de cada quebra. Repetindo-se o teste para diferentes amplitudes de deslocamento pode-se então traçar uma curva da amplitude de tensão contra o número de ciclos, a qual é denominada de Curva S-N ou de *Wöhler*. Para estabelecer a tensão gerada na região de falha utilizou-se a fórmula de *Poffenberger-Swart* (1965). Os ensaios foram executados, de acordo com as recomendações da CIGRE (1985), EPRI (1979) e IEEE (1978), em uma bancada de 46,8 metros de comprimento, em ambiente climatizado, com sistema de controle dos equipamentos totalmente informatizado. Para a combinação cabo-grampo usada, a Curva Limite de Segurança da CIGRÉ (CSBL) mostrou-se muito conservativa, isto é, a vida do cabo é de 5 a 10 vezes maior quando calculada utilizando a curva específica do material como referência. Através do mapeamento das falhas constatou-se que para amplitudes de deslocamento menores que 1,0 mm, de maneira geral as falhas ocorreram na camada externa, já para amplitudes maiores a maior incidência até três falhas, foi na camada interna. O valor médio das distâncias das falhas na camada externa foi de 26,7 mm e na camada interna foi de 26,2 mm. Esta constatação evidencia que a previsão da vida útil em fadiga do cabo é de grande importância para as atividades de manutenção, isto porque, as quebras dos fios ocorrem dentro do grampo de suspensão e, portanto não podem ser identificadas nas inspeções visuais.

## ABSTRACT

The present work consists of an experimental research on fretting fatigue of an ACSR IBIS overhead conductor, with the objective to contribute to the study of the estimated fatigue life of such components. More specifically, tests were conducted in the same bending displacement amplitude (peak to peak) at a position on the cable 89 mm away from the last point of contact between cable and the mono-articulated aluminium clamping system. The rupture of the first, second and third aluminum strands were monitored as well as the number of cycles experienced by the assembly until the moment of each break. Repeating the test for different levels of prescribed displacement amplitudes one can then plot a curve of stress amplitude *versus* fatigue life, the so called S-N or Wöhler's Curve. To correlate the prescribed displacement with stress amplitude Poffenberger-Swart equation was used. The tests were performed in accordance with the recommendations of CIGRE (1985), EPRI (1979) and IEE (1978), in a 46.8 meters long span, in air conditioned environment and using a closed loop control system to assure the repeatability of the tests. The results of the tests showed that, for the conductor/clamp mounting used, the CIGRE Safe Border Line (CSBL) curve was extremely conservative. The actual conductor life was 5 to 10 times higher than the value estimated by the CSBL for the same level of stress amplitude. Such result emphasizes the need to raise specific laboratory S-N curves for different cable/clamp assemblies should accuracy of life estimates be pursued. Mapping the wire failures it was found that for displacement amplitudes smaller than 1 mm, the failures generally occurred in the outer layer, while for amplitudes larger than 1 mm, they preferably occurred in the inner aluminium layer, for up to three failures. Such wire breaks were localized inside the clamp at average distances of 26.7 mm in the outer layer and 26.2 mm in the inner layer, both measured from the clamp mouth. The fact that the broken strand occurs well within the suspension clamp means that it can not be identified by visual inspection and that even inspections by infrared thermography may not be effective, demonstrating the need to establish an accurate methodology to estimate the remaining conductor life in order to allow maintenance before a catastrophic breakage of the whole cable.

# SUMÁRIO

<b>1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>01</b>
<b>1.1- O ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>01</b>
<b>1.2- OBJETIVO .....</b>	<b>05</b>
<b>1.3- JUSTIFICATIVAS .....</b>	<b>06</b>
<b>1.4- APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....</b>	<b>08</b>
<b>2 - REVISÃO TEÓRICA .....</b>	<b>09</b>
<b>2.1- FADIGA .....</b>	<b>09</b>
<b>2.1.1 -Conceito de Fadiga.....</b>	<b>09</b>
<b>2.1.2 -Caracterização do Processo de Fadiga .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1.3 - Definições Fundamentais dos Ciclos de Tensão .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1.4 - Curva de <i>Wöhler</i> ou Curva S-N.....</b>	<b>18</b>
2.1.4.1 - Determinação da Curva S-N.....	18
2.1.4.2 - Fatores que influenciam a Curva S-N .....	21
2.1.4.3 - Efeito da Tensão Média sobre a Vida em Fadiga .....	24
<b>2.1.5 - Limites de Resistência à Fadiga.....</b>	<b>26</b>
2.1.5.1 - Limite de Segurança da CIGRE .....	27
2.1.5.2 - Limite de Segurança do EPRI e IEEE .....	29
<b>2.2 - CARREGAMENTOS COM AMPLITUDE VARIÁVEL.....</b>	<b>29</b>
<b>2.2.1 - Teoria de Acúmulo de Dano - Teoria de <i>Miner</i>.....</b>	<b>29</b>
<b>2.2.2 - Método de Contagem de Ciclos <i>Rain Flow</i>.....</b>	<b>32</b>
<b>2.3- FADIGA DE CABOS CONDUTORES .....</b>	<b>33</b>
<b>2.3.1 - Fadiga por <i>Fretting</i> .....</b>	<b>33</b>
<b>2.3.2 - Equação de <i>Poffenberger - Swart</i> .....</b>	<b>35</b>
<b>3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL - MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>38</b>
<b>3.1 - MATERIAIS.....</b>	<b>39</b>
<b>3.1.1 -Grampo de Suspensão.....</b>	<b>39</b>
<b>3.1.2 - Cabo Condutor.....</b>	<b>41</b>
<b>3.2 - PLANEJAMENTO DOS TESTES.....</b>	<b>42</b>
<b>3.2.1 - Definição dos Parâmetros que Controlam os Ensaios .....</b>	<b>42</b>

<b>3.3 - DESCRIÇÃO DA BANCADA .....</b>	<b>44</b>
<b>3.3.1 -Visão Geral.....</b>	<b>44</b>
<b>3.3.2 -Mecanismo de Tracionamento do Cabo .....</b>	<b>46</b>
<b>3.3.3 - Mecanismo Excitador.....</b>	<b>48</b>
<b>3.3.4 -Montagem do Grampo de Suspensão.....</b>	<b>49</b>
<b>3.3.5 - Dispositivo para Fixação do Grampo de Suspensão .....</b>	<b>50</b>
<b>3.3.6 -Dispositivo de Detecção da Quebra de Fios.....</b>	<b>51</b>
<b>3.3.7 - Sistema de Aquisição de Dados.....</b>	<b>53</b>
<b>3.4 - METODOLOGIA .....</b>	<b>54</b>
<b>3.4.1 - Preparação do Corpo de Prova .....</b>	<b>54</b>
<b>3.4.2 -Montagem do Corpo de Prova na Bancada .....</b>	<b>56</b>
<b>3.4.3 - Operação da Bancada .....</b>	<b>58</b>
<b>4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>60</b>
<b>4.1 - RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS .....</b>	<b>60</b>
<b>4.2 -CURVA S-N PRELIMINAR DO CABO IBIS X CURVA CSBL.....</b>	<b>63</b>
<b>4.3 - MAPEAMENTO DO POSICIONAMENTO DAS FALHAS .....</b>	<b>66</b>
<b>4.4 - CURVA S-N: IBIS X CSBL X GROSBEAK X LINNET X LIGA 6201 T 81 ....</b>	<b>73</b>
<b>5 - CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA PROJETOS FUTUROS.....</b>	<b>77</b>
<b>5.1 - CONCLUSÕES.....</b>	<b>77</b>
<b>5.2 – PROPOSTAS PARA PROJETOS FUTUROS .....</b>	<b>80</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>81</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>85</b>
<b>A - ESPECIFICAÇÕES DOS EQUIPAMENTOS DO LABORATÓRIO DE FADIGA E INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE CABOS CONDUTORES DE ENERGIA.....</b>	<b>86</b>
<b>A.1 – LOAD WASHER.....</b>	<b>86</b>
<b>A.2 –TALHA DE ALAVANCA.....</b>	<b>87</b>
<b>A.3 – CÉLULAS DE CARGA .....</b>	<b>88</b>
<b>A.3.1 –Célula de Carga – Tração Cabo .....</b>	<b>88</b>
<b>A.3.2 - Célula de Carga – Shaker .....</b>	<b>89</b>
<b>A.4 – ATUADOR ELETROMECHANICO.....</b>	<b>90</b>

<b>A.5 – ACELERÔMETRO .....</b>	<b>91</b>
<b>A.6 –SHAKER ELETROMECHANICO.....</b>	<b>92</b>
<b>A.7 – SENSORES <i>LASER</i>.....</b>	<b>93</b>
<b>A.8 – EXTENSÔMETRO .....</b>	<b>94</b>
<b>A.9 –AQUISITOR DE DADOS .....</b>	<b>95</b>
<b>A.10 – NO BREAKS .....</b>	<b>96</b>
<b>A.11 – AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA .....</b>	<b>97</b>
<b>A.12 – TORQUÍMETRO.....</b>	<b>98</b>
<b>B – RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS.....</b>	<b>99</b>
<b>C – CARACTERÍSTICAS DO CABOS CONDUTORES E LIGAS DE ALUMÍNIO ANALISADOS.....</b>	<b>100</b>
<b>C.1 – CABO CONDUTOR GROSBEAK .....</b>	<b>100</b>
<b>C.2 – CABO CONDUTOR LINNET.....</b>	<b>100</b>
<b>C.3 – LIGA DE ALUMÍNIO 1359 H 19.....</b>	<b>101</b>
<b>C.4 – LIGA DE ALUMÍNIO 6201 T 81 .....</b>	<b>101</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Fator de Acabamento Superficial.....	22
Tabela 2.2 - Fator de Temperatura.....	23
Tabela 2.3 - Constantes da Curva Limite de Segurança ( <i>Safe Border Line</i> ). ....	29
Tabela 2.4 - Limites de Resistência a Fadiga do EPRI.....	29
Tabela 3.1 - Características dimensionais e estruturais do cabo condutor.....	41
Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio 1350-H19.....	42
Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios para EDS 20%.....	62
Tabela 4.2 - Expectativa de vida para Curva S-N preliminar do cabo IBIS e para a CSBL .....	65
Tabela 4.3 - Ordem das Falhas por Camada .....	67
Tabela 4.4 - Posição das falhas nos fios das amostras do cabo IBIS ensaiadas.....	69
Tabela A.1 - Especificações da <i>Load washer</i> .....	86
Tabela A.2 - Especificações da <i>Talha de Alavanca</i> .....	87
Tabela A.3 - Especificações das Células de Carga de Tração do Cabo.....	88
Tabela A.4 - Especificações das Células de Carga do <i>Shaker</i> Eletromecânico .....	89
Tabela A.5 - Especificações do Atuador Eletromecânico Linear.....	90
Tabela A.6- Especificações dos Acelerômetros .....	91
Tabela A.7 - Especificações do <i>Shaker</i> Eletromecânico.....	92
Tabela A.8 - Especificações dos Sensores <i>Lasers</i> .....	93
Tabela A.9 - Especificações do Extensômetro .....	94
Tabela A.10 - Especificações do Aquisitor de Dados .....	95
Tabela A.11 - Especificações dos <i>No Breaks</i> .....	96
Tabela A.12 - Especificações do Amplificador de Potência PA 141 .....	97
Tabela A.13 - Especificações do Amplificador de Potência CP 123 .....	97
Tabela A.14 - Especificações do Torquímetro .....	98
Tabela B.1 - Resultados dos Ensaios Realizados nas 9 Amostras.....	99
Tabela C.1 - Características dimensionais e estruturais do cabo condutor GROSBEAK .	100
Tabela C.2 - Características dimensionais e estruturais do cabo condutor LINNET .....	100
Tabela C.3 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio 1350 H 19 .....	101
Tabela C.4 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio 6201 T 81 .....	101



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fluxograma do processo de fadiga .....	10
Figura 2.2 - Elementos de nucleação de trincas em componentes sujeitos a esforços ciclos .....	11
Figura 2.3 - Elementos de nucleação de trincas em componentes com concentradores de tensão. ....	11
Figura 2.4 - Processo de avanço de trinca por fadiga .....	12
Figura 2.5 - Aspectos da fratura por fadiga.....	13
Figura 2.6 - Representação de um processo de fratura por fadiga cujo material é o aço ....	14
Figura 2.7 - Tipos de tensões cíclicas em fadiga.....	15
Figura 2.8 - Ciclos de tensão de fadiga.....	16
Figura 2.9 - Curvas S-N esquemáticas para um aço maciço e uma liga de alumínio .....	19
Figura 2.10 - Influência da razão de tensão e tensão média para o ensaio de fadiga .....	24
Figura 2.11 - Influência da tensão média na tensão limite de fadiga .....	25
Figura 2.12 - Curva Safe Border Line, bem como as demais curvas compiladas pela CIGRE .....	28
Figura 2.13 - Curva de fadiga demonstrando a Teoria de <i>Miner</i> .....	32
Figura 2.14 - Fadiga por <i>fretting</i> no cabo condutor, localizada no grampo de ancoragem .	34
Figura 2.15 - Fadiga por <i>fretting</i> .....	34
Figura 2.16 - "Pó escuro" .....	35
Figura 2.17 - Localização do "Ponto 89" .....	37
Figura 3.1 - Montagem esquemática cabo/grampo mostrando a posição padrão para medida da amplitude de deslocamento $Y_B$ .....	39
Figura 3.2 - Grampo de suspensão monoarticulado - Geometria .....	40
Figura 3.3 - (a) Conjunto cabo condutor/grampo de suspensão monoarticulado .....	40
Figura 3.3 - (b) Parafuso tipo U do grampo de suspensão .....	40
Figura 3.4 - Seção do cabo condutor IBIS 397,5 MCM - Formação 26/7.....	41
Figura 3.5 - Grampo de suspensão monoarticulado rompido após a aplicação do torque igual a 6,0 daNm.....	43
Figura 3.6 - Amplitude de deslocamento $-Y_B$ .....	44
Figura 3.7- Desenho esquemático da montagem da bancada de ensaios.....	45
Figura 3.8 - Bloco móvel montado em uma base com rolamentos e os trilhos.....	45

Figura 3.9 - Bloco fixo com o trilho para deslocamento do <i>shaker</i> .....	46
Figura 3.10 - Bloco fixo 3 que contém os equipamentos para controle de tração do cabo .	46
Figura 3.11 - Talha de alavanca ancorada ao bloco de fixação 1.....	47
Figura 3.12 - (a) Fixação do cabo através do grampo de ancoragem passante no bloco fixo 3 .....	47
Figura 3.12 - (b) Detalhe do grampo de ancoragem passante e a célula de carga.....	47
Figura 3.13- Painel de controle da carga de pré-esticamento aplicada no cabo.....	48
Figura 3.14 - (a) Montagem da haste rígida de alumínio.....	49
Figura 3.14 - (b) Acoplamento do <i>shaker</i> ao cabo .....	49
Figura 3.15 - Vista superior da montagem cabo/grampo .....	50
Figura 3.16 - Montagem do grampo de suspensão sobre o bloco móvel.....	50
Figura 3.17 - Desenho esquemático ilustrando a forma de medição do ângulo de rotação	52
Figura 3.18 - Dispositivo de detecção de quebra de fios .....	53
Figura 3.19 - Sala de controle.....	54
Figura 3.20- Retirada do cabo condutor da bobina.....	55
Figura 3.21- Polias auxiliares posicionadas ao longo do vão de teste.....	55
Figura 3.22 - Corte do corpo de prova utilizando-se disco de corte.....	56
Figura 4.1 - Acelerômetro, posicionado sobre a braçadeira que une o cabo a haste do <i>shaker</i> e célula de carga localizada abaixo da braçadeira .....	61
Figura 4.2 - Montagem cabo/grampo mostrando no detalhe, o acelerômetro na posição padrão do ponto a 89 mm da boca do grampo .....	61
Figura 4.3 - Curva $S_a \times N - CSBL \times$ Cabo IBIS .....	64
Figura 4.4 - Gráfico com os sinais relativos à rotação do cabo indicando momento das respectivas quebras para a Amostra 3.....	68
Figura 4.5 - Detalhe da Amostra 3 com falhas em três fios da camada externa .....	68
Figura 4.6 - Localização da distância das falhas na camada externa da Amostra 5.....	69
Figura 4.7- Detalhe da Amostra 2 com falhas em dois fios da camada interna .....	70
Figura 4.8 - Percentuais de todas as falhas ocorridas nas camadas externas e internas de cada amostra ensaiada.....	71
Figura 4.9 - Percentuais para o limite de três falhas ocorridas nas camadas externas e internas de cada amostra ensaiada.....	72
Figura 4.10 - Análise da distância média ( $D_{FM}$ ) das falhas no fio de alumínio .....	73
Figura 4.11 - Curvas S-N: IBIS, CSBL, GROSBEAK, LINNET e LIGA 6201 .....	75

Figura A.1 - Load washer - Modelo LW 1538.....	86
Figura A.2 - Talha de Alavanca - Carl Stahl - Modelo HX 3200 .....	87
Figura A.3 - Célula de carga - Modelo Z.....	88
Figura A.4 - Célula de carga - Modelo CSR .....	88
Figura A.5 - Célula de carga - Modelo 208C03 .....	89
Figura A.6 - Atuador eletromecânico linear - Modelo 62B1 .....	90
Figura A.7 -Acelerômetro - Modelo 352C33.....	91
Figura A.8 - <i>Shaker</i> eletromecânico - Modelo Inc. ET - 127.....	92
Figura A.9 - Sensores laser - Modelo CH-8501 .....	93
Figura A.10 - Extensômetro .....	94
Figura A.11 - Aquisitor de dados - Modelo AC 2122 .....	95
Figura A.12 - No break - Modelo Star-Volt II .....	96
Figura A.13 - No break - Modelo UTD .....	96
Figura A.14 -Amplificador de potência - Modelo PA 123 .....	97
Figura A.15 -Torquímetro .....	98

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	constante do material.
b	constante do material.
D	função do dano.
$D_{FM}$	a distância média das falhas a partir da boca do grampo.
d	diâmetro do cabo condutor.
$d_a$	diâmetro do fio de aço.
$d_{al}$	diâmetro do fio de alumínio.
E	módulo de elasticidade
$E_a$	módulo de elasticidade do aço.
$E_{al}$	módulo de elasticidade do alumínio.
EDS	every day stress
f	freqüência.
I	momento de inércia.
$I_{min}$	momento de inércia mínimo.
K	constante da fórmula de <i>Poffenberger-Swart</i> .
$k_a$	fator de acabamento superficial.
$k_b$	fator de escala.
$k_c$	fator de carga.
$k_d$	fator de temperatura.
$k_e$	fator para outros efeitos.
n	quantidade de ciclos para os respectivos níveis de tensão obtidos em campo.
$n_a$	número de fio de aço.
$n_{al}$	número de fio de alumínio.
N	número de ciclos.
$N_f$	número de ciclos de vida.
p	constante da fórmula de <i>Poffenberger-Swart</i> .
R	razão entre tensões.
S	tensão.
$S_a$	amplitude de tensão.
$S'_e$	tensão limite de fadiga de ensaio.

$S_m$	tensão média.
$S_{m\acute{a}x}$	tensão máxima.
$S_{m\acute{m}n}$	tensão mínima.
$S_T$	resistência à temperatura de operação.
$S_{RT}$	resistência à temperatura ambiente.
$\Delta S$	variação de tensão.
$S_u$	limite de ruptura do material.
$\sigma_a$	amplitude de tensão.
$\sigma_{ar}$	tensão limite de fadiga, para $\sigma_m = 0$ .
$\sigma_m$	tensão média.
$\sigma_{m\acute{a}x}$	tensão máxima.
$\sigma_{m\acute{m}n}$	tensão mínima.
$\sigma_{US}$	tensão limite de resistência.
$\sigma_y$	tensão limite de escoamento.
$\Delta \sigma$	variação de tensão.
$T$	tração no cabo condutor.
$V$	duração da vida do condutor.
$Y_B$	amplitude de deslocamento.

# CAPÍTULO 1

## 1 - INTRODUÇÃO

### 1.1 – O ESTADO DA ARTE

Desde o início do século passado o efeito da ação do vento nos cabos condutores de linhas aéreas de transmissão é um assunto pesquisado no meio técnico científico, destacando-se Varney (1926) e Nefzger (1933), porém somente em 1968, foi dado destaque ao estudo sobre o efeito da fadiga por *fretting* em cabos condutores, devido a vibração. Nesta época Fricke e Rawlins (1968) realizaram ensaios tanto nas linhas de transmissão em operação, como em laboratório e constataram que em todos os casos as trincas nos cabos foram originadas a partir de marcas causadas pelo efeito da fadiga por *fretting*. Eles foram os primeiros a apresentar a evolução do dano por *fretting* através de ensaios metalográficos e fotos das superfícies quebradas, concluíram que deveria ser utilizado uma superfície de proteção como procedimento para minimizar este efeito.

Em 1970, Moecks fez várias fotos de análises metalográficas relativas a *fretting* e quebra de fios, confirmando que a “corrosão friccional” tem uma influência substancial na resistência a fadiga dos condutores encordoados. No ano seguinte, Dulhunty (1971) também apresentou fotos de fios quebrados próximos ao ponto de fixação dos amortecedores, onde indicava claramente que as marcas de *fretting* eram os pontos de início das trincas.

Uma revisão extensa do processo de iniciação e propagação de trincas em fios de condutores foi apresentada por Rawlings em 1979. Várias maneiras de correlacionar à resistência em fadiga do cabo aos dados de vibração medidos em campo foram revisadas e propostas neste trabalho. Entretanto, reconheceu-se que o complexo estado de tensão provocado pelo contato mecânico e a presença de um desgaste superficial provocado pelo movimento relativo de pequena amplitude (denominado desgaste por *fretting*) entre os fios tornavam a quantificação do problema um desafio extremamente complexo.

O Grupo de Trabalho 04 do Comitê de Estudo 22 da CIGRE em 1979, apresentou recomendações para a avaliação da resistência à fadiga de condutores de linhas de transmissão e demonstrou graficamente que a resistência em fadiga de metais sob condições de *fretting* era substancialmente reduzida com relação à condição sem o *fretting*.

Ramey e Townsend, em 1981, declararam que o *fretting* é o parâmetro mais importante na identificação da localização da quebra do fio e, também, o maior parâmetro para determinar o número de ciclos que causará esta quebra, para um dado nível de amplitude.

Em 1981, Ramey e Silva realizaram uma série de testes para avaliar a eficiência da redução da amplitude de vibração na vida à fadiga de cabos condutores. Neste trabalho um aparato experimental foi desenvolvido para simular em ambiente de laboratório as condições tão próximas quanto possível às do campo, principalmente o carregamento eólico a que o cabo está submetido. Trinta e três testes foram realizados com cabos CAA (Cabos de Alumínio com Alma de Aço). A maioria dos cabos testados foi submetida inicialmente a altas amplitudes de vibração e, após a ruptura de alguns fios (geralmente dois ou três), a amplitude de vibração era reduzida e o teste prosseguia. O uso de um LVDT (*Linear Voltage Displacement Transducer*) para medir a rotação do condutor permitiu a monitoração cronológica das falhas nos fios. Este acompanhamento fornecia o número de ciclos de fadiga e a localização exata de cada fio rompido. Os resultados destes testes mostraram que a redução na amplitude de vibração dos cabos indicava uma forma eficiente de evitar a falha de outros fios que compõem o cabo. Cabos testados a altas amplitudes que apresentaram alguns fios rompidos após alguns poucos milhões de ciclos, resistiram a vidas de até 108 ciclos, sem apresentar outras falhas, quando a amplitude de vibração foi reduzida a aproximadamente um terço da amplitude aplicada inicialmente. Assim, os autores sugeriram que o uso de amortecedores capazes de reduzir os níveis de vibração eólica nos cabos poderia ser uma forma eficiente de conter o dano por fadiga nestes elementos.

No Guia de Testes de Resistência de Condutores Montados em Grampos, escrito pelo Grupo de Trabalho WG 04 SC 22 da CIGRE (1985), foi relatado que o efeito do *fretting* ocorre nos fios das camadas adjacentes do condutor e entre os fios externos do condutor, na superfície de contato com o grampo ou ponto de restrição, ou seja, nos acessórios de linhas de transmissão.

Em meados de 1988, um artigo da CIGRE, apresentou os princípios básicos do mecanismo do *fretting* em cabos encordoados e seus perigosos efeitos no processo de fadiga. Além disso, relatava que a presença de um pó de cor marrom na região das montagens cabo/grampo era uma indicação de que o cabo estava operando em níveis perigosos de vibração e um processo de falha estava em curso. Este "pó" é constituído de partículas muito duras e abrasivas produzidas pelo desgaste devido ao *fretting* entre os fios de alumínio. Em contato com o ar estas partículas se oxidam e ganham uma coloração marrom escura, formando o óxido de alumínio  $Al_2O_3$ , Azevedo (2002). Posteriormente, Azevedo *et al* (2009) constataram que na composição deste pó escuro há presença de óxido de silício,  $SiO_2$ , formando lamínulas cortantes que aceleram o processo de desgaste.

Outro estudo experimental desenvolvido por Ramey *et al* (1986) visava obter curvas S-N (curvas de amplitude de tensão em relação ao número de ciclos) para cabos CAA tipo "Drake". Neste trabalho vibrações eólicas eram simuladas em laboratório utilizando-se um vibrador eletromagnético conectado a montagem cabo/grampo de suspensão. Para cada teste o número de ciclos de carga necessários para a ruptura de um fio era gravado e o experimento era interrompido após a ruptura de cinco fios. Os fios de alumínio eram fabricados de uma liga 1350-H19 e os fios de aço possuíam uma cobertura de zinco. Quarenta testes foram realizados para construir as curvas S-N, onde os resultados obtidos mostraram que, apesar do alumínio não possuir um limite de fadiga bem definido, os testes com o cabo "Drake" apresentaram um limite de fadiga (para a ruptura do primeiro fio) de 21,31MPa. Mais ainda, observou-se que a dispersão dos dados experimentais aumentou significativamente para baixos níveis de tensão.

O efeito da geometria dos grampos de suspensão no processo de fadiga dos cabos condutores é outro fator que tem sido estudado. Para avaliar tal efeito, Preston *et al* (1986) realizaram uma série de testes de fadiga em cabos CAA utilizando grampos de suspensão com três diferentes raios longitudinais. Medidas de deformações estática e dinâmica foram conduzidas nas camadas exteriores do cabo, observando-se que quanto maior o raio de curvatura do grampo de suspensão, menor o nível de tensão medido e, conseqüentemente, maior a resistência à fadiga da montagem. Também verificou-se que todos os fios rompiam na região de contato do cabo com o grampo, onde o desgaste por "*fretting*" estava sempre presente. A maioria dos fios rompidos (aproximadamente 75% deles) pertencia às camadas intermediárias do cabo, onde o desgaste por "*fretting*" foi mais severo.



Em 1993, Gopalan desenvolveu um experimento alternativo em que as oscilações dos cabos foram provocadas pela atração e repulsão eletromagnética de dois outros cabos paralelos. Estes cabos paralelos, um sob corrente alternada e outro sob corrente contínua, foram excitados perto de suas frequências naturais. Para se menosprezar os efeitos de ponta, foram propostos que os fios fossem muito maiores que o espaço entre eles. Gopalan enfatiza que apesar dos testes em laboratório negligenciarem os efeitos de umidade, temperatura e direção variável do vento, estes ainda podem fornecer uma boa indicação das variáveis que controlam o processo de fadiga dos cabos, além de oferecer uma opção mais econômica quando comparada a testes em campo.

Em 1995, Zhou *et al* desenvolveram um aparato experimental para testes de fadiga por *fretting* dos fios que constituem os cabos condutores. Nestes experimentos um fio de alumínio H19 era submetido a uma carga de fadiga aplicada por um dispositivo motor-excêntrico. Uma pré-tensão era induzida no espécime utilizando-se um sistema mola-parafuso e transversalmente ao fio, uma carga de contato era aplicada por um conjunto de sapatas cilíndricas para simular o contato entre o fio e o grampo de suspensão ou o contato entre fios, que acontecem no cabo condutor. O objetivo destes testes era o de comparar o comportamento à fadiga do fio quando testado isoladamente com o seu comportamento quando o cabo condutor como um todo era testado. Para isto, as superfícies em contato onde o desgaste por *fretting* ocorria (nos testes com o fio) eram analisadas em detalhe e comparadas com zonas típicas observadas em testes completos com cabos, (Zhou, 1996). Os testes com os fios mostraram que as zonas em contato eram divididas em uma zona de adesão, sem desgaste, e uma zona de escorregamento, com perda de material. O tamanho destas zonas dependia das condições de carregamento aplicadas ao fio. Observou-se que maiores amplitudes da carga de fadiga provocavam um crescimento da zona de escorregamento e, uma conseqüente redução na vida à fadiga do fio. Assim como verificado anteriormente por Preston *et al* (1986) e Ramey (1984), as trincas invariavelmente tinham início nas zonas de escorregamento. Após uma série de análises, os pesquisadores concluíram que, as características das zonas em contato, assim como os modos de nucleação e propagação das trincas em testes de fadiga por *fretting* em fios e cabos, eram similares. Portanto, parece ser possível usar os resultados de simples testes em fios para prever o comportamento à fadiga do conjunto cabo/grampo. Esta conclusão é de extremo interesse pois testes com fios são muito mais simples e baratos para serem implementados do que um teste completo envolvendo o cabo e o grampo.

Em 2006, Henriques desenvolveu uma bancada de ensaios mecânicos à fadiga de cabos condutores, bem como uma metodologia para ensaios de fadiga. Esta bancada foi projetada e construída seguindo as recomendações da CIGRE (1985), EPRI (1979) e IEEE (1978). Além disto, foram implementados novos equipamentos e procedimentos para monitoração e minucioso controle na execução dos testes. Os primeiros ensaios realizados foram com amostras do cabo CAA 636 MCM – GROSBEAK. Os resultados obtidos mostraram que a Curva Limite de Segurança (Safe Border Line) é muito conservativa, isto é, prevê vida no mínimo 8 (oito) vezes menores que as obtidas experimentalmente. Constatou-se também que o fenômeno que ocorre na ligação cabo/grampo é muito mais severo e crítico que um problema clássico de fadiga. Isto porque quando a Curva S-N obtida é comparada a Curva de Fadiga do Material verifica-se que a resistência a fadiga do cabo reduz-se a menos da metade. Em 1999, a curva de fadiga levantada em ensaios realizados no CEPREL para o cabo CAA 336,4 MCM – LINNET, cabo utilizado em larga escala em linhas de transmissão da CEMIG, comprovou-se também que a Curva Limite de Segurança recomendada pela CIGRE e utilizada pela CEMIG leva à estimativas de vida conservativas (Castilho, 1999).

A partir desta breve revisão do estado da arte, pode-se constatar que a construção da bancada de ensaios de fadiga de cabos do ENM-UNB constitui em uma ferramenta essencial para o desenvolvimento das pesquisas brasileiras sobre fadiga por *fretting*, em cabos condutores de linhas aéreas de transmissão. Tendo em vista que nela poderão ser realizados experimentos rigorosamente controlados que possibilitarão a avaliação da vida útil de diversos cabos para vários níveis de tensão de pré-esticamento, além de viabilizar a criação de novos modelos de ferragens e acessórios para minimizar e/ou monitorar o efeito da vibração eólica nos cabos.

## **1.2 - OBJETIVO**

O presente trabalho é de natureza experimental e visa apresentar uma contribuição sobre o estudo da estimativa de vida útil de cabos condutores de energia elétrica, tendo como referência a análise da resistência à fadiga por *fretting*. Em particular, o levantamento de dados preliminares que possibilitem a determinação da curva de durabilidade (Curva de *Wöhler* ou S-N) da montagem do cabo CAA 397,5 MCM - IBIS, com o grampo de

suspensão monoarticulado. Assim como, identificar as características associadas ao aspecto e posicionamento das falhas encontradas neste tipo de cabo.

Os dados preliminares obtidos trarão novas e imprescindíveis informações acerca do fenômeno de fadiga sobre condições de *fretting* em cabos condutores tipo IBIS. Tais dados, associados a novas pesquisas, propiciarão descobertas no sentido de minimizar as ocorrências de falhas nos cabos, elementos básicos que compõem o sistema de distribuição e transmissão aéreo de energia elétrica no Brasil. Vale ressaltar que, até onde esta autora tem conhecimento, não existem dados publicados para este tipo de cabo.

### **1.3 – JUSTIFICATIVAS**

O grande desafio do sistema de energia elétrico é o de garantir a confiabilidade de suprimento e para tanto é necessário uma estrutura tecnológica otimizada que inicia no planejamento da transmissão e continua nas etapas subseqüentes, quais sejam: projeto, obra e operação/manutenção. Dentre os pontos estratégicos a serem monitorados estão os materiais utilizados para a construção das linhas aéreas de transmissão, destacando-se em especial o cabo condutor de energia elétrica.

Os condutores, como os demais materiais empregados na engenharia, estão sujeitos à falhas, as quais são decorrentes dos tipos e intensidades das solicitações a que são submetidos e também de sua capacidade de resistir às mesmas (FUCHS).

O vento atmosférico suave e de sentido constante é um tipo de solicitação que pode induzir nos cabos condutores vibrações de frequências elevadas que, dependendo do ângulo de incidência com estes cabos, pode provocar a sua ruptura por fadiga, junto aos pontos de restrição.

A interrupção no fornecimento de energia, provocada pela ruptura de cabos condutores de linhas de transmissão, tem ocorrido com frequência no sistema elétrico brasileiro, causando enormes prejuízos aos consumidores e as concessionárias de energia elétrica.

Tipicamente, a maioria dessas falhas está associada à fadiga do material, causada pela ação das forças eólicas. As falhas são caracterizadas pelo crescimento de trincas nos fios que constituem o cabo. Estas trincas são resultantes do processo de *fretting* e do carregamento cíclico do cabo, e invariavelmente ocorrem na superfície de contato entre o grampo de suspensão e o cabo, ou naquela entre o espaçador e o cabo. Este processo pode ser

acelerado pelo aumento súbito de carga nas linhas de transmissão, isto é, pelo efeito térmico da corrente elétrica na formação do ponto de fadiga do cabo condutor.

No dia 30 de abril de 2004, às 19:00 horas, houve o rompimento do cabo condutor 397,5MCM – IBIS, de uma linha de sub-transmissão da CELG D, chamada LT 138 kV Brasília Sul - Marajoara. Este acidente deixou 127.342 unidades consumidoras, o que corresponde a uma população de aproximadamente 636.700 habitantes, sem energia elétrica durante 33 horas, tempo este agravado devido à ruptura da estrutura em implantação durante os serviços de içamento. Estudos posteriores comprovaram que o rompimento do cabo da fase inferior ocorreu no ponto de fixação do grampo de suspensão. No caso, a primeira estrutura utilizada em substituição a que foi danificada, quebrou porque a resistência do concreto da peça era inferior ao prescrito por norma.

Constata-se, portanto, que houve uma sucessão de falhas iniciadas pela fadiga por *fretting* do cabo condutor, que comprometeram os serviços de fornecimento de energia elétrica pela concessionária, gerando prejuízos de toda a natureza, desde a falta de energia para os consumidores, indenizações e até o comprometimento da imagem da empresa. Este acidente despertou na equipe técnica da CELG D a necessidade de iniciar estudos sobre o assunto e que, após conhecer as pesquisas já iniciadas pela Universidade de Brasília, resolveu fazer uma parceria através de um P&D (Pesquisa e Desenvolvimento), o que foi prontamente aprovado pela Diretoria da Empresa.

Este trabalho trata, portanto, de uma pesquisa embrionária para subsidiar os estudos deste fenômeno, possibilitando novas pesquisas sobre o desenvolvimento de modelos eficientes de ferragens e métodos de aplicação de grampos de suspensão, novos procedimentos para manutenção preventiva e construção das linhas de transmissão, otimização dos projetos reduzindo altura cabo-solo, a partir do aumento do EDS (every day stress) e recondutoramento de linhas de transmissão em operação através do retensionamento dos cabos condutores. Desta forma, poderão ser minimizados os riscos de falhas nas linhas áreas de transmissão e subtransmissão, garantindo a confiabilidade do sistema elétrico.

## 1.4 – APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Esta pesquisa encontra-se estruturada em cinco capítulos, sendo este o primeiro, onde está inserido o estado da arte, ou seja, um breve resumo sobre algumas das principais pesquisas já desenvolvidas sobre fadiga por *fretting* e determinação da Curva S-N de cabos condutores de energia elétrica, no qual são enfocadas as descobertas mais notáveis e, também apresentados os objetivos, justificativas e a estrutura do trabalho.

A revisão teórica é abordada no segundo capítulo, onde é feita uma revisão sucinta sobre fadiga, carregamentos com amplitude variável e fadiga de cabos condutores.

O programa experimental é descrito no terceiro capítulo, onde são apresentadas as características dos materiais utilizados nos ensaios, o planejamento dos testes, além da bancada experimental e métodos utilizados para obtenção dos dados para determinação da Curva S-N.

No quarto capítulo faz-se a apresentação e discussão dos resultados obtidos no programa experimental, com a finalidade de avaliar a estimativa da vida útil do cabo condutor estudado.

Finalmente, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões obtidas e, tecidas as considerações finais.

## **CAPÍTULO 2**

### **2 – REVISÃO TEÓRICA**

#### **2.1 - FADIGA**

##### **2.1.1 – Conceito de Fadiga**

Segundo Moura Branco (1985), a fadiga de um metal é definida como um “fenômeno de enfraquecimento progressivo de um metal quando este está submetido a cargas dinâmicas ou repetidas”. Garcia (2000), corroboram, complementando que materiais metálicos quando submetidos à ação de esforços cíclicos, rompem-se sob tensões muito inferiores daquelas obtidas nos ensaios estáticos de tração e compressão e que a ruptura que ocorre nestas condições dinâmicas de aplicação de esforços é conhecida como ruptura por fadiga, a qual acontece após um tempo considerável do material em serviço.

A ASTM (*American Society for Testing and Materials*) define que, “Fadiga é um processo de alteração estrutural permanente, progressivo e localizado, que ocorre num material sujeito a condições que produzem tensões ou extensões dinâmicas num ponto ou em vários pontos, e que pode culminar em trincas ou numa fratura completa após um número suficiente de variações de carga”, citada por Moura Branco (1985). Com esta definição, a ASTM apresenta de forma irrefutável e resumida o processo de ruptura por fadiga.

Na década de 1850, o engenheiro alemão, August Wöhler, realizou os primeiros estudos sobre o comportamento de materiais metálicos submetidos a esforços cíclicos, que dentre os resultados obtidos nos ensaios realizados está um gráfico que relaciona a tensão versus o número de ciclos até a fratura do material, chamado de “Curva de Wöhler”, e que ainda hoje é largamente utilizada no meio técnico científico, sendo a referência básica para os ensaios de fadiga realizados em laboratório. A partir de então, com o desenvolvimento vertiginoso da indústria com ramificações multidisciplinares, este assunto se tornou um grande desafio tanto para os empreendedores, quanto para os pesquisadores, os quais têm como meta básica a fabricação de materiais econômicos com a máxima resistência à

fadiga, a partir do desenvolvimento de métodos de concepção e cálculos de estruturas sujeitas à fadiga.

### 2.1.2 – Caracterização do Processo de Fadiga

O processo de fadiga que pode ocasionar a ruptura da peça submetida a tensões dinâmicas, pode ser dividido em três etapas básicas: i) nucleação da trinca, ii) propagação da trinca, ou crescimento macroscópico, iii) ruptura final. A Figura 2.1 apresenta o fluxograma do processo de fadiga.

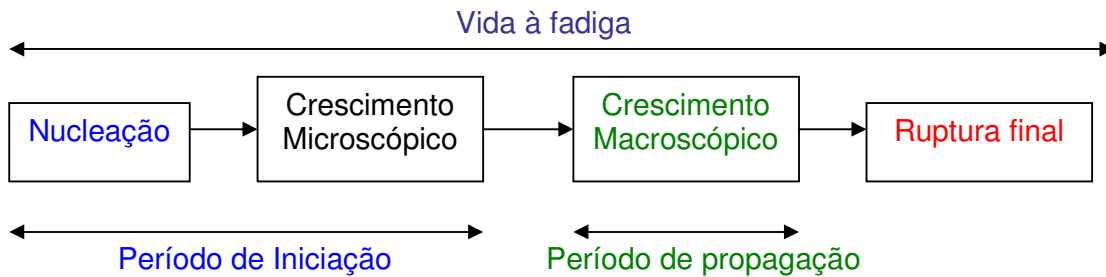


Figura 2.1 - Fluxograma do processo de fadiga

A primeira etapa, isto é a nucleação da trinca, consiste no início da trinca seguido pelo crescimento não perceptível ao olho nu. As trincas têm início em regiões de alta concentração de tensão ou regiões de baixa resistência local, entre as quais se destacam os defeitos de superfície, como ranhuras, pequenas trincas de usinagem, pontos de corrosão, mau acabamento superficial ou pontos que sofreram deformação localizada e principalmente, formas que compõem cantos em ângulos retos ou entalhes resultantes de falhas de projetos e os defeitos internos tais como, contornos de grão, porosidade acentuada e solidificação. Para as regiões livres de defeitos, as trincas podem ser nucleadas por concentração localizada de tensão, provocadas por deformações locais em bandas de deslizamento particulares. (Garcia, 2000). As Figuras 2.2 e 2.3 mostram respectivamente, os elementos de nucleação de trincas em componentes sujeitos à esforços cíclicos e concentradores de tensão.

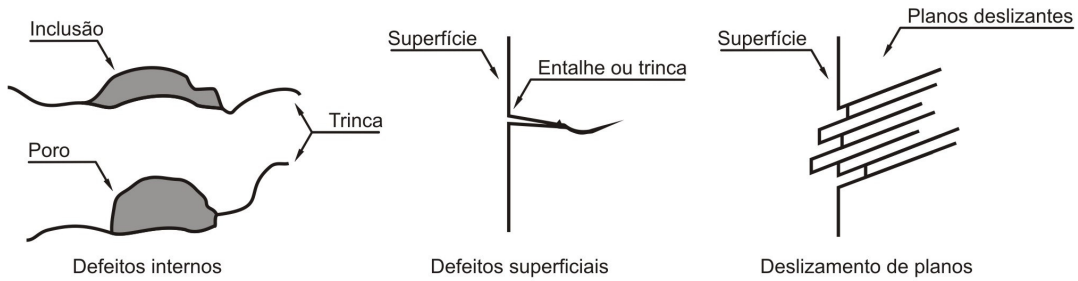


Figura 2.2 - Elementos de nucleação de trincas em componentes sujeitos à esforços cíclicos (Garcia, 2000 - modificado)

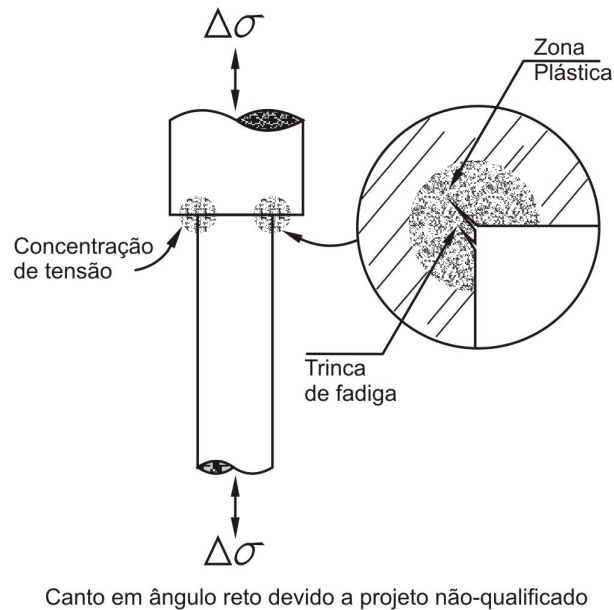


Figura 2.3 - Elementos de nucleação de trincas em componentes com concentradores de tensão, (Garcia, 2000 - modificado)

A propagação cíclica é a segunda etapa do processo de fadiga. Inicialmente devido a concentração local de tensão causada pelas imperfeições internas da peça, ocorre uma deformação plástica causada pela ação de tensão cíclica, mesmo com a tensão nominal abaixo do limite elástico, propiciando uma deformação localizada, favorecendo sobremaneira o crescimento de uma pequena trinca. A figura 2.4 mostra o processo de avanço de trinca por fadiga, podendo ser observado que a concentração de tensão (tração)



na ponta da trinca favorece o deslizamento de planos de 45° com o plano da trinca. Além disso, em resposta à deformação plástica localizada, a ponta da trinca torna-se curva com a aplicação de tensões de tração, sendo que na recuperação da tensão (ou tensão de compressão), a ponta é comprimida, formando novamente uma ponta aguda. Deste modo, o processo volta a repetir em cada ciclo de tensão, com um avanço relativo do comprimento da trinca de  $\Delta a$ , a cada novo ciclo.

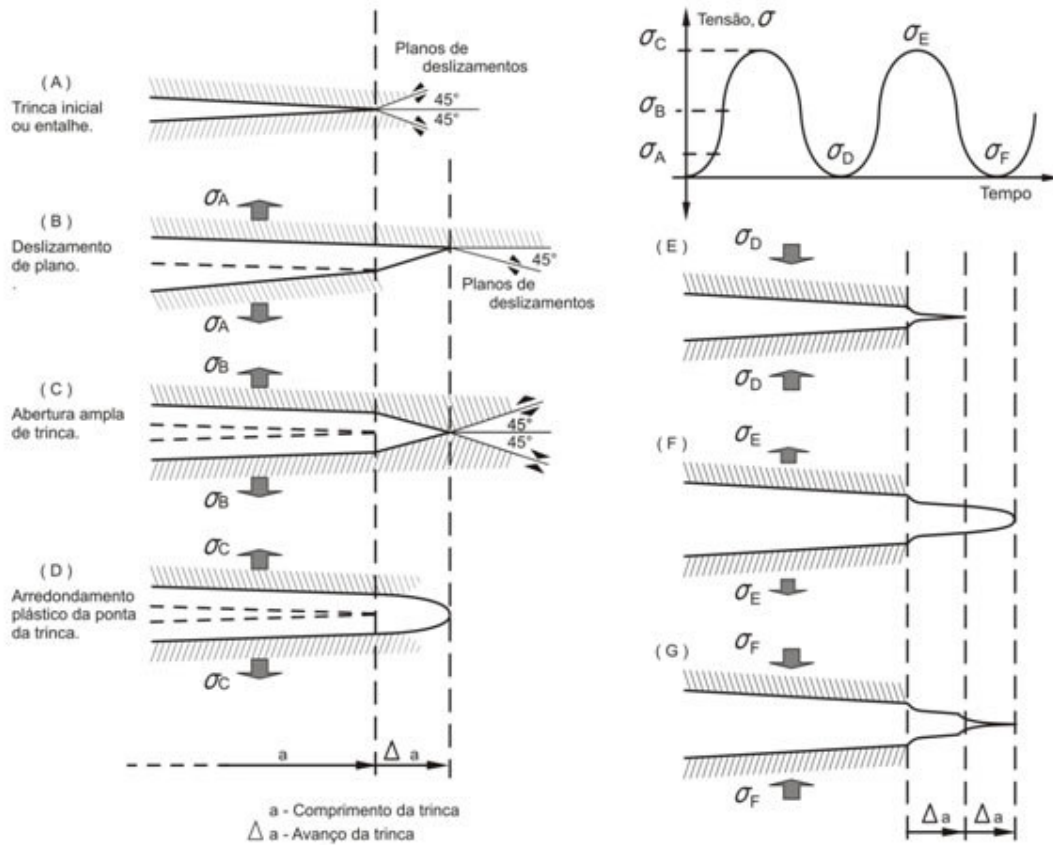


Figura 2.4 - Processo de avanço de trinca por fadiga, (Garcia, 2000 - modificado)

Ainda, segundo Garcia (2000), a trinca em fadiga avança de maneira cíclica, e a cada novo ciclo de tensão ou etapa de abertura ou fechamento, deixa na macroestrutura da superfície de fratura, marcas características que podem ser observadas ao microscópio eletrônico, chamadas de marcas de praia (*beach lines*). Essas marcas apresentam-se curvadas em relação a origem da falha, permitindo dessa forma, investigações que conduzam a identificação do início do processo de fratura. Pode-se observar que de maneira geral nas marcas de praia, as bandas mais claras representam uma propagação basicamente plana, já

as mais escuras, correspondem a uma propagação mais tortuosa e, portanto mais rugosas. É notório que as bandas mais claras representam níveis de tensões mais baixos, e que as bandas mais escuras, níveis de tensão mais elevados. Ressalta-se que as dezenas ou centenas de estrias se encontram dentro das marcas de praia.

A terceira e última etapa é a ruptura final, também chamada de falha catastrófica, a qual ocorre quando é atingido o valor crítico do comprimento da trinca,  $a_c$ , momento em que a seção transversal da peça remanescente não suporta a carga aplicada. A ruptura poderá apresentar características dúcteis ou frágeis, dependendo do material e dos níveis de tensões aplicadas. Vale ressaltar que a ruptura por fadiga ocorre sem aviso prévio, porque por vezes as trincas não podem ser identificadas a olhos nus. As Figuras 2.5 e 2.6 ilustram a representação de processo de fratura por fadiga cujo material é aço, mostrando o início da trinca (normalmente na superfície), a área de propagação da trinca de fadiga (marcas de praia) e a área da ruptura final.

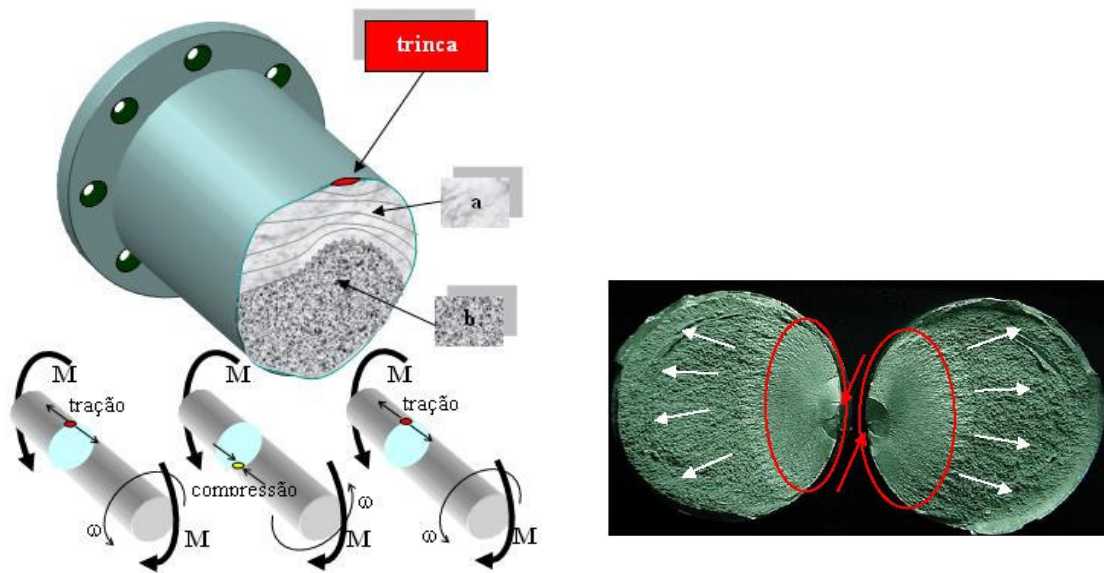


Figura 2.5 – Aspectos da fratura por fadiga - a= área de propagação da trinca e b= área da ruptura catastrófica

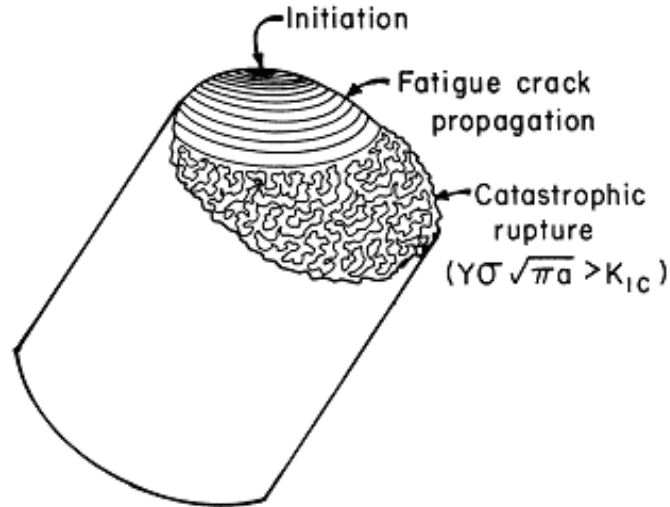


Figura 2.6– Representação de um processo de fratura por fadiga cujo material é o aço (Moía, 2001 - modificado)

### 2.1.3 Definições Fundamentais dos Ciclos de Tensão

A fadiga só se manifesta numa peça se a tensão aplicada for dinâmica, isto é, variar com o tempo, assim, um ciclo de tensão de fadiga traduz a variação da tensão aplicada com o tempo ou com o número de ciclos de aplicação da carga. Os principais tipos de ciclos de tensão de fadiga podem se dividir em dois grandes grupos: ciclos com amplitude de tensão constante, tais como alternado, repetido e pulsante, e ciclos com amplitudes de tensão variável, quais sejam, blocos e irregular ou aleatório. (Moura Branco, 1985).

As tensões aplicadas podem ser axial (tração-compressão), de flexão (dobramento) ou de torção (carga rotativa).

Para apresentação dos gráficos dos ciclos citados, inicialmente pode-se imaginar um eixo rotativo funcionando a velocidade constante e sem sobrecarga, este caso se aproxima a um ciclo alternado de aplicação de tensão na forma senoidal, o qual pode ser visto na Figura 2.7 (a). Para este tipo de ciclo de tensão, as tensões máximas (picos) e mínimas (vales) são iguais em valor absoluto, sendo que, as tensões de tração são consideradas positivas, e as de compressão, negativas. Na Figura 2.7 (b) é apresentado um ciclo de tensão que se repete em torno de uma tensão média ( $\sigma_M$ ), chamado de repetido, no qual os valores de tensão máxima ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ) e da tensão mínima ( $\sigma_{m\acute{i}n}$ ) não são iguais. Este ciclo pode se deslocar na

direção do eixo das ordenadas, situando-se totalmente no campo da tração ou de compressão, ou em situações em que as tensões máximas e mínimas tenham sinais opostos. Observando-se a solitação das molas da suspensão de veículos que trafegam em estradas não pavimentadas, bem como, das asas de um avião, sobrecarregadas por corrente de vento, tem-se a variação do ciclo de tensão irregular ou aleatória, como pode ser observado na Figura 2.7 (c).

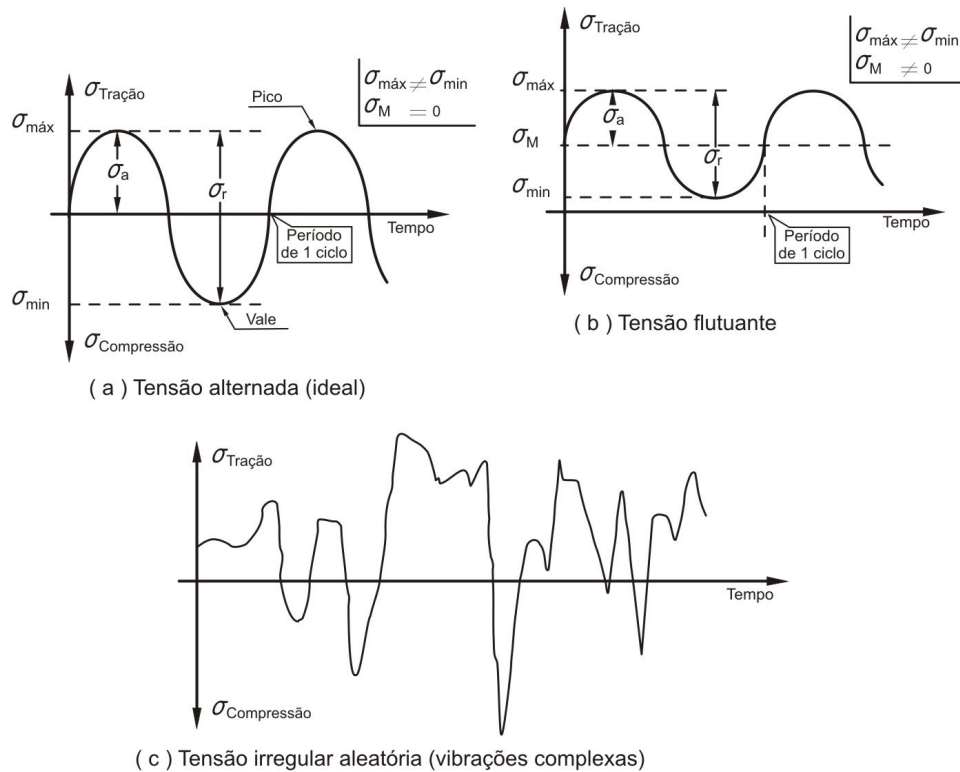


Figura 2.7– Tipos de tensões cíclicas em fadiga: (a) Tensão Alternada Reversa; (b) Tensão Repetida Flutuante e (c) Tensão Irregular Aleatória, (Garcia, 2000 - modificado)

Na figura 2.8 (c) é apresentado o ciclo no qual a amplitude tensão varia por blocos, que consistem em uma sucessão bem definida de ciclos de tensão. Cada bloco é caracterizado por um determinado número de ciclos, tensão máxima e mínima.

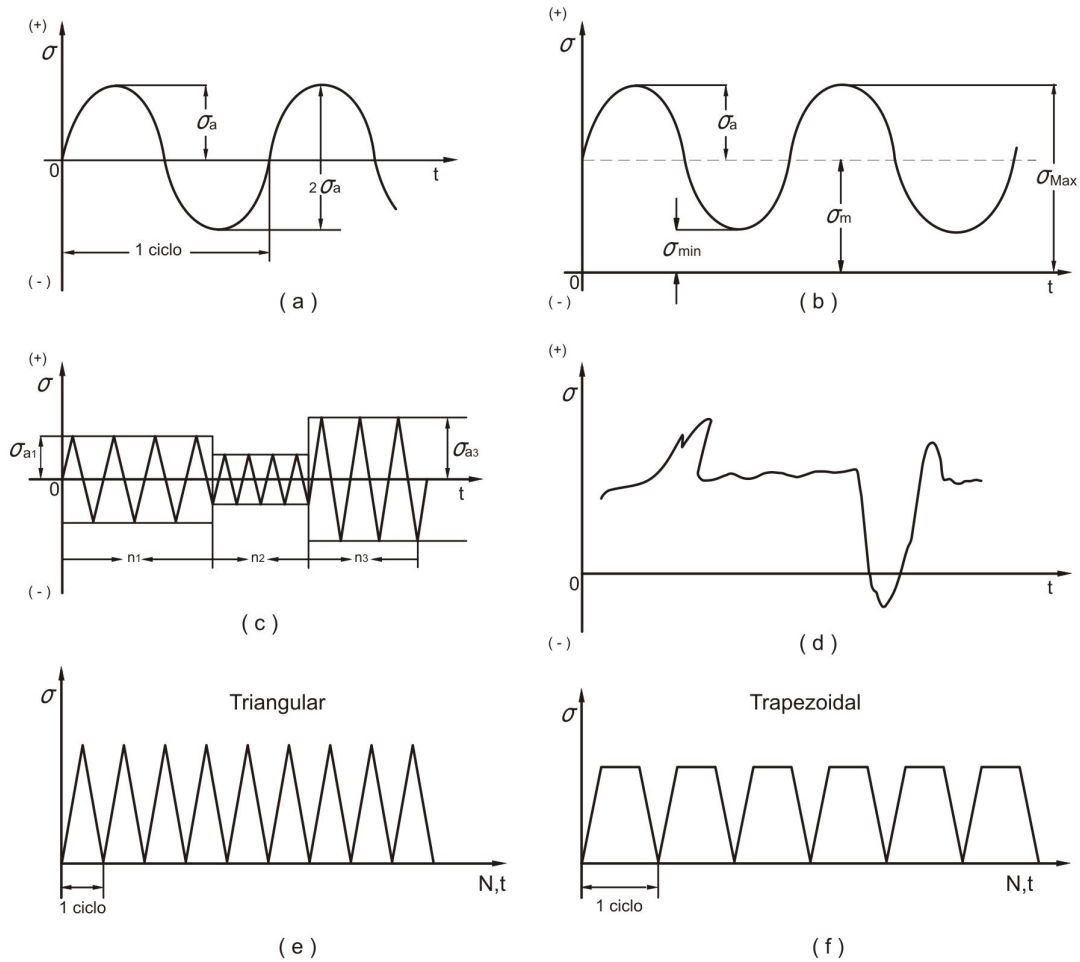


Figura 2.8 – Ciclos de tensão de fadiga, (a) Alternado; (b) Repetido; (c) Blocos; (d) Irregular ou aleatório; (e) Ciclos com onda de tensão triangular e trapezoidal; (Moura Branco, 1985 - modificado)

Complementando a análise dos gráficos apresentados acima, pode-se constatar que no eixo das ordenadas tem-se a tensão aplicada, e no eixo das abscissas tem-se os ciclos ou tempo. Segundo Moura Branco (1985), o ciclo de tensão é a menor parte da função tensão (carga) que é periódica e repetida. Uma solicitação a amplitude de tensão constante é constituída por N ciclos com a mesma onda, Figura 2.8 (a), o que não acontece no caso de solicitações a amplitude de tensão variável, Figuras 2.8 (c) e 2.8 (d).

A relação entre o tempo e o número de ciclos é dada pela equação:

$$f = \frac{N}{t} \quad (2.1).$$

Na qual,  $f$  é a frequência de aplicação da carga em ciclos por segundo ou ciclos por minutos,  $N$  é o número de ciclos e  $t$  é igual ao tempo correspondente ao número de ciclos em segundo ou minutos.

O ciclo de tensões é definido por uma função chamada de onda de tensões que pode ter várias formas tais como, senoidal, linear ou triangular, trapezoidal, exponencial, parabólica, dentre outras. A onda senoidal é muito comum, e é dada pela equação:

$$\sigma = \sigma_{\text{máx}} \text{ sen } 2\pi t f \quad (2.2).$$

A amplitude da tensão em um ciclo de tensões é definida como a diferença entre a tensão máxima ( $\sigma_{\text{máx}}$ ), ou tensão mínima ( $\sigma_{\text{mín}}$ ), e a tensão média ( $\sigma_M$ ). Portanto, a tensão média ( $\sigma_M$ ) é igual a semi-soma da tensão máxima ( $\sigma_{\text{máx}}$ ) com a tensão mínima ( $\sigma_{\text{mín}}$ ), conforme equação a seguir:

$$\sigma_M = \frac{\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}}}{2} \quad (2.3).$$

Nas Figuras 2.7 (a) e (b), a amplitude de tensão ou tensão alternada ( $S_a$ ) é igual a:

$$\sigma_a = \sigma_{\text{máx}} - \sigma_M = \frac{\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}}{2} \quad (2.4).$$

E a variação de tensão é duas vezes a amplitude, assim tem-se:

$$\Delta\sigma = 2 \sigma_a = \sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}} \quad (2.5).$$

Constata-se ainda que, no ciclo de tensões alternado, a tensão média ( $\sigma_m$ ) é nula e a tensão máxima ( $\sigma_{\text{máx}}$ ) é igual a tensão mínima negativa ( $-\sigma_{\text{mín}}$ ). Já no ciclo repetido, a tensão média ( $\sigma_M$ ) é diferente de zero, podendo ser de tração ou compressão. No caso específico onde a tensão mínima ( $\sigma_{\text{mín}}$ ) é nula, o ciclo é chamado pulsante. A tensão média ( $\sigma_M$ ) é normalmente quantificada pela razão  $R$  definida pela equação:

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

Conclui-se portanto que, no caso de um ciclo alternado de tensões, onde os valores absolutos da tensão máxima e mínima são iguais, tem-se que  $R = -1$ , e no repetido ou flutuante,  $R = 0$ .

#### 2.1.4 Curva de *Wöhler* ou Curva S-N

Durante as décadas de 1850 e 1860 o engenheiro August *Wöhler* realizou pesquisas sobre eixos de trens que estavam sujeitos a flexão rotativa. Dentre os principais resultados obtidos, destacam-se: i) determinação da curva de tensão aplicada em função do número de ciclos necessários para que ocorra a ruptura do material, intitulada na literatura técnica como Curva de *Wöhler* ou Curva S-N (*S-stress* e *N-number of cycles*); ii) identificação de uma tensão limite de resistência à fadiga para aços.

E mesmo depois de mais 150 anos destas descobertas, a forma mais utilizada para apresentar os resultados dos ensaios de fadiga continua ser a Curva de *Wöhler*.

##### 2.1.4.1 Determinação da Curva S-N

O método para obtenção das curvas S-N de maneira geral, consiste em registrar o número de ciclos até a ruptura dos corpos-de-prova de mesmo material, submetidos a diferentes tensões aplicadas, ensaiados em condições idênticas de tratamento térmico, acabamento superficial e dimensional. Cada corpo de prova é submetido a uma determinada amplitude de tensão ou tensão alternada que se mantém constante durante todo o ensaio, e termina quando o corpo de prova é rompido ou quando se exceder um determinado número de ciclos muito longos ( $10^7$  ou  $10^8$  ciclos).

A curva S-N básica é obtida quando a tensão média é zero; isto é, a tensão mínima é compressiva com  $|\sigma_{\min}| = |\sigma_{\max}|$ , a razão de carregamento é  $R = -1$ .

Segundo Garcia (2000), como procedimento inicial, submete-se o corpo de prova a um ciclo de tensões com uma tensão máxima geralmente elevada, quase sempre a uma tensão de  $2/3$  do limite de resistência à tração do material ensaiado. Repete-se esse procedimento com outros corpos-de-prova, diminuindo-se gradativamente a tensão aplicada.

A tensão inicialmente aplicada é diminuída até que se atinja uma tensão máxima onde não haja a ruptura do corpo-de-prova. Após obter a tensão máxima sem ruptura, aumenta-se a tensão gradativamente nos demais corpos-de-prova, até se conseguir a máxima tensão correspondente ao patamar, que será a tensão limite de fadiga do material ( $\sigma_{f0}$ ).

Para montagem da curva, o número  $N$ , (ou  $\log N$ ) é colocado no eixo das abscissas e no eixo das ordenadas, a tensão máxima,  $\sigma_{m\acute{a}x}$ , que também pode ser expressa por meio de logaritmo. O diagrama da curva S-N poderá ser elaborado utilizando as seguintes escalas para os eixos cartesianos:  $S \times N$ ,  $S \times \log N$  e  $\log S$  e  $\log N$ . A escala logarítmica facilita a comparação dos dados, pois fornece curvas de diversos materiais com a mesma forma, além de facilitar e diminuir a escala de  $N$ . (Souza, 1982).

A Figura 2.9 apresenta curvas S-N esquemáticas para um aço maciço e uma liga de alumínio.

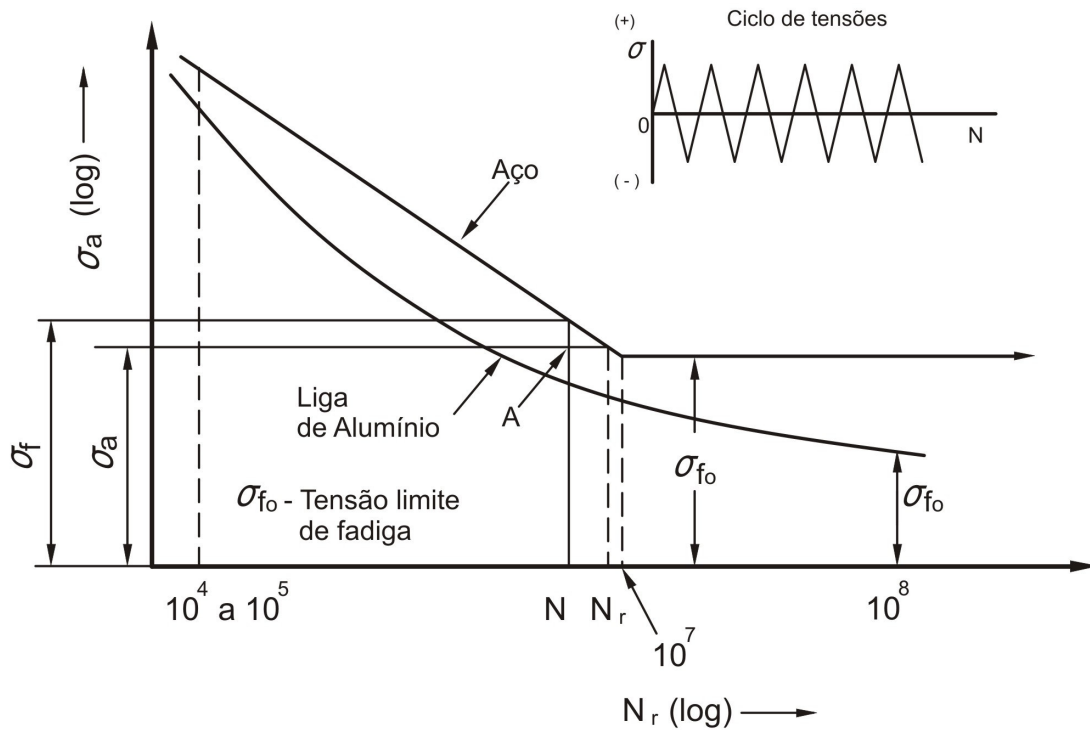


Figura 2.9 – Curvas S-N esquemáticas para um aço maciço e uma liga de alumínio (Moura Branco, 1985 - modificado)

Analisando o gráfico acima segundo Moura Branco (1985), observa-se que o eixo das abscissas, que corresponde ao  $N$ , possui duas regiões bem definidas.



A primeira na qual  $N_r < 10^4 - 10^5$ , é chamada de zona de fadiga de baixo número de ciclos ou fadiga oligocíclica. Nesta zona as tensões e extensões na peça são predominantemente plásticas e, muitos ensaios são feitos com extensão plástica controlada em vez de carga ou tensão controlada. A fadiga oligocíclica tem leis de comportamento próprias, as quais não serão objeto de estudo deste trabalho.

A segunda região, na qual  $N_r > 10^4 - 10^5$ , quanto maior a tensão ( $\sigma$ ), menor o número de ciclos aplicado ( $N_r$ ). O autor ressalta que em alguns materiais, como os aços e o titânio, a curva S-N torna-se horizontal para uma determinada tensão limite ( $\sigma_{f0}$ ), que funciona como assíntota da curva. Para tensões abaixo desta tensão limite, denominada tensão limite de fadiga, o material poderá provavelmente suportar um número infinito de ciclos sem romper.

Entretanto, este comportamento não pode ser generalizado porque em muitos metais não ferrosos, como o alumínio, magnésio e ligas de cobre, a curva S-N tem uma inclinação que decresce gradualmente com o número de ciclos de ruptura. Estes materiais não têm um limite de fadiga verdadeiro porque a curva S-N nunca se torna horizontal.

Chama-se resistência à fadiga, a tensão alternada  $\sigma_a \equiv S$  que aparece nas ordenadas da curva S-N, Figura 2.9. A resistência à fadiga defini-se portanto, sempre em relação a uma determinada duração ou número de ciclos até a ruptura, exceto para a tensão limite de fadiga que corresponde a uma duração provavelmente infinita. Nos materiais que não tenham limite de fadiga verdadeiro pode definir-se uma tensão limite de fadiga para  $10^8$  ciclos, Figura 2.9, (Moura Branco, 1985).

Segundo Dowling (1999), através dos dados experimentais de um ensaio de fadiga uniaxial gera-se o gráfico S-N em escala log-linear, cuja curva pode ser aproximadamente representada pela seguinte equação:

$$\sigma_a = S_a = C + D \log N_f \quad (2.7).$$

Na qual C e D são parâmetros constantes do material. Este gráfico também pode ser apresentado em escala log-log onde a equação linearizada é:

$$\sigma_a = S_a = A N_f^B \quad (2.8).$$

Uma segunda equação frequentemente usada é:

$$S_a = S'_f (2 N_f)^b \quad (2.9).$$

Os parâmetros constantes do material podem ser obtidos através das seguintes fórmulas:

$$A = 2^b S'_f \quad (2.10),$$

$$B = b \quad (2.11).$$

A equação 2.8 pode ser escrita na sua forma mais conhecida, chamada de relação de Basquin:

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma'_f (N_f)^\gamma \quad (2.12),$$

onde  $\frac{\Delta\sigma}{2}$  é a amplitude tensão,  $N_f$  é o número de ciclos de vida, e  $\sigma'_f$  é o coeficiente de resistência à fadiga e  $\gamma$  é o expoente de resistência a fadiga.

#### 2.1.4.2 Fatores que influenciam a Curva S-N

A curva S-N é traçada a partir dos resultados de ensaios realizados em corpos de prova padrão, em ambiente de laboratório. Portanto, as resistências à fadiga ou os limites de fadiga obtidos nestes ensaios devem ser modificadas para considerar, em seus valores finais as diferenças entre os corpos de prova e a peça real que está sendo projetada. Dentre os fatores de redução da resistência à fadiga obtida em laboratório destacam-se: fator de acabamento superficial ( $k_a$ ), fator da escala ( $k_b$ ), fator de carga ( $k_c$ ), fator de temperatura ( $k_d$ ) e fator para outros efeitos ( $k_e$ ). Assim, a tensão limite de fadiga da peça real ( $S_e$ ) pode ser obtida através da equação 2.13:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S'_e \quad (2.13).$$

### Fator de acabamento Superficial ( $k_a$ )

O fator  $k_a$  é função do acabamento superficial e do nível de resistência da peça, o qual poderá ser obtido através da equação 2.14:

$$k_a = a S_{ut}^b \quad (2.14),$$

sendo que  $S_{ut}$  é igual a resistência a tração do material e os valores de **a** e **b** podem ser obtidos da tabela 2.1

Tabela 2.1 – Fator de Acabamento Superficial  
(Shigley, 1989 - modificado)

<b>Tipo de Superfície</b>	<b>Fator a (MPa)</b>	<b>Expoente b</b>
Retificada (Ground)	1.58	-0,085
Maquinada/laminada a frio (machined or cold-drawn)	4.51	-0,265
Laminado a quente *hot-rolled)	57.70	-0,718
Forjada (as forged)	272	-0,995

### O Fator de escala ( $k_b$ )

O fator  $k_b$  é função da dimensão da peça. Segundo Shigley (1989), os valores abaixo poderão ser utilizados:

#### Peças submetidas a torção e flexão rotativa:

- Para  $2,8 \text{ mm} \leq d \leq 51 \text{ mm}$

$$k = \left( \frac{d}{7,62} \right)^{-0,1133} \quad (2.15).$$

- Para diâmetros maiores  $k_b \approx 0,60$  a  $0,75$

#### Peças submetidas esforços axiais:

- Para peças sujeitas a esforços axiais, não existe o efeito referente a dimensão da peça e, portanto  $k_b = 1$ .

### O Fator de carga ( $k_c$ )

O fator  $k_c$  é função do tipo de carga aplicada. Assim, segundo Shigley (1989), os valores abaixo poderão ser utilizados:

$k_c = 0,923$	carga axial	$S_{ut} \leq 1520 \text{ MPa}$
$k_c = 1$	carga axial	$S_{ut} > 1520 \text{ MPa}$
$k_c = 1$	flexão	
$k_c = 0,577$	torção e cisalhamento	

### O Fator de temperatura ( $k_d$ )

O fator  $k_d$  é função da temperatura de trabalho da peça. Assim, segundo Shigley (1989), este fator poderá ser obtido a partir da seguinte equação:

$$K_d = \frac{S_T}{S_{RT}} \quad (2.16),$$

onde,  $S_T$  é igual a resistência à temperatura de operação e  $S_{RT}$  é igual a resistência à temperatura ambiente, os quais poderão ser obtidos na Tabela 2.2 a seguir:

Tabela 2.2 – Fator de Temperatura  
(Shigley,1989 - modificado)

Temperatura °C	$S_T/S_{RT}$
20	1,000
50	1,010
100	1,020
150	1,025
200	1,020
250	1,000
300	0,975
350	0,943
400	0,900
450	0,840
500	0,766
550	0,670
600	0,546

### Tensão Limite de fadiga de ensaio ( $S'_e$ )

$$S'_e = 0,504 S_{ut} \quad S_{ut} \leq 1400 \text{ MPa}$$

$$S'_e = 700 \text{ MPa} \quad S_{ut} > 1400 \text{ MPa}$$

#### 2.1.4.3 Efeito da Tensão Média sobre a Vida em Fadiga

A tensão média é um dos fatores que influencia a resistência à fadiga, portanto deve ser avaliado com critério. Na literatura, a maioria dos resultados experimentais de resistência à fadiga encontrados foi determinado para condições de ciclo alternado de tensões, em que a tensão média é igual a zero. Porém, frequentemente podem ocorrer situações em que, embora haja um ciclo reverso de aplicação de tensões, a tensão média não é nula. Para carregamentos com tensão média diferente de zero, as curvas de resistência à fadiga sofrem alterações significativas.

A influência da tensão média sobre a resistência a fadiga é apresentada qualitativamente na figura 2.10. Segundo Garcia (2000), observa-se no gráfico a que a tensão máxima é apresentada em função do número de ciclos,  $N$ , para vários valores de  $R$ , ( $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$ ) e que à medida que  $R$  se torna maior e positivo, o limite de resistência a fadiga aumenta. No gráfico b, a amplitude de oscilação ( $\sigma_a$ ) é função de  $N$ , para diferentes valores de tensão média. Nota-se que, a medida que a tensão média aumenta, a amplitude livre de oscilações decresce.

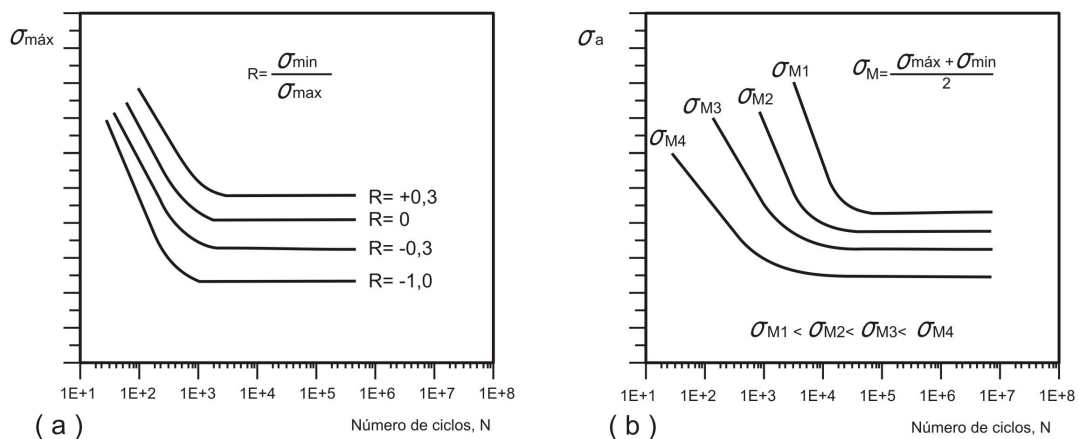


Figura 2.10 – Influência: a) da razão de tensão e b) da tensão média, para o ensaio de fadiga - (Garcia, 2000 - modificado)

Os primeiros estudos para estabelecer o efeito da tensão média nas propriedades à fadiga do material foram iniciados por Goodman em 1899, e a partir de então, várias outras teorias procuraram traduzir matematicamente os resultados experimentais que se analisava esse efeito, dentre elas se destacam Gerber e Soderberg. Essas teorias podem ser observadas através da Figura 2.11, influência da tensão média na tensão limite de fadiga e das respectivas equações das curvas, 2.17 (Goodman), 2.18 (Gerber) e 2.19 (Soderberg).

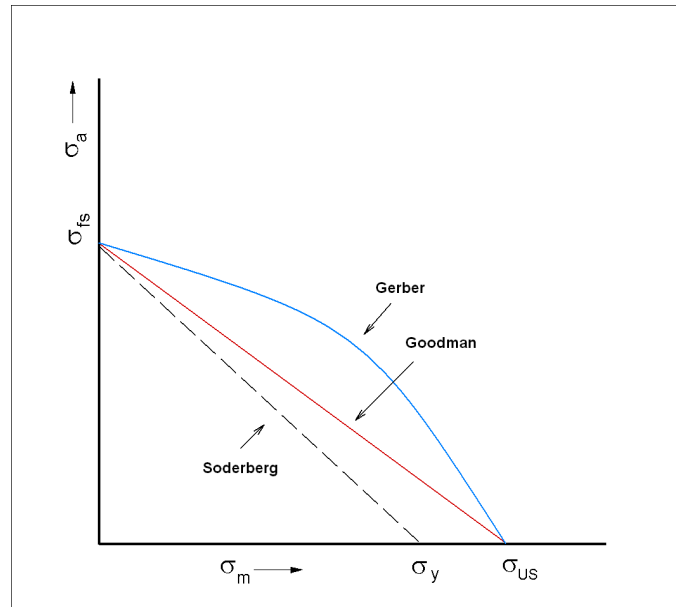


Figura 2.11 - Influência da tensão média na tensão limite de fadiga

$$\text{Equação de Goodman: } \sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{US}}\right)} \quad (2.17);$$

$$\text{Equação de Gerber: } \sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{US}}\right)^2\right)} \quad (2.18);$$

$$\text{Equação de Soderberg: } \sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_y}\right)} \quad (2.19).$$

A Figura 2.11 apresenta o gráfico da amplitude da tensão limite de fadiga  $\sigma_a$  em função da tensão média. Nas equações 2.17, 2.18 e 2.19,  $\sigma_m$  é a tensão normal média,  $\sigma_{ar}$  é o limite de fadiga para  $\sigma_m = 0$ ,  $\sigma_y$  é o limite de escoamento e  $\sigma_{US}$  é o limite de resistência.

Segundo Moura Branco (1985), para análise comparativa entre os três modelos, as curvas poderão ser representadas pela seguinte equação:

$$S_a = \sigma_a = \sigma_{aeq} \left[ 1 - \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_{rt}} \right)^x \right] \quad (2.20),$$

onde x é igual 1, para a reta de Goodman, x é igual a 2, para a curva de Gerber e  $\sigma_{aeq}$  é a tensão limite de fadiga no ciclo alternado, com  $\sigma_m = 0$ . Nesta equação, para a reta de Soderberg,  $\sigma_{rt}$  deverá ser substituída pela tensão de escoamento .

Estes diagramas têm por finalidade verificar se um determinado ciclo de tensões pode provocar falha no material. Nesta análise, se um ponto representativo do ciclo de tensões ficar no interior destes diagramas, não haverá ruptura por fadiga e conseqüentemente ficando fora, haverá ruptura.

De maneira geral, o meio técnico científico define que nos materiais dúcteis os resultados experimentais aproximam-se geralmente da curva parabólica, porém devido a dispersão dos resultados e facilidade de utilização, prefere-se a relação linear no dimensionamento. A reta de Soderberg dá a margem de segurança mais alta no dimensionamento (tensão limite de fadiga mais baixa), sendo a mais utilizada, por ser definida até a tensão de escoamento, traduzindo mais perto o comportamento real do material.

### 2.1.5 Limites de Resistência à Fadiga

Segundo Oliveira (2003), no que se refere a resistência do condutor à fadiga, duas diferentes abordagens são freqüentemente utilizadas:

i) Abordagem do Dano Acumulativo (*Cumulative Damage Approach*), na qual, a evolução do processo de fadiga aumenta gradativamente a cada ciclo de vibração durante a vida útil do condutor, até a ocorrência da ruptura. Parte-se da premissa que esta acumulação é linear, utilizando a Teoria de *Miner*. Nesta teoria são feitas considerações probabilísticas quanto à recorrência de ventos que ocasionam vibração e, quanto às curvas de resistência à

fadiga do condutor (curva S-N ou de *Wölher*). Assim, são calculadas tensões seguras a partir da definição de uma vida útil do condutor considerada aceitável;

ii) Abordagem do Limite de Resistência (*Endurance Limit Approach*), na qual considera-se que a manutenção dos níveis de vibração abaixo de determinados limites proporciona uma vida infinita ao condutor, isto é, as tensões seguras são determinadas de forma que estes limites não seja ultrapassados.

As abordagens citadas acima foram concebidas a partir de resultados de ensaios de fadiga e, portanto são igualmente aceitas no meio técnico científico, sendo que a Abordagem do Dano Acumulativo possibilita considerar a variação da vibração do cabo ao longo do tempo, isto é, períodos com pequena, grande ou até mesmo sem qualquer vibração. Já a Abordagem do Limite a Resistência pode ser considerada como um caso da Abordagem do Dano Acumulativo, na qual a vida útil estimada do condutor tende ao infinito e, portanto é mais conservativa.

#### 2.1.5.1 Limite de Segurança da CIGRE – Abordagem do Dano Acumulativo

A metodologia proposta pela CIGRE foi definida a partir de uma curva proposta pelo Comitê de Estudos de Linhas Aéreas (SC 22), intitulada *Safe Border Líne*, a qual foi obtida da compilação de vários resultados de ensaios de fadiga, realizados em cabos e fios de alumínio e liga, em diversos laboratórios do mundo. Assim, ela apresenta o menor número de ciclos permitido para diversos níveis de tensão, isto é, uma estimativa conservadora da vida útil dos cabos e/ou fios, tendo em vista que ela foi concebida para ficar abaixo da série de resultados obtidos nos ensaios citados. A Figura 2.12 ilustra a curva *Safe Border Line*, bem como as demais curvas compiladas pela CIGRE.



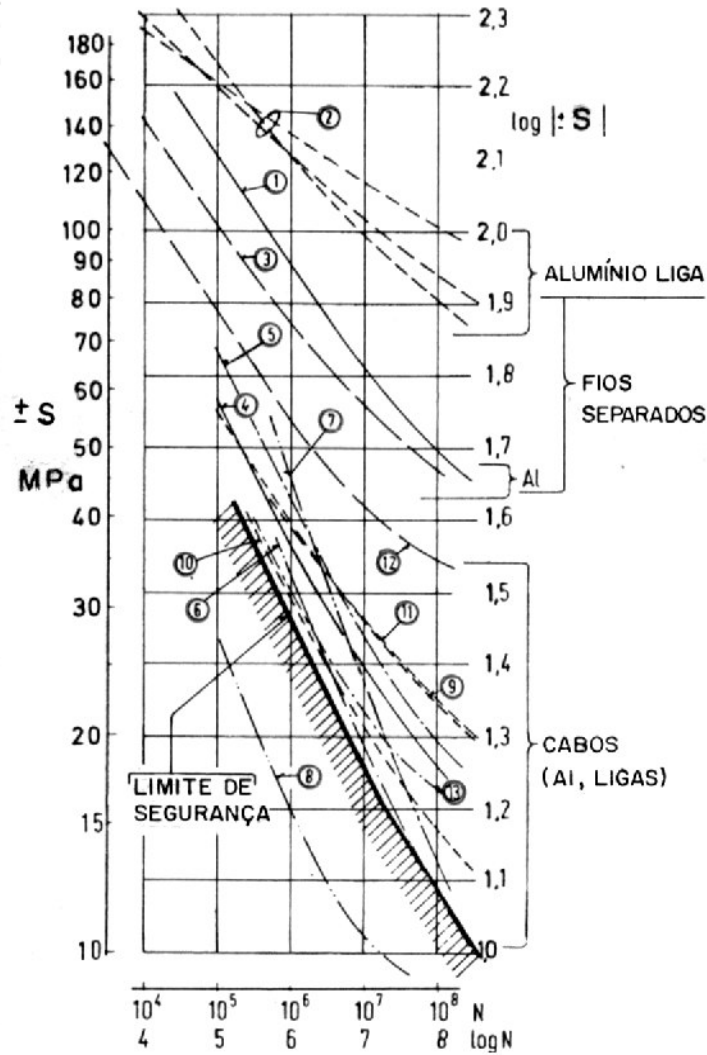


Figura 2.12 - Curva *Safe Border Line*, bem como as demais curvas compiladas pela CIGRE (CIGRE, 2003 - modificado)

Esta curva pode ser representada pela seguinte equação:

$$\sigma_a = AN^b \quad (2.21),$$

onde  $\sigma_a$  é a tensão dinâmica em MPa,  $N$  é a vida em ciclos e  $A$  e  $b$  são constantes obtidas através da Tabela 2.3, na qual pode-se observar que atualmente para estas constantes são utilizados valores diferenciados para cabos com uma ou mais camadas de fios de alumínio.

Tabela 2.3 – Constantes da Curva Limite de Segurança (*Safe Border Line*)  
(CIGRE, 1988)

Nº de camadas de fios de Alumínio do Cabo Condutor	N < 2 . 10 <sup>7</sup>		N > 2 . 10 <sup>7</sup>	
	A	b	A	b
1	730	-0,2	430	-0,168
>1	450	-0,2	263	-0,168

#### 2.1.5.2 Limite de Segurança do EPRI e IEEE– Abordagem do Limite de Resistência

A metodologia proposta pelo EPRI (1979) considera que quando o valor de tensão dinâmica tende ao “limite de resistência à fadiga”, indica que o valor de número de ciclos até a ruptura é elevado, garantindo, dessa forma, uma vida extensa ao cabo. A Tabela 2.4 apresenta os limites de resistência de acordo com o número de camadas de fios de alumínio do cabo.

Tabela 2.4 – Limites de Resistência a Fadiga do EPRI

Número de Camadas de Fios de Alumínio do Cabo Condutor	Limite de Resistência (Mpa)
1	22,5
> 1	8,5

As metodologias EPRI e IEEE possuem o mesmo princípio, isto é, se a deformação do cabo medida no ponto 89 mm, a partir do último ponto de contato cabo/grampo não for superior aos limites propostos pelas respectivas metodologias, isto significa que, o cabo não apresentará problemas decorrentes à vibração eólica. No caso do IEEE este limite é 150 µε (microstrains) pico a pico.

## 2.2 – CARREGAMENTOS COM AMPLITUDE VARIÁVEL

### 2.2.1 – Teoria de Acúmulo de Dano – Teoria de *Miner*

A ação do vento sobre as linhas de transmissão provoca oscilação nos cabos condutores ao longo de sua vida útil, e, portanto além da tensão estática de esticamento, o cabo está sujeito a uma diversidade de solicitações oriundas de vários níveis de vibração, sendo que cada nível possui número de ciclos diferentes. Segundo Oliveira, 2003, é normalmente aceito que a deterioração dos materiais é cumulativa, assim, é possível definir uma função  $D$  que descreva a deterioração gradativa do material sujeito a vibração. Esta função assumirá valores que variam de 0 a 1, ou seja, o valor 0 se refere ao início da vida do cabo condutor e o valor 1 se refere ao instante da ruptura, o final da vida útil do material.

Portanto, a fração de vida do material é igual  $\frac{n_i}{N_i}$ .

A Teoria de *Miner*, também chamada de *Palmgren-Miner* define que a ruptura por fadiga do material é esperada quando o somatório das frações de vida é 1, ou seja quando 100% da vida é exaurida (Citado por Dowling, 1999). Esta teoria apresenta um modelo matemático no qual a função “ $D$ ” é linear e, independe da seqüência de aplicação dos diversos níveis de tensões, bem como, é válida para qualquer nível de tensão. A equação 2.22 apresenta a função “ $D$ ”, segundo *Miner*.

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (2.22),$$

onde:

- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 \dots \sigma_i$  são os valores dos diferentes níveis de tensão dinâmica a que os condutores estão sujeitos no campo;
- $n_1, n_2, n_3, n_i$  são as quantidades de ciclos para os respectivos níveis de tensão obtidas em campo;
- $N_1, N_2, N_3, N_i$  são as quantidades de ciclos na curva S-N, correspondente a  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 \dots \sigma_i$ ;
- $D$  é igual ao valor do dano.

Ensaio realizados para comprovar a Teoria de *Miner* têm mostrado que o valor de  $S_m$  (somatório dos danos) varia entre 0,5 e 2, de acordo com o material e a estrutura mecânica ensaiada. No entanto, considera-se geralmente, com certa margem de erro que o fim da

vida ocorre quando  $S_m$  é igual a unidade, assim, a completa fadiga ou ruptura do cabo condutor ocorre conforme demonstrado matematicamente na equação 2.23.

$$S_m = \sum D_i = \sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (2.23).$$

Se  $D_i$  for calculada considerando valores de  $n_i$  extrapolados para um ano de vida do condutor, a duração da vida  $V$  do condutor pode ser estimada pela equação 2.24 descrita a seguir:

$$V = \frac{1}{\sum D_i} \text{ (anos)} \quad (2.24).$$

Segundo publicações da CIGRE (1979 e 1995), citadas por Oliveira (2003), a vida útil média do cabo condutor considerada econômica e tecnicamente satisfatória é de aproximadamente trinta anos.

Segundo Henriques (2006), para aplicação da Teoria de *Miner*, duas premissas básicas são fundamentais: i) a curva de fadiga S-N para a montagem cabo/grampo, e caso não seja possível levantá-la em laboratório, utiliza-se a Curva de Segurança da CIGRE (*Safe Border Line*) e, ii) a distribuição  $n_i$  ( $\sigma_i$ ) dos ciclos acumulados em cada um dos níveis de tensão experimentados no campo. Esses dados são obtidos por meio de vibrógrafos, sendo expressos por ciclos, por ano. Em campo é medida a amplitude de dobramento ( $Y_b$ ) a 89 mm do primeiro ponto de contato entre o cabo e o grampo e, em seguida, utilizando a fórmula *Poffenberger-Swart* transforma-se este valor em tensão. A fórmula de *Poffenberger-Swart* será apresentada no item 2.3.2 deste Capítulo. A Figura 2.13 apresenta a Curva de fadiga demonstrando a Teoria de *Miner*.

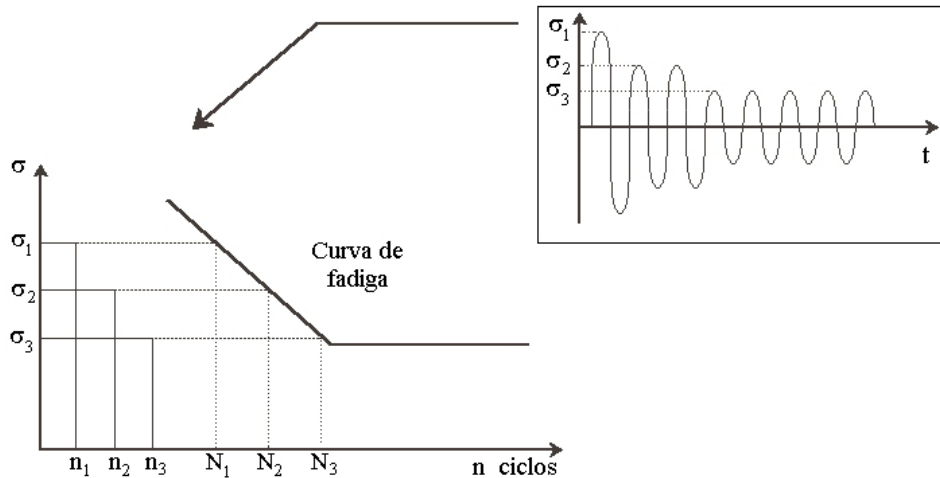


Figura 2.13 – Curva de fadiga demonstrando a Teoria de *Miner*.

### 2.2.2 – Método de Contagem de Ciclos *Rain Flow*

Segundo Dowling (1999), se na história de carregamento, a qual está sujeito o material, existe uma variação muito grande de tensões, não é possível isolar ou definir os respectivos ciclos e, por conseguinte, não será possível aplicar a Teoria de *Palmgren-Miner*. Durante muitos anos, foram propostos e discutidos vários métodos para contagem de ciclos nos casos de história de carregamento irregulares, entretanto, o consenso surgiu apenas em 1968, quando o Prof. T. Endo e sua equipe apresentaram um procedimento chamado *RainFlow Cycle Counting*.

A técnica de contagem de fluxo chuvoso, "*rainflow*", é um algoritmo matemático baseado na analogia da queda nos pingos de chuva nos telhados japoneses ("pagodes"). Foi o primeiro método confiável para extrair ciclos de fadiga de um sinal de deformação variando aleatoriamente e de um sinal de carregamento com amplitude variável. Tipicamente, uma análise de "*rainflow*" é feita sobre um histórico de carregamento de serviço de uma estrutura de engenharia ou componente, para contar as curvas cíclicas de tensão-deformação. Após a contagem desta curva cíclica tensão-deformação, faz-se então a análise acumulativa de dano. O método grava faixas de deformações para ciclos fechados de tensão-deformação, (Ricardo, 1979).

## 2.3 – FADIGA DE CABOS CONDUTORES

### 2.3.1 – Fadiga por fretting

A vida de um condutor relaciona-se inversamente com o nível de esforços estáticos e dinâmicos. Quanto maiores forem os esforços estáticos, menores serão os esforços dinâmicos permitidos para evitar uma falha do material por fadiga, (Rosa, 1974 , citado por Fuchs, 1992).

Segundo Fuchs (1992), a tensão mecânica é considerada como um dos meios eficientes para prevenir o aparecimento de vibrações no cabo. O aumento de tensão reduz o valor do auto-amortecimento dos cabos, e por este motivo, a tensão deve ser tão baixa quanto economicamente viável. Entretanto, o mesmo autor, evidencia que a intensidade de vibração depende não só da tensão no condutor, bem como, do tipo de terreno onde a linha está, ou será instalada e, pode-se destacar de forma inquestionável, que alguns pesquisadores acrescentam também o tamanho do vão entre as estruturas.

A ruptura de cabos condutores ocorre principalmente devido a fadiga do material, em consequência das ações das forças eólicas, que provocam no cabo, vibrações fortes, isto é, de alta frequência e baixa amplitude. Estas vibrações ocorrem em vãos muito grandes, nas travessias de grandes rios, onde o vale do rio guia o fluxo de ar através da linha, e de maneira geral nos trechos da linha em travessia plana.

Assim, ao longo da vida útil do cabo estas vibrações propiciam o aparecimento e, por conseguinte o crescimento de trincas nos fios que compõe o cabo. Estas trincas são resultantes do processo de *fretting* e do carregamento cíclico do cabo, e freqüentemente estão localizadas nos pontos de fixação do cabo, quais sejam: grampos de suspensão, amortecedores, espaçadores dentre outros.

Segundo Lindley (1997), *fretting* é o fenômeno que surge quando duas superfícies em contato estão sujeitas a forças tangenciais oscilatórias, onde zonas de microdeslizamento ocorrem na qual as duas superfícies deslizam uma sobre a outra. Dois importantes fenômenos podem surgir como resultado desta ação: i) desgaste das superfícies pode ocorrer, dando origem a um processo denominado desgaste por *fretting* e ii) trincas de fadiga podem ter início na região danificada levando a grandes reduções da resistência a fadiga de um componente carregado ciclicamente. Este segundo processo é denominado fadiga por *fretting*. Nos cabos condutores, Figura 2.14, dependendo das condições de carregamento, três diferentes modos de contato podem levar à fadiga por *fretting*: i) o

contato do grampo com os fios da camada mais externa do cabo, Figura 2.15 (a); ii) o contato entre dois fios de alumínio, Figura 2.15 (b) e, iii) o contato entre o fio de alumínio e o fio de aço. Este processo forma o acúmulo de um pó devido ao desgaste entre as superfícies. Em contato com o ar estas partículas se oxidam e ganham uma coloração escura, formando o óxido de alumínio  $Al_2O_3$ , um material muito duro, que associado as tensões de contato aceleram o processo de desgaste, Figura 2.16.



Figura 2.14 - Fadiga por *fretting* no cabo condutor, localizada no grampo de ancoragem

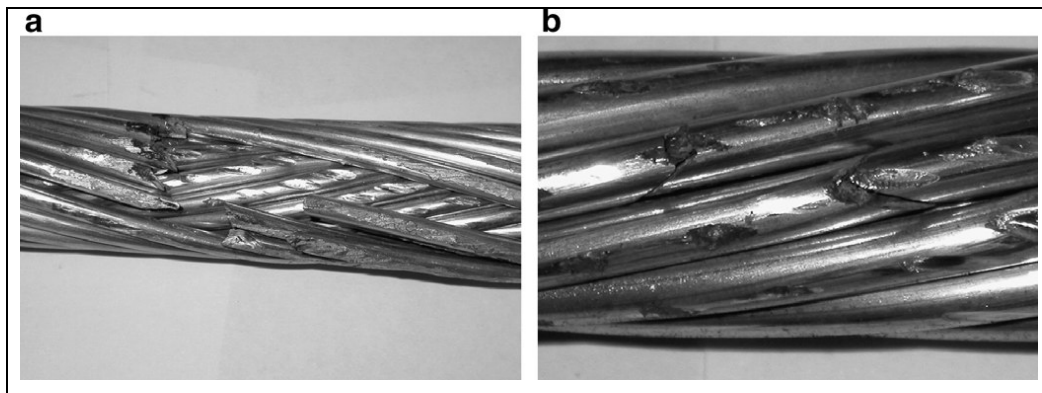
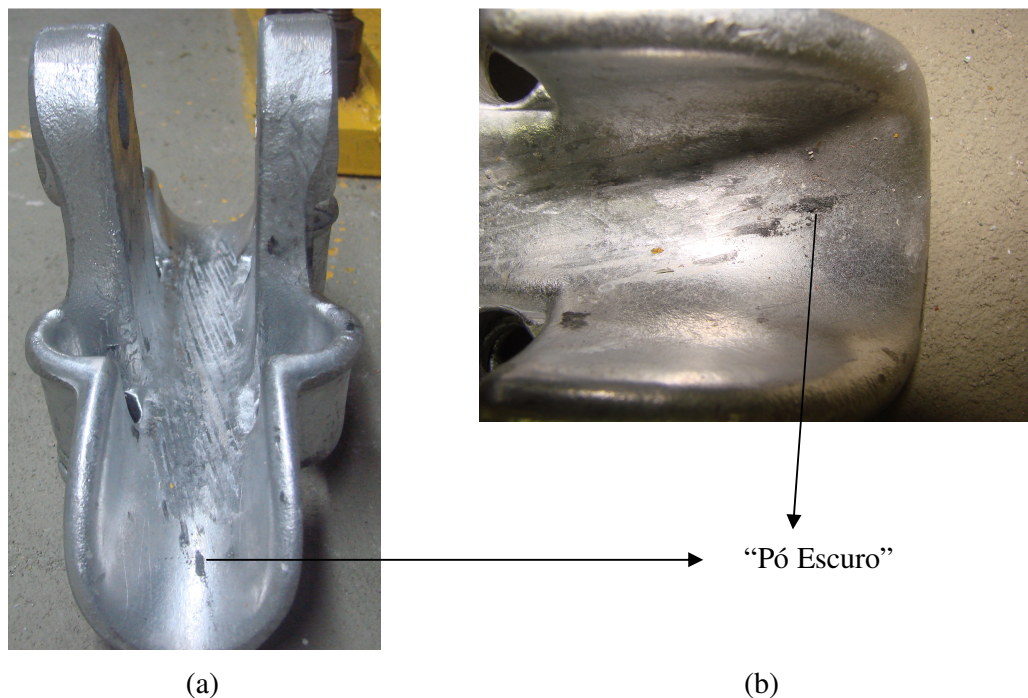


Figura 2.15 – Fadiga por *Fretting* - a) O detalhe mostra intenso desgaste superficial, com fratura de alguns fios de alumínio, na camada externa do cabo condutor ACSR, b) O detalhe mostra marcas elípticas de *fretting* e fraturas de fios da camada interna do cabo condutor ACSR (Azevedo, 2009 – modificado).



Figuras 2.16 – “Pó Escuro” - constituído de partículas muito duras e abrasivas produzidas pelo desgaste devido ao *fretting* entre os fios de alumínio, obtido nos ensaios realizados nesta pesquisa.

### 2.3.2 – Equação de *Poffenberger-Swart*

Desde o início do século passado, vários estudos foram realizados sobre a análise da vida útil de cabos condutores de energia elétrica, entretanto somente em 1966, o IEEE Task Force on The Standardization of Conductor Vibration Measurements (1966) padronizou o método da amplitude a flexão, o qual é definido pelo deslocamento diferencial medido em um ponto do cabo, localizado a 89 mm do último ponto de contato do cabo com o grampo. Assim, a grande contribuição de *Poffenberger-Swart* no campo das pesquisas sobre cabos condutores foi sem dúvida, a concepção de um modelo matemático, que possibilita converter a amplitude de flexão, coletada em campo ou laboratório, em tensões de flexão na superfície dos fios da camada mais externa do condutor. Esta metodologia considera apenas o estado de tensão provocado pelo processo de flexão do cabo previamente tensionado e busca quantificar a tensão imposta pela vibração em flexão. De acordo com este modelo, a parcela do cabo na vizinhança do ponto de restrição é assumida como uma viga de Euler. Destarte, o deslocamento vertical (medido pico a pico) no ponto 89 mm, padronizado, pode ser usado para se obter a tensão experimentada por um fio de alumínio



da camada mais externa do cabo e na boca do grampo. O valor da tensão de flexão pode ser obtida pela equação 2.25, apresentada a seguir:

$$\sigma_a = KY_B \quad (2.25),$$

onde  $\sigma_a$  é a faixa de tensão dinâmica (pico a pico),  $Y_B$  é a amplitude de deslocamento pico a pico, medida a partir de um ponto sobre o cabo distante 89 mm do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão, e o valor de K poderá ser obtido através da equação 2.26:

$$K = \frac{E_a d p^2}{4(e^{-px} - 1 + px)} [N/mm^3] \quad (2.26),$$

sendo  $E_a$  (MPa) e  $d$  (mm), o módulo de elasticidade (Módulo de *Young*) e o diâmetro dos fios de alumínio da camada externa do cabo, respectivamente;  $x$  é a distância ao longo do cabo entre o último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão e o ponto de medição, usualmente 89 mm (“Ponto 89”), indicado na figura 2.17. O valor de  $p$  é igual a:

$$p = \sqrt{\frac{T}{EI}} \quad (2.27),$$

onde  $T$  (N) é a carga de esticamento para a temperatura média durante a medição,  $EI$  (N.mm<sup>2</sup>) é a rigidez a flexão do cabo, cujo valor mínimo é dado pela equação 2.28:

$$EI_{\min} = n_a E_a \frac{\pi d_a^4}{64} + n_s E_s \frac{\pi d_s^4}{64} \quad (2.28),$$

onde:  $n_a$ ,  $E_a$ ,  $d_a$  são respectivamente, o número, diâmetro individual e o módulo de elasticidade dos fios de alumínio;  $n_s$ ,  $E_s$ ,  $d_s$  são respectivamente, o número, diâmetro individual e o módulo de elasticidade dos fios de aço.

A Figura 2.17 apresenta a boca do grampo, bem como o “Ponto 89”.



Figura 2.17 – Localização do “Ponto 89”

Azevedo (2008) ressalta que o uso da Equação 2.25 demanda atenção especial, tendo em vista que a variação da rigidez à flexão do cabo em função do comportamento dinâmico não é considerada nesta formulação. Enfatiza também que, para pequenos níveis de amplitude de tensão, deve-se esperar que os fios individuais do condutor não deslizem entre si e, portanto o cabo se comporta como uma barra rígida, respondendo a flexão com sua máxima rigidez. Por outro lado, à medida que a amplitude de vibração aumenta, mais e mais fios passam a escorregar e a rigidez a flexão se aproxima de  $EI_{\min}$ , apresentada pela expressão (2.28). Conclui-se que, neste caso, a fórmula de *Poffenberger-Swart* torna-se uma melhor aproximação para os níveis de tensão na camada mais externa do cabo.

## CAPÍTULO 3

### 3- PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado o programa experimental da pesquisa, compreendendo seus objetivos, materiais utilizados, planejamento dos testes, descrição da bancada, bem como, a metodologia aplicada.

O programa experimental desta pesquisa foi desenvolvido com o objetivo de determinar a curva de fadiga (Curva S-N) da montagem do cabo IBIS, 397,5 MCM e o grampo monoarticulado. Destaca-se que este cabo é muito utilizado nas linhas de subtransmissão do sistema elétrico da CELG Distribuição S.A. – CELG D. Os ensaios foram executados, de acordo com as recomendações da CIGRE (1985), EPRI (1979) e IEEE (1978). A padronização desses testes é fundamental pois, além de fornecer resultados confiáveis, que servirão como parâmetros para aperfeiçoar os projetos, a operação e manutenção de linhas de transmissão, poderão ser comparados e/ou aplicados por outros pesquisadores em diferentes laboratórios em nível nacional ou internacional.

Em geral, a resistência em fadiga da montagem cabo/grampo de suspensão é obtida de maneira análoga a usada para corpos-de-prova sólidos. Para estabelecer a tensão gerada na região de falha usualmente utiliza-se a fórmula de *Poffenberger-Swart* (1965), que correlaciona uma amplitude de deslocamento medida em uma posição padronizada a partir do grampo, com uma amplitude de tensão no ponto mais externo do cabo e na saída do grampo. Testes a uma mesma amplitude de tensão são conduzidos, observando-se a ruptura do primeiro, segundo e terceiro fio de alumínio e registrando o número de ciclos experimentado pela montagem até o instante de cada quebra. Repetindo o teste para diferentes amplitudes de deslocamento é possível então traçar uma curva da amplitude de tensão contra o número de ciclos, a qual é denominada de Curva S-N ou de *Wöhler*. A Figura 3.1 ilustra a montagem esquemática cabo/grampo.

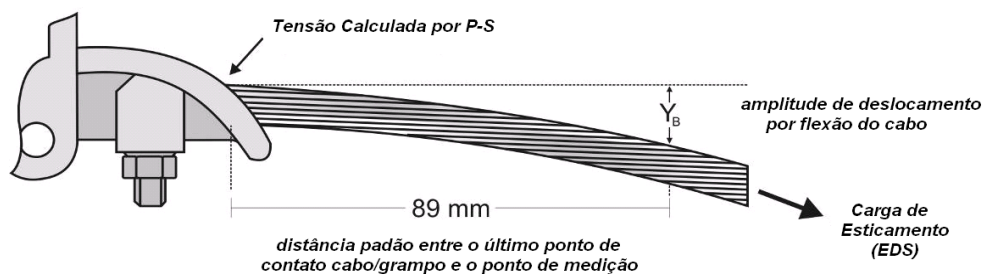


Figura 3.1 – Montagem esquemática cabo/grampo mostrando a posição padrão para medida da amplitude de deslocamento  $Y_B$

Para a realização deste estudo experimental, foi montada e utilizada a Bancada para Ensaio Mecânico à Fadiga de Cabos Condutores de Energia, do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília, localizado no Bloco SG 09 do Campus Darcy Ribeiro, Brasília - DF.

### 3.1 –MATERIAIS

As principais características dos materiais empregados na pesquisa são apresentadas a seguir.

#### 3.1.1 – Grampo de Suspensão

O grampo de suspensão utilizado na realização dos ensaios foi o monoarticulado, fornecido pela Forjasul. Consiste em uma peça composta do corpo que é de liga de alumínio de elevada resistência mecânica, não magnética e muito resistente à corrosão, de elementos ferrosos de aço carbono, zincado por imersão à quente, conforme NBR 6323 e duas cupilhas (contrapino) que podem ser de latão duro, bronze ou aço inoxidável. O grampo ensaiado suporta 60% da carga de ruptura do cabo de maior bitola utilizado e apresenta uma resistência mínima de escorregamento de 25% da carga de ruptura do maior condutor. A peça possui superfície lisa e uniforme, não apresenta arestas cortantes e a “boca” de saída tem ângulo máximo de  $20^\circ$ , evitando assim danificar os cabos. Este grampo é adequado para o uso em cabos condutores de alumínio ou aço/alumínio (CA - Cabo de Alumínio ou CAA – Cabo de Alumínio com Alma de Aço) com diâmetro mínimo de 17 mm e máximo de 29 mm, possui carga de ruptura de 7.000 kg e peso total de 1,28 kg. A

Figura 3.2 apresenta a geometria do grampo monoarticulado e as Figuras 3.3 (a) e (b) ilustram o conjunto: cabo condutor/grampo de suspensão monoarticulado e o parafuso tipo U do grampo, respectivamente.

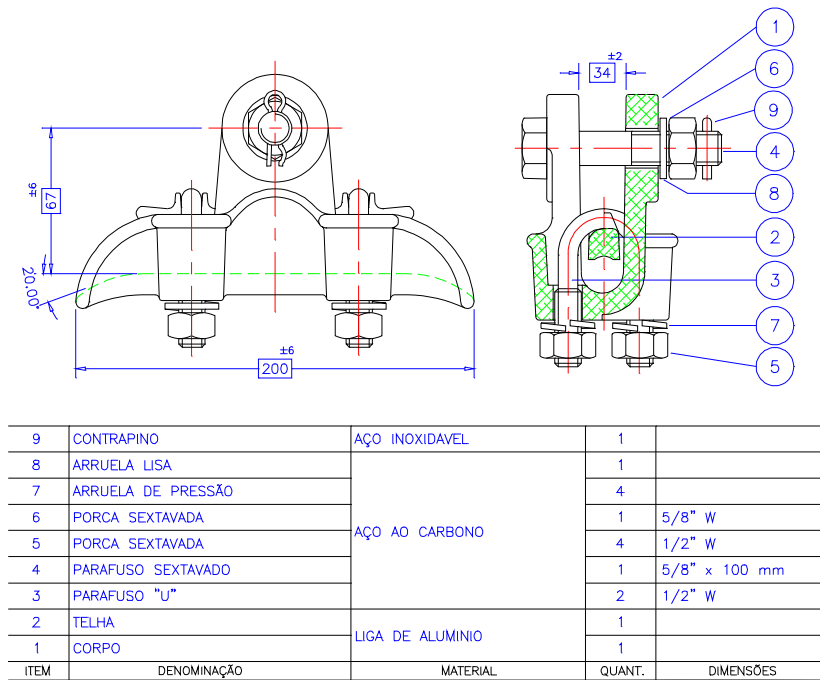


Figura 3.2 - Grampo de suspensão monoarticulado – Geometria

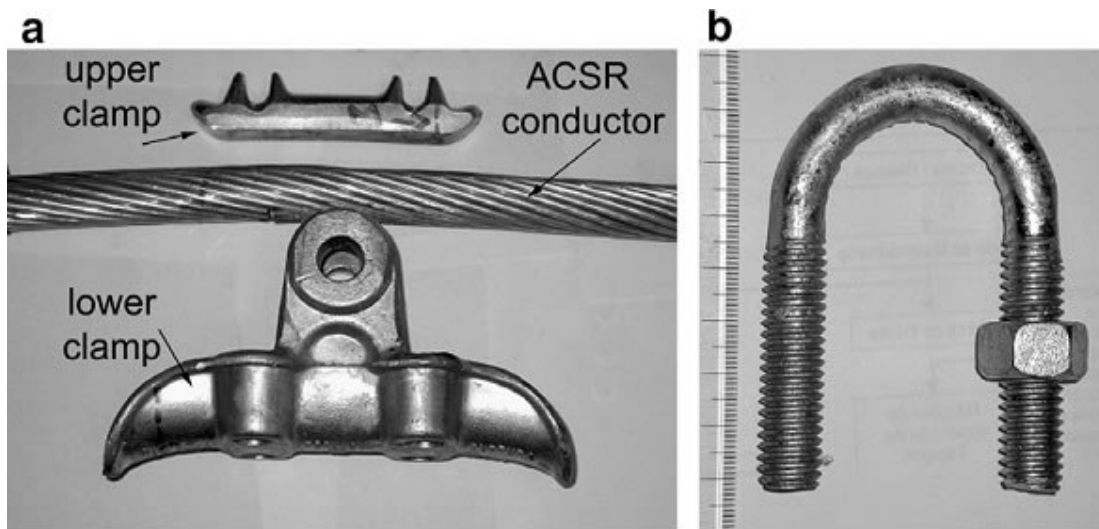


Figura 3.3 –a) Conjunto: cabo condutor/grampo de suspensão monoarticulado e b) Parafuso tipo U do grampo de suspensão, (Azevedo, 2009 – modificado)

### 3.1.2 – Cabo Condutor

Nos ensaios foi utilizado o cabo IBIS - 397,5 MCM, sendo este, o cabo usualmente utilizado pela CELG D nas linhas de subtransmissão com classe de tensão igual a 138 kV. As amostras ensaiadas foram fornecidas pela CELG D, cujo fabricante é a Prysmian Cabos e Sistemas, antiga Pirelli Cabos. Este cabo é composto de duas camadas concêntricas composta de 26 fios de alumínio 1350-H19, encordoadas em torno de uma “alma” de aço composta de 7 fios. Nas Tabelas 3.1 e 3.2 são apresentadas às características dimensionais e estruturais do condutor e as propriedades mecânicas da liga de alumínio 1350-H19, respectivamente. A Figura 3.4 mostra esquematicamente a seção transversal do referido cabo.

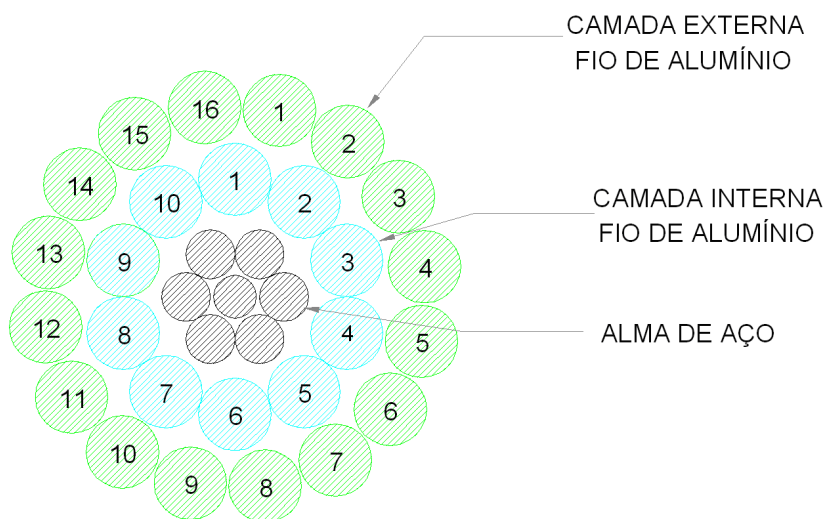


Figura 3.4 - Seção do cabo condutor IBIS 397,5 MCM – Formação 26/7

Tabela 3.1 – Características dimensionais e estruturais do cabo condutor (NEXANS, 2007, modificado)

Condutor	Bitola MCM	Área Nominal			Encordoamento nº de fios x diâmetro		Diâmetro Nominal Cabo (mm)	Peso Linear (kg/km)	Carga Ruptura (kgf)
		Alumínio mm <sup>2</sup>	Aço mm <sup>2</sup>	Total mm <sup>2</sup>	Alumínio	Aço			
IBIS	397,5	201,21	234	435,21	26x3,139	7x2,441	19,88	557,5	7394

Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas da liga de alumínio 1350-H19  
(Henriques, 2006, modificado)

Propriedades Físicas e Mecânicas	Unidade	Valor
Coefficiente de Poisson	-	0,33
Densidade	Kg/m <sup>3</sup>	2705
Dureza Brinell	-	50
Elongação na Quebra	%	1,5 (Min)
Limite de escoamento	MPa	165
Limite de Resistência à Tração	MPa	186
Módulo de Elasticidade	GPa	68,9
Resistência a Fadiga para 5 10 <sup>8</sup> Ciclos	MPa	48,3
Resistência ao Cisalhamento	MPa	103

### 3.2 – PLANEJAMENTO DOS TESTES

#### 3.2.1 – Definição de Parâmetros que Controlam os Ensaios

Para realização dos ensaios de fadiga é necessário prescrever os seguintes parâmetros:

1- Ângulo de mergulho, que simula o ângulo que o cabo faz com o grampo de suspensão

O ângulo de mergulho é função de diversos parâmetros, dentre os quais os mais importantes podem ser citados: i) tensão mecânica diária (EDS), ii) densidade do cabo, iii) comprimento do vão e iv) flecha admissível. É usual utilizar-se nas montagens cabo/grampo variações angulares entre 10° e 20°. O limite superior desse ângulo está relacionado ao fato da saída dos grampos ser projetada de modo a não danificar estaticamente o cabo condutor até um ângulo máximo de 20°. Já o limite inferior é limitado devido, basicamente, à carga de EDS que pode ser aplicada no cabo. Neste trabalho adotou-se um ângulo de mergulho de 10°.

A montagem grampo/cabo durante a realização destes ensaios, bem como, a escolha do tipo do grampo devem merecer atenção especial, tendo em vista que, o conjunto de solicitações que atuam sobre os cabos, sejam elas verticais ou horizontais, cria no condutor uma tensão mecânica, que é transmitida aos suportes. Nos pontos de suspensão, em virtude

do peso do condutor e de sua natural rigidez, aparecem esforços de flexão bastantes elevados. Quando a curvatura inferior da calha do grampo de suspensão não se amolda bem à curvatura natural do cabo, estes podem sofrer esmagamento dos filamentos, pois a superfície de apoio fica bastante reduzida (Fuchs, 1992).

2- Torque de aperto dos parafusos de fixação do cabo no grampo de suspensão, normalmente fornecido pelo fabricante do grampo

O torque de aperto que é aplicado nas porcas que fixam os parafusos ao grampo de suspensão, insere uma carga compressiva no conjunto cabo/grampo, evitando-se o escorregamento do cabo sobre o grampo de suspensão. Nos testes utilizou-se um grampo de suspensão monoarticulado que possibilita a montagem de cabos de diâmetros entre 17 a 29 mm. O torque de aperto independe do diâmetro do cabo utilizado, sendo especificado para cada tipo de grampo pelo fabricante. Para estes ensaios foi utilizado inicialmente um torque de 6,0 daNm, porém, observou-se que após a retirada do grampo, o cabo estava bastante danificado e, em algumas montagens, o grampo foi a ruptura, por isso, este valor foi reduzido para 5,0 daNm. A Figura 3.5 ilustra o grampo rompido após a aplicação do torque igual 6,0 daNm.

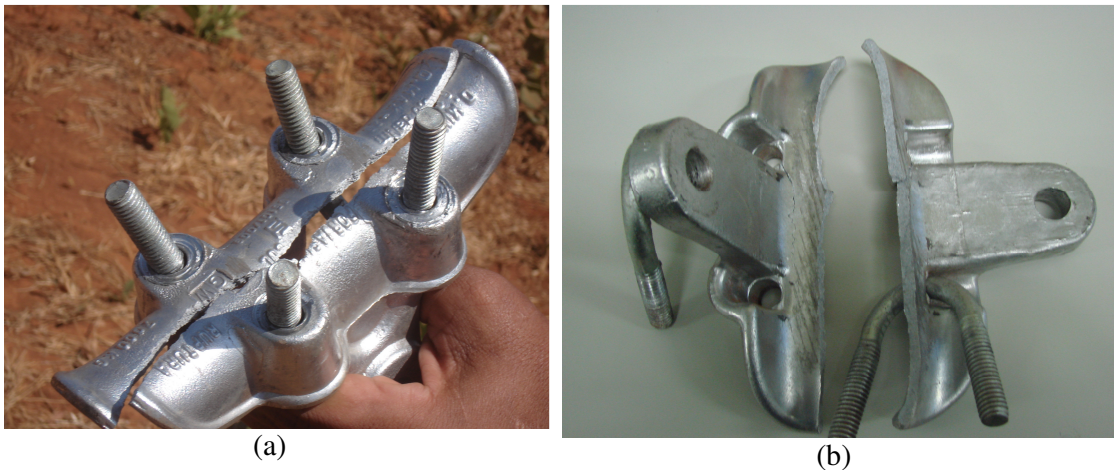


Figura 3.5 – Grampo de suspensão monoarticulado rompido após a aplicação do torque igual 6,0 daNm



### 3- Carga de pré-tensionamento

A carga de pré-esticamento está associada à tensão média mecânica (EDS- *Every Day Stress*) que o cabo é solicitado ao longo de sua vida. Nos ensaios realizados adotou-se uma carga de pré-esticamento igual a 20% da carga de ruptura do cabo IBIS, o que corresponde a um valor de 14,79 kN.

### 4- Amplitude de deslocamento

A amplitude de deslocamento que é aplicada no cabo durante a realização dos testes no ponto localizado a 89 mm do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão é também uma das variáveis de controle. Para estes ensaios foram escolhidos quatro diferentes níveis de deslocamento: 0,8; 0,9; 1,0 e 1,1 mm (pico-a-pico). A Figura 3.6 ilustra a amplitude de deslocamento.

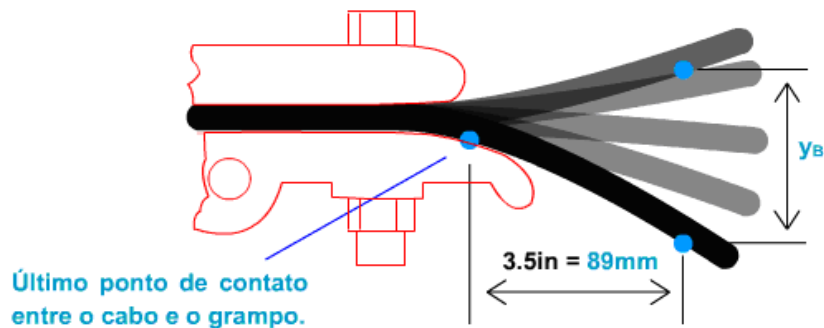


Figura 3.6 – Amplitude de deslocamento -  $Y_B$ , (Araújo, 2008 – modificado)

## 3.3 - DESCRIÇÃO DA BANCADA

### 3.3.1 - Visão Geral

A Figura 3.7 apresenta o desenho esquemático da montagem da bancada de ensaios. O comprimento total do vão é de 46,8 m, podendo ser subdividido em dois outros vãos: ativo e passivo. O vão ativo define o comprimento do cabo ensaiado, delimitado pelo centro da roldana (bloco fixo 3) e o centro do grampo de suspensão (bloco móvel), podendo variar de 31 a 41m, sendo que nessa extensão estão contidos todos os instrumentos e sensores de

medição necessários para o controle do ensaio. O vão passivo é utilizado apenas para fixação do cabo.

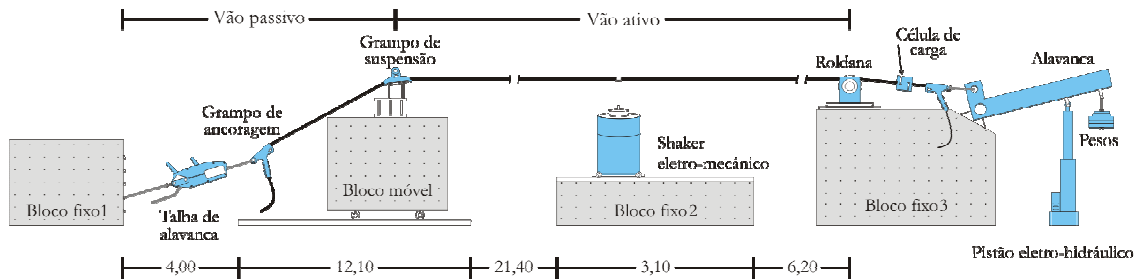


Figura 3.7 - Desenho esquemático da montagem da bancada de ensaios

Os três blocos fixos e o bloco móvel são em concreto armado. O bloco móvel foi montado sobre uma chapa espessa de aço que foi fixada a dois eixos dotados de rolamentos, para permitir a movimentação do bloco e desta forma, possibilitar a variação de tamanhos de cabos. No local destinado a movimentação do bloco móvel e sobre o bloco fixo 2, que serve de suporte para o *shaker* eletromecânico, descrito no item 3.3.3, foram fixados trilhos de aço com perfil em I e em C, respectivamente. A Figura 3.8 mostra a foto do bloco móvel montado em uma base com rolamentos e os trilhos para o seu deslocamento. A Figura 3.9 apresenta o bloco fixo 2 com o trilho para deslocamento do *shaker* eletromecânico. A Figura 3.10 ilustra o bloco fixo 3 que possui os equipamentos para o controle de tração do cabo.



Figura 3.8 – Bloco móvel montado em uma base com rolamentos e os trilhos



Figura 3.9 – Bloco fixo com o trilho para deslocamento do *shaker*



Figura 3.10 – Bloco fixo 3 que contém os equipamentos para controle de tração do cabo

### 3.3.2 - Mecanismo de Tracionamento do Cabo

Uma das extremidades da amostra de teste é fixada a um grampo de ancoragem passante, o qual é acoplado ao dispositivo extensor, que é fixado ao bloco fixo 1. A Figura 3.11 mostra a talha de alavanca ancorada ao bloco de fixação.



Figura 3.11 - Talha de alavanca ancorada ao bloco de fixação 1

A outra extremidade de teste é fixada a um grampo de ancoragem passante, o qual é interligado a célula de carga, que por fim é ligada ao braço de alavanca. As Figuras 3.12 (a) e (b) mostram respectivamente a fixação do cabo através do grampo de ancoragem passante no bloco fixo 3 e o detalhe do grampo de ancoragem passante e a célula de carga.



(a)



(b)

Figura 3.12 – a) Fixação do cabo através do grampo de ancoragem passante no bloco fixo 3, b) Detalhe do grampo de ancoragem passante e a célula de carga

Para os ensaios é necessária a aplicação de uma carga de pré-esticamento, feita através de um atuador eletro-hidráulico ligado a um braço de alavanca. A célula de carga acoplada no vão ativo permite controlar o nível da carga desejada. O atuador eletro-hidráulico é ligado

a um controlador eletrônico que permite manter a tensão constante no cabo, dentro de uma faixa de 2,5 % da carga de tracionamento desejada, o que permite corrigir possíveis variações de tensões no cabo devido a mudanças de temperatura ambiente e ao *creep*. A Figura 3.13 mostra o painel de controle da carga aplicada.

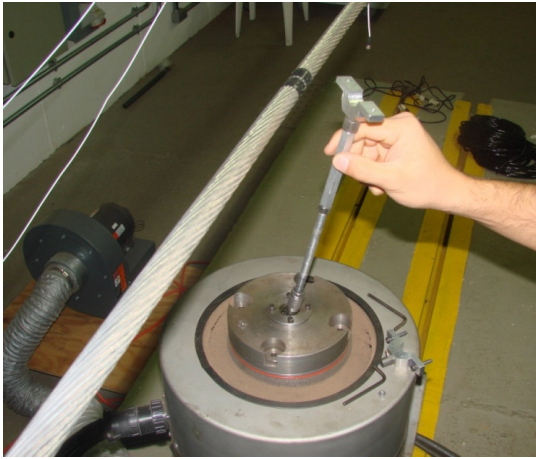


Figura 3.13 – Painel de controle da carga de pré-esticamento aplicada no cabo

### 3.3.3 - Mecanismo Excitador (*Shaker*)

A excitação do cabo foi feita por um excitador eletrodinâmico (*shaker*) com as seguintes características: marca/modelo Labworks Inc. ET – 127; força senoidal de 2.225 N (pk); força aleatória de 1.557 N (rms); força de choque de 4.450 N (pk) e 50  $\mu$ .s de pulso; deslocamento máximo de 25,4 mm (pk-pk) continuamente e 30,48 mm (pk-pk) entre paradas; velocidade máxima de 3.556 mm/s (pk); acelerações máximas dirigidas, ressonante e pulso de choque de 100g (pk), 150 g (pk) e 300 g (pk), respectivamente; e faixa de frequência DC de 4,5 kHz.

O acoplamento do excitador ao cabo foi feito através de uma haste rígida de alumínio, com 12,7 mm de diâmetro, fixada ao cabo por uma braçadeira fabricada também de alumínio. Entre a extremidade superior da haste de alumínio e a braçadeira, foi instalado um transdutor de força e sobre a braçadeira foi instalado um acelerômetro. Desta forma pode-se monitorar a frequência e a força aplicada pelo excitador ao cabo. A Figura 3.14 (a) mostra o detalhe da montagem da haste rígida de alumínio, e a Figura 3.14 (b) mostra o acoplamento do excitador fixo ao cabo.



(a)



(b)

Figura 3.14 (a)– Montagem da haste rígida de alumínio; (b) Acoplamento do *shaker* ao cabo

#### 3.3.4 - Montagem do Grampo de Suspensão

O ponto utilizado para o controle de deslocamento no ensaio está sobre o cabo, distante 89 mm do último ponto de contato entre a base do grampo de suspensão e o cabo. A boca do grampo de suspensão monoarticulado, montado na bancada, está localizada a 68,5 mm desse ponto de referência, o qual a partir deste momento será chamado de “ponto 89”. Portanto, a distância entre o último ponto de contato (do cabo com a base do grampo) e a boca do grampo é de 20,5 mm. A Figura 3.15 mostra a vista superior da montagem cabo/grampo.



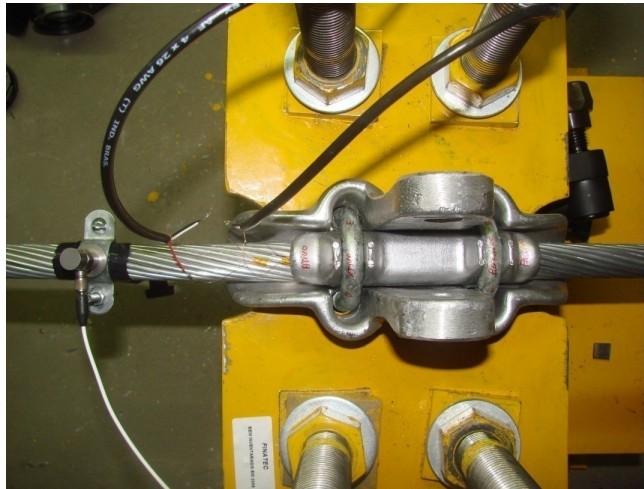


Figura 3.15 - Vista superior da montagem cabo/grampo

### 3.3.5 - Dispositivo para Fixação do Grampo de Suspensão.

Para fixação do grampo de suspensão foi construído um dispositivo metálico na face superior do bloco móvel, que permite reproduzir o ângulo de saída do condutor que é tipicamente de  $10^\circ$  para grampos de suspensão e de  $0^\circ$  para os grampos amortecedores. A Figura 3.16 mostra a montagem cabo/grampo para uma amostra ensaiada do cabo. No detalhe é possível a visualização do acelerômetro montado no ponto em que é medido o deslocamento do cabo (ponto 89).

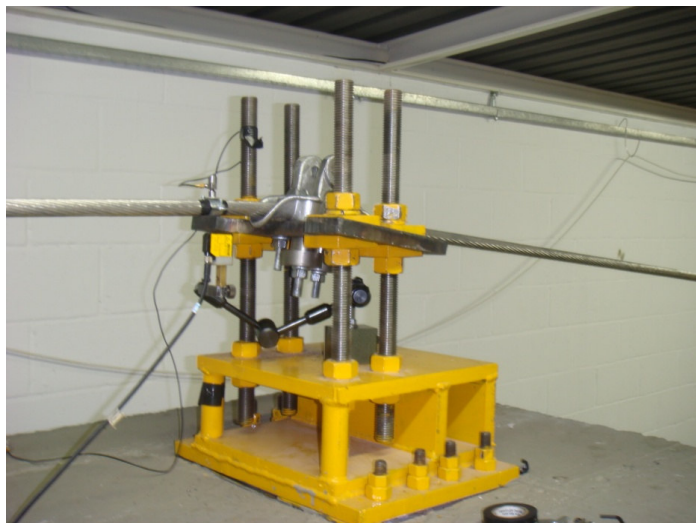


Figura 3.16 – Montagem do grampo de suspensão sobre o bloco móvel

Para monitorar a força de aperto no grampo de suspensão, quatro arruelas instrumentadas (*load washers*) foram montadas junto às quatro porcas de aperto do referido grampo.

Com o objetivo de variar o comprimento do vão ativo do condutor em teste, o dispositivo de fixação do grampo de suspensão foi montado sobre um bloco de concreto (bloco móvel), com dimensões 1,0 x 0,92 x 1,0 m, ancorado a um carrinho fabricado em aço que corre sobre um trilho, também em aço, com 12,8 m de comprimento, podendo assim variar o comprimento do vão ativo do condutor de 37 a 44 m.

### 3.3.6 - Dispositivo de Detecção de Quebra de Fios.

O dispositivo utilizado para detecção de quebra de fios permite identificar o instante (número de ciclos) e a camada onde ocorreu a quebra do fio de alumínio. Este dispositivo é composto por duas hastes de alumínio presas ao cabo por uma braçadeira, dois sensores de deslocamento a laser, com faixas de medição de 16 a 120 mm e resolução de 2 a 100  $\mu\text{m}$  acoplados a um sistema de aquisição de dados modular, descrito no item 3.3.8.

O dispositivo é instalado no local de ocorrência do nó da amostra ensaiada mais próximo ao grampo de suspensão. O projeto do dispositivo de quebra dos fios é baseado no processo de fabricação do condutor, observando-se que o cabo é formado através do encordoamento de fios metálicos.

No caso do condutor ACSR (*Aluminium Conductor Steel Reinforced*) IBIS, em torno da alma do cabo, constituída por sete fios de aço galvanizados são enrolados duas camadas ou coroas concêntricas totalizando vinte e seis fios de alumínio. O sentido do enrolamento de cada uma das camadas é sempre oposto ao da camada anterior.

O processo de fabricação do condutor faz com que a força axial no fio de um condutor tracionado produza componentes de força tangencial e longitudinal no mesmo. Assim, quando ocorre a quebra de um fio, a carga por ele suportada deve ser distribuída entre os fios remanescentes para que o equilíbrio se mantenha. Como resultado desta acomodação, o condutor gira ou distorce em relação ao seu eixo longitudinal. A rotação é causada pelo momento resultante do produto da componente tangencial da força no fio pela distância do mesmo ao eixo longitudinal do condutor. Conseqüentemente, a falha de um fio localizado em uma camada externa do condutor gera um maior momento do que a falha de um fio interno, e como cada camada é enrolada no sentido oposto, uma em relação a outra, o sentido de rotação do condutor depende da camada em que o fio quebrado se localiza.



O dispositivo de detecção de quebras se utiliza do fato do condutor girar ou distorcer quando o fio quebra, isto é, quando ocorre a quebra de um fio, o cabo gira de um ângulo de rotação ( $\alpha$ ), obtido por:

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{L_1 - L_2}{\frac{2}{100}} \right) \quad (3.1)$$

A Figura 3.17 apresenta esquematicamente o dispositivo e a forma de medição desse ângulo.

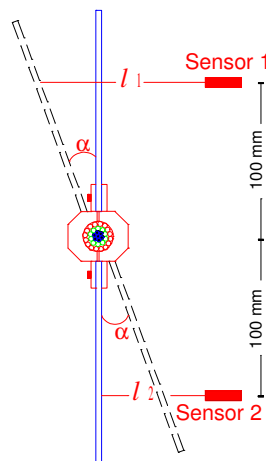


Figura 3.17 – Desenho esquemático ilustrando a forma de medição do ângulo de rotação

Os sensores a laser foram posicionados de maneira a medir os deslocamentos  $L_1$  e  $L_2$  da barra de referência em relação ao plano horizontal, destacando-se que a utilização de dois sensores laser permite isolar o movimento de translação do movimento de rotação do cabo, assim elimina-se a possibilidade do sistema acusar um deslocamento de corpo rígido do cabo como se fosse uma rotação do mesmo. A Figura 3.18 apresenta o dispositivo de detecção de quebra de fios.



Figura 3.18- Dispositivo de detecção de quebra de fios

### 3.3.7 – Sistema de Aquisição de Dados.

Foi utilizado um sistema de aquisição de dados fabricado pela Lynx Tecnologia, modelo ADS2000. Este equipamento, o software de aquisição de dados e o software de controle da bancada acoplado a um microcomputador foram os responsáveis pela aquisição dos dados de todo o sistema de instrumentação utilizado na bancada de testes.

O sistema de instrumentação e controle é composto de: i) quatro extensômetros ; ii) quatro arruelas instrumentadas (*load washers*); iii) sensor de temperatura (termopar J), um sensor de deslocamento a laser e dois acelerômetros, um para medição da amplitude no ponto 89 e outro para monitoramento da aceleração e frequência de excitação do *shaker* iv) dois sensores de deslocamento a laser (dispositivo de detecção de rotação); v) um transdutor de força (controle da força de excitação); vi) uma célula de carga (medição da força de tração do cabo); vii) um excitador (*shaker*); viii) um amplificador para o excitador e ix) um controlador do excitador.

O software de controle do excitador, fornecido pelo fabricante, é programado para manter os valores de deslocamento pico-a-pico, frequência e forma de onda no ponto 89 mm, obtidos a partir do acelerômetro instalado neste ponto. Este software também foi programado para cessar a excitação da amostra do cabo ensaiado quando o dispositivo de detecção de quebra de fios indicasse a quebra de pelo menos três fios (programada para finalização dos testes, assim, as variáveis monitoradas e analisadas durante os ensaios foram: i) deslocamento do ponto 89 do sensor de deslocamento a laser; ii) controle da

amplitude de excitação do cabo no ponto 89 por meio do acelerômetro acoplado a esse ponto; iii) registro dos dados oriundo do dispositivo de detecção de rotação.

A Figura 3.19 mostra uma vista da sala de controle e de alguns equipamentos do sistema de controle, tais como o amplificador e o controlador.

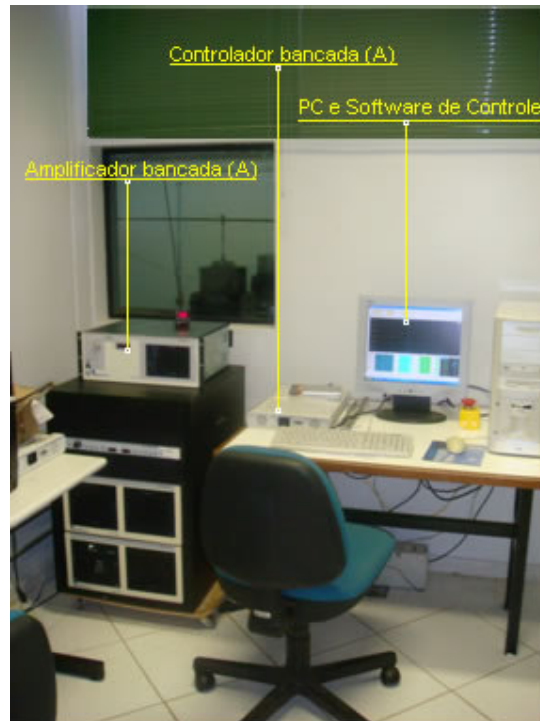


Figura 3.19- Sala de controle

### 3.4 - METODOLOGIA

Para esta pesquisa foram utilizadas 9 amostras do cabo condutor IBIS – 397,5 MCM. Os ensaios foram executados, de acordo com as recomendações da CIGRE (1985), EPRI (1979) e IEEE (1978).

#### 3.4.1 – Preparação do Corpo de Prova.

Os corpos de prova foram retirados das bobinas do cabo condutor desprezando-se sempre o comprimento relativo a primeira espira e evitando torções e desdobramentos com raios de curvaturas menores aos mínimos admissíveis, tendo como referência o raio da bobina.

Todos os cuidados foram tomados para que as superfícies com as quais o cabo em lançamento tivesse contato não fossem de material metálico e não contivessem objetos cortantes, tais como pregos, parafusos, ou que pudessem danificar ou contaminar o mesmo. A Figura 3.20 mostra a retirada do cabo condutor da bobina, utilizando uma polia auxiliar como apoio da extremidade do cabo.



Figura 3.20 – Retirada do cabo condutor da bobina

Para o posicionamento do corpo de prova na Bancada, utilizou-se como apoio, polias auxiliares que estavam posicionadas ao longo do vão do teste, conforme mostra a Figura 3.21.



Figura 3.21 - Polias auxiliares posicionadas ao longo do vão do teste

Após a amostra ter sido esticada com um comprimento de aproximadamente 49 m é feita a amarração do cabo no ponto de corte através de braçadeiras e logo em seguida a operação de corte é realizada utilizando-se disco de corte. O procedimento quanto ao corte do cabo foi seguido para as duas extremidades de cada corpo de prova. A Figura 3.22 mostra o corte do corpo de prova.



Figura 3.22 - Corte do corpo de prova utilizando-se disco de corte

#### 3.4.2 – Montagem do Corpo de Prova na Bancada.

Para a montagem dos corpos-de-prova foram seguidos os procedimentos descritos abaixo:

- i- Foi fixada uma das extremidades do corpo de prova no grampo de ancoragem posicionado junto ao bloco de apoio do braço de alavanca (bloco fixo 3);
- ii- Utilizando-se uma talha manual, o braço de alavanca foi suspenso o máximo possível, antes, porém, colocou-se cerca de 60 kg de contrapeso (equivalente a uma tração no cabo de 6 kN na gaiola de pesos);
- iii- Uma célula de carga foi instalada entre o braço de alavanca e o grampo de ancoragem;
- iv- O corpo de prova foi colocado dentro do grampo de suspensão (montado sobre o bloco móvel), tomando-se o cuidado de não danificar a região do cabo que ficará em contato com o referido grampo. Os parafusos de fixação do grampo de suspensão, nesta fase da montagem, deverão ser instalados, mas suas porcas de fixação não deverão ser apertadas;

- v- A outra extremidade do corpo de prova foi fixada no grampo de ancoragem localizado no vão passivo junto ao bloco de ancoragem (bloco fixo 1);
- vi- A talha de alavanca foi instalada entre o grampo de ancoragem fixado na extremidade do vão passivo e o bloco de ancoragem (bloco fixo 1);
- vii- O corpo de prova foi tracionado utilizando-se a talha de alavanca, até que foi atingida a carga de tração definida para o teste;
- viii- Após atingida a carga de tração definida no teste, fixou-se o grampo de ancoragem (vão passivo) ao bloco de ancoragem (bloco fixo 1) utilizando-se um parafuso esticador;
- ix- Após a instalação do parafuso esticador, a carga do guincho de alavanca foi aliviada lentamente até ficar nula;
- x- Foram retiradas as polias auxiliares que estavam posicionadas ao longo do vão do teste;
- xi- Concluída a instalação do corpo de prova na Bancada, foi adicionado contra pesos ao braço de alavanca até que a carga de tração indicada pela célula de carga atingisse cerca de 40% da carga de ruptura do cabo em teste durante 24 horas;
- xii- Após o período de acomodação do corpo de prova, parte dos contra pesos foram retirados até que o valor da carga de tração no cabo atingisse o valor definido. O ajuste final do valor da carga de tração foi feito através do parafuso esticador;
- xiii- As arruelas instrumentadas foram posicionadas nos parafusos de fixação do grampo de suspensão e em seguida, as porcas foram apertadas utilizando-se um torquímetro com torque de 5,0 dNm;
- xiv- Em seguida, o corpo de prova foi fixado ao excitador eletromecânico (shaker) utilizando-se um suporte composto de uma haste e uma braçadeira, fabricadas em alumínio. A haste foi posicionada em ângulo reto em relação ao cabo testado. Entre a haste e a braçadeira foi instalado um transdutor de força e sobre a braçadeira foi instalado um acelerômetro, através do qual foi monitorada a frequência de excitação do sistema;
- xv- Finalmente o sensor laser foi posicionado a 89 mm do primeiro ponto de contato do cabo com o grampo de suspensão e em seguida foram verificadas todas as ligações dos sensores aos equipamentos de monitoração;

O sistema de detecção da quebra dos fios, bem como, o atuador linear, só foram introduzidos na bancada depois de feita uma varredura em frequência e fixada a frequência de excitação imposta durante o teste.

### 3.4.3 – Operação da Bancada.

Durante a realização dos ensaios foram mantidas constantes a carga de tração no corpo de prova e a amplitude de deslocamento prescrita a 89 mm do primeiro ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão. Foram controlados também, os sistemas que atuaram sobre as mesmas.

A seqüência utilizada nos ensaios para a operação do sistema de monitoração da Bancada é descrita a seguir:

- i- Inicialmente foram ligados o microcomputador, o controlador do excitador eletromecânico (*shaker*) e o sistema de aquisição de dados;
- ii- Logo após inicializou-se o programa de análise de sinais que possibilitou o pós-processamento de sinais armazenados em séries temporais, bem como, a visualização em forma gráfica ou forma de tabela os dados dos arquivos;
- iii- O programa de controle do sistema de excitação (*SignalStar Vector Shaker Controller*) foi inicializado através do menu iniciar, programas, *SignalStar* e em seguida definidas as configurações de controle;
- iv- Depois de estabelecidas as variáveis do sistema, foi feita uma varredura em frequência para se detectar as frequências naturais da amostra em teste;
- v- Foi selecionada uma frequência de ensaio próxima a uma das frequências naturais (quanto mais alta melhor) e excitou-se o sistema com um valor de cerca de dois terços do valor da frequência natural escolhida, mantendo-se constante o deslocamento prescrito a 89 mm da “boca” do grampo de suspensão. Nos casos em que o sistema ficou instável, o deslocamento imposto foi diminuído ou foi utilizada uma frequência natural menor do que a anterior;
- vi- Após a estabilização do sistema foi marcado no corpo de prova, o nó mais próximo ao grampo de suspensão, através de uma fita isolante preta. Neste ponto foi instalado o sistema de detecção de quebra de fios;
- vii- O dispositivo de detecção de quebra fios foi instalado com o excitador desligado e em seguida o dispositivo contendo dois sensores a laser foi posicionado a uma distância das barras que permitisse a percepção de um sinal adequado pelos sensores;

- viii- Com o excitador ainda desligado, conectou-se o atuador linear ao braço de alavanca ligando em seguida o seu controlador. O acionamento do atuador foi programado em função da carga de tração definida para o teste;
- ix- Finalmente o sistema foi religado, dando início ao teste de fadiga no corpo de prova.
- x- Após ter ocorrido a quebra de três fios, o sistema encerrou o teste automaticamente, se assim desejado;
- xi- Depois de encerrado o teste e antes de cortar o trecho do cabo onde ocorreu a quebra dos fios (junto ao fio de suspensão), foram fixadas braçadeiras nas respectivas extremidades e logo em seguida realizado o corte. Desta forma, foi preservada a região onde ocorreu a falha, possibilitando assim, a análise dos pontos de quebra.
- xii- Este processo foi repetido para as nove amostras seguintes.



## CAPÍTULO 4

### 4- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental. A seqüência da apresentação inicia-se com a divulgação dos dados obtidos nos 9 (nove) ensaios realizados em amostras do cabo condutor IBIS, logo após, é feita a comparação entre a curva obtida e a curva Safe Border Line (CSBL), seguida pelo mapeamento da camada e do posicionamento das falhas por fadiga dos fios em relação a boca do grampo. Os dados de durabilidade para construção da curva S-N preliminar do cabo IBIS foram obtidos por meio da fórmula de *Poffenberger-Swart* (P-S), que finalmente são comparados com algumas curvas de fadiga de cabos disponíveis na literatura.

#### 4.1- RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS

Os ensaios de fadiga foram realizados utilizando-se freqüências entre 13 a 30 Hz. A escolha da freqüência mais adequada para condução dos testes baseia-se em um ensaio prévio de fadiga para varredura das freqüências de ressonância do sistema.

O teste de varredura é conduzido por meio do Programa DP 550Win – Vibration Controller, em controle de deslocamento, medido a partir de um acelerômetro, PCB®, modelo 352C33, posicionado sobre a braçadeira que une o cabo a haste do *shaker* (*exitador*), Figura 4.1. Durante o ensaio de varredura também coletam-se dados de deslocamento, fornecidos por outro acelerômetro, do mesmo modelo, posicionado a 89 mm do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão, Figura 4.2, e de força, por meio de uma célula de carga, modelo 208C03, PCB®, instalada na haste que liga o cabo ao *shaker*, Figura 4.1. Para finalmente determinar a freqüência que será utilizada no ensaio, compara-se a razão entre os deslocamentos sobre o *shaker* e no ponto 89, além de se avaliar o valor da força na haste de ligação do cabo ao *shaker*. Uma freqüência apropriada estará bem próxima a uma freqüência de ressonância, e para não forçar o

*shaker*, será escolhida de tal forma que a razão entre esses deslocamentos não ultrapasse 5, e a força medida na haste seja inferior a 200N.

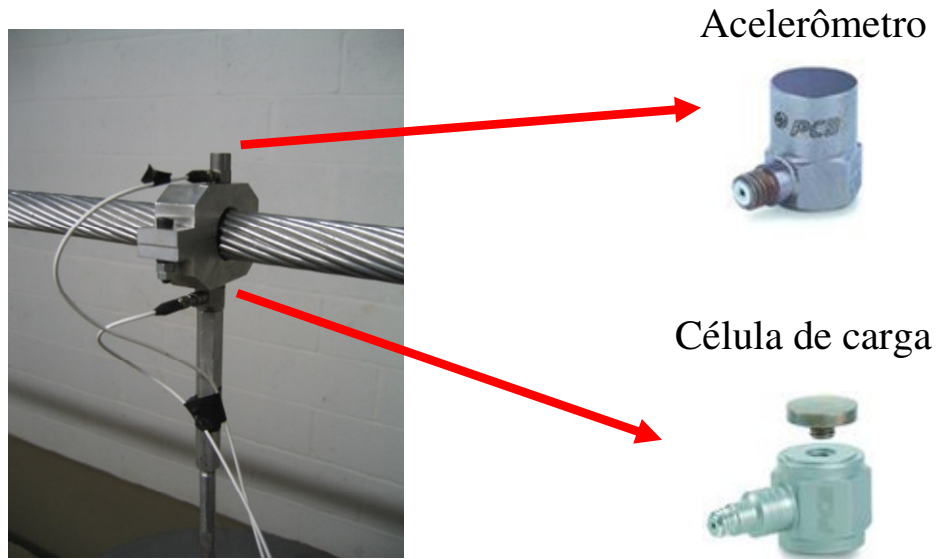


Figura 4.1 - Acelerômetro, posicionado sobre a braçadeira que une o cabo a haste do *shaker* e célula de carga localizada abaixo da braçadeira.

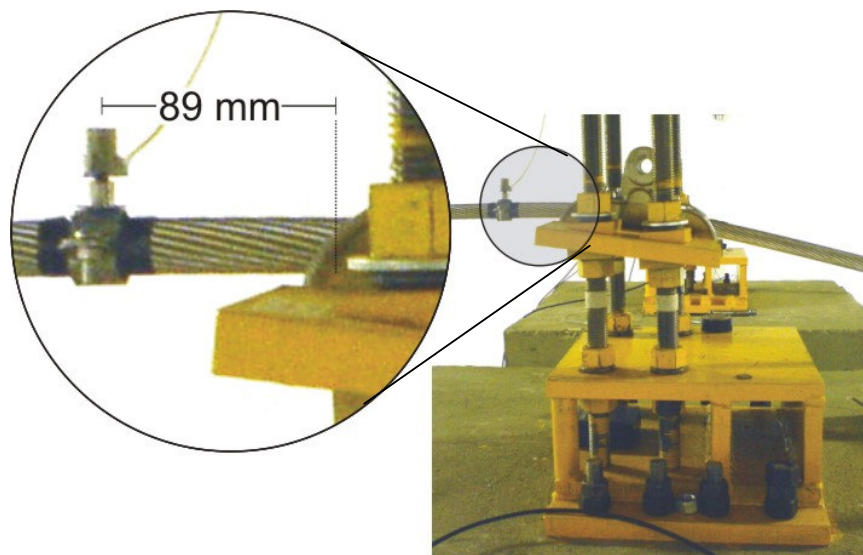


Figura 4.2 - Montagem cabo/grampo mostrando no detalhe, o acelerômetro na posição padrão do ponto a 89 mm da boca do grampo.

Para esta pesquisa foram feitos 9 ensaios, sendo 1 amostra com amplitude de deslocamento igual a 0,8 mm, outra com 0,9 mm, 4 amostras com 1,0 mm e 3 amostras com 1,1mm.

O critério de parada do ensaio de fadiga para cabos condutores proposto pela CIGRE (1979), considerava a ruptura de 10% do número de fios de alumínio do cabo ou 3 fios, sendo adotado o maior valor. Entretanto, em 2008, a CIGRE apresentou uma nova proposta, a qual define a ruptura de apenas 1 fio de alumínio. Neste trabalho, considerou-se como critério de parada do ensaio, a ruptura de pelo menos 3 fios. Em alguns ensaios optou-se por deixar o ensaio continuar por período mais longo e registrar o instante e o local de todas as quebras existentes. O ensaio também era interrompido quando atingia a marca de 25 milhões de ciclos, mesmo não havendo o registro de rupturas.

Em geral esta opção por se encerrar o ensaio com a ruptura de 3 fios de alumínio está associada ao fato de que, neste estágio, a redução da seção do cabo provoca o aquecimento do trecho comprometido, aumentando as perdas elétricas, devido ao aumento da resistência à passagem de corrente elétrica gerada pela redução de área da seção transversal do cabo. Mais ainda, muito provavelmente, deve ocorrer um processo de aceleração da ruptura dos demais fios, pois a mesma carga mecânica (estática e dinâmica) será redistribuída para um menor número de fios.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados dos ensaios realizados, para EDS igual a 20 %, os quais serão utilizados nas análises seguintes.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios para EDS 20%

Amostra	$Y_B$ (mm)	$S_a$ (MPa) P-S	1ª quebra	2ª quebra	3ª quebra	Média 1ª quebra	Média 2ª quebra	Média 3ª quebra
			$N$ (ciclos)	$N$ (ciclos)	$N$ (ciclos)	$N$ (ciclos)	$N$ (ciclos)	$N$ (ciclos)
1	1	31,68	3,10E+06	4,34E+06	7,12E+06	1,90E+06	3,52E+06	5,52E+06
2			1,36E+06	2,73E+06	5,74E+06			
3			1,23E+06	3,51E+06	3,71E+06			
4			3,57E+06	5,82E+06	7,31E+06*			
5	0,9	28,51	2,98E+06	6,34E+06	**	2,98E+06	6,34E+06	-
6	0,8	25,35	***	***	***	-	-	-
7	1,1	34,85	1,78E+05	3,99E+05	1,53E+06	3,14E+05	5,63E+05	1,56E+06
8			1,28E+05	2,24E+05	1,31E+06			
9			6,35E+05	1,07E+06	1,84E+06			

\* A terceira ruptura para esse ensaio não foi completa. O fio possuía uma trinca que claramente avançou por mais de 50% de seção transversal do fio.

\*\* O ensaio foi interrompido para 9 E+06 número de ciclos e não houve o rompimento de um terceiro fio.

\*\*\* O ensaio foi interrompido quando o número de ciclos atingiu 25 E+07, não havendo rompimento de nenhum fio.

## 4.2 - CURVA S-N PRELIMINAR DO CABO IBIS X CURVA CSBL

Como apresentado no Capítulo 2 o levantamento da curva S-N ou de Wöhler, para a montagem cabo condutor/grampo de suspensão é uma ferramenta fundamental para a utilização de metodologias modernas para o projeto e a manutenção de LT's. Neste sentido, a Fig. 4.3 apresenta os dados relativos aos ensaios com o cabo IBIS, sob uma EDS de 20%, em um gráfico da amplitude de tensão versus o número de ciclos.

Deve-se lembrar que, apesar dos ensaios terem sido conduzidos em controle de deslocamento, a fórmula de *Poffenberger-Swart* pode ser invocada para conversão deste valor em uma amplitude de tensão correspondente. Os dados utilizados para a construção da curva se referem a média da 3ª quebra e estão contidos na Tabela 4.1, a partir dos quais foi traçado uma linha de tendência, tipo potência, utilizando-se a ferramenta “Assistente de Gráfico” do programa Microsoft Excel, 2003, obtendo-se a seguinte equação:

$$S_a = 188,14 N^{-0,1171} \quad (4.1).$$

Para efeito de comparação e análise, também plotou-se no mesmo gráfico, a Curva CSBL, substituindo-se os valores das amplitudes de tensão, obtidas a partir da fórmula de P-S e as respectivas amplitudes de deslocamento utilizadas neste trabalho, na equação abaixo descrita:

$$S_a = 450 N^{-0,2} \quad (4.2).$$

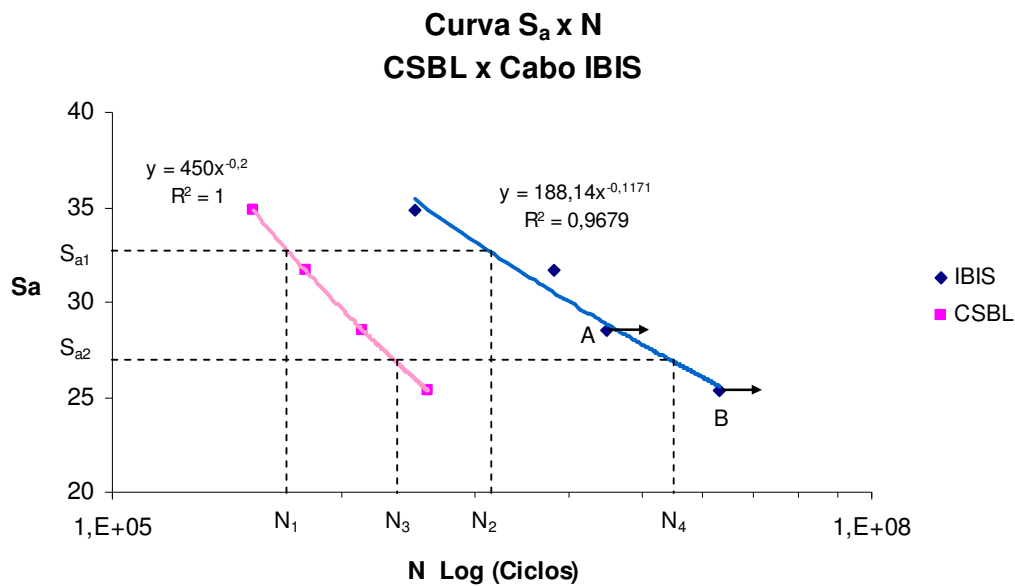


Figura 4.3 – Curva  $S_a \times N$  – CSBL x Cabo IBIS

Analisando a Figura 4.3, nota-se a presença de pontos com setas, na curva do cabo IBIS. O ponto A indica o ensaio com amplitude de deslocamento igual a 0,9 mm, o qual foi interrompido com número de ciclos igual a 9,03 milhões, sem ocorrer a 3ª quebra de fio, e o ponto B se refere ao ensaio com amplitude de deslocamento igual a 0,8 mm, o qual foi interrompido com 25 milhões de ciclos, sem qualquer quebra detectada. No primeiro caso (ponto A), a análise do gráfico de rotação apontou a possibilidade de existir a ruptura de um terceiro fio, entretanto, ao examinarmos a amostra, essa suspeita não se confirmou. No segundo caso, o ensaio foi interrompido devido a seu tempo de execução. Nesse sentido, estabeleceu-se o limite de 25 milhões de ciclos para interrupção dos ensaios, mesmo quando não houvesse qualquer quebra de fios. Esse, portanto, pode ser considerado como um limite de fadiga inferior para esse nível de amplitude de deslocamento (ou de tensão), ou seja, um limite seguro, sabe-se que na verdade o cabo suportará mais ciclos até que ocorram as quebras.

Observando ainda a Figura 4.3 pode-se afirmar que a curva CSBL apresenta valores muito mais conservativos que aqueles obtidos experimentalmente. A Tabela 4.2 apresenta as expectativas de vidas do cabo IBIS tomando com referência a CSBL e a Curva S-N preliminar obtida a partir dos dados dos ensaios.

Tabela 4.2 – Expectativa de vida para Curva S-N preliminar do cabo IBIS e para a CSBL

$Y_B$ (mm)	$S_a$ (MPa)	NÚMERO DE CICLOS ATÉ A FALHA		Razão $3Q/CSBL$
		CSBL	Experimental 3ª Quebra	
1,1	34,9	3,59E+05	1,56E+06	4,4
1	31,7	5,78E+05	5,52E+06	9,6
0,9	28,5	9,79E+05	9,03E+06	9,2
0,8	25,3	1,76E+06	2,50E+07	14,2

<sup>1</sup> O ensaio foi interrompido para esse número de ciclos e não houve o rompimento de um terceiro fio.

<sup>2</sup> O ensaio foi interrompido quando o número de ciclos atingiu 25.000.000, não havendo rompimento de nenhum fio.

Observando-se a Tabela 4.2, percebe-se que para os ensaios com amplitude de deslocamento ( $Y_B$ ) igual a 1,0 mm, a razão entre os valores obtidos experimentalmente e os previstos pela CSBL é de aproximadamente 10, isto é, a vida do cabo é 10 vezes maior quando calculada utilizando a curva específica do material como referência, enquanto que para  $Y_B$  igual a 1,1 mm, a CSBL apresentou vida aproximadamente 5 vezes menor, indicando uma tendência à aproximação das curvas à medida que a amplitude aumenta. Este comportamento é caracterizado de forma ilustrativa por meio das curvas de Wöhler apresentadas na Fig 4.3. Esta tendência também é constatada em algumas curvas referentes a cabos (Al e liga) que compõe os resultados de ensaios de fadiga compilados pela CIGRE (1979). Pode-se verificar que, para o nível de tensão  $S_{a1}$ , a vida obtida em laboratório para o cabo IBIS é  $N_2$ , enquanto que para este mesmo nível de tensão a CSBL estima uma vida  $N_1$ , notadamente menor. Para um nível de tensão inferior, por exemplo,  $S_{a2}$ , a diferença entre a vida de fato do cabo e a prevista pela CIGRE, é significativamente maior, ou seja, a relação  $N_4/N_3$  é muito superior que  $N_2/N_1$ .

Castilho (1999), concluiu que os resultados dos ensaios para determinação da curva de fadiga do cabo LINNET, 336,4 MCM, comprovaram que a CSBL, recomendada pela CIGRE e utilizada pela CEMIG, levava a estimativa de vidas conservativas. Este fato também foi constatado por Henriques (2006), para a combinação cabo GROBEAK, 636 MCM e o grampo de suspensão monoarticulado, evidenciando que a CSBL prevê vidas pelo menos 8 vezes menores às observadas experimentalmente.

Ressalta-se que, como a CSBL foi concebida a partir do patamar inferior da compilação de vários ensaios realizados em diversos tipos de cabos e fios no mundo todo, os resultados destas pesquisas não poderiam ser diferentes, o que não era de conhecimento do meio técnico-científico, é que esta proporção seria tão significativa.

Portanto, para definição da previsão da vida útil de cabos condutores de energia elétrica, em que pese a falta de informações sobre a resistência a fadiga não só dos cabos existentes, como também das próprias ligas de alumínio dos fios que os constituem, é de fundamental importância a obtenção da curva S-N específica para cada montagem cabo/grampo, desta forma poder-se-ão realizar recapacitações, manutenções preventivas e corretivas respaldadas em dados mais próximos aos reais, garantindo assim, o princípio da relação custo/benefício/segurança.

Cabe salientar que a determinação das curvas de fadiga de cabos condutores depende de ensaios complexos, de custos elevados, necessitando de espaço físico adequado, alto nível de monitoramento das variáveis de controle e principalmente de disponibilidade de tempo, contudo, em breve estes procedimentos se tornarão usuais e conseqüentemente com custos mais viáveis, possibilitando assim, a criação de um banco de dados destas curvas.

#### **4.3 – MAPEAMENTO DO POSICIONAMENTO DAS FALHAS**

O mapeamento da camada e do posicionamento das falhas ocorridas nas amostras ensaiadas viabilizará a identificação dos pontos de maior e/ou menor incidência de falhas. Estes dados, associados às respectivas amplitudes de deslocamento (ou tensão), poderão ser correlacionados com os dados obtidos a partir do monitoramento da vibração dos cabos das linhas de transmissão em operação, viabilizando assim, a implementação de metodologias adequadas para manutenção, bem como, novas soluções de ferragens, minimizando assim, o impacto do efeito da fadiga por *fretting* nas LT's.

Neste trabalho, este mapeamento terá início com a apresentação das Tabelas 4.3, onde estão relatadas as ordens de ocorrência das falhas por camada.

Tabela 4.3 – Ordem das Falhas por Camada

Amostra	Camada de Al.	Ordem das Falhas por Amostra						Y <sub>B</sub> (mm)
1	Externa	X	X	-	-	X	-	1,0
	Interna	-	-	X	X	-	-	
2	Externa	X	X	-	-	-	-	1,0
	Interna	-	-	X	X	-	-	
3	Externa	X	X	X	-	-	-	1,0
	Interna	-	-	-	-	-	-	
4	Externa	X	X	-	-	-	-	1,0
	Interna	-	-	X	-	-	-	
5	Externa	X	X	-	-	-	-	0,9
	Interna	-	-	-	-	-	-	
7	Externa	-	-	-	X	X	X	1,1
	Interna	X	X	X	-	-	-	
8	Externa	-	-	X	-	-	-	1,1
	Interna	X	X	-	-	-	-	
9	Externa	-	-	-	X	X	X	1,1
	Interna	X	X	X	-	-	-	

É possível identificar essa ordem a partir do gráfico de rotação do cabo no tempo. Por exemplo, a figura 4.4 apresenta o gráfico com os sinais relativos à rotação do cabo ao longo do tempo, para a Amostra 3 (realizado a uma amplitude de deslocamento constante de 1,0 mm (pico a pico) e sob EDS de 20%), o qual é de suma importância para identificação do momento em que ocorre as quebras no ensaio. Claramente pode-se notar que até 1,23 milhões de ciclos, o ângulo de rotação é negativo e permanece praticamente constante. A partir deste instante há uma mudança no ângulo de rotação medido pelos sensores laser de deslocamento, de tal forma que esse agora passa para um novo patamar com valor positivo. Esse evento discreto onde ocorre a mudança de patamar para o ângulo de rotação caracteriza o processo de ruptura do primeiro fio de alumínio. Entretanto, ainda não é possível afirmar em qual camada essa ruptura ocorreu. Uma nova mudança de patamar é verificada quando o ensaio atinge a marca de 3,51 milhões de ciclos. O ângulo de rotação novamente sofreu um incremento no sentido positivo. Isso essencialmente quer dizer que uma outra ruptura de fio ocorreu na mesma camada da ruptura anterior. Cabe ressaltar que, uma falha em outra camada seria caracterizada por uma rotação em sentido contrário, levando o ângulo de rotação para um patamar inferior e não superior como indicado. A terceira quebra acontece com 3,71 milhões de ciclos e implica em um giro no mesmo sentido da segunda quebra. Ao término do ensaio sabíamos que o cabo ensaiado teria três rupturas em uma mesma camada. Com a abertura do grampo de suspensão e o corte da amostra nessa região, pode-se constatar por inspeção visual, que realmente existam três fios rompidos e, todos estavam localizados na camada externa do cabo.



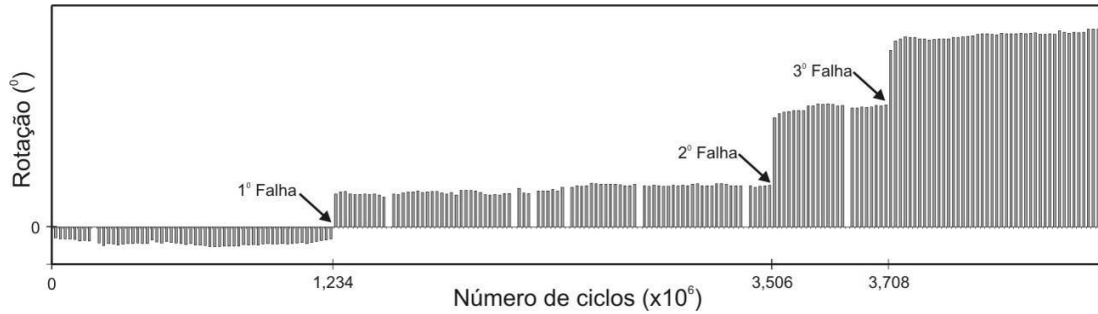


Figura 4.4 – Gráfico com os sinais relativos à rotação do cabo indicando momento das respectivas quebras para a Amostra 3.

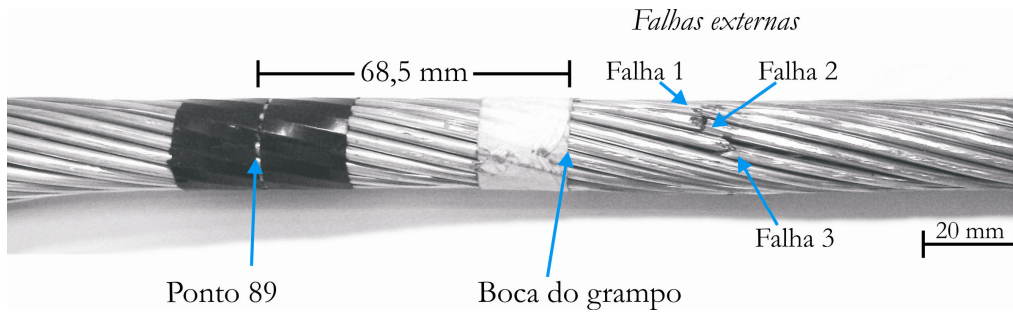


Figura 4.5 – Detalhe da Amostra 3 com falhas em três fios da camada externa.

Analisando a Figura 4.5, nota-se que a quebra do fio da camada externa, se dá no interior do grampo de suspensão, aproximadamente 30 mm após a boca do grampo, que se localiza a 68,5 mm do ponto 89. Essas quebras ocorreram na parte inferior do cabo onde tem-se o contato com o grampo de suspensão. Uma análise de falha similar foi conduzida para as outras amostras e está apresentada na Tabela 4.4. Nesta tabela,  $D_{FM}$ , indica a distância média das falhas a partir da boca do grampo, ocorridas em uma mesma camada para cada ensaio.

Tabela 4.4 – Posição das falhas nos fios das amostras do cabo IBIS ensaiadas

Amostra	Camada de Al.	Posição da Falha de Cada Fio Relativa à Saída (boca) do Grampo						D <sub>FM</sub> (mm)	Y <sub>B</sub> (mm)
1	Externa	27,3	27,2	-	-	26,9	-	27,1	1,0
	Interna	-	-	34,1	25,8	-	-	30	
2	Externa	26,9	28,1	-	-	-	-	27,5	1,0
	Interna	-	-	37	13,7	-	-	25,4	
3	Externa	31,4	26,7	26,6	-	-	-	28,2	1,0
	Interna	-	-	-	-	-	-	-	
4	Externa	25,1	24,6	-	-	-	-	24,9	1,0
	Interna <sup>1</sup>	-	-	27	-	-	-	27	
5	Externa	23,4	23,8	-	-	-	-	23,6	0,9
	Interna	-	-	-	-	-	-	-	
7	Externa	-	-	-	26,9	27,6	31,5	28,7	1,1
	Interna	13,3	11,4	29,7	-	-	-	18,1	
8	Externa	-	-	30	-	-	-	30,0	1,1
	Interna	17,5	39,4	-	-	-	-	28,5	
9	Externa <sup>2</sup>	-	-	-	20,2	26,3	25,1	23,9	1,1
	Interna <sup>2</sup>	29,9	33,6	21,3	-	-	-	28,3	

<sup>1</sup> A terceira ruptura para esse ensaio não foi completa. O fio possuía uma trinca que claramente avançou por mais de 50% de seção transversal do fio.

O valor relatado refere-se a posição dessa trinca com relação a boca do grampo.

<sup>2</sup> O sinal de rotação coletado para esse ensaio não permitiu detectar com clareza a ordem de ocorrência das rupturas dos fios por camada.

Para melhor esclarecer como foi medida a posição da falha, apresentamos a Figura 4.6, que se refere às falhas da Amostra 5, ocorridas na camada externa do cabo. Analisando essa figura, observa-se que a localização dos pontos de falha foi determinada através das distâncias entre os fios rompidos e a saída do grampo de suspensão pelo lado do vão ativo.

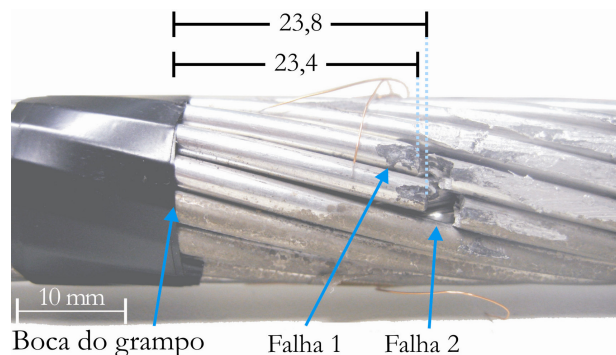


Figura 4.6 – Localização da distância das falhas na camada externa da Amostra 5.

Como exemplo das falhas ocorridas nas camadas internas, invocamos a Figura 4.7, onde são apresentas as falhas da Amostra 2.

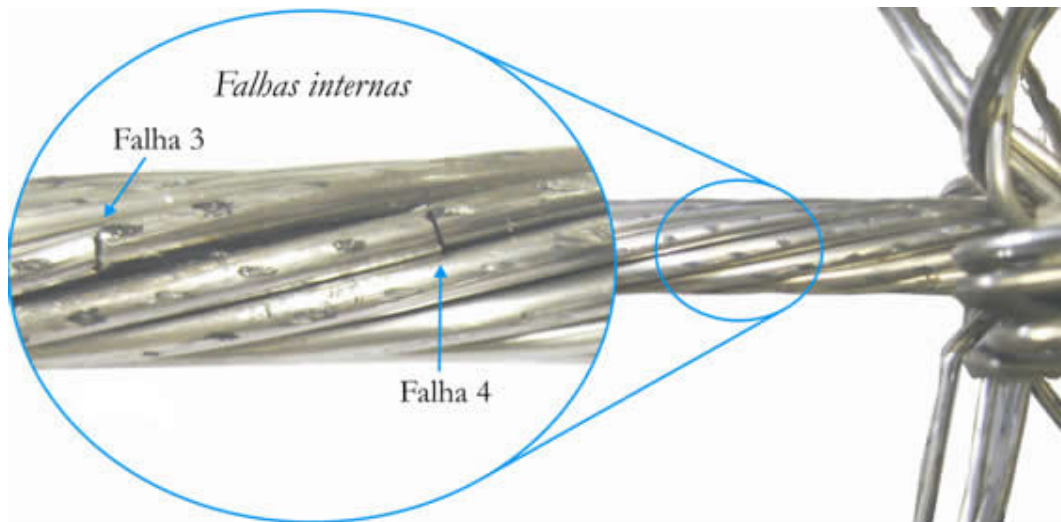


Figura 4.7 – Detalhe da Amostra 2 com falhas em dois fios da camada interna.

Por meio da Figura 4.7, pode-se constatar que as falhas internas ocorridas na segunda camada de alumínio localizam-se sobre as marcas de desgaste por *fretting*, indicando que as trincas iniciam-se devido à combinação dos esforços dinâmicos, resultantes do dobramento alternado do condutor nos pontos de restrição de movimento, mas seu processo de nucleação e crescimento inicial deve ser significativamente agravado pelo efeito do *fretting*. De fato, até onde a autora desta pesquisa tenha conhecimento, ainda não existem trabalhos que quantificaram o impacto do desgaste isoladamente no processo de redução do limite de fadiga, mesmo para espécimes mais reduzidos em laboratório. Observe que, o processo de desgaste também envolve o contato mecânico entre o grampo/fio e fio/fio e, por conseguinte, a concentração de tensões, tornando a quantificação do problema um desafio extremamente complexo.

A partir deste instante será feita uma compilação dos dados referentes ao mapeamento das falhas através de uma análise gráfica, identificando os pontos de maior e/ou menor incidência dessas falhas, além das distâncias médias, relativa à boca (saída) do grampo, onde ocorreram as quebras dos fios.

Neste sentido, na Figura 4.8 são apresentados os percentuais de todas as falhas ocorridas nas camadas externas e internas de cada amostra ensaiada, não sendo considerado, portanto, o limite de 3 quebras por ensaio.

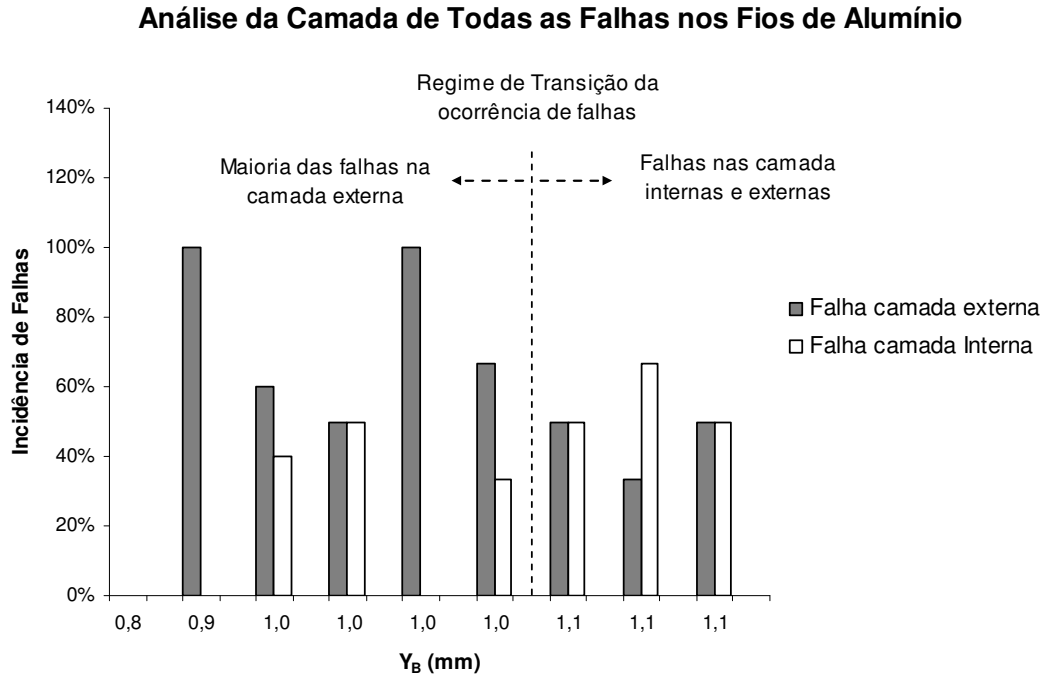


Figura 4.8 – Percentuais de todas as falhas ocorridas nas camadas externas e internas de cada amostra ensaiada.

O gráfico apresentado na Figura 4.8, mostra no eixo das abscissas, a amplitude de deslocamento  $e$ , no eixo das ordenadas as incidências das falhas. Pode-se constatar que, a maior incidência de falhas na camada externa ocorreu nas amostras referentes a amplitudes de deslocamento igual a 0,9 e 1,0 mm, entretanto, para as amostras com amplitudes igual 1,1 mm, as falhas ocorreram proporcionalmente nas duas camadas. Embora os resultados não sejam conclusivos, é possível estabelecer uma análise de tendência de comportamento da camada onde ocorrem as falhas, ou seja, a medida que a amplitude de deslocamento diminui, as falhas tendem ocorrer na camada externa do cabo condutor. Este fato fica evidenciado na Figura 4.9, no qual estão plotadas as incidências para o limite de até três falhas em cada amostra, ressalta-se, entretanto que, para amplitudes de deslocamento igual a 1,1 mm a maioria das falhas ocorre na camada interna.

Na prática, esta análise sugere que, nas regiões em que os resultados de monitoramento do vento e/ou das linhas existentes indicarem baixas amplitudes de deslocamentos, poderá ser

adotado como medida preventiva ou corretiva, por exemplo, o uso de grampos tipo AGS, ou seja, grampos especiais com proteção em borracha, evitando-se assim, o atrito entre o cabo e o grampo, e por conseguinte, as falhas; já nos locais de altas amplitudes, deverá ser realizado estudo para amortecimento da vibração no cabo, tendo em vista que, a ruptura dos fios ocorre internamente e, portanto, de nada adiantaria qualquer mecanismo para evitar o atrito entre o grampo e o cabo.

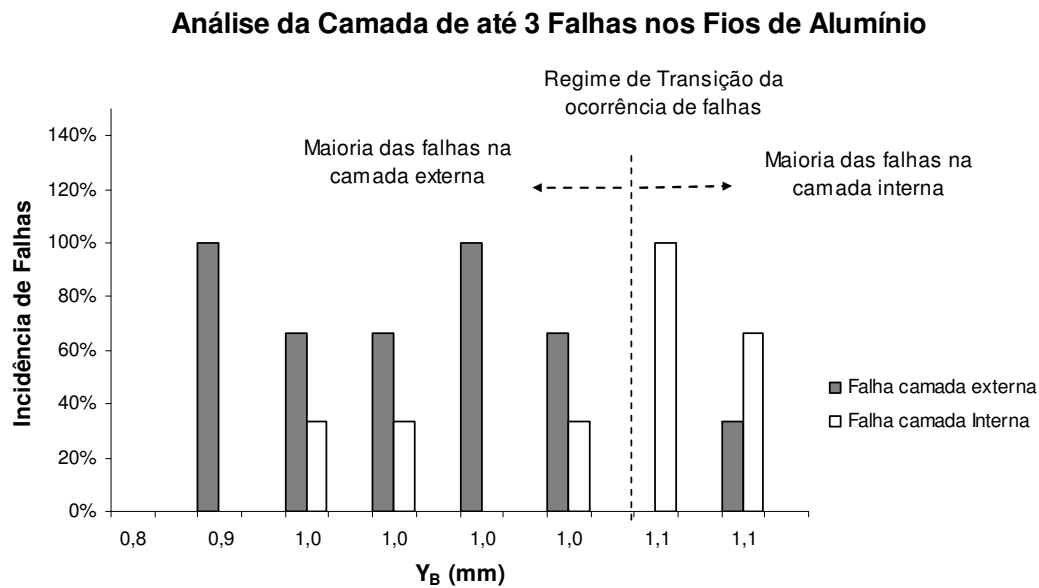


Figura 4.9 – Percentuais para o limite de três falhas ocorridas nas camadas externas e internas de cada amostra ensaiada.

Outra análise importante é a identificação da posição média das falhas ocorridas nos fios de alumínio, que possibilitará verificar se as rupturas ocorrem com maior frequência dentro do ou fora do grampo, isto é, dentro ou fora do campo visual da equipe de manutenção de linhas de transmissão. As posições médias das falhas das amostras ensaiadas são apresentadas na Figura 4.10.

### Distância Média das Falhas nos Fios de Alumínio

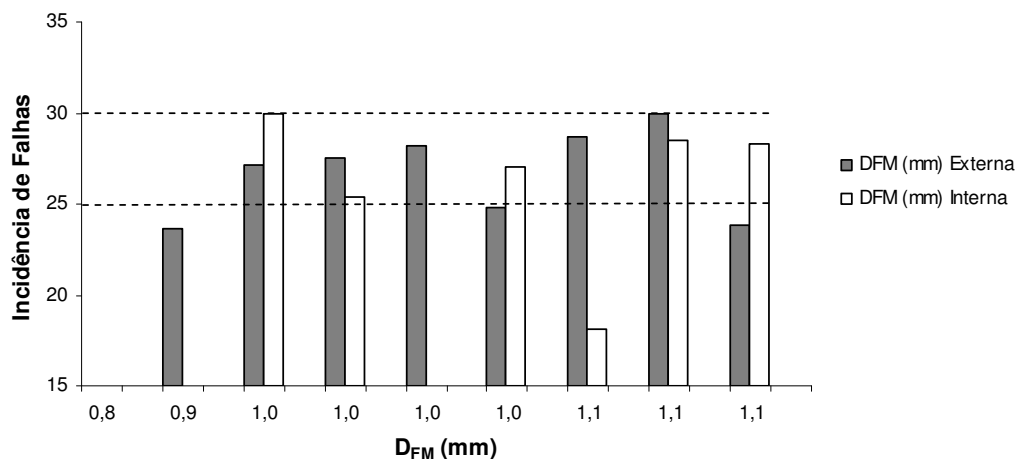


Figura 4.10 – Análise da distância média ( $D_{FM}$ ) das falhas no fio de alumínio.

Observando o gráfico da Figura 4.10 e a Tabela 4.4, nota-se que a posição das falhas nas camadas externas e internas varia entre 25 e 30 mm, em relação a boca do grampo e que o valor médio das posições das falhas ocorridas na camada externa foi de 26,7 mm e para camada interna foi de 26,2 mm. Esta constatação evidencia que a previsão da vida útil em fadiga do cabo é fundamental para as atividades de manutenção de LT's, tendo em vista que, as quebras dos fios ocorrem dentro do grampo de suspensão e, portanto não podem ser identificadas nas inspeções visuais. Assim, uma ferramenta de avaliação quantitativa que forneça uma estimativa razoavelmente confiável de quando inspecionar o cabo seria de grande valia para o setor.

#### 4.4 - CURVA S-N → PRELIMINAR DO CABO IBIS X CSBL X GROSBEAK X LINNET X LIGA 6201 T 81

Existem na literatura curvas de fadiga para alguns tipos de cabos, entre eles o GROSBEAK; e o LINNET; além da curva para a Liga 6201 T 81; e a partir deste trabalho, a curva IBIS. Assim, nesta etapa, apresenta-se uma análise comparativa entre estas curvas, com o objetivo de avaliar os pontos de convergências e divergências de comportamento

destes materiais. Contudo, inicialmente, cabe ressaltar as premissas básicas definidas para construção de cada curva, bem como as respectivas equações.

A curva CBL5 foi concebida pela CIGRE (1979), a partir do patamar inferior da compilação de uma série de diversos resultados de ensaios realizados no mundo todo, em cabos, fios e ligas, cuja equação é dada por:

$$S_a = 450 N^{-0,2} \quad (4.3).$$

A curva S-N GROSBEAK foi obtida a partir de ensaios realizados no conjunto cabo GROSBEAK/grampo de suspensão monoarticulado, (Henriques, 2006), sob EDS de 20 %, sendo que, a equação que melhor descreve a relação entre a tensão estimada pela equação de P-S e o número de ciclos necessários para a falha por fadiga de pelo menos três fios é apresentada abaixo:

$$S_a = 608,8 N^{-0,189} \quad (4.4).$$

A curva S-N LINNET foi obtida a partir ensaios realizados no conjunto cabo LINNET/grampo de suspensão monoarticulado, (Castilho, 1999), sob EDS de 18,5 % cuja equação é:

$$S_a = 400 N^{-0,172} \quad (4.5).$$

A curva S-N Liga 6201 T 81 foi obtida a partir de vários ensaios realizados com amostras do fio da liga de alumínio, (Ferreira, 2004), cuja equação é:

$$S_a = 1813,8 N^{-0,2318} \quad (4.6).$$

A curva S-N IBIS, objeto deste estudo, foi concebida a partir do conjunto cabo IBIS/grampo de suspensão monoarticulado, sob EDS igual a 20%, cuja equação é:

$$S_a = 188,14N^{-0,1171} \quad (4.7).$$

Para uma comparação justa, cabe ressaltar que, todos os conjuntos cabo/grampo citados acima foram submetidos a ensaios de fadiga sob condições de *fretting*, obtendo-se os limites de resistência específicos destes esforços; entretanto, a liga ASTM 6201-T81, foi submetida a ensaios sob condições de carregamentos axiais, obtendo-se os limites de resistência à fadiga do material. Além disto, a liga de alumínio que constitui os fios dos cabos analisados é a 1350 H19, entretanto, como não possuíamos a curva específica deste material, utilizou-se como referência a liga 6201 T 81, ressalta-se que, esta liga possui aproximadamente o dobro da resistência mecânica e da dureza superficial em comparação à liga 1350 H19. Para facilitar uma análise simultânea, as curvas citadas foram construídas em um mesmo gráfico, o qual é apresentado na Figura 4.11,

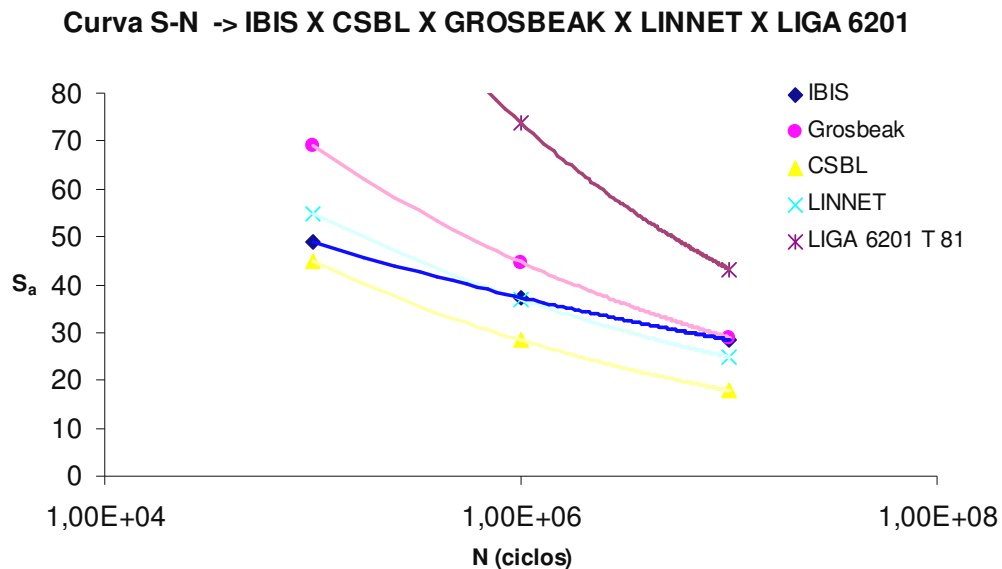


Figura 4.11 – Curvas S-N: IBIS, CSBL, GROSBEAK, LINNET e LIGA 6201.

A partir da Figura 4.11, pode-se inicialmente realizar a comparação entre as curvas S-N da Liga 6201 T 81 (fio) e as dos conjuntos cabo/grampo, constatando-se que a vida da montagem cabo/grampo é significativamente menor que a do fio, visto que o fio está sujeito apenas a um carregamento cíclico, já a montagem cabo/grampo está submetida a



este carregamento, associado ao contato mecânico entre as partes que compõe o conjunto, além do efeito da abrasão devido ao movimento oscilatório entre grampo/fio e fio/fio, ou seja, o *fretting*.

Outra comparação, já ratificada por outros cientistas, é que a CSBL é sempre mais conservativa que as dos conjuntos cabo/grampo.

De maneira geral, todas as curvas analisadas tendem a um comportamento assintótico a partir da amplitude de tensão aproximadamente igual a 10 MPa, o que corresponderia a uma vida extremamente longa, e além disso, comprova que o limite de fadiga considerado pelo EPRI, igual a 8,5 MPa, para cabos com mais de uma camada de fios de alumínio, é mais conservativo que a própria CSBL.

Finalmente, avaliando-se ainda as curvas referentes aos conjuntos cabo/grampo, pode-se perceber que o cabo GROSBEAK possui maior resistência que os demais cabos e parece haver uma tendência que para níveis de amplitude de tensão mais elevados, o cabo LINNET será mais resistente do que o cabo IBIS, enquanto que para níveis de tensão menores esta tendência se inverte. Claramente observa-se que para níveis de amplitude de tensão mais elevados há uma maior proximidade entre as curvas dos cabos LINNET e IBIS e a CSBL, quando comparada à distância do GROSBEAK à mesma curva, indicando que quanto maior a bitola do cabo, maior o conservadorismo da curva da CIGRE.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

#### 5.1 - CONCLUSÕES

A partir dos estudos contidos na literatura somados aos resultados obtidos no programa experimental e as análises realizadas, são apresentadas as conclusões a seguir, particularmente admitidas, para os materiais e condições de realização desta pesquisa:

- ◆ Para definição da previsão da vida útil de cabos condutores de energia elétrica, em que pese a falta de informações sobre a resistência a fadiga não só dos cabos existentes, como também das próprias ligas de alumínio dos fios que os constituem, é de fundamental importância a obtenção da curva S-N específica para cada montagem cabo/grampo. Desta forma, poder-se-ão realizar recapacitações, manutenções preventivas e corretivas respaldadas em dados mais próximos aos reais, garantindo assim, o princípio da relação custo/benefício/segurança.
- ◆ As falhas internas ocorridas na segunda camada de alumínio localizam-se sobre as marcas de desgaste por fretting, indicando que as trincas iniciam-se devido à combinação dos esforços dinâmicos, resultantes do dobramento alternado do condutor nos pontos de restrição de movimento, mas seu processo de nucleação e crescimento inicial deve ser significativamente agravado pelo efeito do *fretting*. De fato, até onde a autora desta pesquisa tenha conhecimento, ainda não existem trabalhos que quantificaram o impacto do desgaste isoladamente no processo de redução do limite de fadiga, mesmo para espécimes mais reduzidos em laboratório. Ressalta-se que, o processo de desgaste também envolve o contato mecânico entre o grampo/fio e fio/fio

e, por conseguinte a concentração de tensões, tornando a quantificação do problema um desafio extremamente complexo.

- ◆ Para a combinação cabo-grampo usada, a Curva Limite de Segurança da CIGRÉ (CSBL) mostrou-se muito conservativa. Nos ensaios com amplitude de deslocamento (YB) igual a 1,0 mm, a razão entre os valores obtidos experimentalmente e os previstos pela CSBL é de aproximadamente 10, isto é, a vida do cabo é 10 vezes maior quando calculada utilizando a curva específica do material como referência, enquanto que para YB igual a 1,1 mm, a CSBL apresentou vida aproximadamente 5 vezes menor, indicando uma tendência à aproximação das curvas à medida que a amplitude aumenta. Esta tendência também é constatada em algumas curvas referentes a cabos (Al e liga) que compõe os resultados de ensaios de fadiga compilados pela CIGRE (1979).
- ◆ A distância das falhas nas camadas externas e internas variou entre 25 e 30 mm, em relação a boca do grampo. O valor médio das distâncias das falhas na camada externa foi de 26,7 mm e na camada interna foi de 26,2mm. Esta constatação evidencia que a previsão da vida útil em fadiga do cabo é de grande importância para as atividades de manutenção, isto porque, as quebras dos fios ocorrem dentro do grampo de suspensão e, portanto não podem ser identificadas nas inspeções visuais.
- ◆ O intervalo de tempo entre a ocorrência da 1ª e 2ª quebra das amostras ensaiadas foi um pouco menor que o da 2ª para 3ª, caso este comportamento seja mantido para a curva S-N final do cabo IBIS, pode-se definir que a programação de manutenção preventiva nas linhas de subtransmissão em operação deve ser iniciada após o período de tempo relativo a 3ª quebra, não justificando, por exemplo, intervenções prévias de desmonte do grampo para identificação e correção de falhas e, portanto, não só otimizando os serviços, como também, garantindo a confiabilidade do sistema elétrico e a redução segura de custos de manutenção.
- ◆ Avaliando todas as falhas ocorridas nas amostras, pode-se constatar que, a maior incidência de falhas na camada externa ocorreu nas amostras referentes a amplitudes de deslocamento igual a 0,9 e 1,0 mm, no entanto, para as amostras com amplitudes igual 1,1 mm, as falhas ocorreram proporcionalmente nas duas camadas. Embora os resultados não sejam conclusivos, é possível estabelecer uma análise de tendência de comportamento da camada onde ocorrem as falhas, ou seja, a medida que a amplitude

de deslocamento diminui, as falhas tendem ocorrer na camada externa do cabo condutor. Este fato também foi observado no caso das incidências para o limite de até três falhas em cada amostra. Entretanto, para amplitudes de deslocamento igual a 1,1 mm, a maioria das falhas ocorreu na camada interna. Na prática, esta análise sugere que, nas regiões em que os resultados de monitoramento do vento e/ou das linhas existentes indicar baixas amplitudes de deslocamentos, poderá ser adotada como medida preventiva ou corretiva o uso de grampos de suspensão armado, com coxim em neoprene e reforço metálico, ou seja, grampos especiais com proteção em borracha, evitando-se assim, o atrito entre o cabo e o grampo, e por conseguinte, as falhas; alternativamente e considerando o elevado custo dos grampos tipo AGS, pode-se pensar na possibilidade de recobrir os grampos de suspensão simples com algum tipo de camada protetora que reduza o coeficiente de atrito na interface cabo/grampo, reduzindo também as tensões provocadas pelo contato mecânico, além de aliviar o desgaste por *fretting*. Nos locais onde forem constatadas altas amplitudes, deverá ser realizado estudo para amortecimento da vibração no cabo, tendo em vista que, a ruptura dos fios ocorre internamente e, portanto, de nada adiantaria qualquer mecanismo para evitar o atrito entre o grampo e o cabo.

- ◆ Ensaios em laboratório permitem estabelecer um controle rigoroso de variáveis como a EDS, a amplitude de deslocamento e o posicionamento do sensor usado para medir a amplitude de deslocamento do cabo, quando da monitoração de vibrações, produzindo valores bastante representativos das condições de campo para cada tipo de montagem cabo-grampo. Caso as curvas em fadiga sejam obtidas sem esse controle espera-se que a dispersão dos resultados seja significativamente elevada, implicando em riscos econômicos.
- ◆ De maneira geral, todas as curvas S-N analisadas, quais sejam: IBIS, LINNET, GROSBEAK, tendem a um comportamento assintótico a partir da amplitude de tensão aproximadamente igual a 10 MPa, o que corresponderia a uma vida extremamente longa, e além disso, comprova que o limite de fadiga considerado pelo EPRI, igual a 8,5 MPa, para cabos com mais de uma camada de fios de alumínio, é mais conservativo que a própria CSBL.
- ◆ Finalmente, avaliando-se ainda as curvas referentes aos conjuntos cabo/grampo, pode-se perceber que o cabo GROSBEAK possui maior resistência que os demais cabos e

parece haver uma tendência que para níveis de amplitude de tensão mais elevados, o cabo LINNET será mais resistente do que o cabo IBIS, enquanto que para níveis de tensão menores esta tendência se inverte. Observou-se também que para níveis de amplitude de tensão mais elevados há uma maior proximidade entre as curvas dos cabos LINNET e IBIS e a CSBL, quando comparada à distância do GROSBEAK à mesma curva, indicando que quanto maior a bitola do cabo, maior o conservadorismo da curva da CIGRE.

## **5.2 – PROPOSTAS PARA PROJETOS FUTUROS**

No que tange a projetos futuros, sugere-se que sejam realizadas algumas pesquisas que possam viabilizar a mitigação do efeito da fadiga por *fretting* nos cabos condutores, otimizando assim, novas metodologias para projetos, obras e manutenção de LT's, tais como: i) o uso de graxa na montagem cabo/grampo; ii) avaliação de outros tipos de grampo de suspensão, como por exemplo, o grampo de suspensão armado, com coxim em neoprene; iii) estudo de algum tipo de recobrimento para os grampos de suspensão simples, que reduza o coeficiente de atrito na interface cabo/grampo; iv) análise da vida útil do cabo considerando EDS acima de 25%;v) avaliação do efeito da fadiga por *fretting* em cabos condutores, com o uso de amortecedores; vi) análise do comportamento do cabo, simulando em laboratório, com o uso do *shaker*, as amplitudes de deslocamentos obtidas através de monitoramentos das LT's em operação, utilizando o vibrógrafo; vii) o efeito do uso do torquímetro para aperto dos parafusos dos grampos, no processo de fadiga por *fretting*.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araújo, J. A, *et al*, “Curso de Fadiga em Cabos Condutores”, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Agosto, 2008.
- Azevedo, C.R.F. and Cescon, T. , “*Failure analysis of aluminum cable steel reinforced (ACSR) conductor of the transmission line crossing the Paraná River*”, *Engineering Failure Analysis*, 9, 2002. pp. 645-664.
- Azevedo, C.R.F. et al, “*Fretting Fatigue in Overhead Conductors: Rig Design and Failure Analysis of a Grosbeak Aluminium Cable Steel Reinforced Conductor*”, *Engineering Failure Analysis*, 16, 2009, pp 136-151.
- Castilho, I. C., e et al., “ Determinação de Curva de Fadiga em Cabo CAA 336,4 MCM – LINNET”, XV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Grupo III, GLT/19, Outubro, 1999
- CIGRE – *Task Force WG 11 SC 22, Guide to Vibration Measurements on Overhead Lines*, ELECTRA nº 162, October 1995.
- CIGRE, Comitê de Estudos nº. B2 – Linhas Aéreas de Alta Tensão, GT 11 – Comportamento Mecânico de Condutores e Acessórios, “Guia para Medições de Vibrações em Linhas Aéreas de Transmissão”, Belo Horizonte, MG, Outubro de 2003.
- CIGRE, SC 22 , Final report of Working Group 04, “*Endurance Capability of Conductors*”,.Paris, 1988, Julho, 19 p.
- CIGRE, WG 04 SC 22 – 02, “*Recommendations for the Evaluation of the Lifetime of Transmission Line Conductors*”,. ELECTRA No 63. March 1979, pp. 103-145
- CIGRE, WG 04 SC 22 , “*Guide for Endurance Tests of Conductors Inside Clamps*”,. ELECTRA No 100. Maio 1985, pp. 77-86
- CIGRE, WG 11 SC B2, “*Fatigue Endurance Capability of Conductor/Clamp Systems Update of Present Knowledge*”, Janeiro, 2006.
- CIGRE, WG B2.30, “*Engineering Guidelines Relating to Fatigue Endurance Capability of Conductor/Clamp Systems*”, October 2008.
- Dowling, Norman E., “*Mechanical Behaviour of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue* ”, Copyright, 1999 by Prentice Hall, Second Edition, New Jersey – EUA.

- Dulhunty, P.W., “*Some recent field experiences with vibration dampers*”, CIGRE ISC22-71 WG04, Maio 1971, 7 p.
- EPRI - *Electrical Power Research Institute*, “*Wind Induced Conductor Motion*”, *Transmission Line Reference Book*, Palo Alto, CA, 1979.
- EPRI, *Electrical Power Research Institute*, *Transmission Line Reference Book*, “*Wind Induced Conductor*”, *Motion Palo Alto*, CA, 1979.
- Ferreira, J. L. A., *et al*, “*Determinação da Curva de Fadiga da Liga de Alumínio ASTM 6201-T81*”, Relatório CTEEP, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, 2004.
- Fricke Jr, W.G., Rawlins, C.B., “*Importance of Fretting in Vibration Fatigue of Stranded Conductors*”, IEEE Transactions Paper, Vol. PAS-87, No 6, June 1968, pp. 1381-1384.
- Fuchs, R.D., Labegalini, P.R., Labegalini, J.A. e Almeida, M.T., “*Projetos Mecânicos de Linhas Aéreas de Transmissão*”, Editora Edgard Blücher Ltda, 2ª Edição, São Paulo, 1992.
- Garcia, Amauri, Spim, Jaime Alvares e Santos, Carlos Alexandre, “*Ensaio dos Materiais*”, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 247p, 2000.
- Gopalan, T. V., “*New excitation system for indoor testing of overhead conductors*”, *Journal of Energy Engineering*, vol. 119, No 3, 1993, pp. 159-167.
- Henriques, A.M.D., “*Bancada de Ensaio Mecânicos à Fadiga de Cabos Condutores de Energia – Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil*, publicação E.TD 006/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília – DF, 162p., 2006.
- IEEE Committee Report, “*Standardization of Conductor Vibration Measurements*”, IEEE PAS-85, vol. 85 n.1, pp 10-22, 1966.
- IEEE, Std.664, “*Guide on Conductor Self Damping Measurements*”, 1978.
- Lavandoscki, R. ; Bolfarini, C. ; Carletti, C. B. ; Bonome, E. C. ; Sylvestre, M. A. ; Vicentim, R. L. . “*Determinação de Propriedades Mecânicas dos Condutores CAA, para o processo de Retracionamento*”. II Congresso Internacional do Alumínio - ABAL, São Paulo, 2005.
- Lindley, T. C. (1997), “*Fretting fatigue in engineering alloys*”, *Int. J. Fatigue*, Vol. 19, No 1, pp. S39-S49.
- Moecks, L., “*Vibration damage on stranded conductors*”, *Bulletin of the Swiss Electrotechnical Association*, Vol. 61 No 5, 1970, pp. 223-227.

- Moia, Diego de Gouveia, “Previsão da Vida em Fadiga de Materiais Metálicos”, Laboratório de Materiais, Departamento de Mecânica, Faculdade de Engenharia Industrial, São Bernardo do Campo – SP, 2001.
- Moura Branco, Carlos A. G. de, “Mecânica dos Materiais”, Fundação Calouste Gulbenkian/Lisboa, Oficinas da Orgal – Orlando & Ca Lda - Porto, Janeiro, 1985.
- NBR 5422, “Projeto de Linhas Aéreas de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica”, Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Março, 1985.
- Nefzger, J., “*Dérangements occasionnés par les oscillations mécaniques des conducteurs aériens et leur remède*”, Rapport CIGRE No 126, 1933.
- Oliveira, Agamenon de, CIGRE - Curso de Introdução às Vibrações em Linhas de Transmissão –Vibrações Eólicas, Tipos de Condutores e Amortecedores e Espaçadores, CEPEL, Rio de Janeiro - RJ, Dezembro, 2003.
- Poffenberger, J. C, and Swart,R. L., “*Differential Displacement and Dynamic Conductor Strain*”, IEEE Transactions Paper, Vol. PAS. 84, 1965, pp. 285-289.
- Preston B., McGill and George E. Ramey, A.; “*Effect of Suspension Clamp Geometry on Transmission Line Fatigue*”, Journal of Energy Engineering, vol. 112, No 3, 1986, pp. 168-183.
- Ramey, G. E. and Silva, J.M., “*An experimental evaluation of conductor aeolian fatigue damage mitigation by amplitude reduction*”, IEEE PES Summer Meeting, Portland, Oregon, July, 1981, pp.26-31.
- Ramey, G. E., A. M. ASCE, Roy R. Duncan, and Robert M, Brunair, “*Experimental Evaluation of S-N Curves for Drake ACSR Conductor*”, Journal of Energy Engineering, vol. 112, No 02, 1986, pp. 138-151.
- Ramey, G. E., Townsend J. S., “*Effects of clamps on fatigue os ACR conductors*” ASCE J. of Energy Div., 1981 Maio, 107 (EY1), pp. 103-119.
- Ramey, G.E., “*Conductor Fatigue Life Research*”, EPRI Project 1278-1 Final Report (Phase III) draft submitted for review, Novembro, 1984.
- Rawlings, C. B., “*Fatigue of Overhead Conductors*”, Transmission Line Reference Book, Electrical Power Research Institute, Palo Alto CA, 1979, pp 51-81.
- Ricardo, Luiz Carlos Hernandez, “*Estimativa da Vida sob Fadiga de Amplitude Variável de um Componente Mecânico*”, Dissertação de Mestrado, IPEN-USP, São Paulo, 1999 ELECTRA 69, March, 1979.



- Rosa, A. A.; Monetti J. e SIter, R. B., - "*Overhead Line Vibration and Inspection Techniques*"; trabalho apresentado no IEE Laticon, São Paulo, 1974.
- Shigley, Joseph Edward. and Mischke, Charles R., "*Mechanical Engineering Design*", Copyright, 1989 by McGraw-Hill Book Co., Fifth Edition.
- Souza, Sérgio Augusto de, "Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos. Fundamentos Teóricos e Práticos", Editora Edgard Blücher Ltda, 2ª Edição, São Paulo, 1982.
- Varney, T., "*Notes on the vibration of transmission line conductors*", Trans. AIEE 45, 1926, pp. 791-795.
- Zhou, Z. R., Cardou, A., Goudreau, S. & Fiset, M., "*Fundamental investigations of electrical conductor fretting fatigue*", Tribology International, 1996, 29, pp. 221-232.
- Zhou, Z. R., Goudreau, S., Cardou, A., & Fiset, M., "*Single wire fretting fatigue tests for electrical conductor bending fatigue evaluation*", Wear, 1995, pp. 181-183 e pp. 531-536.

## **APÊNDICES**

# APÊNDICE A - ESPECIFICAÇÕES DOS EQUIPAMENTOS DO LABORATÓRIO DE FADIGA E INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE CABOS CONDUTORES DE ENERGIA

## A.1 - *LOAD WASHER*



Figura A.1 – *Load washer* - Modelo LW 1538

Tabela A.1 – Especificações da *Load washer*

<i>LOAD WASHER</i>						
Modelo/série	Capacidade (lbf)	Sobrecarga Segura (lbf)	Resistência (ohm)		Excitação	
			Entrada	Saída	Nom	Máx
LW 1538 - 5K/X246532	5000	7500	375,6	351,1	10 V	15 V

## A.2- TALHA DE ALAVANCA



Figura A.2 – Talha de Alavanca – Carl Stahl – Modelo HX 3200

Tabela A.2 – Especificações da Talha de Alavanca

TALHA DE ALAVANCA				
Fornecedor		Modelo	Capacidade (kg)	Diâmetro cabo (mm)
Bancada A	Carl Stahl	HX 3200	3200	16
Bancada B	Berg Stell	GA 3200	3200	15,8

## A.3 - CÉLULAS DE CARGA

### A.3.1 – CÉLULA DE CARGA – TRAÇÃO CABO

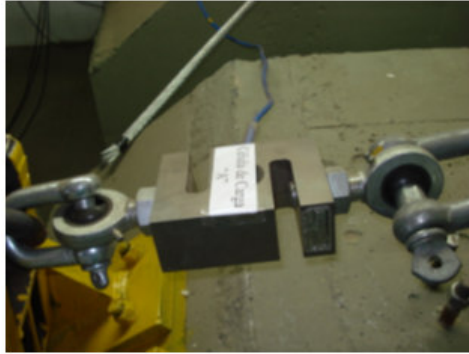


Figura A.3 – Célula de carga - Modelo Z    Figura A.4 – Célula de carga - Modelo CSR

Tabela A.3 – Especificações das Células de Carga de Tração do Cabo

CÉLULAS DE CARGA - Tração Cabo					
Bancada	Fabricante	Modelo	Capacidade	Tensão de Excitação	Sensibilidade
A	Alfa Instrumentos	Modelo Z	5000 kgf	10 - 15 V	2 mV/V
B	MK Controle e Instrumentação	Modelo CSR	5000kgf	10 -15 V	2 mV/V

Maiores informações: <http://www.alfainstrumentos.com.br/artigos.php?id=14>

<http://www.mkcontrole.com.br/novo/pagina.php?pag=produto&produto=27>

### A.3.2 – CÉLULA DE CARGA – *SHAKER*

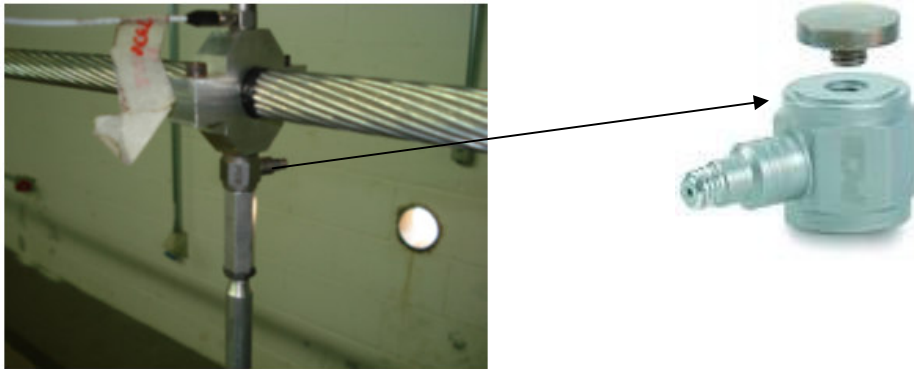


Figura A.5 – Célula de carga PCB® - Modelo 208C03

Tabela A.4 – Especificações das Células de Carga do *Shaker* Eletromecânico

CÉLULA DE CARGA - <i>SHAKER</i>				
Bancada	Modelo	Série	Sensibilidade	Incerteza
A	208C03	26413	2,314 mV/N	+/- 1%
			10,16 mV/lbf	
B	208C03	22195	9,798 mV/lbf	+/- 1%

Maiores informações:

<http://www.pcb.com>

#### A.4 – ATUADOR ELETROMECAÂNICO



Figura A.6 – Atuador eletromecânico linear - Modelo 62B1

Tabela A.5 – Especificações do Atuador Eletromecânico Linear

ATUADOR ELETROMECAÂNICO LINEAR						
Fabricante	Modelo/ Tipo	Corrente Elétrica			Frequência (rpm)	Potência (HP)
		Vtagem (V)	Frequência (Hz)	Amperagem (A)		
FASCO	62B1	220	30/60	1,25/1,60	2600/3000	1/4

## A.5 – ACELERÔMETRO

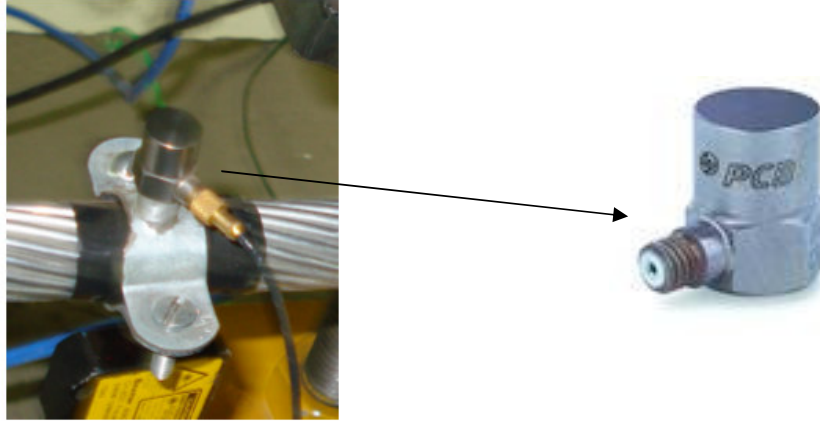


Figura A.7 – Acelerômetro PCB®- Modelo 352C33

Tabela A.6 – Especificações dos Acelerômetros

ACELERÔMETROS				
Bancada	Marca/Modelo	Série	Sensibilidade	
			<i>shaker</i>	Ponto 89
A	PCB® - Piezotronics ICP - 352C33	86682	99,7 mV/g	100,9 mV/g
			10,16 mV/m/s <sup>2</sup>	10,29 mV/m/s <sup>2</sup>
B	PCB® - Piezotronics ICP - 352C33	57505	100,9 mV/g	99,7 mV/g
			10,29 mV/m/s <sup>2</sup>	10,16 mV/m/s <sup>2</sup>

Maiores informações:

[http://www.pcb.com/spec\\_sheet.asp?model=352C33&item\\_id=10442](http://www.pcb.com/spec_sheet.asp?model=352C33&item_id=10442)



## A.6 – SHAKER ELETROMECAÂNICO



Figura A.8 – *Shaker* eletromecânico - Modelo Inc. ET - 127

Tabela A.7 – Especificações do *Shaker* Eletromecânico

SHAKER ELETROMECAÂNICO									
Marca/ Modelo	Força Nominal de Saída			Desloc. Máx. (mm pk-pk)		Vel. Máx. (mm/s)	Aceleração Máxima (g pk)		
	Senoidal (N pk)	Aleatória (N rms)	Choque (N pk)	Cont.	Entre paradas		Dirigida	Ress.	Choque
Labworks Inc. ET 127	2225	1557	4450	25,4	30,48	3556	100	150	300

## A.7 – *SENSORES LASER*



Figura A.9 – Sensores laser - Modelo CH - 8501

Tabela A.8 – Especificações dos Sensores Lasers

<i>LASERS</i>						
Fornecedor		Modelo	Comprimento de onda	Máx. Output	Tensão Máxima	Corrente Máxima
Bancada A	Baumer Eletric	CH - 8501	630 – 680 nm	< 1 mW	24 V	< 100 mA
Bancada B	Baumer Eletric	CH - 8501	630 – 680 nm	< 1 mW	24 V	< 100 mA

Maiores informações:

<http://sensor.baumerelectric.com/>

## A.8 – EXTENSÔMETRO

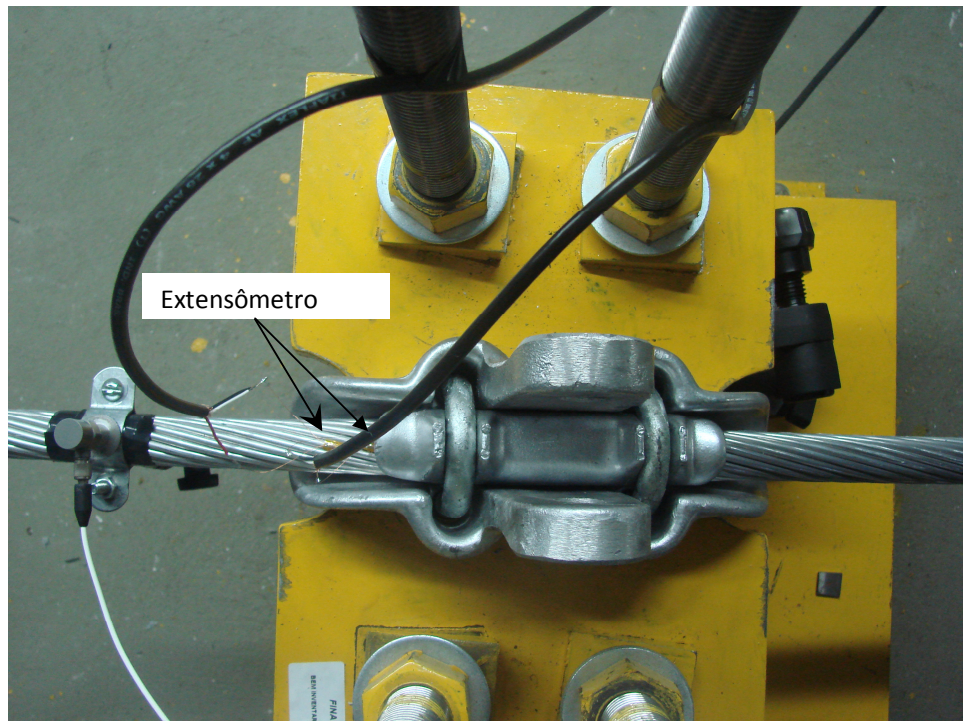


Figura A.10 – Extensômetro

Tabela A.9 – Especificações do Extensômetro

EXTENSÔMETROS			
Fornecedor	Modelo	Gauge Factor	Resistência
Excel	PA – 13- 062 AB – 120 L	2,13	120 $\Omega$

## A.9 – AQUISITOR DE DADOS



Figura A.11 – Aquisitor de dados – Modelo - AC 2122

Tabela A.10 – Especificações do Aquisitor de Dados

AQUISITOR DE DADOS				
Fornecedor	Modelo	VCD	Potência	Número de Canais
LINX	Ac 2122	12 V	Máx. 50 W	2 x 16

## A.10 – NO BREAKS



Figura A.12 – No Break – Modelo Star-Volt II    Figura A.13 – No Break - Modelo UTD

Tabela A.11 – Especificações dos No Breaks

NO BREAKS					
Fornecedor	Modelo	Potência de Saída	Potência	Tensão de Bateria	Frequência
OPUS	UTD	4 kW	5 kVA	192 VDC	60 Hz
Fornecedor	Modelo	Potência de saída	Potência	Proteção contra sobre carga	Frequência
IMBRAMEQ	STAR-VOLT II	4 kW	15 kVA	3 kVA	60 Hz

Maiores informações:

<http://www.inbrameq.com.br/canais/produtos/detalhes.asp?cod=3>

## A.11 – AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA



Figura A.14 – Amplificador de potência - Modelo PA 123

Tabela A.12 – Especificações do Amplificador de Potência - Modelo PA 141

AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA					
Fornecedor	Modelo	Tensões de saída	Entrada máxima de tensão	Corrente máxima de saída	Frequência
LABWORKS	PA - 141	100, 120, 200, 220 ou 240 V	2 kVA	20A	48 – 62 Hz

Tabela A.13 – Especificações do Amplificador de potência – Modelo - CP 123.

AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA								
Modelo/ Fabricante	Voltagem saída (V rms)	Corrente saída (A rms)	Dissipação Contínua Máx. (W)	Frequência Resposta		Voltagem Max. Ganho (dB)	Circuito <i>Interlock</i>	
				Entrada DC (DC-10 KHz)	Entrada DC (DC-10 KHz)			
PA – 123/ Labwoks Inc.	65	40	2,25	-1dB	-1dB	40	<i>Shaker</i> (interno)	Usuário (externo)
							<i>Cooling ou over travel</i>	N.O./N.C. ou TTL

Maiores informações: [http://www.labworks-inc.com/products/amps/pa\\_123\\_3.htm](http://www.labworks-inc.com/products/amps/pa_123_3.htm)

## A.12 – TORQUÍMETRO



Figura A.15 – Torquímetro

Tabela A.14 – Especificações do Torquímetro

TORQUÍMETRO				
Modelo/Série	Faixa (ft-lb)	Precisão	Tolerância	
			Sentido horário	Sentido anti-horário
TECH2FRM100/ 0706100028	5.0-100.0	+/-0.25%	+/-1.0%	+/-1.5%

APÊNDICE B - RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS

Tabela B.1 - Resultados dos Ensaios Realizados nas 9 Amostras

Ensaio	YB (mm)	Total de ciclos	FALHAS																	
			1			2			3			4			5			6		
			ciclos	local	D <sub>F</sub>	ciclos	local	D <sub>F</sub>	ciclos	local	D <sub>F</sub>	ciclos	local	D <sub>F</sub>	ciclos	local	D <sub>F</sub>	ciclos	local	D <sub>F</sub>
1	1,0	1,03E+07	3,10E+06	Ext	27,3	4,34E+06	Ext	27,2	7,12E+06	Int	34,1	7,96E+06	Int	25,8	1,03E+07	Ext	26,9	-	-	-
2	1,0	6,78E+06	1,36E+06	Ext	26,9	2,73E+06	Ext	28,1	5,74E+06	Int	37,0	6,78E+06	Int	13,7	-	-	-	-	-	-
3	1,0	4,87E+06	1,23E+06	Ext	31,4	3,51E+06	Ext	26,7	3,71E+06	Ext	26,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4*	1,0	7,31E+06	3,57E+06	Ext	25,1	5,82E+06	Ext	24,6	7,31E+06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5*	0,9	9,03E+06	2,98E+06	Ext	23,4	6,34E+06	Ext	23,8	9,03E+06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6***	0,8	2,50E+07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	1,1	6,13E+06	1,78E+05	Int	13,3	3,99E+05	Int	11,4	1,53E+06	Int	29,7	-	Ext	26,9	-	Ext	27,6	-	Ext	31,5
8***	1,1	4,30E+06	1,28E+05	Int	17,5	2,24E+05	Int	39,4	1,31E+06	Ext	30,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	1,1	1,84E+06	6,35E+05	Int	29,9	1,07E+06	Int	33,6	1,84E+06	Int	21,3	-	Ext	20,2	-	Ext	26,3	-	Ext	25,1

Legenda:

D<sub>F</sub> = Distância da falha à boca do grampo

Ext = camada externa

Int = camada interna

Observações:

- \* A terceira ruptura para esse ensaio não foi completa. O fio possuía uma trinca que claramente avançou por mais de 50% de seção transversal do fio, uma trinca na camada interna 50% de um fio (26,96mm).
- \*\* O ensaio foi interrompido para esse número de ciclos e não houve o rompimento de um terceiro fio.
- \*\*\* O ensaio foi interrompido quando o número de ciclos atingiu 25.000.000, não havendo rompimento de nenhum fio.
- \*\*\*\* A terceira ruptura para esse ensaio não foi completa. O fio possuía uma trinca que claramente avançou por mais de 50% de seção transversal do fio, uma trinca na camada externa - base do grampo 50% (29,95mm).



## APÊNDICE C – CARACTERÍSTICAS DOS CABOS CONDUTORES E LIGAS DE ALUMÍNIO ANALISADOS

### C.1 – CABO CONDUTOR GROSBEAK

Tabela C.1 – Características dimensionais e estruturais do cabo condutor GROSBEAK

Condutor	Bitola MCM	Área Nominal			Encordoamento nº de fios x diâmetro		Diâmetro Nominal Cabo (mm)	Peso Linear (kg/km)	Carga Ruptura (kgf)
		Alumínio mm <sup>2</sup>	Aço mm <sup>2</sup>	Total mm <sup>2</sup>	Alumínio	Aço			
		GROSBEAK	636	322,33	52,47	374,8			

Fonte: [www.nexans.com.br](http://www.nexans.com.br)

### C.2 – CABO CONDUTOR LINNET

Tabela C.2 – Características dimensionais e estruturais do cabo condutor LINNET

Condutor	Bitola MCM	Área Nominal			Encordoamento nº de fios x diâmetro		Diâmetro Nominal Cabo (mm)	Peso Linear (kg/km)	Carga Ruptura (kgf)
		Alumínio mm <sup>2</sup>	Aço mm <sup>2</sup>	Total mm <sup>2</sup>	Alumínio	Aço			
		LINNET	336,4	170,32	27,68	198			

Fonte: [www.nexans.com.br](http://www.nexans.com.br)

### C.3 – LIGA DE ALUMÍNIO 1350 H 19

Tabela C.3 – Propriedades mecânicas da liga de alumínio 1350 H 19

Propriedades Físicas e Mecânicas	Unidade	Valor
Coefficiente de Poisson	-	0,33
Dureza Brinell	-	50
Limite de escoamento	MPa	165
Limite de Resistência à Tração	MPa	186
Módulo de Elasticidade	GPa	68,9
Resistência a Fadiga para $5 \cdot 10^8$ Ciclos	MPa	48,3

Fonte: [www.nexans.com.br](http://www.nexans.com.br)

### C.4 – LIGA DE ALUMÍNIO 6201 T81

Tabela C.4 – Propriedades mecânicas da liga de alumínio 6201 T 81

Propriedades Físicas e Mecânicas	Unidade	Valor
Coefficiente de Poisson	-	0,33
Dureza Brinell	-	88
Limite de escoamento	MPa	Mín. 310
Limite de Resistência à Tração	MPa	Mín. 330
Módulo de Elasticidade	GPa	69
Resistência a Fadiga	MPa	105

Fonte: Projeto de P&D CTEEP/FINATEC:UNB – Determinação da Curva de Fadiga da Liga de Alumino ASTM 6201 T81