

REVISÃO SOBRE CRITÉRIOS DE
FADIGA PARA CABOS CONDUTORES
DE ENERGIA E USO DE
METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA
DE SUA VIDA REMANESCENTE

AUTOR: Marcos Bruno Bellorio

ORIENTADOR: Prof. José Alexander Araújo Ph.D.

CO-ORIENTADOR: Prof. Jorge Luiz de A. Ferreira D. Sc.

DISSERTAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

15 de Dezembro de 2009

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

REVISÃO SOBRE CRITÉRIOS DE FADIGA PARA CABOS
CONDUTORES DE ENERGIA E USO DE METODOLOGIA
PARA ESTIMATIVA DE SUA VIDA REMANESCENTE

Marcos Bruno Bellorio

ORIENTADOR: Prof. José Alexander Araújo

CO-ORIENTADOR: Prof. Jorge Luiz de Almeida Ferreira

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS
MECÂNICAS

PUBLICAÇÃO: ENM.DM - 144A / 09

BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO - 2009

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

REVISÃO SOBRE CRITÉRIOS DE FADIGA PARA CABOS
CONDUTORES DE ENERGIA E USO DE METODOLOGIA
PARA ESTIMATIVA DE SUA VIDA REMANESCENTE
MARCOS BRUNO BELLORIO

DISSERTAÇÃO DE Mestrado 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.

APROVADA POR:

Prof. José Alexander Araújo, Ph.D. (ENM-UnB)
(Orientador)

Prof. Fábio Comes de Castro, D.Sc. (ENM-UnB)
(Examinador Interno)

Prof. Cassius Olívio Figueiredo Terra Ruchert, D.Sc. (USP - São Carlos)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA / DF, 15 DE DEZEMBRO DE 2009.

FICHA CATALOGRÁFICA

BELLORIO, MARCOS BRUNO

Revisão sobre critérios de fadiga para cabos condutores de energia e uso de metodologia para estimativa de sua vida remanescente. [Distrito Federal] 2009. xii, 86p., 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. Fadiga Uniaxial

3. Regra de Miner

4. Poffenberger-Swart

I. ENM / FT / UnB

II. ENM.DM - 144A / 09

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BELLORIO, M. B., (2009) Revisão sobre critérios de fadiga para cabos condutores de energia e uso de metodologia para estimativa de sua vida remanescente, Publicação ENM.DM- , Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 86p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Marcos Bruno Bellorio

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Revisão sobre critérios de fadiga para cabos condutores de energia e uso de metodologia para estimativa de sua vida remanescente.

GRAU / ANO : MESTRE / 2009

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

Marcos Bruno Bellorio

Av. Doutor Cardoso de Melo, 1060, apt 16, Vila Olímpia

04548-004 - São Paulo - SP - Brasil

Correio Eletrônico: marcos.bellorio@gmail.com

Agradecimentos

À minha esposa Lillian pela compreensão, apoio e carinho.

Às nossas famílias pelo apoio e incentivo.

Ao Prof. José Alexander Araújo pelo apoio e confiança depositada.

Ao colega Bernardo da Engenharia Mecânica da UnB e a equipe dos professores Remo e Luis Veloso da Universidade Federal do Pará pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo conduzir uma revisão crítica sobre as diferentes metodologias existentes para o projeto e manutenção de linhas de transmissão de energia quanto à fadiga sob condições de *fretting*. Entre as metodologias estudadas, o método da Cigré para cálculo da vida remanescente mostrou ser a mais consistente e útil.

Uma vez concluída a análise crítica aplicou-se estas metodologias para um conjunto de dados medidos para um cabo da Eletronorte em uma linha de transmissão de 230 kV instalada na região Norte do Brasil no trecho de travessia Vila do Conde - Guamá. Essa análise permite estimar a durabilidade do cabo e constituiu importante ferramenta de análise para o setor de manutenção de empresas da área.

Atualmente há uma forte demanda das empresas do setor de transmissão de energia elétrica para tentar elevar o nível da carga de pré-esticamento do cabo condutor. Isso além de reduzir custos amenizaria dificuldades operacionais associadas, por exemplo, a construção de torres muito altas para a travessia de grandes rios Amazônicos. Nesse sentido, esse trabalho propôs uma alternativa para o cálculo da curva de resistência a fadiga do cabo na presença de maiores cargas de esticamento. Até onde o autor tenha conhecimento, essa é uma proposta inédita no sentido que, na presença de cargas de esticamento mais elevadas costuma-se corrigir apenas os valores da sollicitação dinâmica do cabo por meio da correção do fator de rigidez na fórmula de Poffenberger-Swart. Essa é a primeira tentativa de corrigir-se não apenas a sollicitação, mas também a curva de resistência a fadiga da montagem cabo/grampo de suspensão. Uma discussão sobre a necessidade dessa medida é construída em detalhes.

Abstract

The aim of this work is to conduct a critical review of the different existing methodologies for the design and maintenance of overhead conductors under *fretting* fatigue. Among these methodologies, the Cigré method for remain life calculation has proved to be the most consistent and useful.

Once the critical review was concluded those methodologies were applied using a set of data obtained from an Eletronorte overhead conductor installed in the North region of Brazil. This analysis allows one to estimate the durability of the overhead conductor which is a very important tool for the maintenance sector of transmission line companies.

Nowadays there is a strong demand from the electrical transmission line companies to elevate the stretch factor (Every Day Stress - *EDS*) of the overhead conductor. This will reduce the costs and the operational difficulties associated to it, for instance, the construction of very high towers for the crossing of large Amazon rivers. In this context, this work proposed an alternative way to calculate the conductor fatigue curve for higher pre-loads. To the author's knowledge, this is a proposal without precedent in the sense that in a presence of higher stretch loads it is common to correct only the values for dynamic loads by correcting the stiffness factor of Poffenberger-Swart formula. This is the first proposal to correct the stiffness factor and also the fatigue endurance limit curve for the conductor/clamp set. A discussion on the need for this measure is constructed in detail.

Lista de Tabelas

- 2.1 – Parâmetros do cabo ACSR – Grosbeak
- 3.1 – Características técnicas dos vibrógrafos
- 3.2 - Grau de influência do tipo de terreno para medição de vibrações eólicas
- 4.1 - Amplitudes máximas de tensão e flexão para um cabo Grosbeak quando submetidos a diferentes *EDS*'s
- 4.2 - Limites de resistência para cabos (ACSR) com uma e duas ou mais camadas de fios de alumínio para o método da IEEE
- 4.3 - Constantes da curva limite de segurança (*Safe Border Line* - Cigré)
- 4.4 - Variáveis calculadas pelas equações de Poffenberger-Swart (*EDS* 20%)
- 4.5 - Tensões máximas, número de ciclos e porcentagem no total de ciclos medidos para cada faixa de amplitude de deslocamento (*EDS* = 20%) para matriz #1
- 5.1 - Vida remanescente para uma *EDS* de 20 %
- 5.2 - Tensões máximas, número de ciclos e porcentagem no total de ciclos medidos para cada faixa de amplitude de deslocamento (*EDS* = 20%) para matriz #2
- 5.3 - Variáveis calculadas pelas equações de Poffenberger-Swart para *EDS* 25 e 30%
- 5.4 - Dano, vida remanescente e vida remanescente útil para *EDS*'s de 25% e de 30% (sem correção por Goodman)
- 5.5 - Tensões máximas, número de ciclos e porcentagem no total de ciclos medidos para cada faixa de amplitude de deslocamento (*EDS* = 25%) para matriz #2
- 5.6 - Tensões máximas, número de ciclos e porcentagem no total de ciclos medidos para cada faixa de amplitude de deslocamento (*EDS* = 30%) para matriz #2
- 5.7 - Amplitudes de tensões para diferentes *EDS* corrigidas por Goodman
- 5.8 - Dano, vida remanescente e vida remanescente útil para *EDS*'s de 25% e de 30% (corrigidos por Goodman)
- 6.1 - Resumo dos parâmetros de dano e vida calculados pelo critério da Cigré para a matriz # 2
- 6.2 - Variação nas vidas remanescentes para diferentes *EDS*'s
- 1A - Matriz # 1 obtida na literatura

2A - Matriz # 2 obtida em campo por meio de aparelho vibrógrafo (UFPA)

Lista de Figuras

- 1.1 – Pontos de restrição do movimento
- 1.2 – Fios de alumínio rompidos devido à fadiga por *fretting*
- 2.1 - Superfície de um material com trinca
- 2.2 – Curvas *S-N* para aços e para alumínio e ligas de cobre
- 2.3 - Ciclos de fadiga senoidais
- 2.4 – Diagrama de fadiga para vários critérios de falha
- 2.5 - Esquema ilustrativo do método Rainflow
- 2.6 - Curva *S-N* típica
- 2.7 - Fadiga por *fretting* em cabos condutores
- 2.8 - Configuração do cabo Grosbeak e superfícies de contato
- 2.9 - Modelos de grampos de suspensão
- 2.10 - Grampo de suspensão para travessia de rios
- 3.1 - Escoamento do ar em torno de um cilindro
- 3.2 – Relação entre número de Reynolds e número de Strouhal
- 3.3 - Carga de pré-tensão em um condutor
- 3.4 - Modelos de vibrógrafos
- 3.5 - Ponto de posicionamento do sensor do vibrógrafo
- 3.6 - Matriz amplitude-frequência extrapolada para um ano
- 4.1 - Típica construção de condutores de linha de transmissão
- 4.2 - Tensão de flexão na superfície do cabo em função da amplitude de flexão
- 4.3 - Fios de duas camadas adjacentes submetidos a força normal F_N e deslocamento dx
- 4.4 - Rigidez a flexão em função da curvatura do condutor
- 4.5 - ***Safe Border Line*** da CIGRÉ e curvas *S-N*
- 4.6 - Croqui da bancada experimental do Laboratório de Cabos Condutores de Energia Elétrica da Universidade de Brasília (UnB)
- 4.7 - Porcentagem de ciclos para cada faixa de amplitudes de deslocamento
- 5.1 – Curvas *S-N* da Cigré (Safe Border Line) e a obtida em laboratório para cabo Grosbeak ($EDS = 20\%$)

5.2 - Curvas $S-N$ para EDS 's de 20% (para o cabo Grosbeak da UnB) e 25% e 30% corrigidas por Goodman

5.3 – Curvas $S-N$ da Cigré (Safe Border Line) e a obtida em laboratório para cabo Grosbeak corrigida para $EDS = 25\%$

5.4 – Curvas $S-N$ da Cigré (Safe Border Line) e a obtida em laboratório para cabo Grosbeak corrigida para $EDS = 30\%$

6.1 - Razão entre as vidas remanescentes baseadas nas curvas limite de segurança da Cigré e na curva para o cabo Grosbeak levantada no laboratório da UnB.

Lista de Símbolos

EDS - Every Day Stress

N - Número de ciclos

σ_a - Amplitude de tensão

N_f - Vida em fadiga

σ'_f - Coeficiente de resistência a fadiga

b - Expoente de resistência a fadiga ou expoente de Basquim

S_u - Limite de resistência à tração (kN)

S₁₀₀₀ - Tensão alternada para uma vida de 10³ ciclos

Se - Limite de fadiga

$\Delta\sigma$ - Diferença entre os valores máximos e mínimos de tensão

σ_m - Tensão média

$\sigma_{máx}$ - Tensão máxima

$\sigma_{mín}$ - Tensão mínima

R - Razão entre a tensão mínima e máxima

$\tilde{\sigma}_{fB}$ - Tensão verdadeira de resistência a fratura (Morrow)

σ_{ar} - Resistência a fadiga equivalente ao material testado

σ_u - Limite de resistência (MPa)

T - Temperatura

ΔT - Diferença de temperatura

α - Coeficiente de expansão térmica

E - Módulo de elasticidade

σ_t - Tensão térmica

D - Soma dos danos referente a cada nível de carregamento

n_i - Número de ciclos aplicados para cada σ_i

N_i - Número de ciclos para falha

σ_i - Nível de tensão do carregamento

Re - Número de Reynolds
 V_e - Velocidade do escoamento (vento)
 d - diâmetro do condutor
 d_{cil} - diâmetro do cilindro
 ν - viscosidade cinemática do ar
 f_s - Frequência de despreendimento dos vórtices
 S - Número de Strouhal
 X_b - Distância de medição
 f_{ext} - Fator de extrapolação
 t_m - Tempo real de medição do vibrógrafo
 i - Taxa de amostragem por hora
 t_c - Período total de permanência do coletor de dados na linha
 Y_b - Amplitude de deslocamento do condutor (pico a pico)
 EI_{min} - Rigidez mínima do condutor
 EI_{max} - Rigidez máxima do condutor
 K - Fator de Poffenberger-Swart
 p - Fator de Poffenberger-Swart
 E_{al} - Módulo de elasticidade do alumínio
 d_{al} - Diâmetro dos fios de alumínio
 n_{al} - Número de fios de alumínio
 E_s - Módulo de elasticidade de aço
 d_s - Diâmetro dos fios de aço
 n_s - Número de fios de aço
 T - Carga de tração do cabo
 CRT - Carga de ruptura a tração do cabo
 F_N - Força normal
 f - Frequência de vibração
 f_{EI} - Frequência de vibração considerando o efeito do EI
 a - Comprimento do vão livre
 m_c - Massa específica do condutor

m - Modo de vibração

V - Vida remanescente

$V_{CIGRÉ}$ - Vida remanescente calculada pela curva da Cigré

V_{UnB} - Vida remanescente calculada pela curva da UnB

$V_{\text{útil}}$ - Vida remanescente útil do cabo (anos)

$V_{\text{útil-UnB}}$ - Vida remanescente útil calculada pela curva da UnB

D_{UnB} - Acumulo de dano calculado para o cabo Grosbeak da UnB

$D_{Cigré}$ - Acumulo de dano calculado através da curva limite de segurança da Cigré

$V_{\text{Útil-UnB}}$ - Vida remanescente útil calculada para o cabo Grosbeak da UnB

$V_{\text{Útil-Cigré}}$ - Vida remanescente útil calculado através da curva $S-N$ da Cigré

ACSR - Aluminum Conductor Steel Reinforced

CAA - Cabo de Alumínio com Alma de Aço

LVDT - Linear Variable Differential Transformer

N_{nucle} - Número de ciclos para nucleação da trinca

N_{prop} - Número de ciclos para propagação da trinca

N_{rup} - Número de ciclos para ruptura do material

Al_2O_3 - Óxido de alumínio

Sumário

Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivo.....	2
1.3 O fenômeno de fadiga por fretting em cabos.....	2
1.4 Revisão do estado da arte.....	4
1.5 Metodologia.....	8
Capítulo 2	10
Revisão da literatura / aspectos teóricos.....	10
2.1 Mecanismos de fadiga.....	10
2.2 Fadiga Uniaxial.....	13
2.2.1 Curvas S-N.....	13
2.2.2 Efeito da Tensão média.....	14
2.2.3 Efeito da Temperatura.....	19
2.2.4 Efeito do Acabamento.....	19
2.3 Fadiga para carregamentos aleatórios.....	20
2.3.1 Método Rainflow.....	20
2.3.2 Regra de Palmgren-Miner.....	21
2.3.3 Regra de Acúmulo de Dano Progressivo.....	24
2.4 Fadiga por Fretting.....	24
2.3.1 Fadiga por <i>Fretting</i> em cabos condutores.....	25
Capítulo 3	29
Teoria da influência da vibração eólica em cabos condutores.....	29
3.1 Vórtices de Von Karman.....	29
3.1.1 Vibrações em cabos condutores de energia.....	32
3.1.1.1 Vibração eólica.....	32
3.1.1.2 Oscilações de sub-vão.....	33
3.1.1.3 Galloping.....	34

3.2	Medição de vibrações eólicas.....	34
3.2.1	Locais para medição.....	39
Capítulo 4	.....	40
	Revisão das metodologias de avaliação da vibração em cabos condutores	40
4.1	Metodologias de avaliação da vibração em cabos condutores.....	40
4.1.1	Metodologia da EPRI.....	40
4.1.2	Metodologia da IEEE.....	42
4.1.3	Metodologia da Cigré WG 22-04.....	43
4.1.3.1	Poffenberger-Swart	43
4.1.3.2	Flexão do Condutor.....	45
4.1.3.3	Frequência de vibração do condutor	47
4.1.3.4	Limite de Resistência a Fadiga	48
4.1.4	Estudo de caso para uma matriz extraída da literatura.....	51
Capítulo 5	.....	54
	Aplicação das metodologias em uma linha real e método para estimar a resistência a fadiga para níveis elevados de <i>EDS</i>	54
5.1	Dados de vibração de campo.....	54
5.2	Avaliação da vida remanescente para uma <i>EDS</i> 20%.....	55
5.3	Proposta para correção da curva <i>S-N</i> para elevadas <i>EDS</i>	57
5.3.1	Vida remanescente para <i>EDS</i> 's 25 e 30% sem correção por Goodman....	58
5.3.2	Vida remanescente para <i>EDS</i> 's 25 e 30% corrigidos por Goodman.....	61
Capítulo 6	.....	67
	Discussão dos resultados e conclusões.....	67
5.1	Proposta para trabalhos futuros	73
Referências	.....	74
Anexo	.....	79

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Uma das variáveis para definir um país como desenvolvido é a facilidade de acesso da população aos serviços de infra-estrutura, entre eles a energia. A energia é o fator determinante para o desenvolvimento econômico e social ao fornecer apoio mecânico, térmico e elétrico às ações humanas.

Com quase 184 milhões de habitantes o Brasil se destaca como a quinta nação mais populosa do mundo. Em 2008, cerca de 95 % da população tinha acesso à rede elétrica sendo mais de 61,5 milhões de unidades consumidoras em 99 % dos municípios, a grande maioria residencial, cerca de 85 % [1].

A conexão e atendimento ao consumidor são realizados pelas distribuidoras de energia elétrica. As distribuidoras funcionam como elo entre o setor de energia elétrica e a sociedade, visto que suas instalações recebem das companhias de transmissão todo o suprimento destinado ao abastecimento no país.

Em 2008 o segmento de transmissão no Brasil era composto por mais de 90 mil quilômetros de linhas com tensões que variam de 88 kV a 750 kV [1]. A grande extensão da rede de transmissão no Brasil é explicada pela configuração do segmento de geração, constituído, na maior parte, de usinas hidrelétricas instaladas em localidades distantes dos centros consumidores.

O tempo de vida destas linhas de transmissão é muitas vezes governado por processos de fadiga, causados por vibrações ou por aplicações de cargas cíclicas causadas principalmente pelas correntes de ar. Os cabos condutores, mais afetados por esse processo de fadiga, são os elementos mais importantes em uma linha de transmissão contribuindo com cerca de 40% do total de custos [10].

1.2 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo geral estudar e aplicar uma metodologia preditiva que permita ao Engenheiro de Projeto e de Manutenção de Linhas estimar com confiança a durabilidade quanto a fadiga por *fretting* de cabos condutores de energia. Mais especificamente, propõe-se:

(i) Conduzir uma revisão crítica sobre as diferentes metodologias existentes para o projeto e manutenção de linhas de transmissão de energia quanto a fadiga sob condições de *fretting*.

(ii) Calcular a vida remanescente de um cabo Grosbeak utilizando uma matriz de amplitude x frequência, coletada em campo por meio de aparelho vibrógrafo (matriz # 2).

(iii) Apresentar uma alternativa para o cálculo da curva de resistência a fadiga do cabo na presença de maiores cargas de esticamento (*EDS*).

1.3 O fenômeno de fadiga por fretting em cabos

Em geral, os aspectos mais relevantes para o projeto e concepção de linhas de transmissão são: a energia a ser transportada e as perdas decorrentes deste transporte. Entretanto aspectos mecânicos, como a fadiga por *fretting*, e metalúrgicos também devem ser considerados a fim de manter baixos os custos de manutenção.

A fadiga por *fretting* é influenciada por inúmeros fatores como: carga de contato e a amplitude do escorregamento entre os fios, o coeficiente de fricção, condições da superfície do material, tipo de material em contato e o ambiente em que eles se encontram. A causa fundamental de fadiga em cabos é a flexão cíclica, da ordem de 200 – 1400 μm , imposta por vibrações decorrentes da ação das correntes de ar – *Aeolian vibration*. Os pontos onde há uma restrição do movimento causado por essas vibrações, como grampos, espaçadores, etc, são os mais sujeitos a falha, figura 1.1.

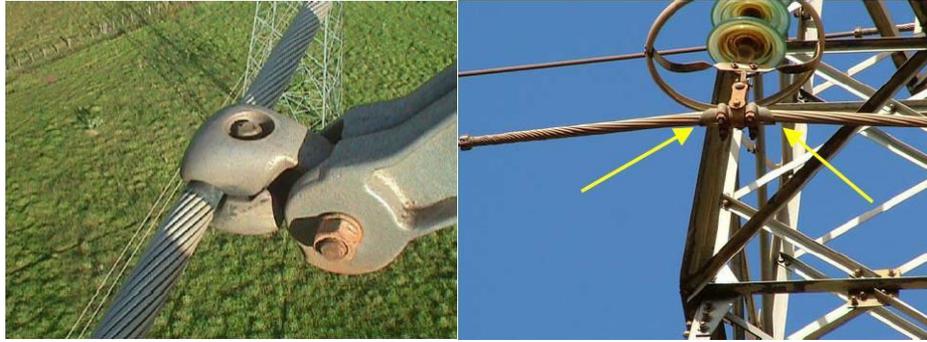


Figura 1.1 – Pontos de restrição do movimento [12]

Essa restrição faz com que os fios que constituem o cabo escorreguem entre si, e as forças de fricção aliadas a este movimento relativo causem o *fretting* entre os fios e nos contatos do cabo com os grampos de sustentação. Uma vez que uma trinca, induzida por *fretting* é formada, a mesma poderá se propagar por fadiga levando ao rompimento do fio ou, em casos extremos ao rompimento total do cabo [21, 9], figura 1.2.



Figura 1.2 – Fios de alumínio rompidos devido à fadiga por *fretting* [12]

1.4 Revisão do estado da arte

Em 1965, Poffenberger e Swart [28] desenvolveram uma solução analítica que define a relação entre o deslocamento e a flexão sofrida pelos fios de cabos condutores. Essa relação depende da tensão no cabo condutor, do comprimento do cabo de grampo a grampo e a sua rigidez a flexão. Esse foi um passo fundamental para o desenvolvimento de teorias de durabilidade de cabos baseadas no uso de propostas mais modernas no âmbito da Fadiga de Metais.

A IEEE [21] propôs um novo guia com os procedimentos a serem seguidos bem como os tipos de aparelhos hoje disponíveis no mercado para se medir a vibração causada em cabos condutores pela ação dos ventos - *Aeolian vibration*. A influência do tipo de terreno, vegetação, tipo de grampos de sustentação e possíveis erros na aquisição de dados também foram abordados. Com essa padronização os aparelhos vibrógrafos são fabricados e posicionados para obter a matriz de frequência e deslocamento para um determinado cabo em uma região específica ao longo do ano. São esses dados que serão utilizados na celebrada Equação de Poffenberger-Swart para cálculo da sollicitação mecânica do cabo e assim alimentar os modelos preditivos de acúmulo de dano por fadiga.

Ramey e Silva [30] realizaram uma série de testes a fim de avaliar a eficiência da redução da amplitude de vibração na vida à fadiga de cabos condutores. Neste trabalho foi desenvolvido um aparato experimental para simular no laboratório, o carregamento cíclico devido a forças eólicas a que o cabo está submetido em campo. Trinta e três testes foram realizados com cabos CAA (*Cabo de Alumínio com alma de Aço*). Grande parte dos cabos testados foi submetida inicialmente a altas amplitudes de vibração. Após a ruptura de alguns fios (geralmente dois ou três) a amplitude de vibração era reduzida prosseguindo então com o teste. O uso de um LVDT para medição da rotação do condutor permitiu a monitoração cronológica das falhas nos fios fornecendo o número de ciclos de fadiga e a localização exata de cada fio rompido. Os resultados mostraram que a redução na amplitude de vibração dos cabos é uma forma eficiente de evitar a falha de outros fios que o compõem. Cabos testados a altas amplitudes que apresentaram alguns fios rompidos após alguns poucos milhões de ciclos resistiram a vidas de até 10^8 ciclos,

sem apresentar outras falhas, quando a amplitude de vibração foi reduzida a aproximadamente um terço da amplitude aplicada inicialmente. Foi então sugerido pelos autores que o uso de amortecedores capazes de reduzir os níveis de vibração eólica nos cabos pode ser uma forma eficiente de conter o dano por fadiga nestes elementos.

Outro estudo experimental desenvolvido por Ramey *et al.* [32], visava obter curvas *S-N* para cabos CAA tipo *Drake*. Vibrações eólicas foram simuladas em laboratório utilizando-se um excitador de vibrações 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 a confecção das curvas *S-N*. Os resultados obtidos mostraram que, apesar do alumínio não possuir um limite de fadiga bem definido, o cabo *Drake* apresentou um limite de fadiga (para a ruptura do primeiro fio) de 21,31 MPa. Foi observado também 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.* [29] realizaram uma série de testes de fadiga em cabos CAA utilizando grampos de suspensão com três diferentes raios longitudinais. Medidas de deformações estáticas e dinâmicas foram conduzidas nas camadas exteriores do cabo. Foi observado que quanto maior o raio de curvatura do grampo de suspensão menor era o nível de tensão medido e conseqüentemente maior era a resistência à fadiga da montagem. Também foi verificado que todos os fios rompiam em algum lugar entre os últimos pontos de contato entre o cabo e as partes superiores e inferiores do grampo, em uma região onde o desgaste por *fretting* estava sempre presente. A maioria dos fios rompidos (aproximadamente 75% deles) pertencia às camadas intermediárias do cabo, aonde o desgaste por *fretting* foi mais severo.

Gopalan [15] 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. O autor enfatizou que apesar dos testes em laboratório negligenciarem os efeitos da umidade, temperatura e direção variável do vento, estes ainda poderiam 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.

Um aparato experimental para testes de fadiga por *fretting* dos fios que constituem os cabos condutores foi desenvolvido por Zhou et al. [42]. 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 corpo de prova utilizando-se um sistema mola-parafuso. Transversalmente ao fio uma carga de contato era aplicada por um conjunto de sapatas cilíndricas simulando o contato entre o fio e o grampo de suspensão ou o contato entre fios. O objetivo foi comparar o comportamento à fadiga do fio quando testado isoladamente e quando testado em conjunto com o cabo. Para tal, 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 executados por Zhou et al., [43] em outro estudo. Os testes com os fios isolados 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. Adicionalmente concluiu-se que maiores amplitudes da carga de fadiga provocavam um crescimento da zona de escorregamento com uma conseqüente redução na vida à fadiga do fio. Assim como verificado anteriormente por Preston et al. [29] e Ramey [31], 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, é plausível o uso dos resultados de simples testes em fios para prever o comportamento à fadiga do conjunto cabo/grampo, tornando os testes mais simples e baratos.

Hardy e Dyke [18] munidos de uma coletânea sobre observações referentes a vibrações eólicas sobre cabos condutores, em escala natural, chegaram a várias conclusões, entre elas:

- A frequência e a amplitude da vibração são independentes a correntes de ar paralelas.
- A turbulência colabora significativamente na atenuação da vibração do condutor.
- Altos índices de tensionamento no cabo (*EDS*) aumentam sua sensibilidade a vibrações.
- O uso de espaçadores anti-vibração (*damping spacers*) foi de grande benefício no controle das vibrações eólicas, porém não surtiu muito efeito no caso de vibrações induzidas por esteiras turbulentas.

Goudreau [16] apresentou os resultados de testes de fadiga no qual seu histórico de carregamento aplicado ao cabo seguiu uma aproximação da distribuição de Rayleigh. Uma comparação entre o diagrama de Rayleigh-Mainier e os resultados experimentais mostraram uma tendência não conservativa quando aplicada a regra de Palmgren-Miner para baixos níveis de amplitudes de tensões.

Hardy e Brunelle [17] apresentaram os princípios básicos do dimensionamento e análise de vibrações eólicas sobre cabos condutores utilizando o vibrógrafo PAVICA. A principal análise feita foi quanto a probabilidade de falha do cabo quando utilizado o método da Cigré, demonstrando ser este muito conservativo em ambos os experimentos executados.

Cardou [4] em uma revisão da literatura, concluiu que o uso da regra de Miner para um contexto de vibração de cabos condutores causada pelo deslocamento do ar - *Aeolian vibration* é mais satisfatória que o uso da metodologia EPRI devido principalmente aos seguintes fatores: o ponto de obtenção das amplitudes de vibração ser próximo ao contato entre o cabo e o grampo de suspensão e do detalhamento dos dados de falha do material durante e após os testes. Entretanto, salientou-se que maior número de testes deve ser executado a fim de se definir com uma maior exatidão em qual situação a regra de Miner será mais bem empregada.

Mansur *et al.* [25] avaliaram a vida restante em corpos de prova do aço SAE 8620 quando submetido á fadiga de alto ciclo para as seguintes teorias: Palmgren-Miner, Henry, Corten-Dolan, Marin, regra de danos Double Linear de Manson e a teoria do ponto do joelho da curva *S-N* (Knee-point). A teoria que apresentou os melhores resultados para condições de carregamento, aplicados de forma alternada, foi a de Corten-Dolan sendo que os resultados obtidos com a teoria de Palmgren-Miner se mostraram muito bons para uma probabilidade de falha de 50 %.

Em 2008, Azevedo *et al.* [2] apresentaram o detalhamento do projeto, construção e operação da bancada para ensaios de fadiga por *fretting* de cabos condutores de energia, localizada no Departamento de Engenharia Mecânica da UnB. Essa bancada permite a realização de ensaios com rigoroso controle da amplitude de deslocamento medido no ponto padrão (localizado sobre o cabo a 89 mm do último ponto de contato entre o cabo e grampo de suspensão) em malha fechada, dos instantes em que ocorrem a rupturas dos fios de alumínio e da carga de pré-esticamento do cabo condutor. Também mostrou-se nesse trabalho que a intensa degradação, como a deformação plástica e a perda de material incluindo a manta de Zn, da rosca dos parafusos de aço carbono que fixam o grampo de sustentação ao cabo, também tem grande importância no processo de dano, sendo fundamental o controle da especificação dos componentes dos grampos para a realização de testes em larga escala.

1.5 Metodologia

O trabalho proposto envolve uma revisão crítica de metodologias existentes para o cálculo da durabilidade de cabos condutores de energia. Posteriormente, serão escolhidas para avaliação uma ou mais metodologias consideradas mais consistentes e apropriadas para o caso específico da estimativa da vida útil dos cabos existentes no Brasil, que possui condições de vento, terreno e temperatura bastante diferentes dos países do hemisfério norte, onde essas teorias foram propostas inicialmente. Um passo fundamental mas laborioso para avaliação das teorias selecionadas será implementá-las numericamente. Essas rotinas são alimentadas com dados da solicitação e da resistência (Curva *S-N*) do cabo. Os dados referentes à solicitação do cabo (provocada pela vibração eólica) podem ser obtidos na literatura, ou a partir da medição em campo com um aparelho medidor de vibrações posicionado em ponto padrão da linha de transmissão/distribuição. A Universidade Federal do Pará (UFPA) possui esse aparelho e realizou medições em um cabo Grosbeak da Eletronorte S.A.. Essas medições foram enviadas ao orientador dessa dissertação para análise e desenvolvimento de trabalho colaborativo. Quanto a resistência a fadiga do cabo condutor (sua curva *S-N*), há duas

possibilidades. Primeiro pode-se fazer uso da celebrada Curva Limite de Segurança da Cigré. Essa curva contém informações sobre a amplitude de tensão *versus* o número de ciclos que diversos tipos de cabos e fios de alumínio suportam antes de romper por fadiga. Alternativamente, pode-se obter a resistência do cabo a partir de ensaios de fadiga em laboratório. Até onde o autor desse trabalho tem conhecimento, o Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB é atualmente o único Laboratório no hemisfério sul com capacidade de levantar a curva *S-N* de cabos condutores dentro do rigor e dos procedimentos recomendados pela Cigré. Atualmente dispomos de curva *S-N* do cabo Grosbeak obtida em nosso laboratório para efeito de comparação nessa dissertação. Será de grande importância e resultado fundamental desse trabalho avaliar os resultados obtidos pelas metodologias preditivas quando se fornece aos modelos estudados dados de resistência oriundos da Curva da Cigré ou de curva levantada em Laboratório para o cabo específico. Também foi proposto uma forma de se estimar a resistência em fadiga de cabos submetidos a níveis de carga de esticamento acima dos valores convencionais para os quais pode-se encontrar dados laboratoriais disponíveis.

Finalmente, o trabalho poderá ser concluído com uma ampla avaliação dessas teorias e dos impactos e possibilidades de sua utilização no Brasil. Mais ainda, será avaliada quantitativamente a importância (ou não) de se realizar ensaios de resistência a fadiga por *fretting* em laboratório para o uso dessas teorias.

Capítulo 2

Revisão da literatura / aspectos teóricos

A fadiga de cabos condutores apesar de ser um tema complicado fez uso amplo da teoria de fadiga para um regime de alto número de ciclos e em condições uniaxiais de carregamento. Nesse sentido, esse capítulo traz uma revisão de alguns desses conceitos que serão abordados ao longo desse trabalho.

2.1 Mecanismos de fadiga

Vários componentes e estruturas de engenharia estão sujeitas em seu funcionamento a complexas histórias de carregamento que podem levá-los a falha devido à fadiga. Fadiga é um processo de degradação contínua de um componente sujeito a carregamento cíclico que pode, eventualmente, levar à ruptura do material devido à iniciação e posterior propagação de uma ou múltiplas trincas.

Em um material cristalino a deformação plástica durante um carregamento cíclico ocorre pelo movimento de discordâncias, sob a ação de tensões cisalhantes. Este movimento tem como resultado final o deslocamento relativo entre dois planos atômicos. Este deslizamento é mais acentuado quando a tensão cisalhante é maior, e, para um dado carregamento, a deformação plástica é preponderante na direção da máxima tensão de cisalhamento. Com o aumento no número de ciclos, essa trinca tende a se propagar até que ocorra uma falha resultando na separação completa do componente.

O processo de fadiga de um material envolve os seguintes estágios: (1) nucleação de trinca, (2) crescimento da trinca e (3) ruptura final.

A nucleação da trinca, primeiro passo no processo de fadiga, ocorre em um ou mais pontos no plano de cisalhamento que, compreende a superfície ou interior do contorno do grão, ou próximo às concentrações de máxima tensão. Estes pontos ou descontinuidades podem surgir devido aos seguintes fatores:

- Presença de pontos na estrutura do material onde há mudanças rápidas na secção transversal como em chavetas, furos e etc.
- Formação de cavidades superficiais ou lascamento após vários ciclos de carga entre materiais que trabalham com alta pressão de contato como mancais e engrenagens.
- Falhas na composição do material provenientes ou não dos processos de fabricação como, por exemplo: inclusões de material estranho, porosidades e entalhes.

O próximo estágio no processo de fadiga é o de crescimento da trinca. Esse estágio é dividido em duas fases [24]: a primeira fase ou crescimento baixo de trincas e a segunda fase ou crescimento alto de trincas.

O crescimento baixo de trinca é considerado como sendo o início da propagação da trinca no plano de máxima propagação de cisalhamento sendo, o tamanho da trinca proporcional a microestrutura do material (grão). Na segunda fase há uma longa propagação da trinca, normal ao plano de tensão principal, na direção da máxima tensão de cisalhamento. Nesta fase, as características da trinca são menos afetadas pelas propriedades da microestrutura do material devido à mesma prevalecer sobre a microestrutura do material, figura 2.1.

O último estágio ou estágio 3 ocorre no ciclo de carga final, quando o material remanescente não pode suportar as cargas aplicadas, resultando em fratura rápida e repentina.

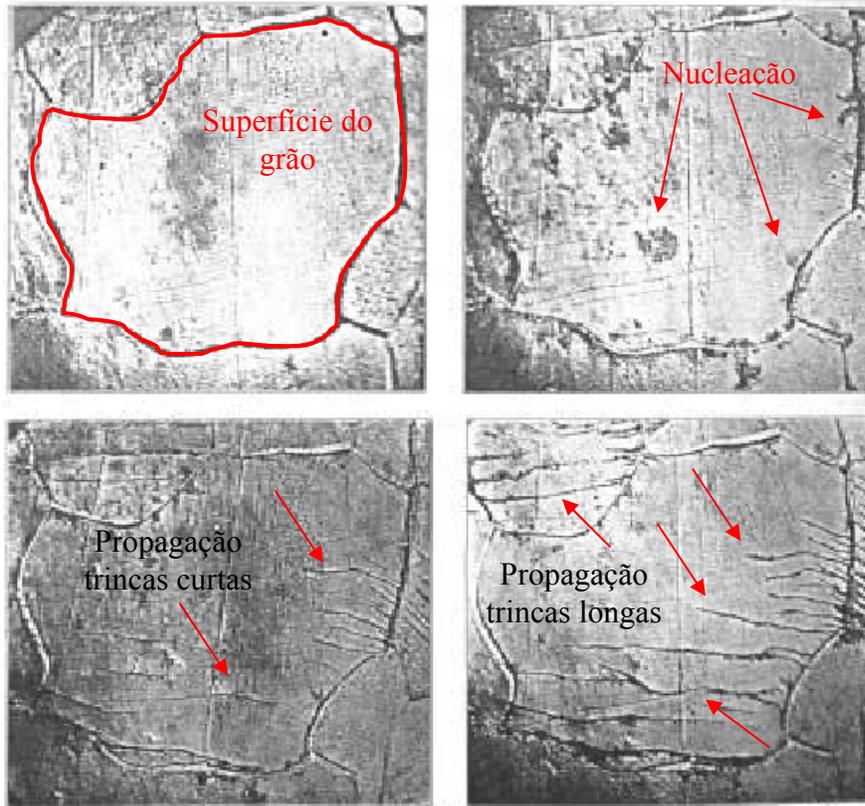


Figura 2.1 - Superfície de um material com trinca

O último estágio ou estágio 3 ocorre no ciclo de carga final, quando o material remanescente não pode suportar as cargas, resultando em fratura rápida e repentina. Normalmente, em regimes de alto número de ciclos ($N > 10^4$) a nucleação da trinca (estágio 1) é o estágio predominante no processo de fadiga, enquanto que para regimes de menor número de ciclos ($N < 10^4$) a propagação da trinca (estágio 2) se sobressai aos outros estágios.

A vida a fadiga de um material é normalmente expressa em número de ciclos, onde o número de ciclos total para falha por fadiga do material (N_f) é dado pela soma do número de ciclos percorridos para cada processo: nucleação das trincas (N_{nucle}), propagação (N_{prop}) e ruptura do material (N_{rup}) equação 2.1.

$$N_f = N_{nucle} + N_{prop} + N_{rup} \quad (2.1)$$

2.2 Fadiga Uniaxial

2.2.1 Curvas $S-N$

As leis ou equações que definem o comportamento do material sobre um processo de fadiga são geralmente obtidas experimentalmente através de ensaios em corpos de prova do material que se deseja estudar. Nestas leis, relaciona-se a amplitude de tensão ou deformação com o número de ciclos necessários para a falha completa do corpo de prova (componente).

Dado um corpo de prova ou um componente estrutural sujeito a um carregamento cíclico uniaxial, poderá ocorrer nestes a iniciação de trincas acarretando assim a uma falha repentina por fadiga.

O número de ciclos para falha será menor à medida que estes testes forem aplicados com maiores níveis de tensão. Estes testes quando traçados em um gráfico, nos apresentam as curvas de Tensão – Vida, curvas $S - N$ ou curvas de Wöhler, onde a amplitude de tensão σ_a ou a tensão nominal é normalmente plotada em função do número de ciclos necessários para falha, ou a vida a fadiga N_f [3].

Tais dados podem ser aproximados por uma reta, segundo a equação de Basquim:

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (2.2)$$

onde σ'_f é o coeficiente de resistência para fadiga e b é o expoente de resistência à fadiga (ou expoente de Basquim), vez que estes são obtidos a partir de ensaios uniaxiais em corpos de prova não entalhados.

Alguns metais, como por exemplo ligas de aço, quando submetidos a amplitudes de tensão constante, apresentam um limite inferior de tensão abaixo do qual não se observa a falha por fadiga (vida infinita ou acima de 2×10^6 ciclos). Essa amplitude de tensão é conhecida como limite de fadiga (Se) e seu valor varia entre 35% a 50% do limite de resistência (Su) para a maioria dos aços e ligas de cobre. Nas curvas $S-N$ o

primeiro ponto do gráfico corresponde à tensão alternada para uma vida de 10^3 ciclos (S_{1000}), essa tensão pode ser estimada em 90% do limite de fadiga.

Alguns materiais como aços de baixa resistência possuem níveis de tensão distintos, fazendo com que a falha por fadiga não ocorra sob condições normais. Porém para alguns materiais, como o alumínio e ligas de cobre, o limite a fadiga é definido para uma vida considerada infinita, como por exemplo, 10^7 ou 10^8 ciclos, ou seja, resistência à fadiga para um determinado número de ciclos, figura 2.2:

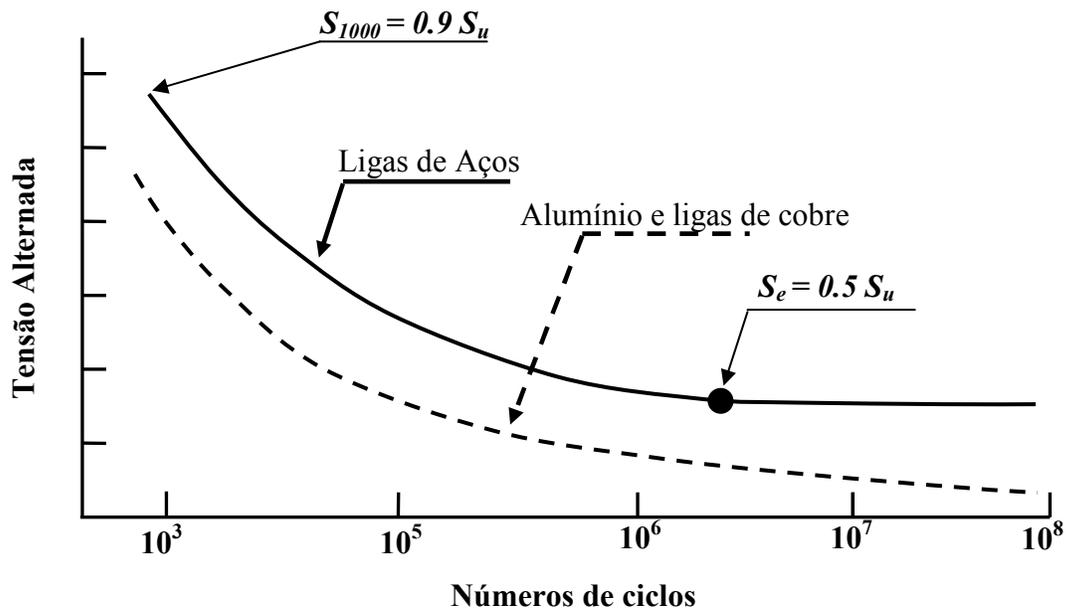


Figura 2.2 – Curvas $S-N$ para aços e para alumínio e ligas de cobre

A vida ou resistência a fadiga pode ser afetada por inúmeros fatores, dentre eles podemos citar a geometria, a temperatura e as tensões médias.

2.2.2 Efeito da Tensão média

A maioria dos dados experimentais disponíveis na literatura correspondem a ensaios conduzidos com tensão média igual a zero. Porém existem várias aplicações em que a tensão média é diferente de zero. O efeito da tensão média é de fundamental

importância no comportamento à fadiga de materiais. As tensões médias de compressão são em geral benéficas enquanto as de tração reduzem a vida a fadiga para uma mesma amplitude de tensão.

Um procedimento freqüentemente usado para visualizar o efeito da tensão média no processo de fadiga é traçar o gráfico dos dados correspondentes a esse tipo de situação em diagramas normalizados [20]. A figura 2.3 mostra ciclos de fadiga senoidais com tensões médias iguais e diferentes de zero. A faixa de tensão, a amplitude de tensão e a tensão média são definidas como:

$$\Delta\sigma = (\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}) \quad (2.3)$$

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n})}{2} \quad (2.4)$$

$$\sigma_a = \frac{(\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n})}{2} \quad (2.5)$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \sigma_m - \sigma_a \quad (2.6)$$

$$\sigma_{m\acute{i}n} = \sigma_m + \sigma_a \quad (2.7)$$

Onde:

$\Delta\sigma$ – diferença entre os valores máximos e mínimos

σ_a – amplitude de tensão

σ_m – tensão média

$\sigma_{m\acute{a}x}$ – tensão máxima

$\sigma_{m\acute{i}n}$ – tensão mínima

A tensão média também pode ser caracterizada em termos da razão de tensões, R:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (2.8)$$

O parâmetro R indica o tipo de carregamento ao qual o elemento está sujeito. Se o ciclo varia de carga nula para carga de tração, a solitação é repetida e $R = 0$. Caso ocorra a completa inversão de tração para compressão, a tensão média é nula, $R = -1$ e o carregamento é denominado totalmente reverso. Se houver somente carga de tração, a solitação é flutuante e $R > 0$.

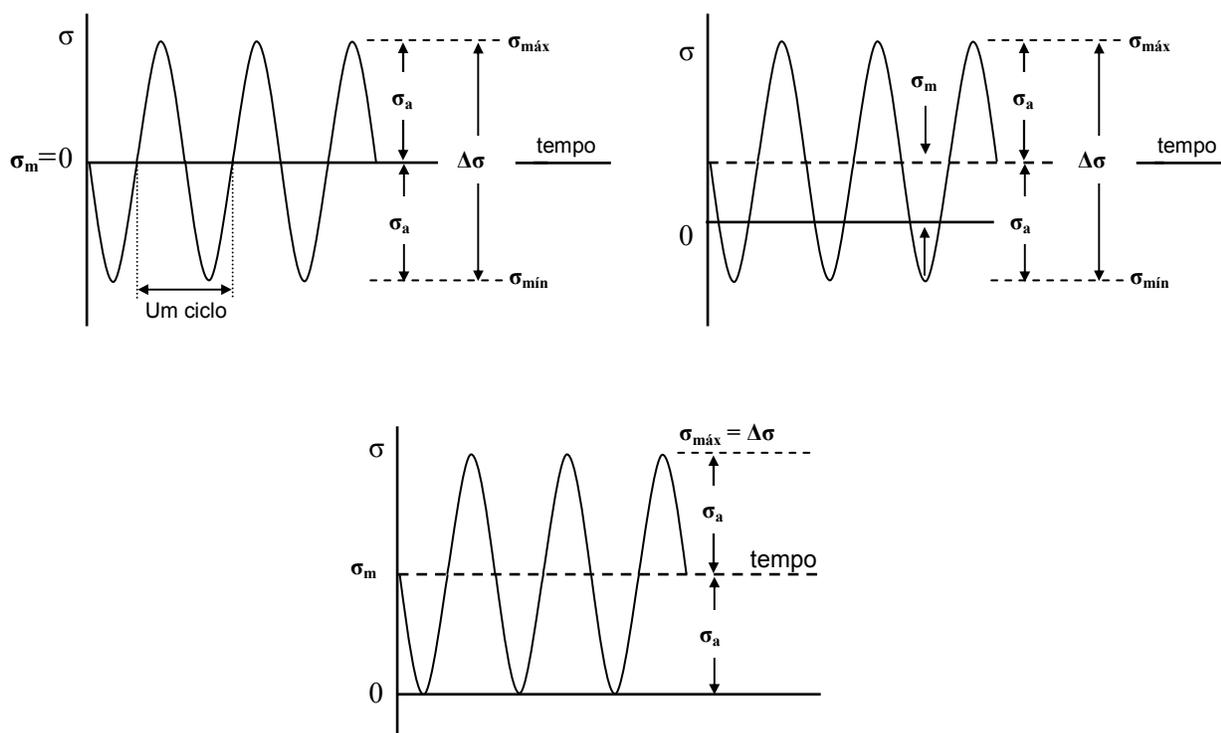


Figura 2.3 - Ciclos de fadiga senoidais

Os efeitos da tensão média podem ser representados em termos de diagramas de vida constante. Nesses diagramas, diferentes combinações de amplitude de tensão e tensão média definem regiões onde um componente poderia operar sem falhar por fadiga após experimentar um determinado número de ciclos de carregamento. GOODMAN (1919), MORROW (1968) e SMITH, WATSON, TOPPER (SWT) [39] propuseram relações de vida constante para estimar o efeito da tensão média sob a resistência a fadiga. Essas são representadas nas equações 2.9 a 2.13. As curvas de vida constantes podem ser visualizadas na figura 2.4, onde Morrow 1 corresponde a equação de Morrow contendo o coeficiente de resistência a fadiga σ'_f e Morrow 2 é a equação de Morrow contendo a tensão verdadeira de resistência a fratura $\tilde{\sigma}_{fB}$.

Relação de Goodman:

$$\sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_u}} \quad (2.9)$$

Relação de Morrow:

$$\sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\tilde{\sigma}_{fB}}} \quad (2.10)$$

$$\sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f}} \quad (2.11)$$

Relação de SWT:

$$\sigma_{ar} = \sqrt{\sigma_{máx} \cdot \sigma_a} \quad (2.12)$$

$$\sigma_{ar} = \sigma_a \left(\frac{2}{1-R} \right)^2 \quad (2.13)$$

Nas equações anteriores σ_{ar} representa a resistência a fadiga equivalente ao material testado com tensão média nula.

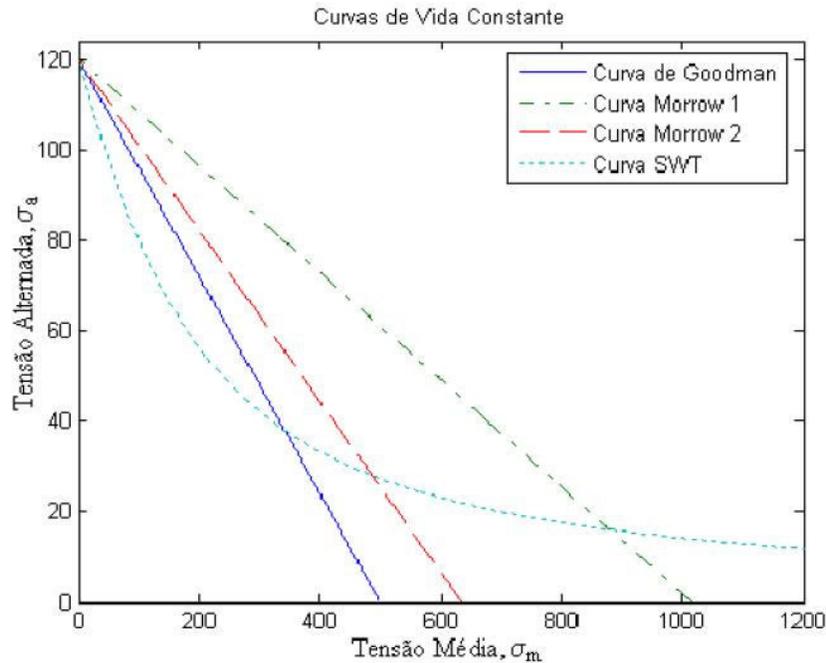


Figura 2.4 – Diagrama de fadiga para vários critérios de falha

Em geral, metais com baixa ductilidade como aços de alta resistência tendem a se ajustar bem à curva de Goodman, por outro lado materiais frágeis como ferro fundido tendem a apresentar seus dados experimentais abaixo dessa. Para se obter uma curva que se ajuste a esses materiais, J. Morrow propôs algumas modificações na equação de Goodman como: a substituição do limite de resistência σ_u pelo coeficiente de resistência à fadiga σ'_f do material ou pela tensão verdadeira de resistência a fratura por fadiga $\tilde{\sigma}_{fB}$. Ambas as modificações apresentaram resultados razoáveis pra aços e ligas de alumínio.

Outra importante relação idealizada por Smith, Watson e Topper (SWT) apresenta resultados razoáveis para a maioria dos metais e ótimos resultados para ligas de alumínio.

2.2.3 Efeito da Temperatura

Quanto maior a temperatura, menor será a resistência do material consequentemente, a resistência a fadiga e o limite de fadiga também serão menores [11]. A magnitude de uma tensão térmica (σ_t) desenvolvida por uma mudança de temperatura ΔT é dependente do coeficiente de expansão térmica α e do módulo de elasticidade E de acordo com a equação a seguir [6]:

$$\sigma_t = \alpha \cdot E \cdot \Delta T \quad (2.14)$$

2.2.4 Efeito do Acabamento

Durante operações de usinagem, pequenos arranhões e ranhuras são invariavelmente introduzidos na superfície da peça de trabalho por ação de ferramenta cortante. Estas marcas de superfície podem limitar a vida a fadiga, portanto uma melhora no acabamento da superfície aumentará significativamente à vida a fadiga.

Dentre os processos de tratamentos superficiais dois se destacam por provocar tensões residuais compressivas responsáveis pelo aumento do desempenho a fadiga de um componente, são eles [38]:

- **Jateamento com esferas:** Consiste na deformação plástica de uma superfície por meio de pequenas esferas com diâmetros que variam de 0,1 a 1,0 mm, que são lançadas em alta velocidade de encontro à superfície a ser tratada. O resultado da deformação, com profundidade entre um quarto e metade do diâmetro da esfera, induz à tensão residual compressiva, aumentando à vida a fadiga do componente [38].

- **Conformação a frio:** Aplicação particular em raios e chanfros contidos em eixos, onde através de rolos provoca-se a deformação plástica da superfície de revolução do componente, resultando uma tensão residual compressiva na superfície

aumentando assim a resistência da mesma aos carregamentos de flexão rotativa ou torção reversa [38].

2.3 Fadiga para carregamentos aleatórios

Para uma aproximação geral da previsão do tempo de vida de uma estrutura sujeita a um carregamento aleatório, é necessário definir amplitudes de ciclos de carregamento equivalentes que são funções da sequência de máximos e mínimos deste carregamento. A partir daí podemos extrair ciclos de carregamento, através dos quais calculamos o dano e fazemos previsões do tempo de vida. O processo de dano acumulado depende só dos valores e da ordem dos extremos locais do carregamento.

2.3.1 Método Rainflow

Geralmente, um registro da amplitude de tensão no tempo não se apresenta de forma harmônica, mas sim de forma aleatória. Devido a isso torna-se difícil a obtenção da variação da tensão que ocorre em um determinado ponto da estrutura bem como o ciclo referente a esta tensão. Para contornar esta dificuldade, foram desenvolvidos alguns métodos de contagem de ciclos de tensões, como por exemplo, o método Rainflow.

A finalidade deste método é extrair de um sinal aleatório no tempo as gamas de tensão e seus respectivos ciclos.

O algoritmo é baseado na contagem de picos e vales representando o caimento de uma gota d'água ao longo de um telhado, figura 2.5 [41]. O eixo do tempo é orientado verticalmente com o sentido positivo para baixo. Os picos e vales são identificados com letras, a gota de água ou o fluxo da chuva pode escoar tanto da direita para esquerda, como da esquerda para direita do sinal. O início e o fim de cada caminho de escoamento definem as extremidades da metade de um ciclo, podendo o caminho ser iniciado tanto nos picos como nos vales. A vantagem desse método é a capacidade de considerar todas as variações de tensão que ocorrem ao longo do tempo.

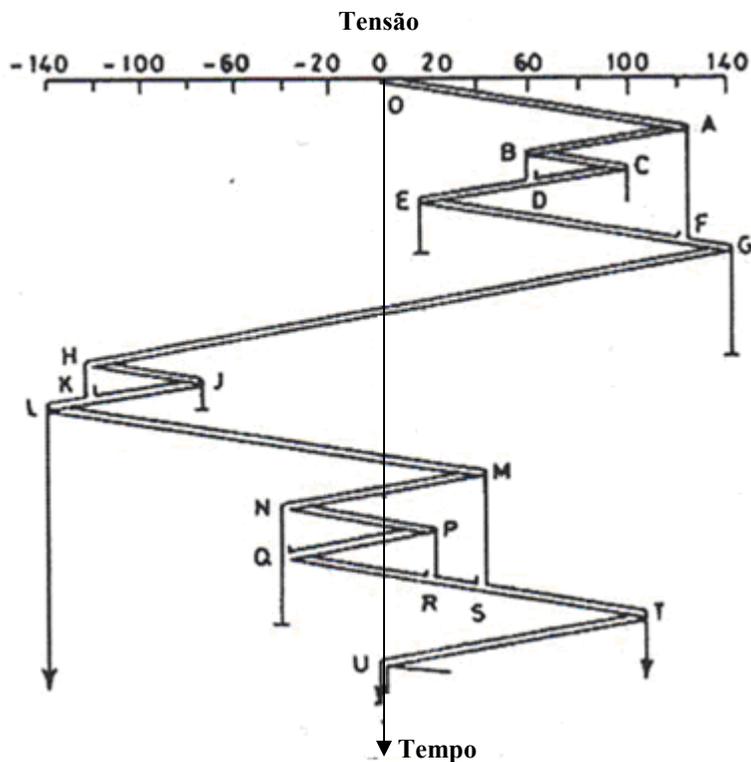


Figura 2.5 - Esquema ilustrativo do método Rainflow [41]

2.3.2 Regra de Palmgren-Miner

O material de um componente mecânico, quando submetido a carregamentos variáveis no tempo, sofre deformações plásticas permanentes e irreversíveis que reduzem a vida útil da peça. Essa perda parcial de funcionalidade da peça é denominada dano. O dano pode ser acumulativo à medida que um componente, inicialmente com um dano, continua a ser solicitado sobre influência de uma tensão nominal cíclica.

O primeiro modelo linear de dano era utilizado para aplicações na indústria sueca e foi proposto por Palmgren em 1924 [24]. Ele sugeriu o conceito de soma linear de dano por fadiga, que hoje é conhecido por regra de acúmulo de dano linear. Em 1945, Miner, que trabalhava para a Douglas Aircraft, foi o primeiro a representar o conceito de Palmgren conforme equação 2.15 abaixo [13]:

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (2.15)$$

Miner mostrou excelentes concordâncias entre os resultados das previsões feitas pela regra de dano linear e seus experimentos. Esse sucesso obtido criou uma grande associação entre a regra de dano linear e Miner, conseqüentemente, esta regra ficou conhecida como regra de dano linear de Miner.

O modelo para o cálculo do acúmulo de dano proposto por Miner admite que a soma dos danos referentes a cada nível de carregamento D pode ser quantificado pela razão entre número de ciclos aplicados, n_i , e o número de ciclos necessários para causar a falha, N_i em um nível de tensão σ_i [11]. O número de ciclos N_i é obtido através da curva $S-N$ do material desejado. Definiu-se, ainda, que a peça falha quando a soma de todas as razões é maior ou igual à unidade, conforme equação 2.16 abaixo:

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \geq 1 \quad (2.16)$$

Como exemplo, supõe-se que foram inicialmente aplicados três níveis distintos tensões sem ocorrer ruptura, figura 2.6. Ao aplicar a quarta solicitação, a ruptura ocorreria quando o número de ciclos satisfizesse a seguinte igualdade, demonstrada na equação 2.17.

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \frac{n_4}{N_4} = 1 \quad (2.17)$$

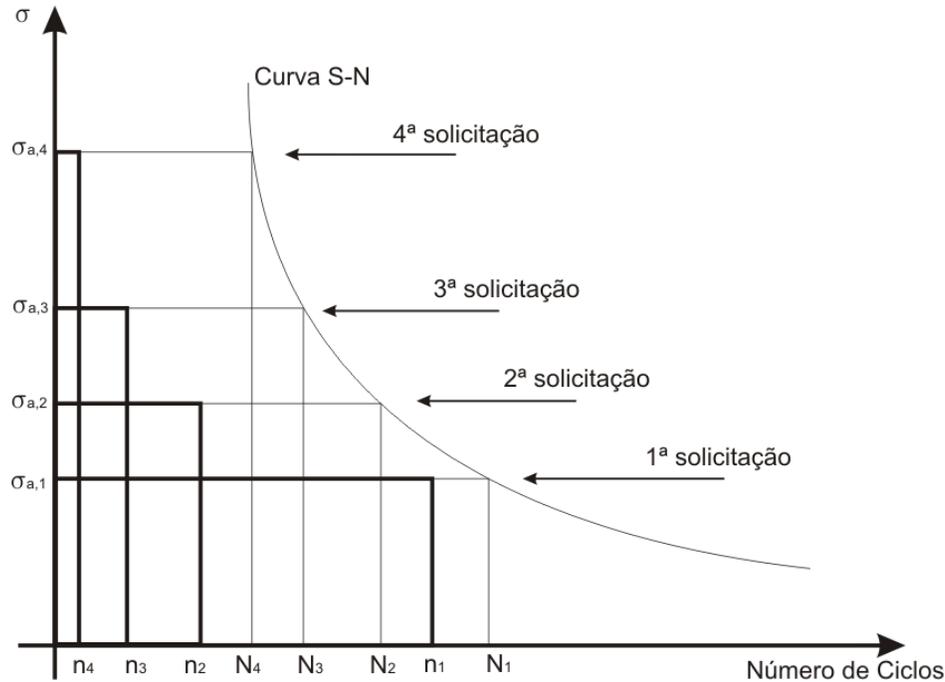


Figura 2.6 - Curva S-N típica

Pode-se estimar a vida remanescente utilizando a equação 2.18 abaixo:

$$V = \frac{1}{D} \quad (2.18)$$

Para $V \leq 1$ o material analisado já terá sofrido falha, pois a soma dos danos parciais já terá ultrapassado ou igualado a 1 ($D \geq 1$). Para $V > 1$ o valor encontrado para V será subtraído de 1 (para $D = 1 \rightarrow V = 1$), assim o valor resultante será a vida remanescente útil em anos ($V_{\text{útil}}$) do material equação 2.19.

$$V_{\text{útil}} = V - 1 \quad (2.19)$$

As principais deficiências desta teoria são: a independência do nível de tensão, da seqüência do carregamento e da interação entre os danos. Apesar de experiências demonstrarem que a ordem de aplicação dos ciclos de tensões é de grande relevância para

o cálculo do acúmulo de dano [34], os resultados obtidos por Mansur et all [25], considerando a regra de Palmgren-Miner, mostraram-se muito satisfatórios para uma probabilidade de falha de 50%.

2.3.3 Regra de Acúmulo de Dano Progressivo

A regra de Dano Progressivo [35] e [5] prevê que o dano acumulado é fornecido pela soma dos danos parciais. Cada parcela do dano é obtida pela relação entre o número de ciclos aplicados n_i sob uma tensão σ_i e a vida esperada N_i , da curva $S-N$. A partir da segunda parcela, essa razão é multiplicada pelo expoente das diferenças das tensões atual e anterior, dividida pela tensão atual e multiplicada pelas parcelas anteriores de danos acumulados, conforme equação 2.19 [5]:

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

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

(2.19)

Nesta regra, além de considerar a ordem de carregamento, ela propõem que o histórico dos danos acumulados em cada parcela é de extrema importância na estimativa de vida de um componente mecânico.

2.4 Fadiga por *Fretting*

O *fretting* é um fator importante a ser considerado no projeto de juntas mecânicas. Ele limita a vida em fadiga reduzindo a vida do material, pois aceleram os processos de

nucleação e de crescimento de trincas nos componentes da montagem sujeitos a uma tensão remota cíclica, levando o sistema prematuramente ao colapso. Duas condições são primordiais para a existência do *fretting*: carga de contato e um movimento repetitivo de escorregamento entre duas superfícies em contato. O *fretting* pode-se iniciar com amplitude de escorregamento menores que $10^{-5} mm$ e sua influência na vida em fadiga torna-se substancial para um número de ciclos maior que 10^5 [37].

O mecanismo de *fretting* no alumínio inicia-se com a remoção, decorrente da fricção, do filme oxidante. No primeiro momento as superfícies tendem a se aderir, porém estes pontos de aderência serão rompidos posteriormente com movimento relativo entre as superfícies. Este processo forma um acúmulo de resíduos entre a superfície dos corpos propiciando o surgimento de uma fina e quebradiça camada de óxido de alumínio Al_2O_3 . A partir daí a formação de micro trincas se torna inevitável podendo levar a falha do material caso estas se propagem por debaixo da camada de Al_2O_3 em direção a estrutura remanescente de alumínio [9, 37].

A ocorrência de *fretting* acelera o processo de iniciação de trincas. Enquanto na fadiga convencional o processo de iniciação pode chegar a 90% da vida total do componente, na presença do *fretting*, a iniciação pode ocorrer em até 5% da vida total [40].

2.3.1 Fadiga por *fretting* em cabos condutores

A maioria das falhas em cabos condutores de energia está associada a fadiga do material, causada pela ação de forças eólicas [12] que provocam vibrações de alta frequência e baixa amplitude nas linhas. As falhas são caracterizadas pelo crescimento de trincas nos fios que constituem o cabo. Estas trincas são resultantes do processo de abrasão ou “*fretting*” e do carregamento cíclico do cabo e invariavelmente ocorrem nas superfícies de contato entre o grampo de suspensão e o cabo, ou entre o espaçador e o cabo, figura 2.7.

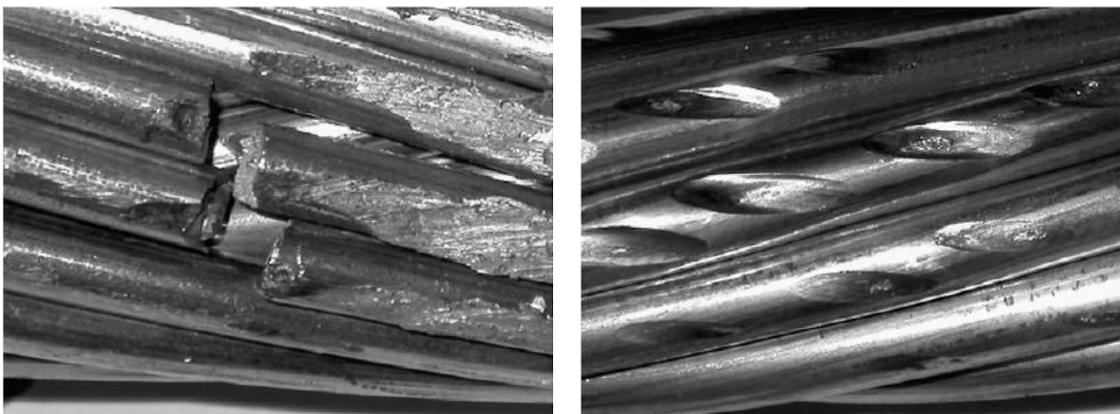


Figura 2.7 - Fadiga por fretting em cabos condutores [12]

A figura 2.8 abaixo mostra a disposição dos feixes de alumínio e de aço na estrutura de um cabo ACSR – Grosbeak e suas superfícies de contato entre fios de alumínio e alma de aço (C), entre os fios de alumínio (D e B) e entre os fios de alumínio e o grampo de suspensão (A).

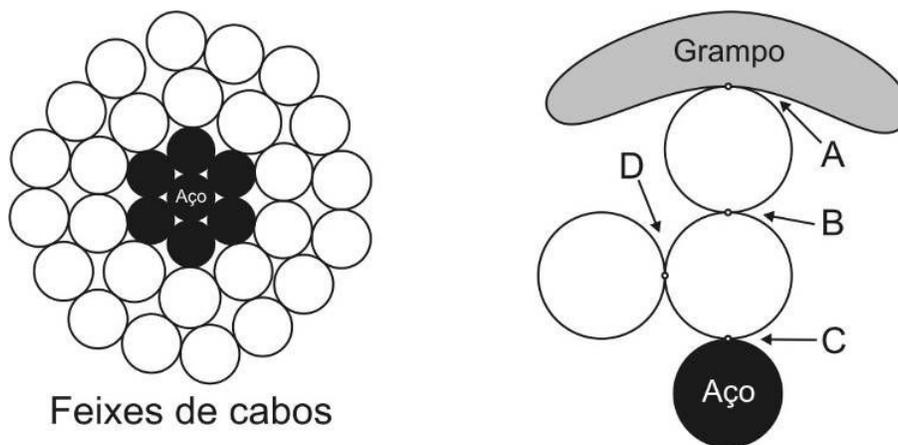


Figura 2.8 - Configuração do cabo Grosbeak e superfícies de contato

Na tabela 2.1 a seguir, os parâmetros do cabo ACSR - Grosbeak fornecidos pela fabricante de cabos Nexans (www.nexans.com.br).

Tabela 2.1 – Parâmetros do cabo ACSR - Grosbeak

Formação do condutor						
Alumínio			Aço			Carga de ruptura (kgf)
Modulo de elasticidade(GPa)	Nº de fios	Ø (mm)	Modulo de elasticidade(GPa)	Nº de fios	Ø (mm)	
70	26	3,973	200	7	3,089	11427

Os grampos são utilizados para suspender os condutores e fixá-los a torres de transmissão. Suas principais funções são:

- Suportar carregamentos mecânicos impostos pelo condutor;
- Evitar danos ao condutor em sua área de contato;
- Prevenir ou reduzir danos nos fios provenientes de vibrações;
- Assegurar boa resistência a corrosão
- Suportar curto circuitos e possuir uma baixa resistência ao contato e baixa dissipação de energia.

Abaixo, nas figuras 2.9 e 2.10 [9], alguns exemplos de grampos de suspensão utilizados em campo:

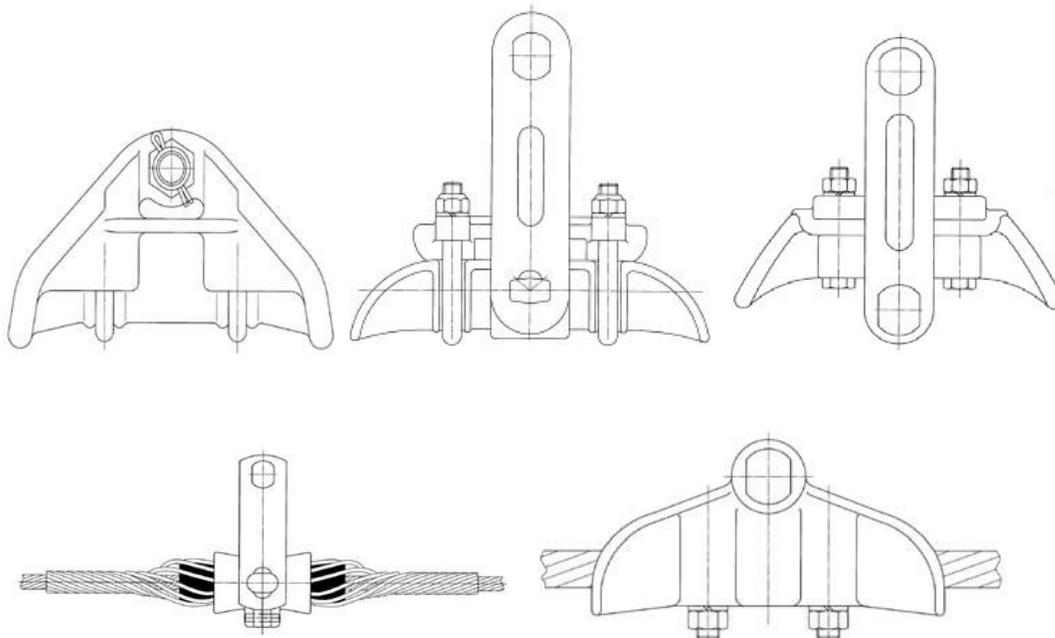


Figura 2.9 - Modelos de grampos de suspensão [9]

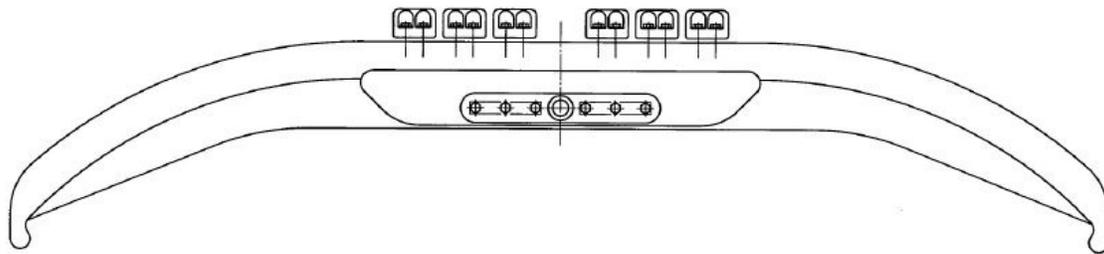


Figura 2.10 - Grampo de suspensão para travessia de rios [9]

Capítulo 3

Influência da vibração eólica em cabos condutores

3.1 Vórtices de Von Karman

A vibração em cabos condutores devido à ação do vento representa a principal causa de falha por fadiga de fios e/ou itens associados ao seu suporte e proteção como grampos de suspensão, espaçadores etc [12].

Um dos principais parâmetros para descrição do escoamento do fluido é o número de Reynolds. O número de Reynolds é um parâmetro adimensional que relaciona as forças de inércia e as viscosas, em termos da velocidade do escoamento, da geometria do corpo imerso no escoamento (no caso de condutores, o diâmetro do cilindro circular), e da viscosidade cinemática do fluido. O número de Reynolds (R_e) é dado por [14]:

$$R_e = \frac{V_e d}{\nu} \quad (3.1)$$

Para:

R_e : Número de Reynolds

V_e : velocidade do escoamento (m/s)

d : diâmetro do condutor (m)

ν : viscosidade cinemática do ar (m²/s)

O valor da viscosidade cinemática do ar tem uma pequena variação com a temperatura, $\nu = 11,44 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para $T = 250 \text{ K}$ e $\nu = 15,89 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para $T = 300 \text{ K}$ e pode ser considerado independente da pressão [14].

Para $Re \leq 1$ ocorre o escoamento permanente e lento “creeping flow” (figura 3.1a), para $Re > 5$, inicia-se a formação de recirculação de fluido com o aparecimento de vórtices a jusante do escoamento, um acima e outro abaixo da linha média de fluxo (figura 3.1b), Para $Re > 40$, observa-se a presença de uma esteira de vórtices, fenômeno este conhecido como “esteira de Von Karman” (figura 3.1c). O desprendimento destes vórtices causa uma força de sustentação oscilante sobre o cilindro, perpendicular ao movimento da corrente excitando oscilações resultando assim em vibrações.

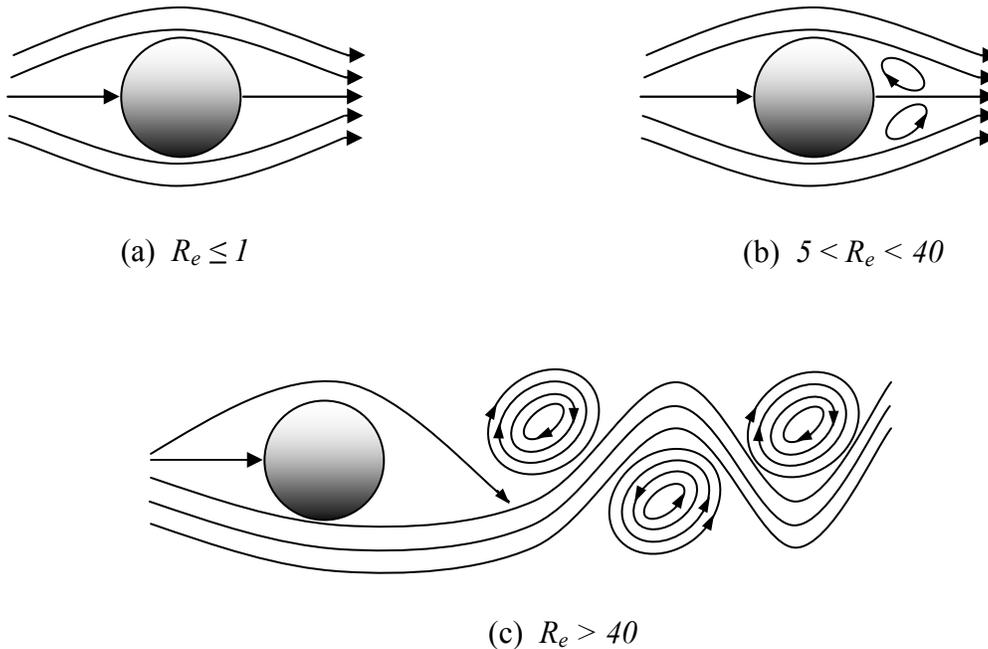


Figura 3.1 – Escoamento do ar em torno de um cilindro

A frequência de desprendimento dos vórtices ou a frequência de vibração dos cabos condutores dependem da velocidade do vento e do diâmetro do cabo conforme a fórmula de Strouhal [9, 20]:

$$f_s = S \cdot \frac{V_e}{d_{cil}} \quad (3.2)$$

Para:

f_s : Frequência de desprendimento dos vórtices (Hz)

S : Número de Strouhal (adimensional)

V_e : Velocidade do escoamento

d_{cil} : Diâmetro do cilindro (mm)

O número de Strouhal para condutores das linhas de transmissão, está na faixa de 0,15 a 0,25 , sendo usualmente adotado um valor de 0,18. Um condutor de 25 mm de diâmetro, sujeito a um vento transversal na faixa de 0,8 a 8 m/s, apresenta frequências de Strouhal na faixa de 6 a 60 Hz [20]. A figura 3.2 abaixo mostra a relação entre o número de Strouhal e o número de Reynolds:

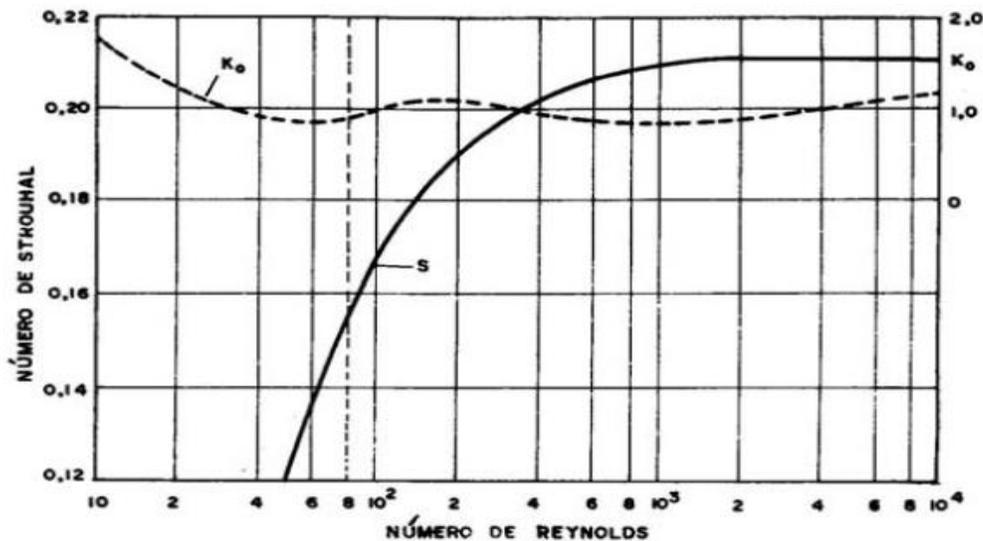


Figura 3.2 – Relação entre número de Reynolds e número de Strouhal

3.1.1 Vibrações em cabos condutores de energia

A vibração nos cabos condutores devido à ação do vento é talvez o maior problema mecânico das linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. A vida útil dos cabos está diretamente relacionada com a ocorrência da vibração e com os níveis da sua amplitude. As dificuldades existentes para, na fase de projeto da linha, se prever o comportamento vibratório dos cabos com precisão, conduzem a limitações de alguns parâmetros do projeto da linha, tais como a carga de tração dos cabos e o comprimento dos vãos entre as torres [21].

Tendo o vento como fonte de excitação, os condutores das linhas de transmissão estão sujeitos a três tipos de movimentos: vibração eólica, oscilação de sub-vão e galloping do condutor. Estes tipos se distinguem entre si pelos diferentes efeitos sobre os condutores, grampos e outros componentes da linha de transmissão.

3.1.1.1 Vibração eólica

A vibração eólica não é facilmente detectável em uma inspeção visual, pois caracteriza-se pelas pequenas amplitudes que raramente excedem o diâmetro do condutor. A faixa de velocidade do vento mais propícia para a geração de vibrações eólicas, em condições normais, é de 1 a 7 m/s [9, 21 e 18] devido as seguintes razões:

- Abaixo de 1 m/s não há energia suficiente para sustentar as vibrações;
- Acima de 7 m/s o fluxo de vento tende a ser turbulento e a formação de vórtices aperiódicos;
- A frequência de vibração varia diretamente com a velocidade do vento e portanto altas velocidades de vento causariam altas frequências, que são associadas a altos níveis de autoamortecimento interno do condutor, reduzindo-se a amplitude de vibração.

Um fator que afeta fortemente a vibração eólica é a tração mecânica dos cabos condutores ou *EDS* - Every day stress, figura 3.3. O *EDS* está associado à tensão média diária a qual o cabo será submetido ao longo de sua vida útil e é definido como uma porcentagem da carga de ruptura a tração (*CRT*) ou UTS (ultimate tension stress) a que o cabo é tracionado.

$$T = EDS \cdot CRT \quad (3.3)$$

T (N) é a carga de tração para a temperatura média durante a medição determinada. Hoje em dia as empresas do setor utilizam *EDS*s que variam de 18,5 - 20% da *CRT*, ou seja, o cabo é instalado nas torres de transmissão de maneira que permaneça durante sua vida útil esticado com uma tensão de tração T que varia de 18 a 20% de sua carga de ruptura a tração (*CRT*).

O amortecimento próprio do condutor varia inversamente com a carga de tração, por esse motivo a tração mecânica deve ser tão baixa quanto economicamente viável.

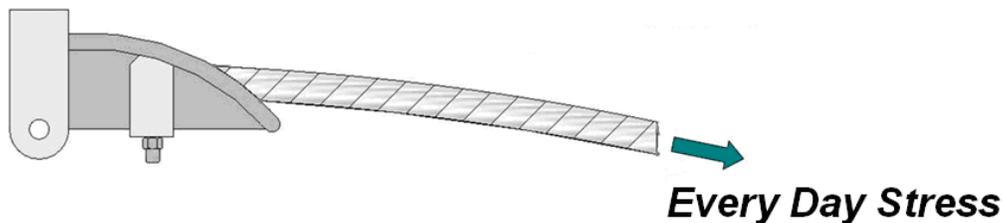


Figura 3.3 - Carga de pré-tensão em um condutor

3.1.1.2 Oscilações de sub-vão

Também são chamadas de oscilações induzidas por esteira e ocorrem em feixes de cabos. O cabo a jusante é aerodinamicamente excitado por vórtices gerados pelo escoamento eólico sobre o cabo a seu montante. A frequência de vibração das oscilações de sub-vão varia entre 1 e 5 Hz e são causadas por velocidades de vento que variam entre 4 e 18 m/s. A amplitude de oscilação depende do modo de oscilação podendo atingir valores iguais a metade da distância entre dois condutores do mesmo conjunto [23].

A oscilação de sub-vão é considerada uma vibração induzida por escoamento eólico sendo classificada como de baixa frequência.

3.1.1.3 Galloping

Ocorre em um único condutor ou, particularmente, em um conjunto de condutores. O acumulo de gelo nos condutores promove um perfil aerodinâmico instável gerando amplitudes responsáveis pela envergadura dos cabos causando, em alguns casos, o choque entre condutores. A velocidade do vento responsável por tal evento varia de 6 a 25 m/s resultando em frequências de vibração menores que 1 Hz [23] com amplitudes de 5 a 300 vezes o diâmetro do condutor [20].

Assim como as oscilações de sub-vão o galloping é classificado como sendo de baixa frequência.

3.2 Medição de vibrações eólicas

A importância das medições em campo de vibrações em cabos condutores deve-se aos seguintes fatores:

- Determinar a causa de um dano por fadiga na estrutura de um cabo condutor;
- Identificar a existência de níveis de vibração;
- Prever danos futuros por fadiga;
- Avaliar a performance dos cabos condutores bem como das estruturas a este interligadas;

Ao se identificar um dano por fadiga em uma linha de transmissão, fatores como a fonte e a extensão do dano são as principais preocupações iniciais. Adicionalmente, maneiras de prevenção a futuros danos causados por vibração eólica e a determinação da

característica do mesmo sendo esse resultado de um efeito pontual ou parte de um problema em todo o sistema [21].

O método recomendado pela IEEE para determinação do risco de dano por fadiga em cabos é através do dimensionamento da amplitude de flexão do cabo. Para tal existe no mercado uma grande variedade de equipamentos conhecidos por vibrógrafos, figura 3.4:



(a) Scolar III



(b) Ribe LVR



(c) Vibrec400



(d) Pavica

Figura 3.4 - Modelos de vibrógrafos [12]

Na tabela 3.1 abaixo algumas características técnicas dos vibrógrafos mais encontrados no mercado:

Tabela 3.1 – Características técnicas dos vibrógrafos

VIBRÓGRAFO	MÁXIMA FREQUÊNCIA DE LEITURA (HZ)	MÁXIMA AMPLITUDE DE LEITURA (mm)	OBSERVAÇÕES
Scolar III	100	2,54	--
Ribe LVR	200	2,00	--
Vibrec400	200	2,00	Equipado com sensores de temperatura e velocidade do vento
Pavica	255	1,30	Instalado no condutor conforme figura 3.4 (d)

Fonte [9].

Na maioria das análises estruturais, os equipamentos de medição são geralmente posicionados tendo como base áreas previamente determinadas de forma analítica ou através de um histórico de falhas, onde as solicitações das tensões são mais severas [28].

Nos cabos condutores o vibrógrafo é posicionado de maneira que seu sensor entre em contato com o cabo a 89 mm do último ponto de contato entre o cabo e seu grampo de sustentação, figuras 3.4 e 3.5. As falhas por fadiga ocorrem primeiramente nesta área devido a curva de deflexão de um corpo com alto grau de flexibilidade sujeitos a altas tensões de flexão ocorrerem apenas onde há uma mudança abrupta em sua inclinação [28].

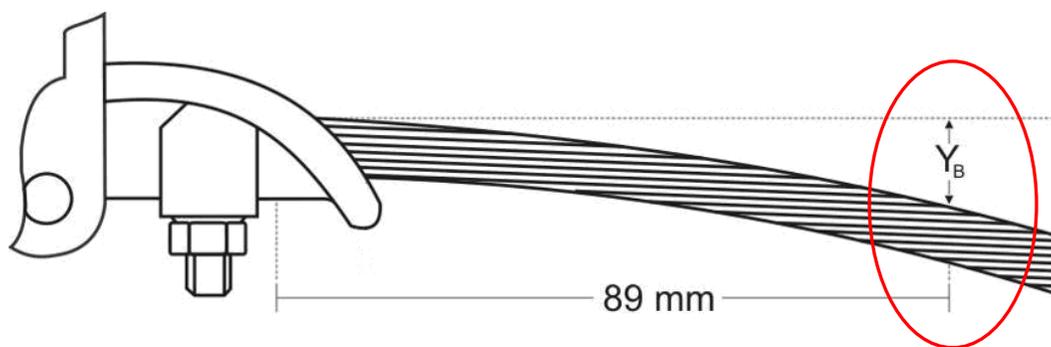


Figura 3.5 - Ponto de posicionamento do sensor do vibrógrafo

Amplitudes dimensionadas a uma distância menor que a padrão (89 mm) serão menores do que as mensuradas a 89 mm, por sua vez as amplitudes provenientes de leituras realizadas em pontos onde a distância é maior que a padrão serão maiores [21]. O erro proveniente de distâncias de posicionamento do vibrógrafo pode ser corrigido multiplicando todas as amplitudes pelo termo abaixo.

$$\left(\frac{89}{X_b}\right)^2 \quad (3.4)$$

Onde:

X_b : Distância de medição (*mm*)

Além do mau posicionamento do equipamento seu funcionamento também pode ser influenciado pelos seguintes fatores:

- Variações de temperatura responsáveis pela variação no tensionamento do cabo;
- Ruído elétrico;
- Envelhecimento dos componentes;
- Erros de calibração.

Em geral, os medidores têm uma autonomia de até 3 meses de uso em linha. Os vibrógrafos mais recentes são: PAVICA da empresa canadense ROCTEST e o Vibrec400 da empresa suíça Sefag, figura 3.4 (c) e (d).

O vibrógrafo Pavica mede o sinal de vibração e picos de amplitude de cada ciclo durante um intervalo programável de 1 a 12 segundos. A contagem de ciclos é feita pelo método *Rainflow* [36] e organizados por faixas de frequência e de amplitude de vibração. Estes dados são apresentados por meio de uma matriz amplitude x frequência, onde a frequência é dada em *Hz* e a amplitude é dada em μm conforme figura 3.6. Ao final do período de medição, a expectativa de vida corrente do condutor (em anos) é estimada a partir dos dados coletados e o instrumento retorna ao modo de espera. O período total é

igual ao período de medição mais o período em espera. Por exemplo, um período total de 10 minutos poderia fornecer 6 períodos ativos por hora. Esse período total é programado com intervalos de 1 a 60 minutos [9].

Freq (Hz)	Amplitude ($\mu\text{m p-p}$)							Soma
	125	251	376	502	627	753	> 753	
2	29493	1827	0	0	0	0	0	29493
5	165474	8091	522	0	0	0	0	165474
10	493029	191835	54549	11484	1305	0	0	493029
15	805185	577071	227331	48024	5220	0	0	805185
20	882441	602388	268569	76734	11745	783	0	882441
25	704178	280836	49329	3654	0	0	0	704178
30	216108	47763	2349	0	0	0	0	216108
34	36540	2088	0	0	0	0	0	36540
40	2088	0	0	0	0	0	0	2088
45	261	0	0	0	0	0	0	261
50	0	0	0	0	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0	0	0	0
83	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0	0
143	0	0	0	0	0	0	0	0
200	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	3334797	1711899	602649	139896	18270	783	0	5808294

Figura 3.6 - Matriz amplitude-freqüência extrapolada para um ano

Como essa matriz representa apenas o tempo no qual o vibrógrafo esta na linha, faz-se necessário uma extrapolação dos dados para um ano. Para tal é determinado um fator de extrapolação f_{ext} , equação 3.5, que multiplicará todos os dados da matriz amplitude-freqüência.

$$f_{ext} = \frac{8766}{t_m} \quad (3.5)$$

onde 8766 é o equivalente de um ano dado em horas e t_m é o tempo real de medição do vibrógrafo que é determinado pela equação 3.6:

$$t_m = i \cdot t_c \quad (3.6)$$

sendo i é a taxa de amostragem por hora, e t_c é o período total que o medidor permaneceu na linha coletando dados.

3.2.1 Locais para medição

Geralmente as leituras devem ser feitas onde espera-se que a vibração no cabo seja mais intensa. Para tal, deve-se escolher uma seção da linha onde o fluxo do vento é perpendicular à mesma, por exemplo, se o vento em uma determinada área for predominantemente Norte/Sul, deverá ser escolhida uma linha que esteja na direção Leste/Oeste [21]. Uma área de planalto com pouca obstrução próxima ou, cruzando lagos ou rios, também potencializa a ação do vento sendo as mesmas preferencialmente escolhidas para o posicionamento do vibrógrafo. A classificação do tipo de terreno a seguir na tabela 3.2 deverá ser considerada, uma vez que sua influência é determinante na ação eólica sobre as linhas de transmissão:

Tabela 3.2 - Grau de influência do tipo de terreno para medição de vibrações eólicas

Tipo de terreno	Grau de Influência
Planaltos com pouca obstrução próxima ou cruzando lagos ou rios	Elevado
Serras com uma leve inclinação e com baixa vegetação	Médio
Vales profundos entre serras ou grandes cadeias de montanhas	Médio baixo
Terreno acidentado ou montanhoso com muita vegetação	Baixo

Capítulo 4

Revisão das metodologias de avaliação da vibração em cabos condutores

4.1 Metodologias de avaliação da vibração em cabos condutores

As medições da amplitude de flexão causadas pelo deslocamento do ar em torno de cabos condutores é, sem dúvida, a maneira mais fácil de investigar as causas de danos nestes cabos [9]. As metodologias que serão apresentadas abaixo são comumente utilizadas na determinação da severidade da vibração nas linhas de transmissão.

4.1.1 Metodologia da EPRI

A metodologia da EPRI sugere para vários tipos de condutores valores máximos de amplitude de flexão e de amplitude de tensão definidos como limites de resistência. Conforme essa metodologia, caso estes patamares de amplitudes sejam ultrapassados a integridade do cabo estaria condenada a fadiga. Estes valores são válidos para condutores suspensos por grampos metálicos rígidos com um perfil interno liso sendo definidos principalmente para condutores ACSR [12].

Considerando um cabo ACSR com mais de uma camada de fios de alumínio, a amplitude máxima de flexão varia entre 0,2 e 0,3 mm podendo ser considerado um único valor de 0,23 mm caso haja uma falta de precisão na estimativa do limite de resistência do condutor [21].

Essas amplitudes de flexão foram calculadas através da equação invertida de Poffenberger-Swart (equação 4.1) tendo como base os limites de resistência a tensão,

estimados através de testes laboratoriais de fadiga (120 testes individuais no total) para vários tamanhos de diferentes tipos de cabos ACSR [21].

$$Y_b = \left(\frac{e^{-p \cdot X_b} - 1 + p \cdot X_b}{(E_{al} \cdot p^2 \cdot d_{al}) / 4} \right) \cdot \sigma_a \quad (4.1)$$

Para um cabo ACSR com uma camada de fios de alumínio o limite de resistência a fadiga será de 22,5 MPa, enquanto que para duas ou mais camadas esse valor é de 8,5 MPa [21].

No caso de condutores de alumínio homogêneos, não há aparentemente dados suficientes, obtidos através de testes a fadiga, para a determinação dos limites de resistência a tensão. Entretanto, estes dados sugerem a possibilidade do uso dos mesmos limites anteriormente mencionados para ligas 1350 e 5005, enquanto que para as ligas 6201 e similares os limites de fadiga sugeridos são de 15 MPa para cabos com uma camada de fios de alumínio e 5,7 MPa para duas ou mais camadas [21] e [12]. Abaixo na tabela 4.1 relata-se os valores das amplitudes máximas de tensão e flexão para diferentes *EDS*'s de um cabo Grosbeak [21].

Tabela 4.1 - Amplitudes máximas de tensão e flexão para um cabo Grosbeak quando submetidos a diferentes *EDS*'s [21].

<i>EDS</i> – Grosbeak							
15%		20%		25%		30%	
Y_b (mm)	σ_a (MPa)	Y_b (mm)	σ_a (MPa)	Y_b (mm)	σ_a (MPa)	Y_b (mm)	σ_a (MPa)
0,26	8,50	0,24	8,50	0,23	8,50	0,22	8,50

4.1.2 Metodologia da IEEE

A avaliação da vida a fadiga em condutores baseadas estritamente na máxima amplitude de tensão correspondente ao limite de fadiga (Metodologia da EPRI), pode ser considerada excessivamente cautelosa [12]. De fato esses limites podem ser ultrapassados por um número limitado de vezes sem efeitos práticos na integridade do condutor. O número de vezes que estes limites podem ser ultrapassados propostos pela IEEE são apresentados abaixo e dispostos na tabela 4.2 [21] e [12].

- A amplitude de flexão não poderá ultrapassar o limite de fadiga do material em mais de 5% do total de ciclos.
- Não mais de 1% do total de ciclos poderá ultrapassar 1,5 vezes o limite de fadiga.
- Em nenhum ciclo a tensão (σ_a) poderá alcançar 2 x o limite de fadiga.

Tabela 4.2: Limites de resistência para cabos (ACSR) com uma e duas ou mais camadas de fios de alumínio para o método da IEEE

Nº de camadas de fios de alumínio	Limites de resistência (MPa) – EDS = 20%		
	1 x limite	1,5 x limite	2 x limite
1	22,5	33,75	45
2 ou mais	8,5	12,75	17

Vale lembrar que inicialmente para IEEE a máxima amplitude de deslocamento suportada por um condutor ACSR sem que este viesse a sofrer danos por fadiga não poderia ser determinada precisamente, era-se especulado que este limite seria de 150 a 200 microstrain (pico a pico). Mais tarde os mesmos mostraram-se muito conservativos sendo substituídos pelos limites acima descritos.

4.1.3 Metodologia da Cigré WG 22-04

A metodologia proposta pela Cigré para avaliação da vida remanescente em condutores, considera o efeito acumulativo de todos os ciclos de vibração adquiridos pelo vibrógrafo [12]. As amplitudes de deslocamento armazenadas na matriz gerada com os dados coletados são extrapoladas para o período de um ano (figura 3.6) sendo posteriormente convertidas em tensões de flexão com o auxílio de uma equação semi-empírica proposta por Poffenberger-Swart que será descrita no próximo sub-item. Utilizando a regra de Miner pode-se então quantificar a fração de dano provocada por cada bloco de amplitude de tensão devidamente armazenado na matriz do vibrógrafo. Obviamente o compto da fração de dano por nível de amplitude de tensão também requer o número de ciclos que o material para um determinado nível de tensão (curva $S-N$) para isso pode-se obter curvas $S-N$ em laboratório ou utilizar-se de uma curva teórica obtida a partir de um banco de dados experimentais para cabos condutores denominada de *Safe Border Line* (Cigré WG 22-04). O resultado obtido por essa metodologia fornece a vida remanescente do condutor apresentada em anos.

4.1.3.1 Poffenberger-Swart

Cabos condutores são formados por fios entrelaçados de forma helicoidal em diferentes camadas. Estas camadas, por sua vez, são entrelaçadas em sentidos inversos, figura 4.1.

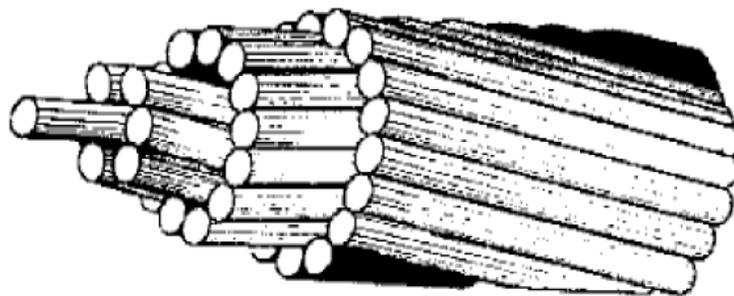


Figura 4.1 - Típica construção de condutores de linha de transmissão

Em geral a resistência a fadiga da montagem cabo/grampo de suspensão é obtida de maneira análoga a usada para corpos de prova sólidos. A fórmula de Poffenberger-Swart [28] é usualmente utilizada para correlacionar uma amplitude de deslocamento medida em uma posição padronizada a partir do grampo (ou outro tipo de ferragem) com uma amplitude de tensão no ponto mais externo do cabo e na saída (boca) do grampo Y_b , figuras 3.4 e 3.5.

A relação entre os esforços dinâmicos e a amplitude de vibração que, em campo, é mediada por vibrógrafos posicionados nas proximidades do grampo, figura 3.4, é dada por Poffenberger-Swart através da equação 4.2:

$$\sigma_a = KY_b \quad (4.2)$$

onde σ_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 K determinado por:

$$K = \frac{E_{al} \cdot d_{al} \cdot p^2}{4(e^{-p \cdot X_b} - 1 + p \cdot X_b)} \quad (4.3)$$

para E_{al} (MPa) o módulo de elasticidade do alumínio, d_{al} (mm) o diâmetro dos fios de alumínio do cabo e p determinado por:

$$p = \sqrt{\frac{T}{EI_{min}}} \quad (4.4)$$

onde T é determinado através da equação 3.3 e EI_{min} (MPa) é a rigidez mínima a flexão do cabo, cujo valor é dado por:

$$EI_{min} = n_{al} \cdot E_{al} \cdot \frac{\pi \cdot d_{al}^4}{64} + n_s \cdot E_s \cdot \frac{\pi \cdot d_s^4}{64} \quad (4.5)$$

onde n_s , E_s e d_s , são o número, o diâmetro individual e o módulo de elasticidade dos fios de aço.

O uso da equação 4.2 deve ser exercitado com cuidado, pois ela não leva em consideração a variação da rigidez à flexão do cabo em função do comportamento dinâmico. Note 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} . Neste caso, a fórmula de Poffenberger e Swart torna-se uma melhor aproximação para os níveis de tensão na camada mais externa do cabo, figura 4.2.

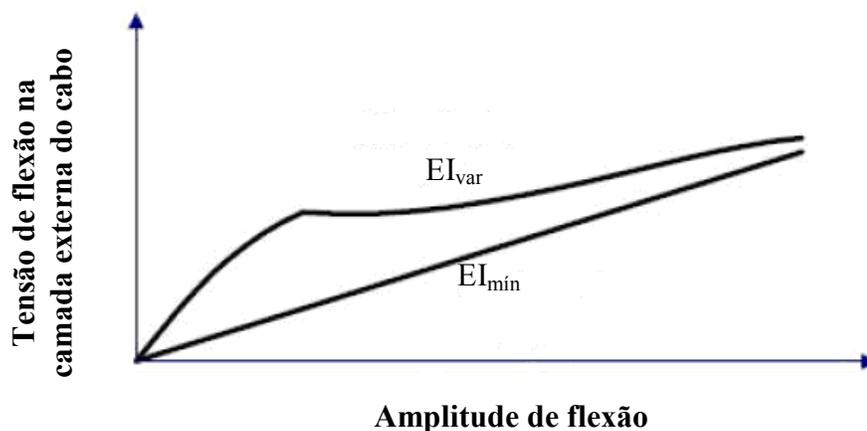


Figura 4.2 - Tensão de flexão na superfície do cabo em função da amplitude de flexão

4.1.3.2 Flexão do Condutor

A vibração eólica induz uma movimentação lateral no condutor pré-tencionado (*EDS*), ou seja, ele se dobra. Porém, antes de fletir-se, o condutor tem que sustentar uma carga externa de tração que esta distribuída individualmente nos fios do condutor, causando tensões de tração. Este estado de carregamento que a primeira vista parece simples (condutor sob pura tensão) é um problema mecânico complexo, especialmente

quando se leva em consideração os efeitos da temperatura, processos de fabricação, deformação, etc [33].

As cargas de tração nos fios causam cargas normais nos pontos de contato entre dois fios de camadas adjacentes (figura 4.3), paralelamente, estes pontos determinam o comportamento de “segurar-deslizar” dos fios durante o dobramento cíclico, causado por vibrações eólicas [27].

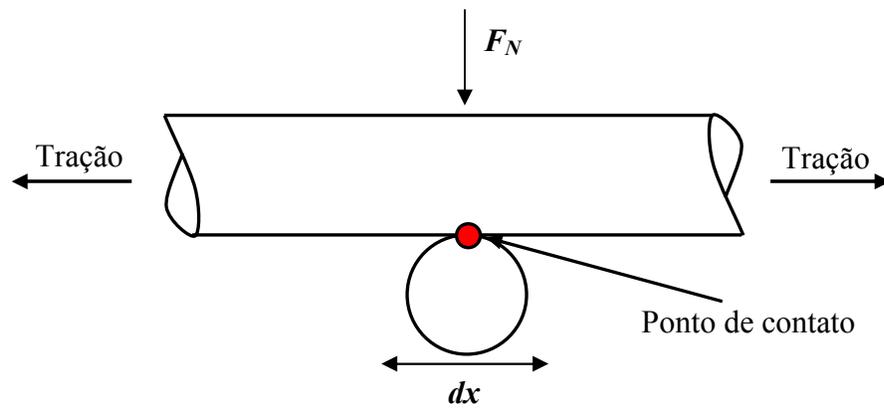


Figura 4.3 - Fios de duas camadas adjacentes submetidos a força normal F_N e deslocamento dx

Quando um condutor se curva, o movimento relativo entre seus fios é impedido pelas forças de atrito que atuam principalmente entre duas camadas adjacentes. A partir de uma determinada deflexão do condutor, as forças de atrito entre as camadas não são suficientes para impedir o movimento entre os fios, fazendo com que estes deslizem uns em relação aos outros. O esforço de dobramento e a tensão relacionada desenvolvem-se como se eles se dobrassem ao redor do seu próprio eixo neutro, este processo leva a uma variação da rigidez a flexão do condutor durante o dobramento. Em amplitudes de flexão pequenas, a rigidez a flexão pode ser calculada como se os fios fossem “ligados” uns aos outros, se comportando como um só corpo, é a chamada EI_{max} . Em grandes amplitudes de flexão, a rigidez a flexão pode ser calculada como se os fios estivessem totalmente frouxos não interagindo entre si, ela é então chamada EI_{min} . Entre estes dois extremos, ocorre uma transição relativamente suave, como apresentado na figura 4.4 [27].

Aprimoramentos recentes deste modelo indicam que EI_{max} não pode ser atingida completamente [19].

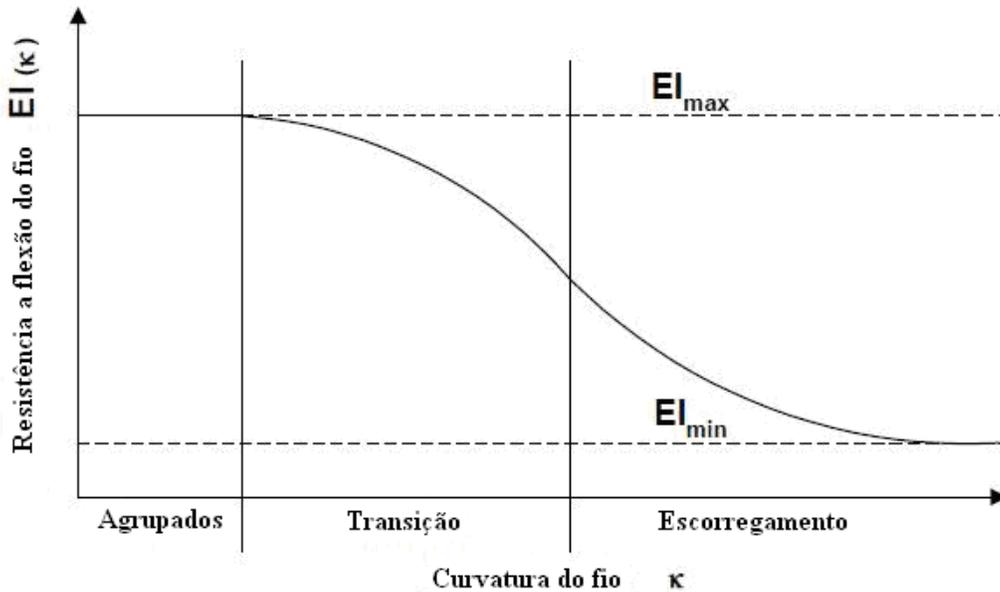


Figura 4.4 - Rigidez a flexão em função da curvatura do condutor

4.1.3.3 Frequência de Vibração do Condutor

Assumindo que o valor do EI é negligenciável uma aproximação da solução da equação da frequência de vibração no cabo é dada por:

$$f = \left(\frac{m}{2 \cdot a} \right) \cdot \sqrt{\frac{EDS}{m_c}} \quad (4.6)$$

Onde:

f : Frequência de vibração

a : comprimento do vão livre

EDS : Every day stress

m_c : massa específica do condutor

m : modo de vibração

Levando em consideração o valor do EI teremos para a frequência de vibração do condutor a seguinte equação:

$$f_{EI} = \left(\frac{m}{2 \cdot a} \right) \cdot \sqrt{\frac{EDS}{m_c}} \cdot \sqrt{\frac{1 + (m \cdot \pi \cdot a)^2 \cdot EI}{EDS}} \quad (4.7)$$

onde f_{EI} é a frequência de vibração quando considerado o valor de EI .

O aumento no EDS de um conjunto de condutores fará com que a frequência natural de vibração aumente na proporcionalidade da raiz quadrada deste incremento [18].

4.1.3.4 Limite de Resistência a Fadiga de Cabos Condutores

Os limites de resistência à fadiga da montagem cabo/grampo de suspensão são determinados em ensaios de laboratório. Os testes são executados até que o cabo apresente a ruptura de 10% de seus fios ou um número específico de fios. Convencionalmente adota-se a falha de três fios como critério de falha, prevalecendo o menor valor.

As curvas obtidas nos ensaios são conhecidas como curvas de fadiga, ou curvas de Wöhler. As curvas de Wöhler apresentam no eixo das ordenadas a amplitude de tensão σ_a , geralmente em MPa, e no eixo das abscissas, em escala logarítmica, o número teórico N_i de ciclos até a ruptura do condutor a uma tensão σ_i . Devido à dificuldade e ao alto custo financeiro exigidos nestes testes, o Comitê de Estudos de Linhas Aéreas da CIGRÉ propôs uma curva limite de segurança [8], conhecida como **Safe Border Line**, para que as empresas não necessitem fazer grandes investimentos a fim de determinar a vida útil de um condutor.

A **Safe Border Line** da Cigré é uma curva $S-N$ derivada de vários ensaios de fadiga realizados para diversos componentes, como condutores, fios de alumínio etc [9]. Ela representa um limite conservativo para as diversas curvas dos ensaios. A curva

apresentada na figura 4.5 [7] é aplicável para alumínio, ligas de alumínio, cabos ACSR e para diversos tipos de grampos. A *Safe Border Line* também disponibiliza uma curva *S-N*, para qualquer montagem cabo/grampo de suspensão, a equação que descreve esta curva é apresentada abaixo.

$$\sigma_a = A \cdot N_i^B \quad (4.8)$$

onde, σ_a é a amplitude de tensão em *MPa*, N_i a vida em ciclos para uma tensão σ_i e A e B são constantes que representam parâmetros materiais.

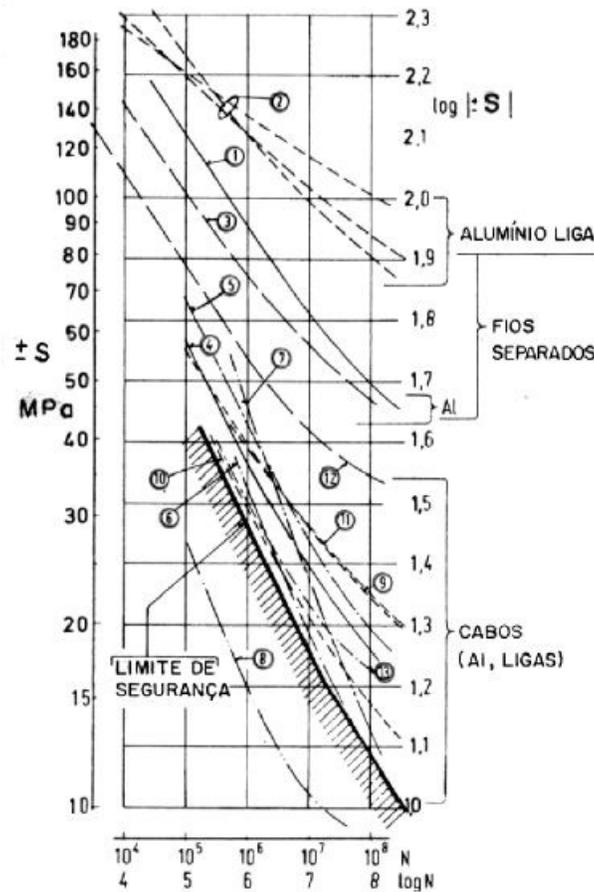


Figura 4.5 - *Safe Border Line* da CIGRÉ e curvas *S-N* [29]

Estudos mais recentes recomendam, para as constantes A e b , valores distintos para cabos com uma ou mais camadas de fios de alumínio conforme mostrados na Tabela 4.3 [8].

Tabela 4.3 - Constantes da curva limite de segurança (*Safe Border Line* - Cigré)

Nº DE CAMADAS DE FIOS DE ALUMÍNIO DO CABO CONDUTOR	NÚMERO DE CICLOS			
	N < 2·10 ⁷		N > 2·10 ⁷	
	A	B	A	B
1	730	-0,2	430	-0,17
>1	450	-0,2	263	-0,17

Portanto as equações (4.10) e (4.11) descrevem a curva limite de segurança da Cigré para cabos condutores com mais de uma camada de fios de alumínio.

$$\sigma_a = 450 \cdot N^{-0,2} \text{ para } Ni < 2 \cdot 10^7 \quad (4.9)$$

$$\sigma_a = 263 \cdot N^{-0,17} \text{ para } Ni > 2 \cdot 10^7 \quad (4.10)$$

Por outro lado, a curva limite de segurança da Cigré pode ser em alguns casos muito conservativa. Ensaios de fadiga em cabos condutores realizados pela Universidade de Brasília (figura 4.6) determinaram uma equação para a curva *S-N* de cabos do tipo Grosbeak [2] mostrada abaixo.

$$\sigma_a = 608,8 \cdot N_i^{-0,189} \quad (4.11)$$

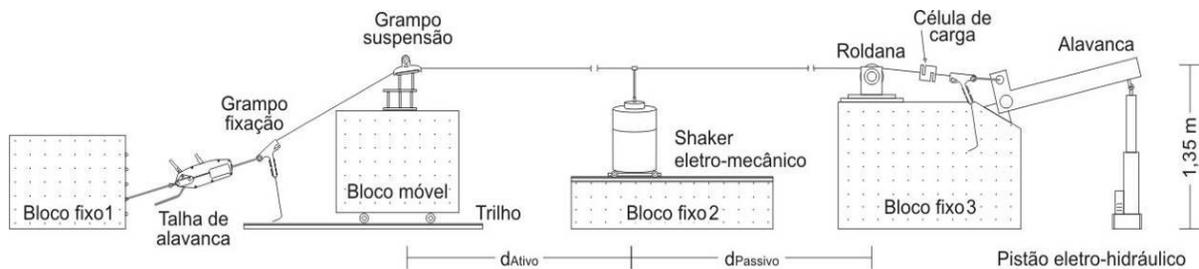


Figura 4.6 - Croqui da bancada experimental do Laboratório de Cabos Condutores de Energia Elétrica da Universidade de Brasília (UnB)

4.1.4 Estudo de caso para uma matriz extraída da literatura

A fim de aplicar e comparar as três metodologias apresentadas IEEE, EPRI e Cigré WG 22-04, utilizou-se um histórico de vibrações representado através de uma matriz amplitude x frequência extraída da literatura [9] apresentada no anexo I, matriz #1.

Considerando os dados do cabo Grosbeak definidos na tabela 2.1 tem-se para uma EDS de 20% uma carga de tração no cabo de $T = 2,242 \times 10^4 N$. Aplicando Poffenberger-Swart (equações 4.3, 4.4 e 4.5) e considerando a carga de tração acima determinada obtém-se os seguintes valores para EI_{min} , p e K apresentados na tabela 4.4 a seguir.

Tabela 4.4 - Variáveis calculadas pelas equações de Poffenberger-Swart (EDS 20%)

Variáveis	EDS - 20 %
EI_{min}	$EI_{min} = 2,846 \times 10^7 N \cdot mm^2$
p	$p = 2,804 \times 10^{-2} mm^{-1}$
K	$K = 34,640 \frac{N}{mm^3}$

A partir do valor de K e considerando a equação de Poffenberger-Swart (equação 4.2) pode-se calcular a tensão dinâmica no fio de alumínio da camada externa do cabo diametralmente oposto ao último ponto de contato entre o cabo e o grampo para cada amplitude de deslocamento. Apresenta-se na tabela 4.5 as amplitudes de tensão correspondentes a cada faixa de amplitude de deslocamento Y_b , bem como o número de ciclos experimentados referentes a cada faixa e sua porcentagem no total de ciclos medidos.

Tabela 4.5: Tensões máximas, número de ciclos e porcentagem no total de ciclos medidos para cada faixa de amplitude de deslocamento ($EDS = 20\%$) para matriz #1

Faixa	Y_b (μm)	Amplitude de tensão (MPa)	Nº de ciclos	% do total	Soma %
1	0 - 125	4,3	3334797	57,4	100,000
2	125 - 251	8,7	1711899	29,5	42,6
3	251 - 376	13,0	602649	10,4	13,1
4	376 - 502	17,4	139896	2,4	2,7
5	502 - 627	21,7	18270	0,3	0,33
6	627 - 753	26,1	783	0,013	0,013
Total de ciclos			5808294	--	--

Foram colocados em um gráfico na forma de histograma os resultados da tabela acima, figura 4.7, para uma melhor visualização dos resultados obtidos:

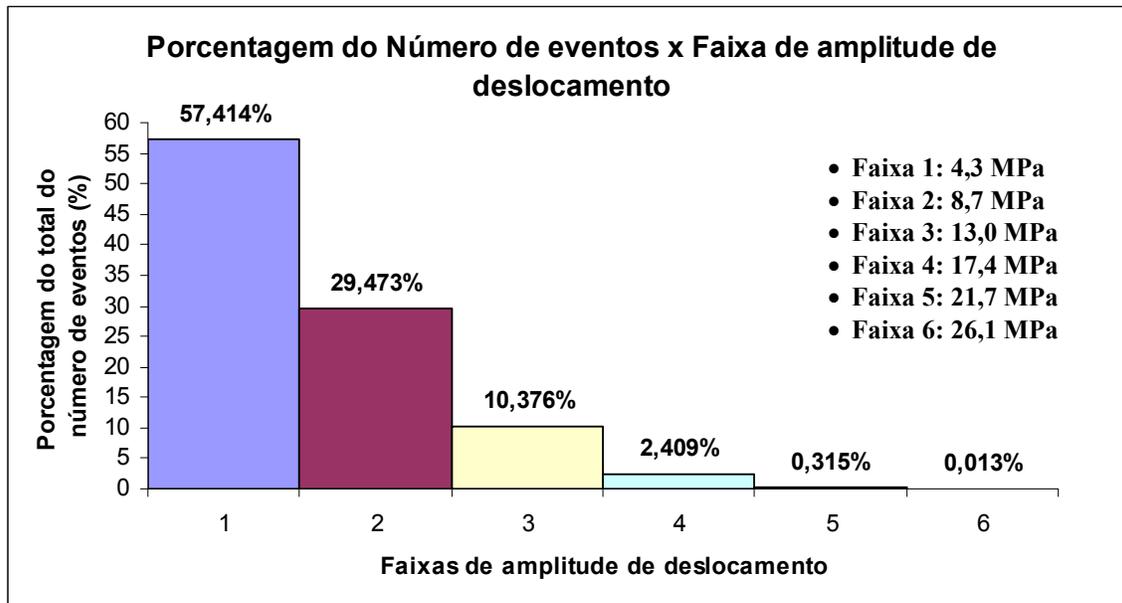


Figura 4.7 - Porcentagem de ciclos para cada faixa de amplitudes de deslocamento

De posse destas tensões e utilizando às equações 4.9 e 4.10 determinou-se o número de ciclos necessários para a falha do material inerentes a tensão máxima de cada faixa de solicitação aplicada. Posteriormente utilizou-se a regra de Miner a fim de determinar pelo Método da Cigré a vida remanescente do cabo após as solicitações apresentadas na matriz # 1.

Considerando os resultados acima apresentados conclui-se que a amplitude de tensão no cabo ultrapassou os limites de resistência de 8,5 MPa em 42,6%, o limite de 12,75 MPa (1,5 vezes o limite de resistência) em 13,1% e o limite de 17 MPa (2 vezes o limite de resistência) em 2,7% do total de ciclos registrados na matriz #1 (limites de fadiga determinados pelos métodos da EPRI e IEEE - tabelas 4.1 e 4.2).

Para as três metodologias apresentadas anteriormente, o cabo, após submetido as solicitações apresentadas na matriz #1, estaria condenado a fadiga caso seja considerado os padrões determinados pela IEEE e pela EPRI, se considerado o método da Cigré a vida remanescente útil ($V_{\text{Útil-Cigré}}$) do condutor, para uma *EDS* de 20%, seria de aproximadamente 29 anos.

Capítulo 5

Aplicação das metodologias em uma linha real e proposta de método para estimar a resistência a fadiga para níveis elevados de *EDS*

5.1 Dados de vibração de campo

A fim de aplicar e discutir criticamente o uso das metodologias estudadas para estimar a resistência em fadiga e / ou da vida remanescente de um cabo Grosbeak, utilizou-se dados de amplitude de vibração medidas em campo pela equipe de professores Remo e Luis Veloso da Universidade Federal do Para - UFPA (matriz # 2). Esses dados foram coletados por um aparelho vibrógrafo modelo Pavica instalado sobre um cabo Grosbeak em uma linha de 230 kV da Eletronorte no trecho de travessia Vila do Conde - Guamá. Esses dados são tradicionalmente armazenados em uma matriz de amplitude x frequência (como já foi ilustrado no capítulo 3) e estão relatados no Anexo I, matriz # 2.

A análise aqui apresentada considerará o uso das diversas metodologias estudadas no capítulo anterior para avaliação da resistência em fadiga de cabos, assim como o confronto das estimativas fornecidas pela metodologia da Cigré quando usa-se a curva limite de segurança da Cigré e a curva *S-N* para o cabo Grosbeak obtida no laboratório de cabos da UnB. Inicialmente o estudo foi conduzido para uma *EDS* de 20%. Posteriormente, propõe-se uma nova metodologia para estender a curva *S-N* obtida em laboratório, para *EDS*'s de 25 e 30%.

5.2 Avaliação da vida remanescente para uma *EDS* 20%

Para uma *EDS* de 20% a carga de tração aplicada ao cabo Grosbeak é de $T = 2,242 \times 10^4 N$ (equação 4.5). Os valores para EI_{min} , p e K foram determinados anteriormente (tabela 4.4).

A partir do valor de K e considerando a equação de Poffenberger-Swart (equação 4.2) pode-se calcular a tensão dinâmica no fio de alumínio da camada externa do cabo diametralmente oposto ao último ponto de contato entre o cabo e o grampo.

A figura 5.1 apresenta duas curvas em gráfico de tensão x número de ciclos. A curva em azul é a curva limite de segurança da Cigré e foi obtida por meio da utilização das equações 4.9 e 4.10, enquanto que a curva em vermelho ilustra o melhor ajuste para os dados produzidos por ensaio de fadiga no laboratório de cabos da ENM-UnB para um cabo Grosbeak com $EDS = 20\%$.

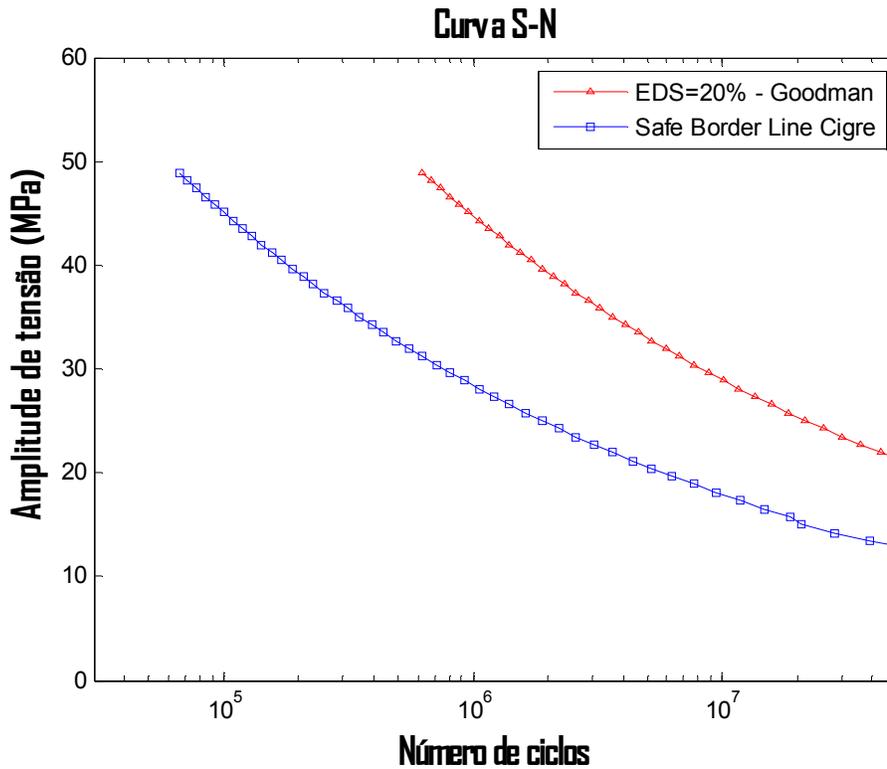


Figura 5.1 – Curvas *S-N* da Cigré (Safe Border Line) e a obtida em laboratório para cabo Grosbeak ($EDS = 20\%$)

Munidos destes dados foi utilizado o Método da Cigré a fim de determinar a vida remanescente do cabo sendo os valores encontrados apresentados na tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Vida remanescente para uma *EDS* de 20 %

Matriz	<i>EDS</i> de 20%		
	V_{UnB}	$V_{CIGRÉ}$	$V_{UnB} / V_{CIGRÉ}$
# 2	$\approx 3,47$	$\approx 0,36$	9,65

É possível através dos resultados apresentados na tabela 5.1 acima visualizar a diferença (dada pela razão entre V_{UnB} e $V_{CIGRÉ}$) entre as estimativas de vida remanescente obtidas por esse método de cálculo quando utiliza-se a curva teórica da Cigré e os dados laboratoriais como característica de resistência a fadiga do cabo. A análise mostra que, assumindo os dados para o cabo Grosbeak levantados pela UnB, o cabo da Eletronorte possui uma vida remanescente útil de $V_{\text{útil}} - UnB = 2,47$ anos ($V_{\text{útil}} - UnB = V_{UnB} - 1$), enquanto que pela curva da Cigré o cabo estaria condenado a fadiga uma vez que o valor obtido para a vida remanescente foi menor que 1 ($V_{Cigré} = 0,36$), ou seja, o dano D obtido para essa solicitação foi maior que 1 ($D = 2,78$). Note que a razão entre as vidas remanescentes do cabo quando utiliza-se a curva $S-N$ da UnB e a curva da Cigré é de 9,65 vezes.

Considerando os padrões definidos pelos métodos da IEEE e EPRI o condutor estaria condenado devido ao fato da amplitude de tensão ter ultrapassado o limite de fadiga de 8.5 MPa em 32,06% , o limite de 12,75 MPa em 31,87% e o limite de 17 MPa em 31,6% do total de ciclos registrados em um ano na matriz # 2 para uma *EDS* = 20% conforme tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Tensões máximas, número de ciclos e porcentagem no total de ciclos medidos para cada faixa de amplitude de deslocamento ($EDS = 20\%$) para matriz #2

Y_b (μm)	Tensão máxima (MPa)	Nº de ciclos	% do total	Soma %
0 - 111	3,8	521871	60,496	100,000
111 - 222	7,7	64166	7,438	39,504
222 - 333	11,5	1683	0,195	32,066
333 - 445	15,4	2168	0,251	31,870
445 - 556	19,3	1249	0,145	31,619
556 - 667	23,1	504	0,058	31,474
667 - 778	26,9	390	0,045	31,416
778 - 889	30,8	341	0,040	31,371
889 - 1001	34,7	253	0,029	31,331
1001 - 1112	38,5	461	0,053	31,302
1112 - 1223	42,4	288	0,033	31,248
1223 - 1334	46,2	269277	31,215	31,215
1334 - 1423	49,3	0	0,000	0,000
Total de ciclos		862651	--	--

O cabo atualmente está sendo utilizado na linha sem indícios de falha caracterizando o conservadorismo das metodologias EPRI, IEEE e Cigré.

5.3 Proposta para correção da curva $S-N$ para elevados níveis de EDS

Atualmente há uma forte demanda das empresas do setor de transmissão de energia elétrica para tentar elevar o nível da carga de pré-esticamento do condutor. Isso além de reduzir custos amenizaria dificuldades operacionais associadas, por exemplo, a construção de torres muito elevadas para a travessia de grandes rios amazônicos. Nesse sentido esse trabalho propôs uma alternativa para o cálculo da curva de resistência a fadiga do cabo na presença de maiores cargas de esticamento (EDS).

Lembrando que para cabos tipo ACSR o padrão é a utilização de cargas de esticamento (EDS) em torno de 18,5 – 20 % da carga de ruptura a tração do cabo, apresenta-se a seguir duas diferentes alternativas para estimativa da vida remanescente do cabo considerando dois diferentes valores de EDS , um de 25% e outro de 30%. Na

primeira proposta para o cálculo da vida remanescente para esses níveis acima do padrão de *EDS* utilizou-se como dado de resistência a fadiga do cabo a curva do Grosbeak obtida experimentalmente no laboratório da UnB (*EDS* = 20%). Por outro lado, corrigiu-se as tensões de solicitação por meio do uso da fórmula de Poffenberger-Swart. Observe que para uma *EDS* de 25 e 30% o valor da variável *p* (equação 4.4) será elevada com relação a esse mesmo valor calculado para uma *EDS* de 20% gerando conseqüentemente valores de tensão mais elevados. Para a segunda proposta, a fim de corrigir a curva *S-N* do efeito do acréscimo de tensão (tensão média) de 5% para a *EDS* de 25% e de 10% para a *EDS* de 30% as amplitudes de tensão calculadas pela equação 4.11 (equação da curva *S-N* do cabo Grosbeak da UnB) para uma *EDS* de 20% foram corrigidas com o auxílio da equação 2.4 de Goodman. Vale lembrar que esta segunda proposta aplica-se apenas para o método da Cigré usado para estimar a vida remanescente do cabo, para os outros métodos (IEEE e EPRI) a correção ocorre no cálculo da variável *p* e conseqüentemente no cálculo da variável *K* (equações 4.3 e 4.4).

5.3.1 Vida remanescente para *EDS*'s 25 e 30% sem correção por Goodman na curva *S-N* do cabo Grosbeak (*EDS* = 20%)

Os mesmos procedimentos utilizados para os cálculos utilizando uma *EDS* de 20% foram repetidos neste caso. Para uma *EDS* de 25% teremos uma carga de tração aplicada ao cabo de $T = 2,802 \times 10^4 N$ enquanto que para uma *EDS* de 30% a carga será de $T = 3,363 \times 10^4 N$. Os valores de EI_{min} , *p* e *K* calculados através das equações de Poffenberger-Swart para cada *EDS* estão apresentados na tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Variáveis calculadas pelas equações de Poffenberger-Swart para EDS 25 e 30%

Variáveis	25 %	30 %
EI_{min}	$EI_{min} = 2,846 \times 10^7 N \cdot mm^2$	$EI_{min} = 2,846 \times 10^7 N \cdot mm^2$
p	$p = 3,138 \times 10^{-2} mm^{-1}$	$p = 3,437 \times 10^{-2} mm^{-1}$
K	$K = 36,899 \frac{N}{mm^3}$	$K = 38,977 \frac{N}{mm^3}$

A partir do valor de K e considerando a equação de Poffenberger-Swart (equação 4.2) pode-se calcular a tensão dinâmica no fio de alumínio da camada externa do cabo diametralmente oposto ao último ponto de contato entre o cabo e o grampo.

Munidos destes dados foi utilizado o Método da Cigré a fim de determinar a vida remanescente do cabo sendo os valores encontrados representados na tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Dano, vida remanescente e vida remanescente útil para EDS's de 25% e de 30% (sem correção por Goodman)

Matriz # 2			
EDS		25 %	30 %
Dano	D_{UnB}	0,40	0,54
	$D_{Cigré}$	3,84	5,00
Vida remanescente	V_{UnB}	2,48	1,86
	$V_{Cigré}$	0,26	0,20
	$V_{UnB} / V_{Cigré}$	9,48	9,33
Vida remanescente útil (anos)	$V_{Útil- UnB}$	1,48	0,86

Pode-se através dos resultados apresentados na tabela 5.4 acima visualizar as diferenças (dada pela razão entre V_{UnB} e $V_{CIGRÉ}$) entre as estimativas de vida remanescente obtidas por esse método de cálculo quando utiliza-se a curva teórica da Cigré e os dados laboratoriais como característica de resistência a fadiga do cabo. A análise mostra que, para uma EDS de 25% e assumindo os dados do cabo Grosbeak levantados pela UnB, o cabo da Eletronorte possui uma vida remanescente útil de 1,48 anos ($V_{útil-UnB}$), enquanto que pela curva da Cigré o cabo estaria condenado a fadiga pois

o valor obtido para a vida remanescente foi menor que 1 ($V_{Cigré} = 0,26$), ou seja, a soma dos danos parciais a que o cabo foi submetido é maior que 1 ($D = 3,84$). A diferença entre os valores encontrados para a vida remanescente é de 9,48 vezes.

Para uma *EDS* de 30%, a vida remanescente útil calculada pela curva da UnB seria de 0,86 anos enquanto que para a curva da Cigré, assim como para a *EDS* de 25%, o cabo estaria condenado à fadiga devido ao fato de que o valor obtido para a vida remanescente ser menor que 1 ($V_{Cigré} = 0,20$) e a soma dos danos parciais maior que 1 ($D = 5$).

Considerando os padrões definidos pelos métodos da IEEE e EPRI o condutor também estaria condenado devido ao fato da amplitude de tensão ter ultrapassado o limite de resistência de 8.5 MPa em 32,06%, o limite de 12,75 MPa em 31,87% e o limite de 17 MPa em 31,6% do total de ciclos registrados na matriz # 2 para uma *EDS* de 25%. Para a *EDS* de 30% a amplitude de tensão ultrapassou o limite de resistência de 8.5 MPa em 39,50%, o limite de 12,75 em 32,06% e o limite de 17 MPa em 31,87% do total de ciclos registrados na matriz # 2. Estes resultados são melhores visualizados nas tabelas 5.5 e 5.6 abaixo.

Tabela 5.5 - Tensões máximas, número de ciclos e porcentagem no total de ciclos medidos para cada faixa de amplitude de deslocamento (*EDS* = 25%) para matriz #2

Y_b (µm)	Tensão máxima (MPa)	Nº de ciclos	% do total	Soma %
0 - 111	4,1	521871	60,496	100,000
111 - 222	8,2	64166	7,438	39,504
222 - 333	12,3	1683	0,195	32,066
333 - 445	16,4	2168	0,251	31,870
445 - 556	20,5	1249	0,145	31,619
556 - 667	24,6	504	0,058	31,474
667 - 778	28,7	390	0,045	31,416
778 - 889	32,8	341	0,040	31,371
889 - 1001	36,9	253	0,029	31,331
1001 - 1112	41,0	461	0,053	31,302
1112 - 1223	45,1	288	0,033	31,248
1223 - 1334	49,2	269277	31,215	31,215
1334 - 1423	52,5	0	0,000	0,000
Total de ciclos		862651	--	--

Tabela 5.6 - Tensões máximas, número de ciclos e porcentagem no total de ciclos medidos para cada faixa de amplitude de deslocamento ($EDS = 30\%$) para matriz #2

Y_b (μm)	Tensão máxima (MPa)	Nº de ciclos	% do total	Soma %
0 - 111	4,3	521871	60,496	100,000
111 - 222	8,7	64166	7,438	39,504
222 - 333	13,0	1683	0,195	32,066
333 - 445	17,3	2168	0,251	31,870
445 - 556	21,7	1249	0,145	31,619
556 - 667	26,0	504	0,058	31,474
667 - 778	30,3	390	0,045	31,416
778 - 889	34,7	341	0,040	31,371
889 - 1001	39,0	253	0,029	31,331
1001 - 1112	43,3	461	0,053	31,302
1112 - 1223	47,7	288	0,033	31,248
1223 - 1334	52,0	269277	31,215	31,215
1334 - 1423	55,5	0	0,000	0,000
Total de ciclos		862651	--	--

5.3.2 Vida remanescente para EDS 's 25 e 30% e curva $S-N$ do cabo Grosbeak corrigidos por Goodman

Como mencionado anteriormente, a equação 4.11 corresponde à curva $S-N$ para o cabo Grosbeak obtida através de testes realizados no laboratório de cabos da UnB considerando uma EDS de 20%. A fim de adaptá-la aos elevados valores de EDS propostos utilizou-se a equação de Goodman (equação 2.4). Até onde o autor tenha conhecimento esse é um procedimento inédito na literatura uma vez que costuma-se corrigir apenas o nível de tensão de solicitação para o cabo por meio da equação de Poffenberger-Swart.

Com as tensões calculadas para uma EDS de 20% através da equação 4.11 mais, as tensões médias acrescidas devido ao incremento de 5% na carga de tração para a EDS de 25% e de 10% para a EDS de 30% e o limite de resistência a tração CRT , foi possível através da aplicação da equação 2.4 de Goodman a obtenção das curvas $S-N$ para as três EDS 's em questão, mostrada na figura 5.2.

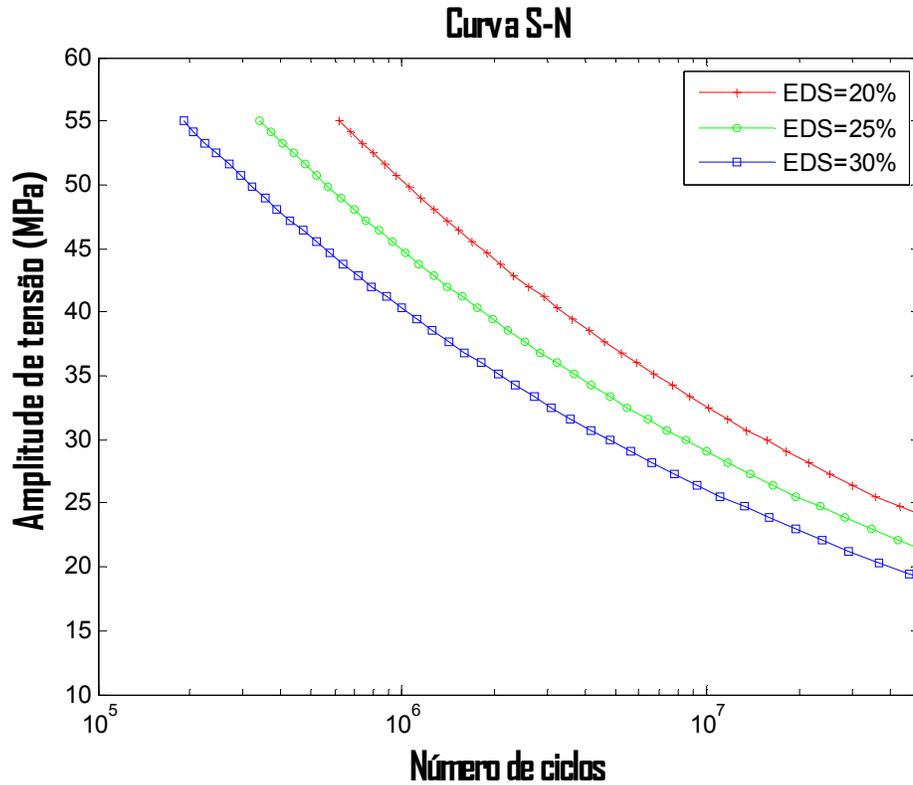


Figura 5.2 - Curvas $S-N$ para EDS 's de 20% (para o cabo Grosbeak da UnB) e 25% e 30% corrigidas por Goodman

Para a confecção das curvas de EDS 25% em verde e de EDS 30% em azul foi utilizado como base à curva de EDS de 20% em vermelho. Deve-se lembrar que para cabos condutores, uma carga de pré-esticamento entre 18,5 e 20% da carga de ruptura do cabo é o padrão de instalação utilizado pela maioria das empresas do setor de transmissão de energia e também é o valor utilizado para os ensaios de laboratório. Nesse sentido, a curva $S-N$ do cabo com EDS de 20% é análoga a curva $S-N$ de um material com tensão média nula. As amplitudes de tensões para EDS de 20% foram determinadas substituindo valores aleatórios de números de ciclos N na equação 4.11. Os valores de N bem como os das amplitudes de tensão para EDS de 20% obtidos via equação 4.11 e o das amplitudes de tensão para EDS 's de 25 e 30% obtidos via equação 2.4 de Goodman estão presentes na tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Amplitudes de tensões para diferentes *EDS* corrigidas por Goodman

Número de ciclos	Amplitudes de tensão (MPa)		
	20%	25%	30%
$1,00 \times 10^4$	106,78	101,44	96,10
$2,50 \times 10^4$	89,80	84,31	80,82
$5,00 \times 10^4$	78,77	74,83	70,89
$7,50 \times 10^4$	72,96	69,31	64,66
$1,00 \times 10^5$	69,10	64,64	62,19
$2,50 \times 10^5$	58,11	54,21	52,30
$5,00 \times 10^5$	50,98	48,43	44,88
$7,50 \times 10^5$	47,22	44,86	42,49
$1,00 \times 10^6$	44,72	42,48	40,25
$2,50 \times 10^6$	37,61	34,73	33,85
$5,00 \times 10^6$	32,99	31,34	29,69
$7,50 \times 10^6$	30,56	29,03	27,50
$1,00 \times 10^7$	28,94	27,49	26,04
$2,50 \times 10^7$	24,34	23,12	21,90
$5,00 \times 10^7$	21,35	20,28	19,21
$7,50 \times 10^7$	19,77	18,79	17,80

Aplicando um ajuste de curva foi possível a determinação das equações 5.1 e 5.2 que descrevem as curvas de 25% e 30%, as mesmas são apresentadas a seguir.

$$\sigma_a = 578,36 \cdot N^{-0,189} \text{ para } EDS = 25\% \quad (5.1)$$

$$\sigma_a = 547,92 \cdot N^{-0,189} \text{ para } EDS = 30\% \quad (5.2)$$

A partir das novas equações geradas foi possível calcular o número de ciclos necessários para a falha do material referente a cada amplitude de tensão (denominador na regra de Miner). As figuras 5.3 e 5.4 mostram as curvas *S-N* corrigidas por Goodman para o cabo Grosbeak referentes às *EDS*'s de 25 e 30%, bem como a curva limite de segurança da Cigré. Deve-se enfatizar que a curva da Cigré é a original sem qualquer correção quanto ao nível de *EDS* utilizado.

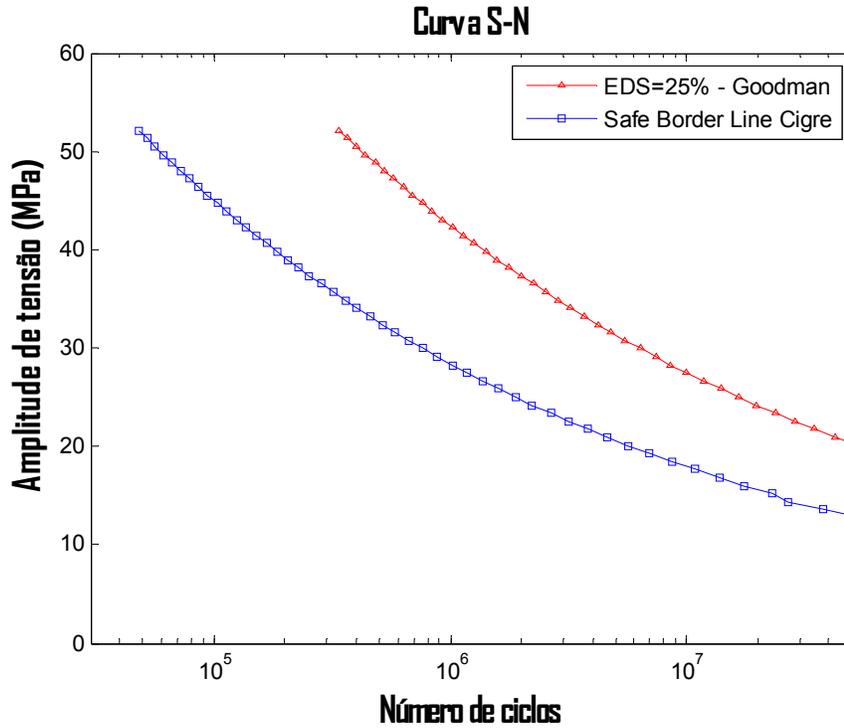


Figura 5.3 – Curvas *S-N* da Cigré (Safe Border Line) e a obtida em laboratório para cabo Grosbeak corrigida para $EDS = 25\%$

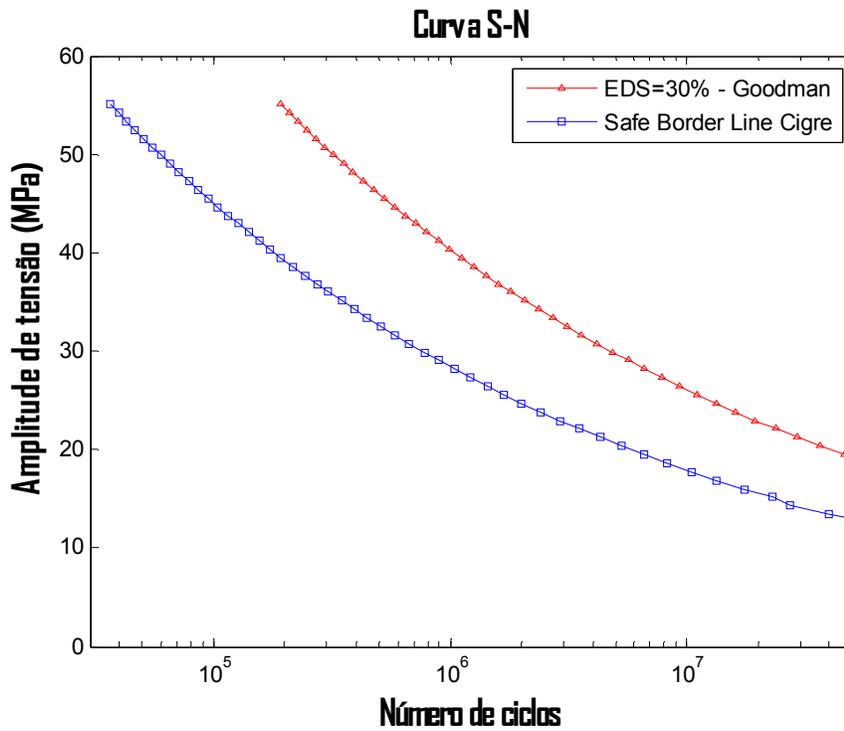


Figura 5.4 – Curvas *S-N* da Cigré (Safe Border Line) e a obtida em laboratório para cabo Grosbeak corrigida para $EDS = 30\%$

As figuras 5.3 e 5.4 apresentam curvas em gráfico de tensão x número de ciclos. As curvas em azul apresentam as curvas limites de segurança da Cigré sendo obtidas por meio das equações 4.9 e 4.10, enquanto que as curvas em vermelho ilustram os melhores ajustes para os dados produzidos por ensaio de fadiga no laboratório de cabos da ENM-UnB para um cabo Grosbeak corrigidos para *EDS's* de 25% e 30% pela equação 2.4 de Goodman. Vale ressaltar que para as três figuras apresentadas (figuras 5.1, 5.3 e 5.4) as curvas limites de segurança da Cigré são idênticas para as diferentes *EDS's* pois suas correções ocorreram no âmbito das equações de Pofenberger-Swart na variável *p* enquanto para a curva da UnB as correções fizeram-se presentes tanto na variável *p* quanto na curva limite de segurança (equação 4.11). A curva da Cigré está presente nas figura citadas para critério de comparação com a curva gerada (*EDS* 20%) e as corrigidas (*EDS's* 25 e 30%).

Aplicando o método da Cigré para as *EDS's* de 25 e 30% obteremos os seguintes valores para a vida remanescente.

Tabela 5.8 - Dano, vida remanescente e vida remanescente útil para *EDS's* de 25% e de 30% (corrigidos por Goodman)

Matriz # 2			
EDS		25 %	30 %
Dano	D_{UnB}	0,53	0,94
	D_{Cigré}	3,84	5,00
Vida remanescente	V_{UnB}	1,89	1,06
	V_{Cigré}	0,26	0,20
	V_{UnB} / V_{Cigré}	7,23	5,34
Vida remanescente útil (anos)	V_{Útil- UnB}	0,89	0,06

Através dos resultados apresentados na tabela 5.8 acima é possível visualizar as diferenças (dada pela razão entre V_{UnB} e $V_{CIGRÉ}$) entre as estimativas de vida remanescente obtidas por esse método de cálculo quando utiliza-se a curva teórica da Cigré e os dados laboratoriais como característica de resistência a fadiga do cabo. A

análise mostra que, para uma *EDS* de 25% e assumindo os dados do cabo Grosbeak levantados pela UnB corrigidos por Goodman, o cabo da Eletronorte possui uma vida remanescente de 0,89 anos ($V_{\text{Útil-UnB}}$), enquanto que para uma *EDS* de 30% a vida remanescente útil é de 0,06 anos. Os valores obtidos quando utilizado a curva da Cigré permaneceram os mesmos visto que a mesma não foi ajustada por Goodman assim, em ambos os casos o cabo estaria condenado a fadiga por apresentarem valores menores que 1 para a vida ($V_{\text{Cigré}}$) e maiores que 1 para o dano (D). As diferenças entre as vidas remanescentes calculadas para o cabo Grosbeak da UnB e a curva de segurança da Cigré foram de 7,23 vezes para a *EDS* de 25% e de 5,34 vezes para a *EDS* de 30%.

Capítulo 6

Discussão dos resultados e conclusões

O trabalho proposto nessa dissertação foi de natureza teórica e numérica. Conduziu-se uma revisão extensa e crítica das diversas metodologias existentes para o dimensionamento e cálculo da resistência em fadiga de cabos condutores de energia. Posteriormente aplicou-se essas metodologias para avaliação da durabilidade de um cabo Grosbeak instalado em uma linha de 230 kV da Eletronorte a partir de uma matriz amplitude x frequência extrapolada para um ano fornecida pela equipe da Universidade Federal do Para (matriz #2). A matriz #2 foi obtida através da instalação nessa linha de um vibrógrafo modelo Pavica. Outro importante dado experimental utilizado foi a equação da curva limite $S-N$ para um cabo Grosbeak, obtida através de testes realizados no laboratório de cabos da ENM-UnB considerando uma EDS de 20%, que juntamente com as matriz citada fomentaram o estudo e as análises conduzidas neste trabalho.

Do ponto de vista teórico é possível se construir uma importante discussão sobre as metodologias de fadiga para cabos condutores apresentadas no capítulo 4. A metodologia da EPRI [21] e [12] apresenta algumas inconsistências fundamentais. Por exemplo, não é razoável que para cabos esticados com diferentes níveis de EDS o limite de fadiga permaneça o mesmo (8,5 MPa para cabos com mais de uma camada de fios de alumínio), a não ser que esse valor seja extremamente conservativo e portanto anti econômico. De fato, ao substituímos o valor de 8.5 MPa na equação para o cálculo da vida segundo a Curva Limite de Segurança da Cigré (Eq. 4.10) essa fornece uma estimativa de $5,8 \times 10^8$ ciclos, valor de vida usualmente considerado como limite de fadiga para cabos condutores (500 Mciclos). Por outro lado, trabalhos anteriores [2] mostram que a vida obtida com a curva da Cigré pode ser até 11 vezes mais conservativa do que a obtida por ensaios em laboratório. Outra inconsistência da metodologia da EPRI é que ela estabelece um limite de fadiga para o cabo e não para a montagem cabo/grampo de

suspensão. É amplamente reconhecido [2, 29] que a durabilidade do cabo depende da geometria do grampo de suspensão, assim como das cargas de aperto (torque) para uma mesma montagem. Obviamente essa metodologia não é sensível a essas características observadas experimentalmente.

A metodologia revisada da IEEE tentou avançar no sentido de diminuir o conservadorismo envolvido na proposta da EPRI, mas infelizmente carece de qualquer explicação teórica ou mesmo de resultados experimentais que validem sua aplicação. Mais ainda, as inconsistências levantadas no parágrafo anterior para o método da EPRI continuam valendo para a proposta da IEEE.

Entre as metodologias estudadas o método da Cigré mostrou ser útil tanto em um contexto de manutenção, com a possibilidade do cálculo da vida remanescente do cabo para quebra do 1º, 2º ou 3º fio de alumínio, quanto no âmbito do projeto da linha. Nesse último caso, porém há dificuldades associadas à necessidade da determinação dos esforços do cabo na região onde a linha será instalada. Para isso seria necessário a condução de simulação numérica com considerável grau de complexidade para obtenção do coeficiente de arrasto a partir do mapa de ventos da região, ou a instalação de uma linha não energizada em região de vegetação rasteira (ou em uma travessia de rio) onde os carregamentos impostos pelo vento ao cabo são mais críticos. Ainda assim, e apesar dessas dificuldades associadas a etapa de projeto da linha, o método da Cigré se mostrou mais versátil e consistente do que os métodos da EPRI e IEEE. O uso de conceitos como a fração de dano imposta por blocos de carregamento com amplitude variável além de ser uma abordagem moderna e amplamente aceita na comunidade de fadiga resolve problemas de ordem prática que essas outras propostas não podiam enfrentar. Como para efetuar o cálculo da fração do dano é necessário se conhecer a curva $S-N$ da montagem cabo/grampo, pode-se incluir claramente na metodologia os efeitos conhecidos da geometria do grampo e das cargas de prensagem da ligação nesse método de cálculo. Também é possível incluir o efeito da carga de pré-esticamento no cálculo da durabilidade do condutor. Usualmente isso tem sido feito apenas se corrigindo o valor da tensão de solitação do cabo por meio do uso da fórmula de Poffenberger-Swart. (Eq. 4.2). O parâmetro K que está associado à rigidez do condutor aumenta para maiores

níveis de *EDS*, e portanto, a amplitude de tensão para um mesmo nível de amplitude de deslocamento por flexão também aumentará com a *EDS*.

Nesse trabalho propôs-se uma nova correção para considerar o efeito da *EDS* não apenas na solicitação do cabo, mas também em sua resistência a fadiga. Note que a correção no nível de solicitação devido a um maior esticamento do cabo (maior *EDS*) está associada uma mudança na rigidez desse componente, que conseqüentemente provocará uma maior amplitude de tensão. Costuma-se assumir que esse aumento do nível de tensão é o suficiente para estimar a redução da vida estimada a partir da curva *S-N* de base para a montagem (em geral obtida com $EDS = 18,5$ ou 20%) ou da curva Limite de Segurança. Nesse trabalho admite-se que não, ou seja, também é necessário corrigir a curva de resistência obtida em laboratório assim como se faz para a curva do material em presença de tensões médias não nulas. A base para essa alegação é que a Eq. de Poffenberger-Swart não carrega informações sobre a mudança de comportamento em fadiga que uma maior carga de pré-esticamento irá certamente provocar na montagem. Sob maiores cargas de esticamento as cargas de contato entre os fios e entre fios e o grampo de suspensão serão diferentes mudando o regime de desgaste na interface de contato. Mais ainda, os fios de alumínio sofrem esmagamentos gerando entalhes que serão cada vez maiores e mais profundos para cargas de esticamento mais elevadas. Assim, as tensões nos pontos de contato serão muito afetadas pelo novo regime de desgaste (coeficiente de atrito médio entre as zonas de escorregamento e adesão típicas em problemas de *fretting*) e pelo concentrador de tensão (gerado simultaneamente pelo problema de contato e pelo entalhe) e evoluirão de maneira não linear com a *EDS*, sendo bastante diferentes da tensão nominal estimada por Poffenberger-Swart (para o fio de alumínio da camada mais externa e portanto na ausência de contato). Desta forma, espera-se que a curva *S-N* para um cabo com *EDS* diferente de 20% da carga de esticamento (curva de base que seria correspondente a uma curva *S-N* do material puro com tensão média nula) seja completamente distinta da curva com $EDS = 20\%$.

Uma análise comparativa das metodologias estudadas foi conduzida utilizando o histórico de amplitudes de tensão medida para um cabo Grosbeak da Eletronorte (matriz # 2), e considerando diferentes *EDS*'s (20, 25 e 30%). Paralelamente utilizou-se a curva *S-N* para o cabo Grosbeak levantada laboratorialmente a fim de comparar a vida

remanescente calculada tendo como base esta curva e a Curva Limite de Segurança da Cigré. Finalmente comparou-se a vida remanescente calculada pelas equações geradas pela correção, através da fórmula de Goodman, da equação do cabo Grosbeak da UnB para as *EDS*'s de 25% e 30% com a vida remanescente calculada através da curva limite de segurança da Cigré, os resultados estão resumidos na tabela 6.1 abaixo.

Tabela 6.1 - Resumo dos parâmetros de dano e vida calculados pelo critério da Cigré para a matriz # 2

Matriz # 2					
	Sem ajuste por Goodman			Ajustadas por Goodman	
<i>EDS</i> (%)	20	25	30	25	30
D_{UnB}	0,29	0,40	0,54	0,53	0,94
$D_{Cigré}$	2,78	3,84	5,00	3,84	5,00
V_{UnB}	3,47	2,48	1,86	1,89	1,06
$V_{Cigré}$	0,36	0,26	0,20	0,26	0,20
$V_{UnB} / V_{Cigré}$	9,65	9,48	9,33	7,23	5,34
$V_{Útil- UnB}$	2,47	1,48	0,86	0,89	0,06
$V_{Útil- Cigré}$	--	--	--	--	--

Os valores obtidos para a curva de segurança da Cigré não variaram após a aplicação de Goodman, pois esse ajuste foi aplicado apenas sobre a curva levantada no laboratório de cabos da UnB para o cabo Grosbeak. A curva da Cigré é uma curva de segurança obtida a partir da compilação de uma série de dados experimentais para cabos e fios de alumínio e, portanto com níveis muitíssimo elevados de conservadorismo como identificado em outros trabalhos [2], por isso não é razoável corrigir essa curva. Considerando o histórico da matriz # 2 para a curva *S-N* da Cigré o cabo estará condenado a fadiga para todas as diferentes aplicações de *EDS* vez que o valor do acúmulo de dano *D* foi maior que 1 e conseqüentemente o valor para a vida remanescente menor que 1. Aplicando o método da Cigré para a curva levantada na UnB o cabo ainda possuiria uma vida remanescente útil de: 2,47, 1,48 e 0,86 anos para *EDS*'s de 20, 25 e 30% respectivamente sem a aplicação de Goodman e de 0,89 e 0,06 anos para *EDS*'s 25 e 30% respectivamente com a aplicação de Goodman. Vale lembrar que a curva para

EDS de 20% foi base para a aplicação da Goodman sendo seus valores iguais em ambas as aplicações (com e sem Goodman).

Para os resultados obtidos pela curva Limite de Segurança da Cigré a diferença entre a curva teórica e a levantada em laboratório, sem correção por Goodman, mostrou-se 10 vezes menor para a *EDS* de 20% e de 9 vezes para as *EDS*'s de 25 e 30%. Essa mesma diferença para as equações corrigidas por Goodman mostrou-se 7,23 vezes menor para a *EDS* de 25% e 5,34 vezes maior para a *EDS* de 30% conforme figura 6.1. Ou seja, a medida que corrigimos os efeitos da *EDS* para a curva de vida do laboratório a vida estimada tende a se aproximar mais da vida calculada com a curva Limite de Segurança da Cigré. Isso acontece, pois as cargas de esticamento mais elevadas provocarão uma redução na resistência em fadiga da montagem que está sendo agora corrigida.

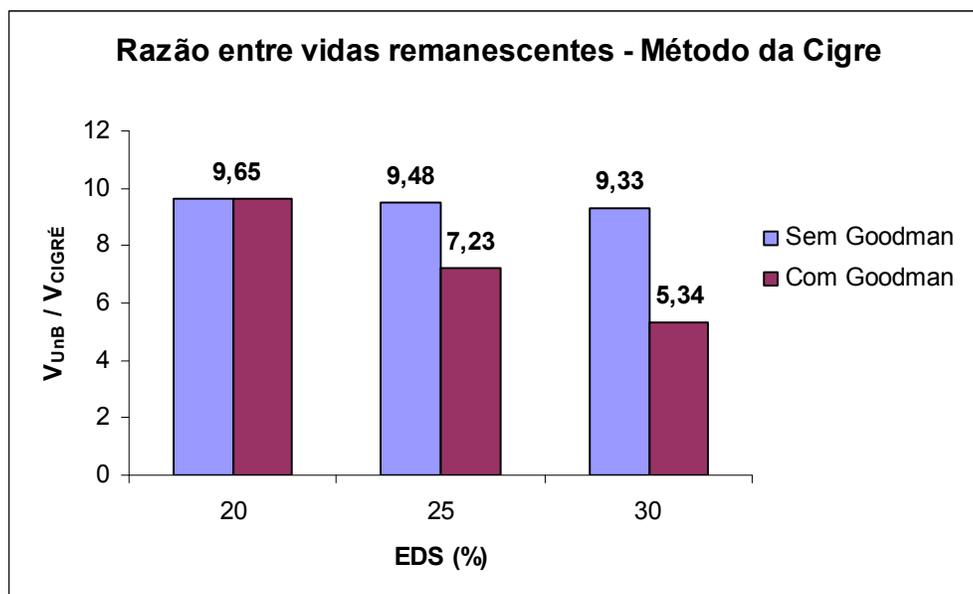


Figura 6.1 - Razão entre as vidas remanescentes baseadas na curva limite de segurança da Cigré e na curva para o cabo Grosbeak levantada no laboratório da UnB.

A Eletronorte realiza inspeções periódicas em suas linhas de transmissão. Até o momento não há registro de queda do cabo ou mesmo de fios rompidos em campo para esta linha. Por esse motivo é provável que o cálculo da vida remanescente a partir dos dados obtidos em laboratório pela UnB esteja mais próximo da realidade. Isso enfatiza a importância e necessidade da utilização dessa moderna metodologia de cálculo.

Torna-se importante observar que de acordo com os resultados obtidos nessa análise e considerando que os dados da matriz amplitude x frequência foram medidos em 2007, seria extremamente recomendável uma inspeção mais cuidadosa dessa linha por parte do setor de manutenções da Eletronorte no sentido de se evitar danos mais severos ao cabo ou até mesmo a sua completa ruptura. A inspeção deveria considerar não apenas o uso de binóculo ou câmera de infra-vermelho mas também a abertura por completo do grampo de suspensão com inspeção visual de toda a área mordida pelo grampo, inclusive e principalmente na parte inferior onde o cabo repousa sobre a superfície do grampo.

Obviamente, se o cabo estiver tracionado com um nível de carga de esticamento superior ao utilizado no instante da medição em campo a matriz de amplitude x frequência seria diferente da registrada, pois o alto amortecimento do cabo diminui e isso facilitará a vibração do mesmo. No entanto, para fins de análise e discussão assumiu-se neste trabalho um mesmo espectro de solicitação em ambas as condições. Isso é evidentemente uma simplificação.

Com relação à redução da vida remanescente do cabo com o aumento da carga de pré-tensão (*EDS*) houve uma redução de cerca de 37 %, em média, na vida para cada incremento de 5% na *EDS* considerando a curva do cabo Grosbeak da UnB sem o ajuste por Goodman e de 55% em média considerando a curvas *S-N* ajustadas por Goodman. A diferença na vida remanescente para a *EDS* de 25% entre as curvas ajustadas e as não ajustadas por Goodman foi de 24 %, já para uma *EDS* de 30% essa diferença foi de 43 %.

Tabela 6.2 - Variação nas vidas remanescentes para diferentes *EDS*'s

Curvas	Vida remanescente para diferentes <i>EDS</i> 's			Redução na vida remanescente para cada incremento de 5% na <i>EDS</i>
	20	25	30	
Sem Goodman	3,47	2,48	1,86	37 %
Goodman	3,47	1,89	1,06	55 %
Diferença	--	24 %	43 %	--

Outro importante aspecto a ser considerado na aplicação do método da Cigré e que o mesmo foi desenvolvido para cabos singelos presos a grampos mono articulados sem armadura pré-formada. Essa limitação vem da fórmula de Poffenberger-Swart que

foi desenvolvida e testada para a situação descrita. Por outro lado, é comum como solução de engenharia aplicar essa fórmula para o cálculo da amplitude de tensão dinâmica na presença de uma armadura pré-formada que envolve o cabo na região de ligação com o grampo de suspensão. O cabo da Eletronorte estava protegido por uma armadura deste tipo. Qualitativamente o efeito da armadura é o de aumentar a rigidez flexo-material do cabo o que deve reduzir o valor de K (equação 4.3) e, portanto também diminuir a amplitude de flexão dinâmica no fio de alumínio. A armadura também serve como uma proteção para o contato direto entre o cabo o grampo de suspensão, mas, não há evidências relatadas na literatura se essa é realmente uma forma efetiva de reduzir ou minimizar o desgaste nessa nova interface de contato. De qualquer modo, apenas a redução nos níveis da amplitude da tensão dinâmica de flexão tende a provocar uma solicitação menos severa ao cabo e, portanto as tensões calculadas considerando ausência da armadura seriam uma alternativa a favor da segurança.

5.1 Proposta para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros propõe-se aplicar espectros de carregamento (matrizes amplitude x frequência) típicos de medições obtidas em campo a ensaios acelerados em Laboratório considerando cabos esticados com diferentes níveis de *EDS*. Também seria importante o levantamento de curvas *S-N* para os mesmos níveis de *EDS* considerados nos ensaios com espectro de carregamento de campo. Essa bateria de testes de razoável complexidade e longa duração permitiria por outro lado uma avaliação quantitativa da precisão das estimativas obtidas por meio do método de cálculo da vida remanescente da Cigré, e consistiria em um conjunto de dados fundamentais para validação da proposta de uso da curva de Goodman para correção da Curva *S-N* de base para cabos na presença de maiores níveis de carga de pré-esticamento.

Referências

- [1] ANEEL, Atlas da Energia Elétrica do Brasil, 2008.
- [2] AZEVEDO C.R.F., HENRIQUES A.M.D., FILHO A.R.P., FERREIRA J.L.A., ARAÚJO J.A., “Fretting Fatigue in Overhead Conductors: Rig Design and Failure Analysis of a Grosbeak Aluminium Cable Steel Reinforced Conductor”, 2008.
- [3] BELLORIO, M.B., “Desenvolvimento de Modelos para Previsão da Nucleação de Trincas para Estados Multiaxiais de Tensões e Sob Condições de Fretting”, 2003.
- [4] CARDOU A., “Fretting Fatigue Under Spectrum Loading – Application to Overhead Electrical Conductors”, 2002.
- [5] CASTRO, C.A.; BRACARENSE, A. Q., “Avaliação de uma Nova Metodologia para Cálculo de Acúmulo de Dano Considerando as Cargas Aplicadas Durante todo o Carregamento, CON08-0625, CONEM2008, Salvador, 2008.
- [6] CHAGAS, H.N., “Seminário Ensaio de Fadiga”, 2009.
- [7] CIGRÉ WG04-SC 22, “Guide FOR Endurance Tests of Conductor Inside Clamps”, Electra n-100, 1985.
- [8] CIGRÉ TF 2 WG 11 SC 22; “Guide to Vibration Measurements on Overhead Lines”, ELECTRA nº 162, 1995.
- [9] CIGRÉ-SCB2-WG11-TF7-06-01; “Fatigue endurance capability of conductor/clamp systems” – Update of Present Knowledge, 2006.

[10] CIGRÉ - TASK FORCE B2.30, “Engineering Guidelines Relating to Fatigue Endurance Capability of Conductor / Clamp Systems, 2008.

[11] DOMINGUES, J. S. Órgãos de Máquina – Fadiga – ISEP (Instituto Superior de Engenharia do Porto), Portugal, 2003, pp. 1-25.

[12] EPRI – Electrical Power Research Institute, Transmission Line Reference Book, “Wind Induced Conductor”, Motion Palo Alto, CA, 1979.

[13] FATEMI, A.; YANG, L. Cumulative Fatigue Damage And Life Prediction Theories: A Survey Of State Of Art For Homogeneous Materials, International Journal Of Fatigue, Vol. 20, No. I, 1998, pp. 9-34.

[14] FOX, R.W.; McDONALD, A.T. “Introdução à Mecânica dos Fluidos”. 5.ed. LTC Editora, Rio de Janeiro, 2002.

[15] GOPALAN, T. V. “New excitation system for indoor testing of overhead conductors, Journal of Energy Engineering”, v. 119, n. 3, pp. 159-167, 1993.

[16] GOUDREAU. S., JOLICOEUR. C., CARDOU. A., CLOUTIER. L., LEBLOND. A., “Palmgren-Miner Law Application to Overhead Conductor Fatigue Prediction”.

[17] HARDY. C., BRUNELLE. J., “Principles of Measurement and Analysis with the New PAVICA Conductor Vibration Recorder”, Québec, J3X 1S1, May, 1991.

[18] HARDY. C.; DYKE. P.V.; “Field Observations on Wind-Induced Conductor Motions”, Institut de Recherche d’Hydro-Québec, Varennes, Québec, J3X 1S1, Canadá, 1994.

- [19] HARDY C. and LEBLOND A., “*On the Dynamic Flexural Rigidity of Taut Stranded Cables*”, Proc. 5th Int’l Symposium on Cable Dynamics, Santa Margarita Ligure (Italy), Sept. 15-18, 2003, pp. 45-52.
- [20] HENRIQUES. A. M. D., “Bancada de Ensaio Mecânicos a Fadiga de Cabos Condutores de Energia”, Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, 2006.
- [21] IEEE, “Guide for Aeolian Vibration Field Measurements of Overhead Conductors”, 2007.
- [22] INÁCIO, T.B., “Otimização de Modelo de Fadiga Multiaxial por meio de Algoritmo Genético”, 2008.
- [23] KIESSLING. F., NEFZGER. P., NOLASCO. J.F., KAJINTZYK. U., “Overhead Power Lines – Planning Design Construction”, 2002.
- [24] LEE, Y.; PAN, J.; HATHWAY, R.; BARKEY, M. Fatigue Testing and Analysis – Theory and Practice; Elsevier, 2005, pp. 57-76.
- [25] MANSUR T.R., PALMA E.S., JÚNIOR A.A., PINTO J.M.A., “Estudo Comparativo para Avaliar Vida Restante em Aço SAE 8620, quando Submetido à Fadiga de Alto-Ciclo, 2008.
- [26] Nexans, Cabos e Sistemas de acabamentos, www.nexans.com.br.
- [27] PAPAILIOU, K.O., “*On the bending stiffness of transmission line conductors*”, IEEE Trans Power Delivery, Vol. 12, No. 4, October 1997, pp. 1576-1588.
- [28] POFFENBERGER J.C., SWART R.T., “Differential Displacement and Dynamic Conductor Strain”, 1965.

- [29] PRESTON B., MCGILL; 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
- [30] RAMEY, G. E.; SILVA, J.M. “An Experimental Evaluation Of Conductor Aeolian Fatigue Damage Mitigation by Amplitude Reduction”. IEEE PES Summer Meeting, Portland, Oregon, pp.26-31, July, 1981.
- [31] RAMEY, G.E. “Conductor Fatigue Life Research”. EPRI Project 1278-1 Final Report (Phase III) draft submitted for review, novembro, 1984.
- [32] RAMEY, G. E.; ASCE, A. M.; DUNCAN, Roy R.; BRUNAIR, ROBERT M. “Experimental Evaluation of S-N Curves for Drake ACSR Conductor”. Journal of Energy Engineering, v. 112, n. 02, pp. 138-151, 1986.
- [33] RAWLINS, C.B., “Some effects of mill practice on the stress behavior of ACSR”, IEEE Transactions on Power Delivery, PE-325-PWRD-0-12-1997.
- [34] REGO, V.B.; “Análise do Efeito da Carga de Pré-Tensão e do Uso de Curvas S-N Específicas na Previsão da Vida Útil para Cabos Condutores de Energia Elétrica”, Relatório Final do Trabalho de Iniciação Científica, 2008.
- [35] REGO, V.B.; “Estudo comparativo de modelos de acúmulo de dano por fadiga”, Relatório Final do Trabalho de Iniciação Científica, 2008.
- [36] ROCTEST; PAVICA Instruction Manual, ROCTEST/TELEMAC, 2003.
- [37] SHARP, M.L.; NORDMARK, G.E.; MENZEMER, C.C.; “Fatigue Design of Aluminum Components & Structures, 1996.
- [38] SILVA, M.C, “Vida em Fadiga da Liga de Alumínio AA7175-T1, 2001.

[39] SMITH, K. N., WATSON, P.O., & TOPPER, T.H., "A Strees-Strain Function for the Fatigue of Metals", J. Mater., Vol. 5 No. 4, 1970.

[40] WATERHOUSE, R. B.; "Fretting Fatigue", International Materials Reviews, v. 37, n. 2, p. 77-97, 1992.

[41] WIRSCHING, P. H.; SHEHATA, A. M., "Fatigue Under Wide Band Radom Stresses Using the Rain-Flow Method." Journal of Engineering Materials and Technology, pp. 205-211, 1977.

[42] ZHOU, Z. R.; GOUDREAU, S.; CARDOU, A.; Fiset, M. Single wire fretting fatigue tests for electrical conductor bending fatigue evaluation. Wear, pp181-183, pp531-536, 1995.

[43] ZHOU, Z. R.; CARDOU, A.; GOUDREAU, S.; Fiset, M. "Fundamental investigations of electrical conductor fretting fatigue". Tribology International, v. 29, pp 221-232, 1996.

Anexo

Tabela 1A: Matriz # 1 obtida na literatura

Freq (Hz)	Amplitude (μm)							Soma
	125	251	376	502	627	753	> 753	
2	29493	1827	0	0	0	0	0	29493
5	165474	8091	522	0	0	0	0	165474
10	493029	191835	54549	11484	1305	0	0	493029
15	805185	577071	227331	48024	5220	0	0	805185
20	882441	602388	268569	76734	11745	783	0	882441
25	704178	280836	49329	3654	0	0	0	704178
30	216108	47763	2349	0	0	0	0	216108
34	36540	2088	0	0	0	0	0	36540
40	2088	0	0	0	0	0	0	2088
45	261	0	0	0	0	0	0	261
50	0	0	0	0	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0	0	0	0
83	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0	0
143	0	0	0	0	0	0	0	0
200	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	3334797	1711899	602649	139896	18270	783	0	5808294

Tabela 2A: Matriz # 2 obtida em campo por aparelho vibrógrafo (UFPA)

Freq. (Hz)	Amplitude (µm)									
	1423 - 1401	1401 - 1379	1379 - 1357	1357 - 1334	1334 - 1312	1312 - 1290	1290 - 1268	1268 - 1245	1245 - 1223	1223 - 1201
0 - 1	0	0	0	0	0	234	4	2	0	2
2 - 3	0	0	0	0	1	139	1	4	0	0
4 - 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6 - 7	0	0	0	0	51	19	0	0	0	0
8 - 9	0	0	0	0	109	93	0	0	0	0
10 - 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12 - 13	0	0	0	0	272	39	0	0	0	0
14 - 15	0	0	0	0	6	173	0	0	0	0
16 - 17	0	0	0	0	301	104	0	0	0	0
18 - 19	0	0	0	0	860	30	0	0	0	0
20 - 21	0	0	0	0	231	3	0	0	0	0
22 - 23	0	0	0	0	278	0	0	0	0	0
24 - 25	0	0	0	0	279	2	0	0	0	0
26 - 27	0	0	0	0	623	0	0	0	0	0
28 - 29	0	0	0	0	689	689	0	0	0	0
30 - 31	0	0	0	0	916	1559	0	0	0	0
32 - 33	0	0	0	0	244	1342	0	0	0	0
34 - 35	0	0	0	0	2079	1945	0	0	0	0
36 - 37	0	0	0	0	770	977	0	0	0	0
38 - 39	0	0	0	0	2506	4903	0	0	0	0
40 - 41	0	0	0	0	1337	2381	0	0	0	0
42 - 43	0	0	0	0	2298	3063	0	0	0	0
44 - 45	0	0	0	0	2466	5808	0	0	0	0
46 - 47	0	0	0	0	2277	7115	0	0	0	0
48 - 49	0	0	0	0	1959	7489	0	0	0	0
50 - 51	0	0	0	0	3635	8332	2	0	0	0
52 - 53	0	0	0	0	3360	13084	0	0	0	0
54 - 55	0	0	0	0	860	19803	0	0	0	0
56 - 57	0	0	0	0	1480	19871	0	0	0	0
58 - 59	0	0	0	0	1026	16480	0	0	0	0
60 - 61	0	0	0	0	1326	15166	0	0	0	0
62 - 63	0	0	0	0	1392	15221	0	0	0	0
64 - 65	0	0	0	0	5751	12257	0	0	0	0
66 - 67	0	0	0	0	4109	7898	0	0	0	0
68 - 69	0	0	0	0	2082	10673	0	0	0	0
70 - 71	0	0	0	0	1341	4141	0	0	0	0
72 - 73	0	0	0	0	983	1768	0	0	0	0
74 - 75	0	0	0	0	1317	3277	0	0	0	0
76 - 77	0	0	0	0	0	1908	0	0	0	0
78 - 79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80 - 81	0	0	0	0	13	909	50	17	9	12
82 - 83	0	0	0	0	1008	820	0	0	0	0
84 - 85	0	0	0	0	1822	7	83	13	4	6
86 - 87	0	0	0	0	0	63	244	129	71	47
88 - 89	0	0	0	0	1640	1101	0	0	0	0
90 - 91	0	0	0	0	907	0	0	0	0	0
92 - 93	0	0	0	0	1812	6	0	0	0	0
94 - 95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
96 - 97	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
98 - 99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100 - 101	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
102 - 103	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
104 - 105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
106 - 107	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
108 - 109	0	0	0	0	946	1355	509	22	4	4
110 - 111	0	0	0	0	10809	2125	0	0	0	0
112 - 113	0	0	0	0	3382	1257	0	0	0	0
114 - 115	0	0	0	0	927	0	0	0	0	0
116 - 117	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
118 - 119	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
120 - 121	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
122 - 123	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
124 - 125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
126 - 127	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	0	0	0	0	72480	195629	893	187	88	71

Freq. (Hz)	Amplitude (µm)									
	1201 - 1179	1179 - 1156	1156 - 1134	1134 - 1112	1112 - 1090	1090 - 1067	1067 - 1045	1045 - 1023	1023 - 1001	1001 - 978
0 - 1	0	0	0	1	2	1	0	0	2	0
2 - 3	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
4 - 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6 - 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8 - 9	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
10 - 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12 - 13	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
14 - 15	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
16 - 17	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
18 - 19	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0
20 - 21	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
22 - 23	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
24 - 25	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
26 - 27	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
28 - 29	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0
30 - 31	0	0	0	1	2	3	0	0	0	0
32 - 33	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0
34 - 35	0	0	1	0	6	1	1	1	0	0
36 - 37	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
38 - 39	0	0	0	5	5	5	0	0	0	0
40 - 41	0	0	0	2	3	1	1	0	0	0
42 - 43	0	0	0	2	3	1	1	1	0	0
44 - 45	0	0	1	2	6	2	1	1	0	0
46 - 47	0	0	0	3	9	3	0	0	0	0
48 - 49	0	0	0	3	10	1	0	0	0	0
50 - 51	0	0	0	5	5	3	1	1	0	0
52 - 53	0	0	1	5	8	8	1	2	0	0
54 - 55	0	0	1	12	9	6	0	0	1	0
56 - 57	0	0	0	9	11	2	1	2	0	0
58 - 59	0	0	0	4	11	2	1	1	0	0
60 - 61	0	0	0	9	8	3	1	0	0	1
62 - 63	0	0	0	3	12	2	0	0	0	0
64 - 65	0	0	2	5	11	4	2	0	0	0
66 - 67	0	0	0	2	5	4	2	0	0	0
68 - 69	0	0	0	3	6	3	0	0	0	1
70 - 71	0	0	0	1	3	1	0	0	0	0
72 - 73	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
74 - 75	0	0	0	0	1	2	2	0	0	0
76 - 77	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
78 - 79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80 - 81	3	9	9	6	7	10	9	7	5	9
82 - 83	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
84 - 85	3	0	3	2	2	6	7	4	5	8
86 - 87	28	18	25	18	28	23	26	33	33	30
88 - 89	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
90 - 91	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
92 - 93	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
94 - 95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
96 - 97	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
98 - 99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100 - 101	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
102 - 103	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
104 - 105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
106 - 107	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
108 - 109	1	3	0	1	0	0	0	2	0	1
110 - 111	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1
112 - 113	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
114 - 115	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
116 - 117	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
118 - 119	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
120 - 121	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
122 - 123	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
124 - 125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
126 - 127	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	36	30	43	108	185	110	61	57	48	51

Freq. (Hz)	Amplitude (µm)									
	978 - 956	956 - 934	934 - 912	912 - 889	889 - 867	867 - 845	845 - 823	823 - 800	800 - 778	778 - 756
0 - 1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
2 - 3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4 - 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6 - 7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
8 - 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10 - 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12 - 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14 - 15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16 - 17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18 - 19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20 - 21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22 - 23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24 - 25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26 - 27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28 - 29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30 - 31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32 - 33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34 - 35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36 - 37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38 - 39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40 - 41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42 - 43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44 - 45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46 - 47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48 - 49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50 - 51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
52 - 53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54 - 55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
56 - 57	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58 - 59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60 - 61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
62 - 63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
64 - 65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
66 - 67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
68 - 69	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70 - 71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
72 - 73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
74 - 75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
76 - 77	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
78 - 79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80 - 81	9	8	10	8	19	16	15	19	20	20
82 - 83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
84 - 85	5	8	13	11	8	10	16	14	15	16
86 - 87	36	28	27	32	40	43	37	34	32	33
88 - 89	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
90 - 91	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
92 - 93	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
94 - 95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
96 - 97	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
98 - 99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100 - 101	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
102 - 103	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
104 - 105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
106 - 107	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
108 - 109	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
110 - 111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
112 - 113	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
114 - 115	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
116 - 117	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
118 - 119	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
120 - 121	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
122 - 123	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
124 - 125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
126 - 127	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	53	46	52	51	68	70	69	67	67	69

Freq. (Hz)	Amplitude (µm)									
	756 - 734	734 - 711	711 - 689	689 - 667	667 - 645	645 - 622	622 - 600	600 - 578	578 - 556	556 - 534
0 - 1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2 - 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4 - 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6 - 7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8 - 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10 - 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12 - 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14 - 15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16 - 17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18 - 19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20 - 21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22 - 23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24 - 25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26 - 27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28 - 29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30 - 31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32 - 33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34 - 35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36 - 37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38 - 39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40 - 41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42 - 43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44 - 45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46 - 47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48 - 49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50 - 51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
52 - 53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54 - 55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
56 - 57	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58 - 59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60 - 61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
62 - 63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
64 - 65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
66 - 67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
68 - 69	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70 - 71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
72 - 73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
74 - 75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
76 - 77	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
78 - 79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80 - 81	22	19	22	22	27	26	27	31	38	27
82 - 83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
84 - 85	18	22	23	25	22	18	34	27	39	41
86 - 87	42	41	29	34	39	32	30	37	39	38
88 - 89	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
90 - 91	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
92 - 93	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
94 - 95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
96 - 97	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
98 - 99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100 - 101	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
102 - 103	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
104 - 105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
106 - 107	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
108 - 109	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
110 - 111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
112 - 113	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
114 - 115	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
116 - 117	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
118 - 119	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
120 - 121	0	0	0	0	0	2	1	13	22	49
122 - 123	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
124 - 125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
126 - 127	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	83	83	74	81	88	78	92	108	138	155

Freq. (Hz)	Amplitude (µm)									
	534 - 511	511 - 489	489 - 467	467 - 445	445 - 422	422 - 400	400 - 378	378 - 356	356 - 333	333 - 311
0 - 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 - 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4 - 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6 - 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8 - 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10 - 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12 - 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14 - 15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16 - 17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18 - 19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20 - 21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22 - 23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24 - 25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26 - 27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28 - 29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30 - 31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32 - 33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34 - 35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36 - 37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38 - 39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40 - 41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42 - 43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44 - 45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46 - 47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48 - 49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50 - 51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
52 - 53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54 - 55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
56 - 57	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58 - 59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60 - 61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
62 - 63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
64 - 65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
66 - 67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
68 - 69	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70 - 71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
72 - 73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
74 - 75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
76 - 77	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
78 - 79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80 - 81	20	33	32	33	28	34	25	29	15	23
82 - 83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
84 - 85	26	53	42	50	38	47	38	46	45	32
86 - 87	18	36	34	27	24	32	24	35	41	27
88 - 89	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
90 - 91	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
92 - 93	0	0	0	0	0	0	4	15	39	65
94 - 95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
96 - 97	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
98 - 99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100 - 101	0	0	13	25	80	150	157	199	182	126
102 - 103	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
104 - 105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
106 - 107	0	12	23	52	62	104	82	102	94	96
108 - 109	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
110 - 111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
112 - 113	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
114 - 115	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
116 - 117	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
118 - 119	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
120 - 121	87	124	173	181	157	143	49	39	9	5
122 - 123	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
124 - 125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
126 - 127	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	151	258	317	368	389	510	379	465	425	374

Freq. (Hz)	Amplitude (µm)									
	311 - 289	289 - 267	267 - 244	244 - 222	222 - 200	200 - 178	178 - 155	155 - 133	133 - 111	111 - 89
0 - 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 - 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4 - 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6 - 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8 - 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10 - 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12 - 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14 - 15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16 - 17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18 - 19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20 - 21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22 - 23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24 - 25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26 - 27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28 - 29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30 - 31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32 - 33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34 - 35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36 - 37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38 - 39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40 - 41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42 - 43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44 - 45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46 - 47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48 - 49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50 - 51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
52 - 53	0	0	0	0	0	0	0	55	283	25
54 - 55	0	0	0	0	0	0	0	179	1226	723
56 - 57	0	0	0	23	122	131	44	380	2828	1456
58 - 59	0	0	0	0	0	0	0	377	4405	5623
60 - 61	0	0	0	0	0	180	2144	8577	28094	34005
62 - 63	0	0	0	0	0	0	0	88	842	538
64 - 65	0	0	0	0	0	0	0	78	286	77
66 - 67	0	3	34	119	104	69	76	108	302	65
68 - 69	0	0	0	0	0	41	395	562	69	7
70 - 71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
72 - 73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
74 - 75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
76 - 77	0	0	10	49	176	128	124	85	20	1
78 - 79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80 - 81	23	21	13	10	5	2	2	0	0	0
82 - 83	0	0	0	0	0	1	122	469	5	0
84 - 85	22	30	28	7	2	0	0	0	0	0
86 - 87	27	20	20	10	0	0	80	517	2	1
88 - 89	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
90 - 91	0	0	0	0	0	0	272	326	2	1
92 - 93	132	149	152	157	106	59	11	3	0	0
94 - 95	0	0	0	0	0	0	192	404	3	2
96 - 97	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
98 - 99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100 - 101	57	23	7	2	1	3	491	102	4	0
102 - 103	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
104 - 105	0	0	0	0	0	0	524	73	1	1
106 - 107	68	45	23	13	5	1	0	0	0	0
108 - 109	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
110 - 111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
112 - 113	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
114 - 115	0	0	0	0	0	72	493	26	3	0
116 - 117	0	0	0	0	3	310	745	111	47	28
118 - 119	0	0	0	0	59	1423	1812	245	150	56
120 - 121	6	3	2	1	10	470	617	66	5	1
122 - 123	0	0	0	0	28	454	81	9	0	0
124 - 125	0	0	0	0	42	446	60	10	1	0
126 - 127	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	335	294	289	391	663	3790	8285	12850	38578	42610

Freq. (Hz)	Amplitude (µm)				TOTAL DE CICLOS
	89 - 66	66 - 44	44 - 22	22 - 0	
0 - 1	0	0	0	0	250
2 - 3	0	0	0	0	150
4 - 5	0	0	0	0	0
6 - 7	0	0	0	0	72
8 - 9	0	0	0	0	204
10 - 11	0	0	0	0	0
12 - 13	0	0	0	0	313
14 - 15	0	0	0	0	180
16 - 17	0	0	0	0	406
18 - 19	0	0	0	0	894
20 - 21	0	0	0	0	235
22 - 23	0	0	0	0	279
24 - 25	0	0	0	0	282
26 - 27	0	0	0	0	625
28 - 29	0	0	0	0	1382
30 - 31	0	0	0	0	2481
32 - 33	0	0	0	0	1589
34 - 35	0	0	0	0	4034
36 - 37	0	0	0	0	1749
38 - 39	0	0	0	0	7424
40 - 41	0	0	0	0	3725
42 - 43	0	0	0	0	5369
44 - 45	0	0	0	0	8287
46 - 47	0	0	0	0	9407
48 - 49	0	0	190	403	10055
50 - 51	0	196	713	87	12980
52 - 53	52	414	597	394	18289
54 - 55	465	456	3209	1487	28437
56 - 57	760	1659	4897	1414	35090
58 - 59	6707	16794	21370	4494	77295
60 - 61	44090	91570	249789	26418	501381
62 - 63	24	1	0	0	18123
64 - 65	3	0	0	0	18476
66 - 67	5	0	0	0	12905
68 - 69	0	0	0	0	13842
70 - 71	0	0	0	0	5487
72 - 73	0	0	0	0	2753
74 - 75	0	0	0	0	4599
76 - 77	0	0	0	0	2503
78 - 79	0	0	0	0	0
80 - 81	0	0	0	0	1837
82 - 83	1	0	0	0	2428
84 - 85	0	0	0	0	2866
86 - 87	0	0	0	0	2494
88 - 89	0	0	0	0	2743
90 - 91	2	35	562	1	2109
92 - 93	0	0	0	0	2712
94 - 95	0	0	0	0	601
96 - 97	0	0	0	0	0
98 - 99	0	0	0	0	0
100 - 101	0	0	0	0	1622
102 - 103	0	0	0	0	0
104 - 105	0	0	0	0	599
106 - 107	0	0	0	0	782
108 - 109	0	0	0	0	2850
110 - 111	0	0	0	0	12937
112 - 113	0	0	0	0	4640
114 - 115	0	0	0	0	1522
116 - 117	2	0	0	0	1246
118 - 119	0	0	0	0	3745
120 - 121	0	0	0	0	2235
122 - 123	0	0	0	0	572
124 - 125	0	0	0	0	559
126 - 127	0	0	0	0	0
TOTAL	52111	111125	281327	34698	862651