

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE GAMA / FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE**  
**MATERIAIS DA ENGENHARIA**

**FADIGA EM CABOS CONDUTORES TIPO CAL DISPOSTOS EM**  
**FEIXE DUPLO VERTICAL - UM ESTUDO DE CASO PARA UMA**  
**LINHA DE TRANSMISSÃO DE 230 KV**

**RAFAEL FERNANDO MENDONÇA DE ALENCAR**

**ORIENTADOR: JORGE LUIZ DE ALMEIDA FERREIRA**

**COORIENTADOR: JOSÉ ALEXANDER ARAÚJO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM INTEGRIDADE DE**  
**MATERIAIS DA ENGENHARIA**

**PUBLICAÇÃO: FGA.DM - 005A/2013**

**BRASÍLIA/DF: SETEMBRO – 2013**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE GAMA / FACULDADE DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE  
MATERIAIS DA ENGENHARIA**

**FADIGA EM CABOS CONDUTORES TIPO CAL DISPOSTOS EM  
FEIXE DUPLO VERTICAL - UM ESTUDO DE CASO PARA UMA  
LINHA DE TRANSMISSÃO DE 230 KV**

**RAFAEL FERNANDO MENDONÇA DE ALENCAR**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA DA  
FACULDADE GAMA E FACULDADE DE TECNOLOGIA DA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA.**

**APROVADA POR:**

**Profº. Jorge Luiz de Almeida Ferreira, Doutor (ENM-UnB)  
(Orientador)**

---

**Profº. José Alexander Araújo (ENM-UnB)  
(Co-Orientador)**

---

**Profº. Daniel Monteiro Rosa (ENM-UnB)  
(Examinador Interno)**

---

**Profº. Antônio Manoel Dias Henriques (ENM-UnB)  
(Examinador Externo)**

---

**BRASÍLIA/DF, 30 DE SETEMBRO DE 2013.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

RAFAEL FERNANDO MENDONÇA DE ALENCAR

Fadiga em Cabos Condutores tipo CAL Dispostos em Feixe Duplo Vertical - Um Estudo de Caso Para uma Linha de Transmissão de 230 kV [Distrito Federal] 2013.

102p., 210 x 297 mm (FGA/FT/UnB, Mestre, Integridade de Materiais da Engenharia, 2013).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade do Gama/Faculdade de Tecnologia.

Programa de Pós-Graduação em Integridade de Materiais da Engenharia.

1.Linha de Transmissão

2.Condutores

3.CAL 6201

3.Vibrógrafo

**I. FGA/FT/UnB**

**II. GAMA**

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Alencar, R.F.M. Fadiga em Cabos Condutores tipo CAL Dispostos em Feixe Duplo Vertical - Um Estudo de Caso Para uma Linha de Transmissão de 230 kV Dissertação de Mestrado em Integridade de Materiais de Engenharia. Publicação FGA.DM - 005A/2013, Programa de Pós-Graduação em Integridade de Materiais da Engenharia, Universidade de Brasília – Faculdade do Gama/Faculdade de Tecnologia, Brasília, DF, 102p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Rafael Fernando Mendonça de Alencar

TÍTULO: Fadiga em Cabos Condutores tipo CAL Dispostos em Feixe Duplo Vertical - Um Estudo de Caso Para uma Linha de Transmissão de 230 kV

GRAU: Mestre

ANO: 2013

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

---

Rafael Fernando Mendonça de Alencar

## AGRADECIMENTOS

*Agradeço a Deus pelas oportunidades que me foram dadas na vida e por ter guiado e iluminado meu caminho para que pudesse concluir mais um projeto na minha vida.*

*Aos meus pais, meu verdadeiro porto seguro, que nunca mediram esforços para ver meus olhos brilhando e que sempre me ensinaram a lutar e persistir, mesmo diante de adversidades.*

*Aos meus irmãos Gabriel e Pedro por compreenderem tantas vezes minha indisponibilidade.*

*A minha namorada Fernanda Fernandes, por toda dedicação, paciência, amor e atenção dedicadas a mim em todo o tempo que estamos juntos, meu imenso agradecimento, carinho e amor.*

*Ao meu orientador Prof. Dr. Jorge Luiz de Almeida Ferreira, por todo incentivo, apoio, orientação, amizade e confiança em meu projeto. Pessoa de coração enorme, que me acolheu e me ensinou nesses anos de convívio.*

*Ao meu coorientador Prof. Dr. José Alexander Araújo, pela amizade e pelas inúmeras ajudas, ideias e bate-papos que tanto contribuíram não só na realização deste trabalho, como para minha carreira profissional.*

*Aos colegas, Silmar, Pereira, Marcão, Wesley, Arthur, Xavier, Tarsis, Carlão, Colegas de trabalho do laboratório de processos de fabricação, no bloco SG-9 da Universidade de Brasília, um agradecimento por todo esforço prestado nas horas boas e ruins.*

*As minhas amigas de Laboratório Thamise, Larissa e Profa. Aida por toda ajuda conversas e conselhos durante todos esses anos.*

*A todos os professores do curso de Engenharia Mecânica, pela paciência, dedicação e ensinamentos disponibilizados nas aulas, cada um de forma especial contribuiu para a conclusão desse trabalho e conseqüentemente para minha formação profissional.*

*Por fim, gostaria de agradecer aos meus amigos e familiares, pelo carinho e pela compreensão nos momentos em que a dedicação aos estudos foi exclusiva, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para que esse trabalho fosse realizado, meu eterno agradecimento.*

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma avaliação crítica sobre a ocorrência de falhas por fadiga dos cabos condutores de alumínio liga 6201, dispostos em feixe duplo vertical, instalados em uma linha de transmissão de 230Kv localizada no Centro-Oeste brasileiro. Neste sentido, inicialmente far-se-á uma revisão bibliográfica sobre o fenômeno de fadiga por *fretting* em cabos condutores de energia, apresentando-se também as metodologias de projeto contra fadiga em cabos e das técnicas de avaliação da severidade da vibração em cabos condutores. Após a revisão, conduz-se uma avaliação da severidade da vibração eólica e do risco contra fadiga das linhas de transmissão por meio da análise de dados obtidos em campo com vibrógrafos. A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que, dentre outros fatores, o condutor apesar de ser um cabo reconhecidamente com ótima resistência estática possui uma durabilidade contra fadiga muito baixa, que aliada a alta incidência de ventos e a presença de espaçadores rígidos contribuiu para a aparição das falhas prematuras por fadiga do condutor. Este resultado prova que as falhas não ocorreram por falha no projeto ou na construção da linha, mas sim, por uma combinação de fatores impossíveis de serem detectados antes da construção.

*Palavras-chave: Linha de transmissão, Condutores, CAL 6201, Vibrógrafo, Análise de falha, Estudo de caso.*

## **ABSTRACT**

This paper presents a critical review on the occurrence of fatigue failures of 6201 alloy aluminum conductor's, arranged in vertical double beam, installed in a 230Kv transmission line located in Central-Western Brazil. In this sense, initially will be done a literature review on the phenomenon of fatigue by fretting on cables power conductors, performing project methodologies against fatigue in cables and at the techniques of evaluation of vibration severity in wire. After reviewing an assessment, leads the severity of wind vibration and fatigue against risk of transmission lines through the analysis of data obtained in field with vibration recorders. From the results obtained, it can be concluded that, although the cable have a great static resistance it has a low durability against fatigue, which combined with high incidence of winds and the presence of rigid spacers contributed to the appearance of premature failures.

*Keywords: Transmission line, Conductors, CAL 6201, Vibration Recorder, Failure analysis, Case Report.*

# SUMÁRIO

<b>1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 - MOTIVAÇÃO .....	2
1.2 - OBJETIVOS .....	3
1.3 - ESTADO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO NO BRASIL .....	3
1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	7
<b>2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>8</b>
2.1 - CONTEXTUALIZAÇÃO DA FADIGA EM MATERIAIS .....	8
2.2 - DEFINIÇÃO DE CICLO DE CARREGAMENTO.....	11
2.3 - DETERMINAÇÃO DA CURVA S-N .....	12
2.4 - EFEITO DA TENSÃO MÉDIA SOBRE A VIDA EM FADIGA .....	14
2.5 - FADIGA EM CABOS CONDUTORES .....	16
2.5.1 - FADIGA POR FRETTING .....	17
2.6 - VIBRAÇÃO EÓLICA.....	19
2.7 - FÓRMULA DE POFFENBERGER-SWART – ESTIMATIVA DA TENSÃO EM CABOS CONDUTORES .....	23
2.7.1 - HISTÓRICO DA FORMULAÇÃO .....	24
2.7.2 - FÓRMULA MATEMÁTICA .....	25
2.8 - DETERMINAÇÃO DA TENSÃO NOMINAL NO FIO MAIS SOLICITADO.....	29
2.9 - CRITÉRIOS DE PROJETO DE FADIGA APLICADOS A LINHAS DE TRANSMISSÃO .....	30
2.9.1 - CIGRÉ WG 22-04 .....	31
2.9.2 - IEEE .....	34
2.9.3 - EPRI .....	35
<b>3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>37</b>
3.1 - IDENTIFICAÇÃO DO CASO ESTUDADO .....	38
3.1.1 - DESCRIÇÃO DO TERRENO .....	38
3.1.2 - VIBRÓGRAFO PAVICA.....	39
3.1.3 - POSICIONAMENTO DOS VIBRÓGRAFOS .....	41
3.2 - BASE NORMATIVA .....	44
3.2.1 - NORMA ABNT NBR 5422/85 – PRINCIPAIS PONTOS.....	44
3.3 - CARACTERÍSTICAS DOS CABOS.....	45

3.3.1 - CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA LIGA.....	46
3.3.2 - CARACTERÍSTICAS DO CONDUTOR .....	46
3.4 - PROCEDIMENTO PARA ESTIMATIVA DA VIDA REMANESCENTE.....	47
<b>4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>50</b>
4.1 - ANÁLISES DE RESISTÊNCIA À FADIGA .....	50
4.1.1 - ANÁLISE 1.....	50
4.1.2 - ANÁLISE 2.....	51
4.2 - POSSIVEL HIPÓTESE DA RUPTURA PREMATURA POR FADIGA NA LT.....	53
4.2.1 - PRIMEIRO FATOR – INFLUÊNCIA DO MATERIAL .....	53
4.2.2 - SEGUNDO FATOR – DOBRAMENTO DO CONDUTOR NO ESPAÇADOR .....	54
4.2.3 - TERCEIRO FATOR – INCIDÊNCIA CONSTANTE DE VENTOS.....	55
4.3 - QUANTIFICAÇÃO DAS TENSÕES MÉDIAS CAUSADAS PELOS ESPAÇADORES .....	56
4.4 - ANÁLISE DAS FALHAS.....	57
4.4.1 - MAPEAMENTO DA POSIÇÃO E DA ORDEM DE OCORRÊNCIA DAS FALHAS .....	57
4.4.2 - POSICIONAMENTO DAS FALHAS EM RELAÇÃO ÀS CAMADAS .....	58
4.4.3 - POSICIONAMENTO DAS FALHAS EM RELAÇÃO AO GRAMPO .....	63
4.4.4 - AVALIAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE FALHA.....	66
<b>5 - CONCLUSÕES .....</b>	<b>81</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>83</b>
<b>APÊNDICE A - PROCEDIMENTO DE CÁLCULO (LOCAL 2) .....</b>	<b>86</b>
<b>APÊNDICE B – PROCEDIMENTO DE CALCULO (ANÁLISE 2).....</b>	<b>87</b>



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Custo por nível de tensão dos principais componentes das linhas de transmissão (R\$/Km) – (Frontin, <i>et al</i> , 2010). .....	6
Tabela 2 – Comparação dos tipos de movimentos cíclicos dos condutores (Rawlings, 1979). .....	23
Tabela 3 – Limites de resistência para o cabo de alumínio liga 6201 com duas ou mais camadas de fios de alumínio para o método IEEE.....	35
Tabela 4 – Grau de influência do tipo de terreno para medição de vibração eólica. (ABNT – NBR 5422/85) .....	39
Tabela 5 – Cargas máximas recomendadas para cabos na condição de trabalho de maior duração, sem dispositivos de proteção contra vibração. ....	44
Tabela 6 – Composição química das ligas de alumínio 1350 e 6201 (Disponível em: < <a href="http://www.matweb.com">www.matweb.com</a> >. Acesso em: 5/8/2013). .....	46
Tabela 7 – Propriedades mecânicas básicas do condutor de alumínio liga 6201 utilizado na linha de transmissão (Relatório de monitoramento em campo das vibrações eólicas fornecido pela empresa.) .....	47
Tabela 8 – Previsão de do condutor para os resultados originais e para as amplitudes de deslocamento multiplicadas pelo fator 2.....	57
Tabela 9 – Ordem das falhas por camada.....	60
Tabela 10 – Posicionamento da falha em relação ao grampo.....	62
Tabela 11 – Posição das falhas nos fios das amostras dos cabos ensaiados.....	64
Tabela 12 – Tipologia das falhas.....	70
Tabela 13 - Percentual de composição química.....	80

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama geral da rede de linha de transmissão do SIN (Sistema Interligado Nacional, 2013).....	4
Figura 2 – Estágios da propagação da trinca por fadiga (modificado de Lee et al., 2005).....	9
Figura 3 – Representação clássica dos ciclos de tensão (Murça, 2011). ....	11
Figura 4 – (a) Ciclo com amplitude de tensão constante alternado (b) Ciclo com amplitude de tensão pulsante (c) Ciclos com amplitude de tensão variáveis em bloco (d) Ciclos com amplitude de tensão variável e irregular - (Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas aplicadas a linhas de transmissão, 2010). ....	12
Figura 5 – Curvas S-N esquemáticas para um aço de baixo teor de carbono e uma liga de alumínio (modificada - Branco, 1986).....	13
Figura 6 – Gráfico comparativo dos modelos de Gerber, Goodman, Soderberg, Morrow e SWT (Fadel, 2010). ....	16
Figura 7 – (a) Secção transversal em um cabo ACSR, (b) Contato entre fio e o grampo (Murça, 2011). ....	17
Figura 8 – Configuração esquemática do problema de contato entre dois cilindros (equivalente a dois fios de camadas distintas no cabo) (Fadel, 2010).....	18
Figura 9 – Detalhe das marcas de <i>fretting</i> . ....	18
Figura 10 – Efeito do aumento do número de Reynolds sobre os padrões de fluxo de ar em volta de um condutor cilíndrico (EPRI, 1979).....	21
Figura 11 – Curva de deflexão do cabo considerando o grampo rígido (modificado – Poffenberger, 1965). ....	25
Figura 12 – Curva de deflexão (modificado – Poffenberger, 1965).....	26
Figura 13 – Curvas de carregamento e de deflexão para subcasos para resolução do caso geral (Modificado – Poffenberger, 1965). ....	26
Figura 14 – Montagem esquemática cabo/grampo mostrando a posição padrão para medida de amplitude de deslocamento $Y_b$ (Murça, 2011).....	29
Figura 15 – Curva <i>Safe Border Line</i> , bem como as demais curvas compiladas pela Cigré em 1979. ....	31
Figura 16 – Exemplo de uma curva S-N típica e quatro diferentes níveis de sollicitação (Domingues, 2003). ....	34
Figura 17 – Vibrógrafo Pavica. ....	40

Figura 18 – Figura esquemática do Pavica (Manual de instrução do pavica – modificado).....	41
Figura 19 – (a) Esquemático da montagem dos PAVICAS (b) Detalhe da montagem dos pavicas no Local 1(c) Detalhe da montagem do pavicas no Local 2.....	42
Figura 20 – (a) Esquemático da montagem dos PAVICAS instalados próximos das garras dos amortecedores. (b) Detalhe da montagem do PAVICA.....	43
Figura 21 – Foto com detalhe do sistema de amortecimento mostrando a presença de mais de um amortecedor próximo a uma torre de ancoragem.....	45
Figura 22 – Modelo da matriz gerada pelo medidor de vibração PAVICA .....	48
Figura 23 – Modelo esquemático procedimento de cálculo da vida remanescente. ....	49
Figura 24 – Distribuição de megaciclos por ano da situação mais severa da análise 1.....	50
Figura 25 – Número de megaciclos por ano para cada faixa de deformação (pico a pico) para a situação mais severa. ....	51
Figura 26 Número de megaciclos por ano para cada faixa de deformação (pico a pico) para a situação mais severa. ....	52
Figura 27 Número de megaciclos por ano para cada faixa de deformação (pico a pico) para a situação mais severa. ....	53
Figura 28 – Curva comparativa do condutor Liga 1350 com a curva do condutor Liga 6201.....	54
Figura 29 – Diferentes configurações da montagem do espaçador entre cabos (a) espaçamento entre cabos maior que o espaçador (b) Montagem ideal (c) espaçamento entre cabo menos que o espaçador. ....	55
Figura 30 – Percentagem de vida consumida do cabo por faixa de frequência/faixa de velocidade de vento .....	56
Figura 31 – Gráfico mostrando a rotação do cabo que indica o momento das quebras (Fadel, 2010). ....	58
Figura 32 – Detalhe da amostra com falha na camada externa. ....	59
Figura 33 – Detalhe da amostra com falha na camada interna. ....	59
Figura 34 – Distribuição das falhas por camada para todos os ensaios e até a 4ª quebra. ....	61
Figura 35 – Percentuais das falhas externas e internas para cada nível de deslocamento dinâmico. ....	61
Figura 36 – Evidência de desgaste no topo do cabo. ....	63
Figura 37 – Localização da distância das falhas (Fadel, 2010). ....	63

Figura 38 – Referencial para medição da posição da falha (Fadel, 2010).....	64
Figura 39 – Distância média total das falhas. ....	65
Figura 40 – Análise da distância média das falhas (DMF) nos fios de alumínio por $Y_b$ .....	66
Figura 41 – Detalhe do grampo de suspensão após o ensaio.....	67
Figura 42 – Quebras nas camadas internas sobre as marcas elípticas de <i>fretting</i> ....	68
Figura 43 – “Montes” formados pela acumulação de material devido ao <i>fretting</i> ..	68
Figura 44 – Vista do desgaste avançado dos fios de alumínio. ....	69
Figura 45 – Tipos de falhas catalogadas.....	69
Figura 46 – (a) Falha quasi-plana na camada externa (b) Detalhe da falha quase-plana .....	71
Figura 47 – (a) Falha “V” na camada interna (b) Detalhe da falha em “V” com a marca de <i>fretting</i> .....	71
Figura 48 – (a) Falha 45° na camada interna (b) Detalhe da falha em 45° .....	72
Figura 49 – Número de falhas de acordo com a tipologia quasi-plana, em V e 45°.....	72
Figura 50 – Distribuição da tipologia da falha de acordo com as amplitudes de vibração. ....	73
Figura 51 – Micrografia de topo da falha na base do condutor realizada no MEV – Falha 45°.....	74
Figura 52 – (a) Detalhe da marca de <i>fretting</i> devido ao contato do condutor com o grampo na base (b) Detalhe de marca de <i>fretting</i> devido ao contato exclusivamente lateral fio-fio na base. ....	75
Figura 53 – Possíveis marcas de rio encontradas na proximidade da marca de <i>fretting</i> 2. ....	76
Figura 54 – Tipologia da falha localizada na base do condutor. ....	76
Figura 55 – Microscopia de topo da amostra entre fios.....	77
Figura 56 – (a) Aumento microscópico de 50 vezes na região da marca de <i>fretting</i> (b) Aumento microscópico de 110 vezes na região da marca de <i>fretting</i> .....	78
Figura 57 - Micrografia da falha do fio usando o detector de elétrons retro espalhados com indicação da fadiga por <i>fretting</i> e zona de acumulação de óxido. ....	78
Figura 58 - Pontos onde foi realizada a composição química do material. ....	79
Figura 59 - Composição química encontrada no ponto 1. ....	79
Figura 60 - Composição química encontrada no ponto 2. ....	80

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos Gregos

$\sigma'_f$	Coefficiente de Resistência à Fadiga
$\Delta_\sigma$	Intervalo de Tensões
$\sigma_y$	Limite de Escoamento
$\sigma_{f0}$	Limite de Fadiga
$\sigma_{US}$	Limite de Resistência
$\sigma_a$	Tensão Alternada
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão Máxima
$\sigma_m$	Tensão Média
$\sigma_{min}$	Tensão Mínima
$\tilde{\sigma}_{fb}$	Tensão Verdadeira de Resistência à Fratura por Fadiga

### Símbolos Latinos

$Y_b$	Amplitude de deslocamento do condutor pico-a-pico
$A_f$	Braço de Flexão
$T$	Carga de esticamento
$Y_D$	Deslocamento diferencial de extensômetros
$d$	Diâmetro do condutor
$d_{fio}$	Diâmetro do fio
$d_s$	Diâmetro do fio de aço
$d_a$	Diâmetro do fio de alumínio
$K$	Fator Intensidade de tensão
$St$	Frequência de strouhal
$f$	Frequência dos vórtices
$Hz$	Hertz
$MPa$	Mega Pascal
$m$	Metro
$E_s$	Módulo de elasticidade do aço
$E_a$	Módulo de elasticidade do alumínio
$N_i$	Número de ciclos necessários para causar a falha em um nível de tensão
$n_s$	Número de fios de aço

$n_a$	Número de fios de alumínio
Re	Número de reynolds
$N_{sb}$	Número de sub-condutores
$n_i$	Número parcial de ciclos aplicados em um nível de tensão
km	Quilometro
kV	Quilovolt
RA	Razão de amplitude
$r_i$	Razão de ciclos correspondente a um nível de tensão
R	Razão de tensão
EI	Rigidez de flexão do cabo
s	Segundo
$K_c$	Tenacidade a fratura
w	Trabalho parcial absorvido
W	Trabalho total absorvido
v	Velocidade do escoamento
$\nu$	Viscosidade cinemática do fluido

## LISTA DE ABREVIACÕES

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ACSR	<i>Aluminium Conductor Steel-Reinforced</i>
AA	<i>Aluminum Alloy</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA	Cabo de Alumínio
CAA	Cabo de Alumínio com Alma de Aço
CAA-EF	Cabo de Alumínio com Alma de Aço – Extra Forte
CAL	Cabo de Alumínio Liga
CALA	Cabo de Alumínio Reforçado com Alumínio Liga
CSBL	<i>Cigre Safe Border Line</i>
DF	Distância Até a Falha
DMF	Distância Média da Falha

EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EDS	<i>Every Day Stress</i>
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i>
HFC	<i>High Cycle Fatigue</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IACS	<i>International Annealed Copper Standard</i>
LT	Linha de Transmissão
LCF	<i>Low Cycle Fatigue</i>
MFEP	Mecânica da Fratura Elasto-Plástica
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica
NBR	Norma Brasileira
P-S	Poffenberger & Swart
QP	Quasi-Plana
SIN	Sistema Interligado Nacional
WG	<i>Work Group</i>

# 1 - INTRODUÇÃO

No Brasil, as linhas de transmissão são, em grande parte, caracterizadas pelas suas grandes estruturas e por suas grandes distâncias percorridas. Devido a este fato, estão altamente expostas às influências exercidas pelo meio ambiente como, por exemplo, os ventos, chuvas, calor, pressão, etc. Entre os fenômenos da natureza citados, o vento é o fator de maior relevância no processo de fadiga em cabos, pois a ocorrência deles provoca vibrações aleatórias, também chamadas de vibrações eólicas, nos cabos de transmissão.

A vibração eólica é um dos mais importantes problemas em linhas de transmissão porque ela representa a principal causa de falha de fadiga de condutores ou de itens associados com o uso, suporte e proteção do condutor. Nesse fenômeno, ocorrem falhas por fadiga localizadas em grampos de suspensão ou em outros dispositivos instalados no condutor como espaçadores, amortecedores de espaçador, amortecedores e outros dispositivos.

Forças induzidas devido ao surgimento de vórtices são a causa deste tipo de vibração. Do ponto de vista aerodinâmico e aeroelástico, a resposta do condutor à excitação, provocada pelo surgimento de vórtices, é fortemente não linear em termos da sua amplitude de vibração. Esta não linearidade está diretamente relacionada com os parâmetros do condutor e com as características do vento que incide sobre ele, tornando assim o problema complexo.

Além disso, algumas diferenças surgem na mecânica do fenômeno dependendo se o condutor está disposto em feixe único ou em configurações onde são apresentados mais de dois condutores, tanto na horizontal quanto na vertical.

Nesse fenômeno, as amplitudes de vibração máxima podem ser tão baixas quanto o diâmetro do condutor sendo elas as responsáveis por causar a fadiga dos fios dos condutores devido à flexão. O problema pode ser reduzido com o controle da amplitude de vibração do condutor, buscando-se manter a tensão imposta abaixo do limite de resistência de fadiga. Esse controle adequado pode ser alcançado com a quantidade correta de amortecimento presente no sistema e, se necessário, um amortecimento adicional pode ser introduzido, sob a forma de dispositivos de amortecimento, como amortecedores e espaçadores-amortecedores.

Nesse contexto, pode-se observar que o processo de fadiga nos cabos condutores está relacionado a uma série de variáveis, tais como: geometria do grampo de suspensão, variação na carga de esticamento do cabo (carga média), carga de aperto no grampo,



carregamentos provocados por vibrações eólicas, etc. Portanto, dependendo do peso da influência de cada variável, cabos sobre condições de carregamentos dinâmicos idênticos podem romper em períodos completamente diferentes.

Com a quantificação da influência de cada uma destas variáveis no processo de fadiga, é possível a utilização e o desenvolvimento de novas técnicas de projeto e planos de manutenção mais apropriados, minimizando os riscos de falhas e os custos de novas linhas de transmissão.

Este novo ponto focal, no desenvolvimento e na utilização de novas técnicas de projeto e planos de manutenção, visa corresponder às expectativas de seus usuários. Entre elas existem as técnicas aplicadas à confiabilidade como a FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) e a FTA (*Fault Tree Analysis*), que tem suas aplicações voltadas para a melhoria de um produto, detecção e bloqueio das causas de falhas potenciais, aumento da competição, sofisticação e padrão de consumo, aumento do desempenho, entre outros. A compreensão da degradação dos materiais devido à fadiga é crítica em inúmeras aplicações quando se pretende garantir a confiabilidade em longo prazo de um componente ou estrutura (Post & Case, 2008), toda esta preocupação se justifica pelo fato de que falhas podem causar grandes perdas econômicas, danos ambientais e podem até comprometer vidas humanas.

Quando tratamos da avaliação da vida de fadiga em cabos condutores de energia elétrica utilizamos os procedimentos recomendados pelo Comitê de Estudos 22 do grupo de trabalho 04 – WG -22/04 (CIGRÉ, 1985). Este procedimento leva em consideração o uso de uma metodologia para estimativa da vida útil do cabo, utilizando basicamente a teoria de acúmulo de dano de Palmgren-Miner (1945) associada à curva S-N do conjunto grampo-cabo.

Neste presente estudo de caso, iremos utilizar os procedimentos descritos no WG - 22/04 da CIGRÉ para realizar os cálculos da previsão de vida em fadiga do condutor de alumínio liga 6201 levando em consideração a matriz de deslocamentos adquirida por um vibrógrafo instalado em campo. Além disso, utilizaremos outros critérios de projeto para análise da linha.

## **1.1 - MOTIVAÇÃO**

A motivação deste trabalho consiste em realizar a análise do projeto de uma linha de transmissão, situada no centro-oeste brasileiro, onde ocorreram falhas prematuras nos

condutores de alumínio liga 6201 dispostos em feixe duplo vertical e propor as possíveis causas dessas falhas.

Esta motivação surgiu após a ocorrência das falhas nos condutores de alumínio liga, em um curto espaço de tempo e com um período de instalação de aproximadamente 2 anos - fato totalmente inesperado, pois os projetos de linhas de transmissão são realizados para uma vida média de aproximadamente 30 anos.

## **1.2 - OBJETIVOS**

O presente estudo tem como objetivo geral conduzir uma avaliação crítica das condições de projeto contra fadiga de uma linha de transmissão que utiliza cabos de alumínio liga 6201 dispostos em feixe vertical.

Outro objetivo constante no trabalho é a condução de uma revisão sobre as diferentes metodologias existentes para o projeto e manutenção de linhas de transmissão de energia quanto à fadiga sob condições de *fretting* e logo após:

- i. Aplicar esses critérios às condições de projeto da LT em estudo utilizando dados reais medidos por vibrógrafos instalados em trechos críticos da linha.
- ii. Calcular a vida remanescente do cabo alumínio liga 6201 utilizando matrizes amplitude versus frequência, coletadas em campo por meio de aparelhos vibrógrafos instalados em campo.
- iii. Identificar os possíveis fatores que provocariam a fadiga prematura da linha.

Após o estudo realizado sobre a linha de transmissão será realizada a análise experimental do desempenho do cabo de alumínio liga 6201.

## **1.3 - ESTADO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO NO BRASIL**

O Brasil, devido seu alto potencial hídrico, se enquadra como um dos maiores geradores de energia hidrelétrica do mundo, hoje, então em operação mais de 180 grandes usinas, responsáveis por quase 70% da produção nacional de energia elétrica. Estes números fazem do País o segundo maior produtor de energia hidrelétrica no mundo, com 12% da geração mundial, perdendo apenas para a China. (Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2013).

Com o avanço do desenvolvimento do Brasil, percebeu-se que era preciso realizar um projeto ambicioso de interligação dos subsistemas de transmissão nacional. Esta ligação era necessária devido ao fato de que os potenciais de geração de energia se



O crescimento médio anual do consumo de energia elétrica entre 1995 e 2011, no Brasil, foi cerca de 3,5%, sendo que neste último ano foi alcançado o patamar de carga de 433,34GWh. (Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2013).

Em termos de capacidade de geração, nosso país tem hoje cerca de 119GW de potência instalada e nos próximos anos espera-se um aumento de capacidade da ordem de 47GW, proveniente de empreendimentos. (Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL)

Depois de deixar a usina, independentemente do tipo da fonte (hidrelétricas, termoelétricas, fonte nuclear, eólicas, etc.) a energia elétrica trafega nas linhas de transmissão em tensões que variam de 13,8kV a 750kV. No projeto dessas linhas de transmissão busca-se atender aos requisitos de planejamento do sistema, ou seja, deseja-se que uma determinada potência seja transmitida em regime normal de operação, com determinados níveis de tensão, ao menor custo final, com baixo impacto ambiental e social, altos índices de confiabilidade, atendendo a requisitos técnicos elétricos e mecânicos.

Com isso, a Tabela 1 apresenta as características básicas das linhas de transmissão de 230kV a 600kV referindo-se principalmente aos custos totais e parciais por unidade de comprimento, sendo estes custos um fator importante para o estudo e projeto de cabos condutores.

A partir da análise da Tabela 1 podemos concluir que o cabo condutor corresponde a em torno de 35,0% da composição dos custos das linhas de transmissão, sendo esse, de fundamental importância para ela. Vale ressaltar que nesse valor não está incluso o custo das supervisões das linhas de transmissão, que é uma atividade arriscada, que exige equipes especializadas sendo assim, envolvendo também um custo elevado. Os cabos condutores empregados para estimativas orçamentárias das linhas de transmissão adotam como padrão o condutor de alumínio com alma de aço.

A precificação do cabo condutor quanto ao custo de aquisição baseia-se no peso por quilômetro de linha, que varia com o tipo de cabo, área de seção transversal, formação do cabo e número de sub-condutores de fase.

Com relação ao custo de instalação do cabo condutor, ele também é dado em termos globais por quilômetro de linha, abrange o lançamento, nivelamento e grampeamento do cabo, e a instalação das cadeias de isoladores e outros acessórios, tais como: amortecedores, espaçadores-amortecedores, conjuntos de emenda, luvas de reparo e outros. Este custo, em média, é determinado pela aplicação do percentual de 15% sobre o valor de aquisição dos cabos condutores.

Tabela 1 – Custo por nível de tensão dos principais componentes das linhas de transmissão (R\$/Km) – (Frontin, *et al*, 2010).

Tensão	230 kV CD	%	500 kV CS	%	500 kV CD	%	± 600 kV cc	%
Projeto	7.955,77	1,86	4.178,87	0,78	6.371,96	0,49	1.816,84	0,24
Levant. Topográfico	2.123,20	0,5	3.228,46	0,6	4.036,16	0,31	2.578,94	0,35
Sondagens	2.099,86	0,49	917,13	0,17	2.758,38	0,21	1.067,36	0,14
Meio Ambiente	12.450,04	2,91	12.721,14	2,38	35.088,79	2,7	37.023,15	4,97
<b>Total Engenharia</b>	<b>24628,87</b>	<b>5,76</b>	<b>21045,6</b>	<b>3,93</b>	<b>48255,29</b>	<b>3,72</b>	<b>42486,29</b>	<b>5,71</b>
Suporte Estruturas	54.770,45	12,82	83.513,50	15,61	239.535,30	18,46	98.783,16	13,27
Suporte Fundação	6.073,78	1,42	4.169,15	0,78	6.175,19	0,48	4.273,68	0,57
<b>Cabo Condutor</b>	<b>151.605,85</b>	<b>35,47</b>	<b>167.218,49</b>	<b>31,25</b>	<b>393.253,40</b>	<b>30,3</b>	<b>291.905,30</b>	<b>39,21</b>
Cabo para-raios	8.523,54	1,99	16.551,71	3,09	20.005,43	1,54	15.877,89	2,13
Contrapesos	1.324,34	0,31	6.769,79	1,27	5.738,43	0,44	1.825,46	0,25
Ferragens cadeias	41.958,60	9,82	12.724,40	2,38	38.001,98	2,93	19.146,14	2,57
Isoladores	8.302,97	1,94	15.189,07	2,84	30.468,09	2,35	21.247,13	2,85
Espaçador (amortec)	7.318,51	1,71	5.157,27	0,96	4.478,30	0,35	8.014,73	1,08
Acessórios	2.692,32	0,63	10.454,51	1,95	5.762,08	0,44	20.282,11	2,72
<b>Total Material</b>	<b>282570,36</b>	<b>66,12</b>	<b>321747,89</b>	<b>60,14</b>	<b>743418,2</b>	<b>57,28</b>	<b>481355,6</b>	<b>64,65</b>
Faixa de Servidão	13.055,49	3,05	23.638,68	4,42	104.392,50	8,04	20.751,58	2,79
Execução fundações	25.396,09	5,94	74.150,78	13,86	209.915,20	16,17	57.486,32	7,72
Montagem e suportes	39.580,60	9,26	37.139,06	6,94	94.255,40	7,26	42.915,39	5,76
Instalação cabos e Acess.	10.962,41	2,56	35.803,95	6,69	41.407,94	3,19	56.952,63	7,65
Instal. Contrapeso	1.211,13	0,28	4.070,01	0,76	18.418,96	1,42	5.893,68	0,79
<b>Total Const. e Mont.</b>	<b>90205,72</b>	<b>21,11</b>	<b>174802,48</b>	<b>32,67</b>	<b>468390</b>	<b>36,09</b>	<b>183999,6</b>	<b>24,71</b>
Administr e Fiscaliz.	8.439,65	1,97	10.734,44	2,01	22.507,30	1,73	23.219,31	3,12
Eventuais	21.543,94	5,04	6.690,87	1,25	15.270,85	1,18	13.473,68	1,81
<b>TOTAL GERAL</b>	<b>427388,54</b>	<b>100</b>	<b>535021,28</b>	<b>100</b>	<b>1297841,64</b>	<b>100</b>	<b>744534,48</b>	<b>100</b>

Conforme proposto no livro prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas aplicadas a linhas de transmissão a Fórmula 1 pode ser utilizada para estimar o custo de aquisição de cabos condutores.

$$A_{\text{Condutores}} \left[ \frac{\text{R\$}}{\text{km}} \right] = N_{\text{sb}} \times \text{Peso do cabo condutor} \left[ \frac{\text{t}}{\text{km}} \right] \times 1000 \times \text{Custo do cabo condutor} \left[ \frac{\text{R\$}}{\text{kg}} \right] \quad (1)$$

onde  $N_{\text{sb}}$  é o número de sub-condutores do sistema.

Tendo em vista as altas multas aplicadas às empresas de geração e transmissão de energia elétrica em casos de indisponibilidade (parcela variável) e as grandes despesas geradas na ação de reparar os danos ocorridos nas linhas, um estudo que visa fornecer dados quanto à duração dos cabos condutores de energia é de fundamental importância.

## **1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

Capítulo 1 – Neste capítulo foi apresentada a motivação do trabalho e também realizada uma introdução ao tema proposto. Além disso, foi realizada uma breve revisão sobre o estado das linhas de transmissão no Brasil e expostos os objetivos.

Capítulo 2 – O segundo capítulo do trabalho visa fornecer ao leitor subsídios teóricos para um melhor entendimento do problema de fadiga em cabos condutores e critérios de projeto de fadiga aplicados a linhas de transmissão. O capítulo traz uma revisão sobre fadiga em cabos condutores e uma abordagem conceitual dos fatores que influenciam na vida remanescente dos cabos condutores sobre influência eólica.

Capítulo 3 – Neste capítulo são apresentados os dados referentes à linha de transmissão em estudo, bem como a base normativa existente e as características básicas do condutor.

Capítulo 4 – No quarto capítulo, primeiramente, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos dados fornecidos pela empresa relativos à linha de transmissão em estudo. Também é relatada a possível hipótese para o rompimento dos condutores e realizada a análise das falhas dos condutores de alumínio liga 6201 ao se levantar a curva S-N.

Capítulo 5 – No último capítulo do trabalho são apresentadas as conclusões do presente estudo e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem por objetivo situar o leitor no campo de estudos da fadiga de materiais para um melhor entendimento desse problema vinculado à fadiga em cabos condutores. Nele poderemos encontrar uma revisão dos conceitos de fadiga e uma abordagem dos fatores que influenciam na vida remanescente de cabos condutores quando estão sobre a influência da vibração eólica.

### 2.1 - CONTEXTUALIZAÇÃO DA FADIGA EM MATERIAIS

A história da fadiga se iniciou com o alemão W. A. J. Albert, que em 1829 publicou o primeiro resultado de teste de fadiga conhecido (Schutz, 1996). Para tal, Albert construiu uma máquina de ensaios para avaliar a fadiga em correntes de um transportador que falharam em serviço.

August Wöhler, porém, foi o primeiro a fazer uma investigação sistemática sobre a fadiga, medindo as cargas de serviço em eixos ferroviários com medidores de deflexão capazes de aplicar carregamentos de torção e flexão rotativa. Esse trabalho foi realizado durante o período de 1858 e 1870 em Berlim.

Utilizando dados obtidos por Wöhler, O. H. Basquin em 1910 desenvolveu e publicou leis empíricas caracterizando a relação entre tensão alternada aplicada sobre um componente mecânico e a sua vida. Esses diagramas são conhecidos como curvas tensão-vida (curvas S-N) ou curvas de Wöhler.

A partir desse diagrama Basquin mostrou que existe uma relação linear, em um gráfico log-log, da tensão com o número de ciclos até a falha. Além disso, observou que a vida em fadiga do componente diminui com o aumento das amplitudes de tensão e que abaixo de certa amplitude de tensão, o eixo não apresentava fratura (Schutz, 1996).

Com o avanço dos estudos, hoje, a ASTM (*American Society for Testing and Materials*) em sua norma ASTM STP E1823, define que: “Fadiga é um processo de alteração estrutural permanente, progressivo e localizado, que ocorre em um material sujeito a condições que produzem tensões ou deformações cíclicas em um ponto ou em vários pontos, e que pode culminar em trincas ou em uma fratura completa após um número suficiente de variações de carga”.

O processo de fadiga pode ser dividido em quatro fases: nucleação da trinca, crescimento microscópico da trinca, propagação estável ou controlada da trinca e propagação instável final.

O entendimento do período de nucleação da trinca ainda não está bem consolidado e é objeto de muitos estudos e pesquisas tanto no âmbito acadêmico quanto industrial. A dificuldade no entendimento desta fase do processo de fadiga ocorre pelo fato dessa fase envolver o estudo das ligações atômicas, contornos e formas de grãos da estrutura cristalina, bandas de escorregamento e interação da matriz metálica com as partículas não metálicas (Teixeira, 2004).

Após a nucleação da trinca, caso persista o carregamento cíclico no material, ela tende a crescer através dos contornos de grãos e logo após ao longo do plano máximo de cisalhamento, sendo esta a terceira fase de propagação da trinca e aquela a segunda fase do processo de fadiga. Essa segunda fase se caracteriza pelo fato da trinca se propagar apenas através de um comprimento da ordem de poucos grãos ao longo do plano de máxima tensão cisalhante, já a terceira fase envolve o crescimento controlado da trinca na direção normal ao plano de carregamento.

Para um melhor entendimento dessas fases do processo de fadiga a Figura 2 mostra em separado essas fases.

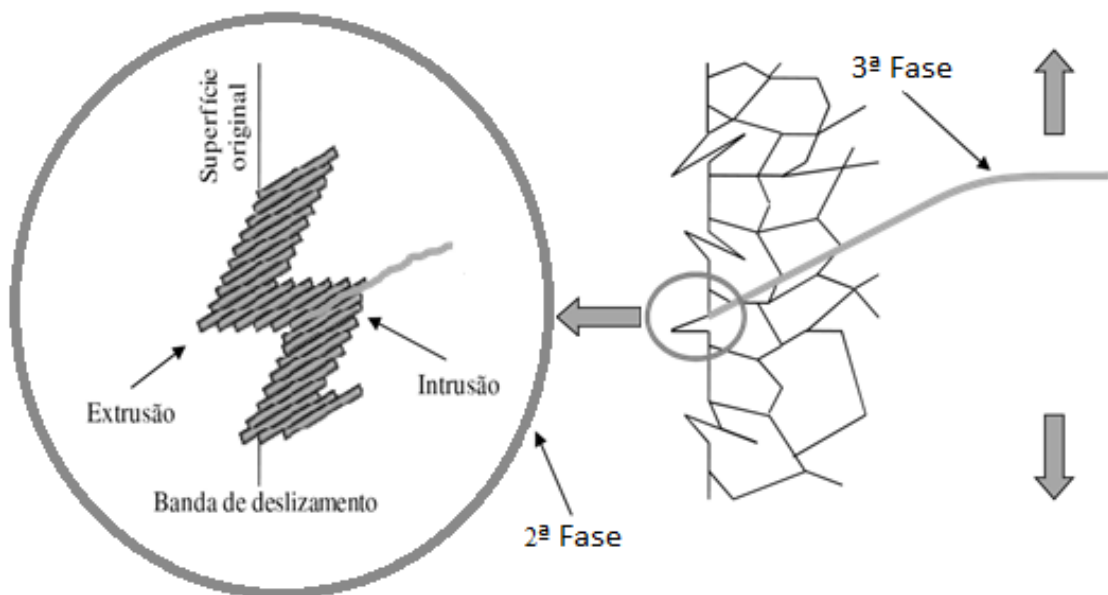


Figura 2 – Estágios da propagação da trinca por fadiga (modificado de Lee et al., 2005).

A quarta fase, propagação instável, ocorre no momento em que a trinca assume um tamanho grande o suficiente para elevar o fator de intensidade de tensão do material,  $K$ , na extremidade da trinca até o nível de tenacidade à fratura,  $K_c$ , quando ocorre a falha repentina de maneira instantânea da peça.



Esse processo, além dessa caracterização, pode ser dividido em relação ao número de ciclos de carregamentos que um material pode suportar até a falha. Em casos onde o material suporta mais de  $10^3$  ciclos, estamos na presença de fadiga a elevado número de ciclos, ou *High Cycle Fatigue* (HFC). Em situações opostas, onde ocorre à fadiga a baixo número de ciclos, ou *Low Cycle Fatigue* (LCF), é causada por um número de ciclos inferior a  $10^3$ . Temos que a HFC está relacionada a deformações relativamente pequenas, sendo estas principalmente elásticas. A LCF é normalmente acompanhada de quantidades significativas de deformações plásticas (Dowling, 2007).

As propriedades de fadiga são parâmetros importantes para a caracterização dos materiais e fornecem subsídios para estimar ou prever a vida de componentes estruturais no âmbito da engenharia na maioria dos casos (ASM Handbook, 2002).

Devido à suas características de fácil usinabilidade, alta condutividade térmica, mecânica, entre outros, os metais são os materiais mais extensivamente utilizados na engenharia. Desta forma, foram eles também, os primeiros materiais a serem amplamente estudados em todos os campos de pesquisa.

O aço foi o primeiro material a ter suas propriedades de fadiga extensivamente estudadas. Porém, com o passar dos anos e com a vinda da Revolução Industrial, houve a necessidade de se avançar com o conhecimento em relação a outros tipos de metais. Com a vinda das guerras mundiais e o avanço da engenharia aeronáutica, o alumínio passou a ser foco, obtendo seu lugar nos estudos e passando a ser também exaustivamente estudado.

Na área de transmissão de energia elétrica, esses dois metais, aço e alumínio, são responsáveis pela transmissão da maior parte de energia gerada em grandes usinas ao redor do mundo. Sendo que a outra parte fica por conta de cabos condutores de cobre e outras ligas metálicas.

Sendo assim, considerando seu alto custo e a fim de se evitar o comprometimento do fornecimento de energia elétrica à população, e conseqüentemente, prejuízos e danos às empresas fornecedoras e geradoras de energia, o cabo condutor exige cuidadosa manutenção preventiva e preditiva por ser um componente mecânico sujeito a esforços repetitivos ao longo do tempo podendo falhar catastróficamente. Portanto, entender a fadiga dos metais é também, em parte, compreender o comportamento de estruturas tão complexas quanto às linhas de transmissão e seus componentes.



onde,  $R$  é a razão de tensão e  $RA$  é a razão de amplitude.

Os principais tipos de ciclos de tensão de fadiga podem se dividir em dois grandes grupos: ciclos com amplitude de tensão constante (Figura 4 (a)), alternado ( $R=-1$  e  $A=\infty$ ), repetido ( $R=0$  e  $A=1$ ) e pulsante ( $A \geq 0$  e  $0 \leq R \leq 1$ ) (Figura 4 (b)), e ciclos com amplitudes de tensão variável (Figura 4 (c)), quais sejam, blocos e irregular ou aleatório (Figura 4 (d)) – (Branco; Fernandes; Castro - 1986).

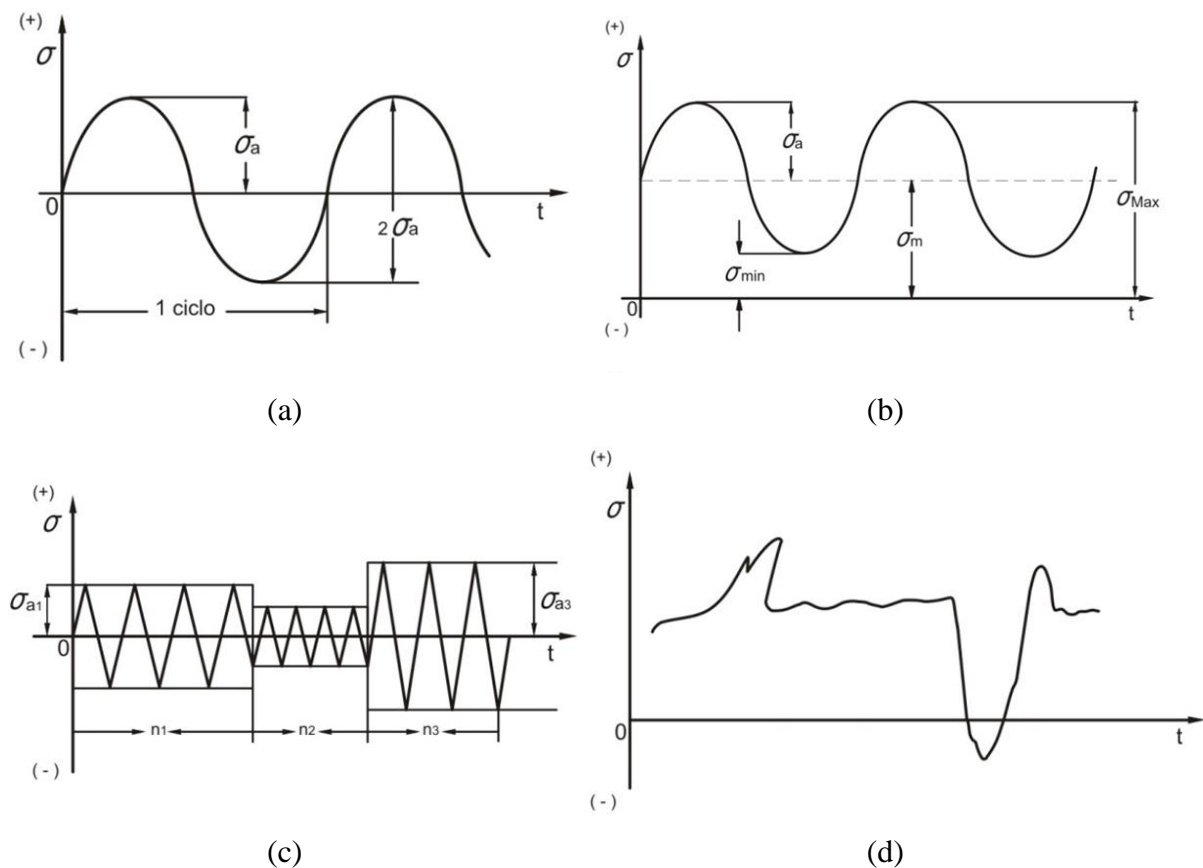


Figura 4 – (a) Ciclo com amplitude de tensão constante alternado (b) Ciclo com amplitude de tensão pulsante (c) Ciclos com amplitude de tensão variáveis em bloco (d) Ciclos com amplitude de tensão variável e irregular - (Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas aplicadas a linhas de transmissão, 2010).

### 2.3 - DETERMINAÇÃO DA CURVA S-N

A obtenção da curva S-N, de modo geral, é realizada a partir do registro do número de ciclos de carregamento realizados até a falha do componente submetido a uma determinada amplitude de tensão. No contexto das normas aplicáveis, uma das mais utilizadas para levantar a curva S-N do componente é a norma ASTM E 793-91 (2004).

No decorrer do ensaio, necessita-se observar algumas condições, entre elas a de que os componentes devem ser idênticos, ou seja, devem possuir as mesmas características

físicas e químicas, além de pertencer ao mesmo lote de fabricação. Outra condição diz respeito aos ensaios que devem garantir a repetitividade do processo de modo a minimizar as influências externas no ensaio.

Cada componente é submetido a uma determinada amplitude de tensão pré-escolhida, que deve ser mantida constante durante todo o ensaio. O fim do ensaio ocorre quando o componente falha ou quando se exceder um determinado número de ciclos escolhidos, em geral,  $10^7$  ou  $10^8$  ciclos.

O número de ciclos é colocado no eixo das abscissas, geralmente em escala logarítmica e no eixo das ordenadas registram-se os níveis de amplitude de tensão experimentados pelas amostras. Em alguns casos o uso da escala logarítmica facilita a comparação dos dados, pois fornece curvas de diversos materiais da mesma forma, além de facilitar e diminuir a escala de N (Souza, 1982).

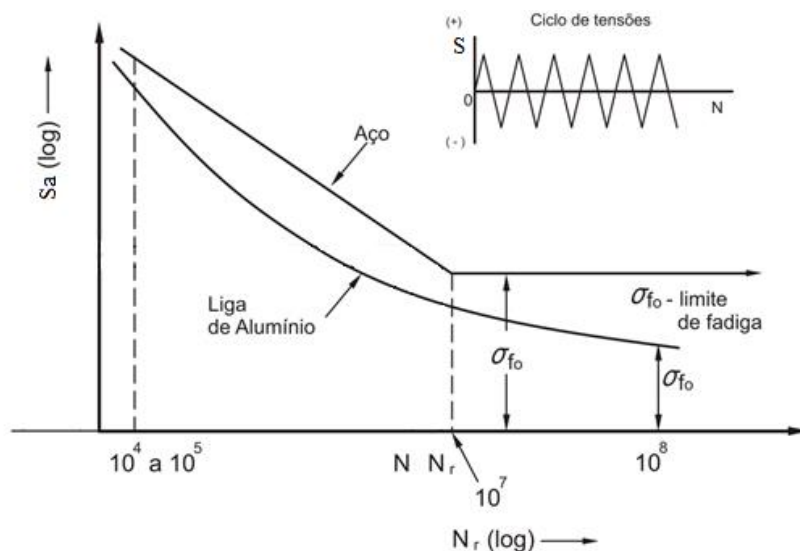


Figura 5 – Curvas S-N esquemáticas para um aço de baixo teor de carbono e uma liga de alumínio (modificada - Branco, 1986).

Na Figura 5 são representadas curvas de fadiga com comportamentos distintos para o alumínio e para o aço. No caso do aço existe uma região para valores aproximadamente da ordem de  $10^7$  ciclos, onde uma reta delimita um patamar de tensão. O nível de tensão deste patamar é denominado limite de resistência à fadiga e se traduz como sendo o nível de tensão máximo para o qual o material poderia suportar um número infinito de ciclos sem que venha a falhar.

Já para o caso do alumínio, o comportamento observado no aço não se repete. Esse patamar do limite de resistência à fadiga é um pouco menos evidente. O que ocorre nesses casos é um comportamento assintótico tendendo para um valor  $\sigma_{fo}$ . É comum definir, para

materiais que possuem este tipo de comportamento, a vida infinita como sendo algo da ordem de  $10^8$  ciclos (Branco, 1986).

Segundo Dowling (2007), através dos dados experimentais de um ensaio de fadiga uniaxial, gera-se o gráfico S-N em escala log-linear, cuja curva pode ser aproximadamente representada pela seguinte equação:

$$\sigma_a = S_a = C + D \log(N_f) \quad (7)$$

na qual C e D são parâmetros constantes do material.

Este gráfico também pode ser apresentado em escala log-log, onde a equação se torna linearizada, conhecida como:

$$\sigma_a = S_a = A(N_f)^B \quad (8)$$

Os parâmetros A e B da Equação 8 referem-se a parâmetros de ajuste e são obtidos após o levantamento da curva experimental.

## **2.4 - EFEITO DA TENSÃO MÉDIA SOBRE A VIDA EM FADIGA**

Entre os vários fatores que podem influenciar no processo de fadiga, a presença de uma componente de tensão média tem um efeito significativo na falha. Quando uma componente de tensão média de tração é somada à componente alternada, o material apresenta falhas com tensões alternadas inferiores às que ocorreriam sob um carregamento puramente alternado (Norton, 2005 ).

Essa componente de tensão média pode agir diretamente na velocidade de propagação da trinca, aumentando ou retardando este processo. Normalmente, tensões médias positivas tendem a acelerar o processo de fadiga enquanto que tensões médias negativas podem retardar este processo (Murça, 2011).

Os primeiros estudos para estabelecer o efeito da tensão média nas propriedades à fadiga do material foram iniciados por Goodman em 1899, e a partir de então, várias outras teorias procuraram traduzir matematicamente este efeito. Dentre elas se destacam Gerber e Soderberg (Calister, 2002).

Basicamente, estes modelos relacionam amplitude de tensão e a tensão média experimentada pelo material e estabelecem limites onde um componente poderia operar sem falar por fadiga após um determinado número de ciclos de carregamento. As equações

9, 10 e 11 apresentam, as formulações propostas por Goodman, Gerber e Soderberg respectivamente:

$$\sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{US}}\right)} \quad (9)$$

$$\sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{US}}\right)^2\right)} \quad (10)$$

$$\sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_y}\right)} \quad (11)$$

onde  $\sigma_a$  é o limite de fadiga na presença de  $\sigma_m$ ,  $\sigma_m$  é a tensão normal média,  $\sigma_{ar}$  é o limite de fadiga para  $\sigma_m = 0$ ,  $\sigma_y$  é o limite de escoamento e  $\sigma_{US}$  é o limite de resistência à ruptura.

Em geral, metais com baixa ductilidade como aços de alta resistência tendem a se ajustar à curva de Goodman, por outro lado materiais frágeis como o ferro fundido tendem a apresentar seus dados experimentais abaixo dessa.

Para obter uma curva que se ajuste a esses materiais, J. Morrow propôs algumas modificações na equação de Goodman, tais como: a substituição do limite de resistência  $\sigma_{US}$  pelo coeficiente de resistência à fadiga  $\sigma_f'$  do material ou pela tensão verdadeira de resistência à fratura por fadiga  $\tilde{\sigma}_{fB}'$ . Ambas as representações propostas por Morrow apresentam resultados razoáveis para aços e ligas de alumínio (Bellorio, 2009)

Essas relações são dadas por:

$$\sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \frac{\sigma_m}{\tilde{\sigma}_{fB}'}\right)} \quad (12)$$

$$\sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_f'}\right)} \quad (13)$$

Outra relação idealizada Smith, Watson e Topper (SWT) pode ser aplicada a todos os materiais, pois não possui variáveis relativas ao material (Equação 14).

$$\sigma_{ar} = \sqrt{\sigma_{m\acute{a}x} * \sigma_a} \quad (14)$$

A Figura 6 apresenta o gráfico comparativo entre os modelos de Gerber, Soderberg, Goodman, Morrow e SWT. Para cada critério, pontos na, ou acima da respectiva linha indicam região de falha.

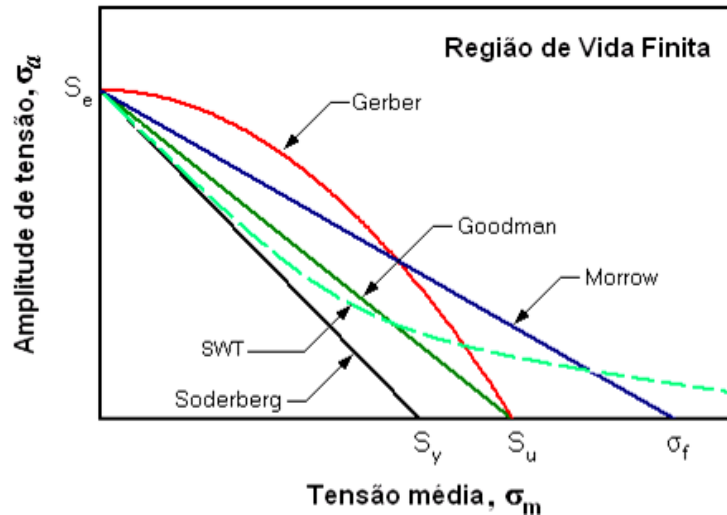


Figura 6 – Gráfico comparativo dos modelos de Gerber, Goodman, Soderberg, Morrow e SWT (Fadel, 2010).

## 2.5 - FADIGA EM CABOS CONDUTORES

A principal causa da fadiga em cabos é a flexão cíclica imposta por vibrações decorrentes da ação das correntes de ar sobre os cabos de transmissão. Ao longo da linha existem pontos onde há uma restrição ao movimento do condutor, por exemplo, nos grampos e espaçadores. Esses pontos com tais restrições são os mais sujeitos à falha.

Esta conclusão pode ser obtida pelo fato de a restrição de movimento fazer com que os fios que constituem o cabo escorreguem entre si, e as forças de fricção aliadas a esse movimento relativo causem o *fretting* entre os fios e nos contatos do cabo com os grampos de sustentação por exemplo.

A Figura 7 (a) mostra um corte transversal de um cabo ACSR, cujas camadas externas são de alumínio e a alma (camada interna) é feita de aço. A Figura 7 (b) mostra um esquema dos contatos entre o cabo e o grampo (representado pelo ponto 'A'), entre o fio de alumínio e os fios de alumínio adjacentes a ele (pontos 'B' e 'C'), entre os fios de alumínio e os fios de aço (ponto 'D') e entre os próprios fios de aço (ponto 'E'). Essas regiões representadas na Figura 7 (b) são as regiões críticas do processo de fadiga *fretting* em cabos condutores, que em quase a totalidade dos casos ocorrem dentro ou próximos aos grampos e ferragens de sustentação e amortecimento do condutor (Murça, 2011).

A fadiga por *fretting* é influenciada por diversos fatores, tais como a 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 as condições do ambiente externo. Uma trinca induzida por *fretting*, uma vez formada, poderá se propagar por fadiga levando ao rompimento do fio ou, em casos extremos, ao rompimento total do cabo (Frontin, 2010).

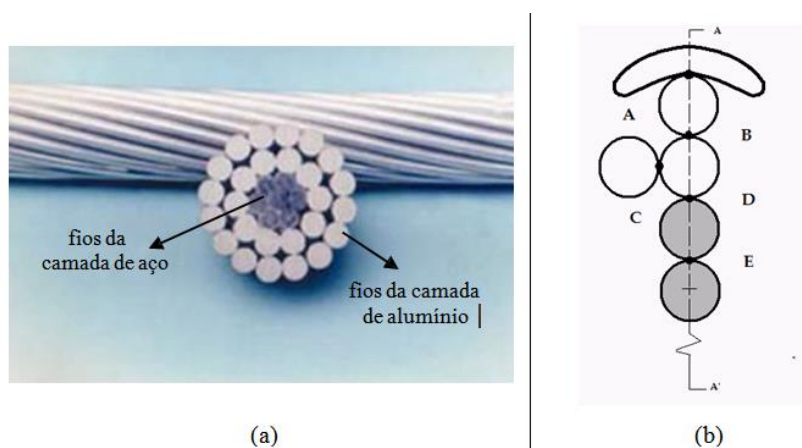


Figura 7 – (a) Secção transversal em um cabo ACSR, (b) Contato entre fio e o grampo (Murça, 2011).

### 2.5.1 - FADIGA POR *FRETTING*

O termo *fretting* é utilizado para denotar um pequeno movimento relativo entre superfícies em contato. A fadiga por *fretting* ocorre sempre quando uma junção entre componentes é submetida a uma força de oscilação, e isto dá origem a um deslocamento tangencial em relação à outra parte da interface. Mais frequentemente essa condição ocorre em juntas aparafusadas ou em fixações mecânicas (Hills e Nowell, 1994).

Além do movimento vibratório no acoplamento, a fadiga por *fretting* envolve a presença de uma tensão remota cíclica em pelo menos um dos componentes da montagem. Este tipo de fadiga é um fator importante a ser considerado em projetos de componentes que se mantem em contato, pois ela pode levar o sistema prematuramente ao colapso. Essa falha prematura é ocasionada devido ao fato de a fadiga por *fretting* acelerar os processos de nucleação e de crescimento de trincas devido ao desgaste superficial e à concentração de tensões provocada pelas cargas de contato “P” (Figura 8).

Tipicamente, o *fretting* ocorre em montagens sob regime de escorregamento parcial (caracterizado por uma região de contato onde existe uma zona de adesão circundada por uma zona de escorregamento) com movimento relativo, provocado por uma carga lateral



oscilante “Q”, inferior a 50 micra e pode provocar reduções de até 90% da resistência à fadiga convencional de um material (Sharp, 1996).

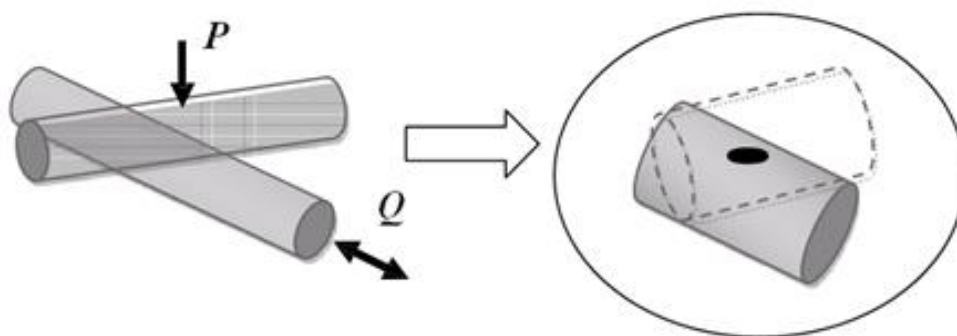


Figura 8 – Configuração esquemática do problema de contato entre dois cilindros (equivalente a dois fios de camadas distintas no cabo) (Fadel, 2010).

Nos cabos condutores, o mecanismo de *fretting* nos fios de alumínio inicia-se com a remoção, decorrente da fricção fio-fio e fio-grampo, do filme oxidante presente no alumínio. No primeiro momento, as superfícies friccionadas tendem a se aderir, porém esses pontos de aderência serão rompidos posteriormente devido ao movimento relativo das partes.

Esse processo gera resíduo e provoca o acúmulo desse material entre os corpos friccionados, propiciando o surgimento de uma fina e quebradiça camada de óxido de alumínio  $Al_2O_3$ . A partir daí, a formação de micro trincas torna-se inevitável podendo levar à falha do material, caso essas se propagem por debaixo da camada de  $Al_2O_3$  em direção à estrutura remanescente de alumínio.

A Figura 9 mostra as marcas de *fretting* deixadas nos fios dos cabos condutores após ensaios realizados em laboratório.

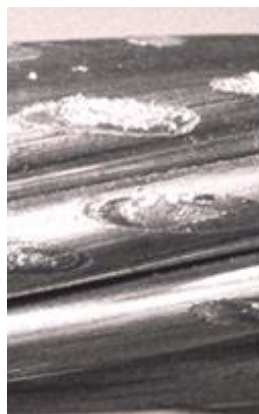


Figura 9 – Detalhe das marcas de *fretting*.

## 2.6 - VIBRAÇÃO EÓLICA

Quando um escoamento contorna um corpo sólido, fenômenos de grande complexidade podem ocorrer, em razão da interação entre diferentes tipos de camadas cisalhantes. Nas aplicações de engenharia, corpos com diferentes formas são usualmente empregados. Em alguns deles, o escoamento mantém-se colado à superfície durante a maior parte do seu percurso, como nos aerofólios, porém nos corpos chamados rombudos, ao contrário, a separação ocorre mais próxima ao bordo de ataque e o escoamento mantém-se descolado até ultrapassar o corpo sólido (Carvalho, 2003).

De maneira geral, o ponto de separação depende, dentre outros fatores, do número de Reynolds e da forma geométrica do corpo. Vibrações eólicas são causadas pela esteira de vórtices de um corpo exposto a um fluxo de um fluido, seja em regime laminar ou turbulento.

Os vórtices são gerados devido à diferença de pressão no escoamento ao longo de sua superfície e da consequente formação da zona de recirculação à jusante do corpo. Analisando-se a distribuição de pressão a partir da montante do escoamento, ao longo da superfície do cilindro é constatado que a pressão vai decrescendo (gradiente de pressão negativo), caracterizada pelo crescimento na velocidade do escoamento junto à superfície do corpo devido ao estreitamento no espaçamento entre as linhas de corrente. Sabe-se que a vazão mássica entre duas linhas de corrente é sempre constante ao longo do escoamento, no entanto a vazão mássica transversal à linha é sempre nula. À jusante do escoamento ocorre o distanciamento das linhas de corrente, acarretando na diminuição da velocidade do escoamento junto à superfície do corpo e na consequente inversão do gradiente de pressão, tornando-se um gradiente adverso (gradiente de pressão positivo, ou seja, crescente) (Fox e Mcdonald, 2001).

Este fato acarreta no descolamento do escoamento e na consequente formação de zona de recirculação à jusante do mesmo. A interação entre a camada de fluido que descola do cilindro e a porção de fluido proveniente da zona de recirculação proporciona a formação dos vórtices, formando então a esteira de Von Karmann.

No caso de vibrações em cabos condutores, existem três tipos de vibrações induzidas pelos ventos, são elas:

- I - Vibrações eólicas simples
- II - Vibrações de Galope
- III - Vibrações de esteira.

Elas se distinguem uma das outras pelos diferentes mecanismos de transferência de energia, pelos diferentes padrões de movimento, pela vasta diferença de frequências e amplitudes de vibração, e pelos diferentes níveis de tensão causados nos condutores, grampos e outros equipamentos.

As vibrações eólicas simples são as mais comuns e sua causa primária se deve ao fato de haver escoamentos alternados na parte superior e inferior do cabo. Essa ação cria um desbalanceamento alternado de pressão, induzindo o condutor a se mover para cima e para baixo com ângulos retos na direção do fluxo de ar. Dependendo da velocidade do escoamento pode ou não ocorrer um deslocamento da camada limite do fluido. Em caso de deslocamento, ocorre o fenômeno de formação de vórtices (EPRI, 1979).

A energia gerada pelos vórtices é absorvida pelo condutor e dissipada, por entre outros motivos, através de atritos internos, da transferência para os grampos, amortecedores, espaçadores, cabos adjacentes, ou até pelo retorno de parte da energia para o próprio vento. Essa medida de energia dissipada pelo cabo por unidade de comprimento é denominada de auto amortecimento.

As magnitudes dessas dissipações e suas posições de fase a cada ciclo determinam se o movimento do condutor será suprimido, sustentado ou acelerado, ou seja, se a potência fornecida pelo vento for maior que a potência dissipada pelo cabo o resultado será convertido em movimento do condutor.

Por fim sabemos que o escoamento ao redor de um cilindro fixo é uma função do número de Reynolds ( $R_e$ ), que por fim definirá se o escoamento é laminar ou turbulento.

$$R_e = \frac{V d}{\nu} \quad (15)$$

onde  $V$  é a velocidade do escoamento,  $d$  é o diâmetro do condutor e  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido.

A um número de Reynolds muito baixo, o escoamento segue o contorno do cilindro. Este regime de escoamento ocorre até o número de Reynolds por volta de 5, como representado na Figura 10 (a). Com o aumento do número de Reynolds, a camada limite se separa da parede do cilindro e um par de vórtices simétricos é formado a jusante próxima do corpo com na Figura 10 (b). Este ainda é um regime de escoamento estacionário e o comprimento da bolha aumenta com o número de Reynolds até aproximadamente Reynolds 45.

Quando o valor do número de Reynolds está na faixa de  $15 \leq R_e \leq 40$  ocorre uma bifurcação do sistema. As camadas cisalhantes dos lados opostos do cilindro começam a interagir e forma-se a esteira de vórtices, mais conhecida como esteira de Von Karmann.

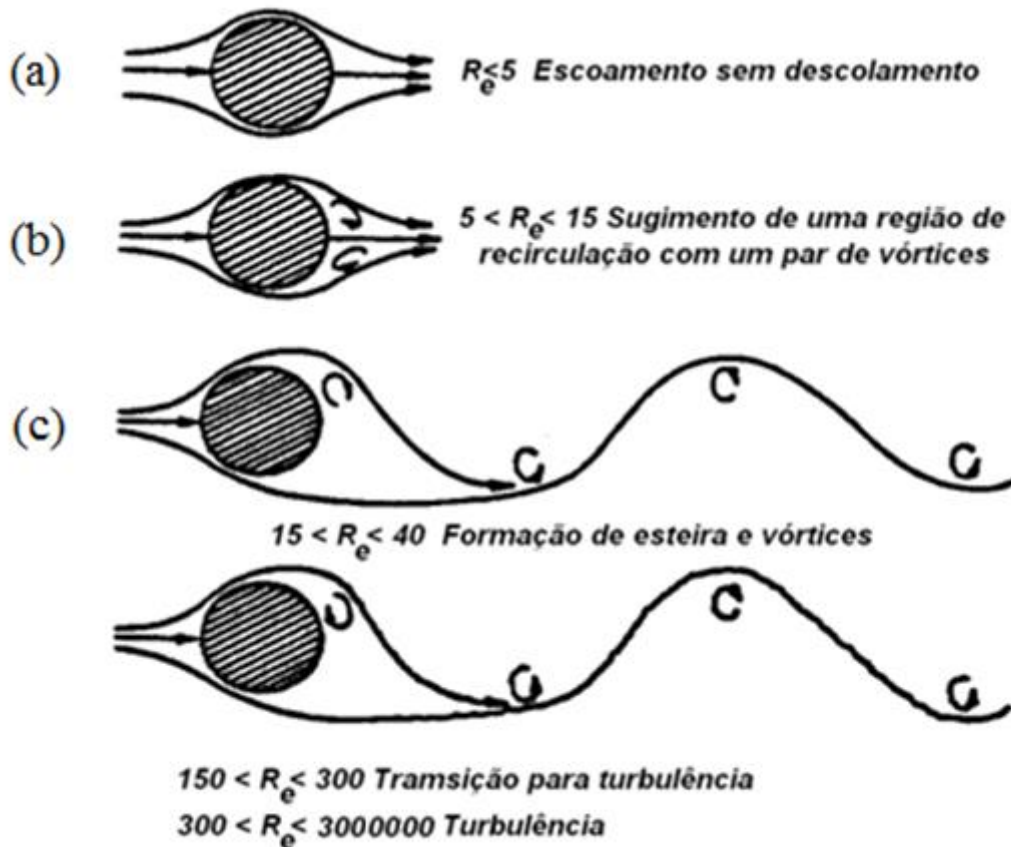


Figura 10 – Efeito do aumento do número de Reynolds sobre os padrões de fluxo de ar em volta de um condutor cilíndrico (EPRI, 1979).

Atribui-se o nome de Von Karmann a esta esteira de vórtices em homenagem aos estudos pioneiros em esteira de corpos rombudos realizados por Theodore Von Karmann. Nesta condição, o escoamento apresenta uma frequência típica associada ao desprendimento alternado dos vórtices.

Esta é a frequência de Strouhal (St), cuja relação adimensional relaciona velocidade, diâmetro do cilindro e frequência dos vórtices.

$$St = \frac{f d}{v} \quad (16)$$

onde  $f$  é a frequência de vórtices,  $d$  é o diâmetro do cilindro e  $v$  a velocidade do escoamento.

O número de Strouhal mostra uma variação moderada para o número de Reynolds entre 500 e 20.000. O *Electric Power Research Institute (EPRI)* toma como referência o valor de 0,185 para o número de Strouhal em casos de escoamento em tornos de cabos ACSR (*Aluminium Conductor Steel Reinforced*). Quando a frequência de oscilação dos vórtices coincide com uma das frequências naturais do condutor ocorre uma condição crítica de vibração.

Normalmente, a duração dessa condição crítica de vibração está diretamente relacionada com a duração de um regime de vento constante e laminar capaz de manter o condutor vibrando em uma de suas frequências naturais. Devido a este fato, as frequências e velocidade a serem evitadas poderão ser descritas pela equação 17.

$$f = \frac{0,185 V}{d} \quad (17)$$

As vibrações de galope se caracterizam por uma baixa frequência de vibração, altas amplitudes principalmente em movimentos verticais dos condutores. Este tipo de vibração é muito incomum no Brasil, pois elas ocorrem devido à presença de uma camada de gelo depositada sobre o condutor, responsável por mudar o coeficiente de arrasto do condutor.

Esse movimento vertical causado pela vibração de galope pode resultar em um desequilíbrio ainda maior de forças, uma vez que a velocidade relativa do escoamento estará em constante mudança e a massa do condutor estará desbalanceada. Essas condições podem levar às vibrações de galope.

As vibrações de esteira é o tipo mais recente movimento reconhecido dos condutores. Este tipo de vibração ocorre em casos onde dois ou mais condutores estão de alguma forma conectados e são expostos a ventos moderados a fortes e surge com o efeito causado pela passagem do escoamento pela primeira feira de cabos que afetará a segunda, gerando um conjunto complexo e variado de forças.

Dependendo da magnitude e das relações de forças existentes podem aparecer movimentos elípticos ou orbitas irregulares.

A Tabela 2 apresenta um comparativo das características de vibração dos condutores e do dano sofrido ao longo dos anos quando submetidos a um determinado regime de ventos.

Tabela 2 – Comparação dos tipos de movimentos cíclicos dos condutores (Rawlings, 1979).

	<b>Vibração Eólica Simples</b>	<b>Vibração de Galope</b>	<b>Vibração de Esteira</b>
Tipos de Linhas de Transmissão afetadas	Todas	Todas	Limitada a linhas com cabos conectados entre si (feixes)
Faixa aproximada de frequência (Hz)	3 a 150	0.08 a 3	0.15 a 10
Faixa aproximada das amplitudes de vibração (pico-a-pico) (Unidades expressas em diâmetros do condutor)	0.01 a 1	5 a 300	Modo de corpo rígido: 0.5 a 80 Modo de sub-vão: 0.5 a 20
<b>Condições do Tempo que Favorecem o Movimento do Condutor</b>			
Característica de vento	Regular.	Regular.	Regular.
Velocidade do Vento	1 a 7 m/s.	7 a 18 m/s.	4 a 18 m/s.
Superfície do Condutor	Exposto ou uniformemente coberto de gelo.	Depósito assimétrico de gelo ao redor do condutor.	Exposto e seco.
Condições de Projeto que Afetam o Movimento do Condutor	Tensão de tração no cabo, auto amortecimento do condutor, uso de amortecedores.	Taxa da frequência natural vertical pela torcional, taxa de decaimento e condições de fixação.	Distância de separação dos condutores, inclinação da amarra, configuração das amarras do sub-vão
<b>Danos</b>			
Tempo Aproximado Requerido para um Dano Severo se Desenvolver	3 a 20+ anos.	1 a 48 horas.	1 mês a 8 anos.
Causas Diretas do Dano	Fadiga devido ao carregamento cíclico.	Altas cargas dinâmicas.	Choque dos condutores, desgaste acelerado.
Componentes da Linha mais Afetados Pelo Dano	Condutores.	Condutores, toda a configuração, isoladores, estruturas.	Mecanismo suspenso, espaçadores, amortecedores, fios do condutor.

## **2.7 - FÓRMULA DE POFFENBERGER-SWART – ESTIMATIVA DA TENSÃO EM CABOS CONDUTORES**

Em 1965 uma solução analítica para a quantificação dos níveis de tensão mecânica experimentados por condutores submetidos a movimento alternados foi desenvolvida por

Poffenberger e Swart (P-S). Em sua abordagem P-S faz uma analogia entre um cabo e uma viga engastada com o objetivo de mostrar a relação de dependência de parâmetros como tensão dinâmica de flexão e da amplitude de flexão levando em consideração fatores como: módulo de elasticidade, tração aplicada no condutor e sua rigidez à flexão.

Outro fator importante na solução analítica de P-S foi a escolha em se realizar a medição no ponto a 89 mm Este ponto é utilizado na tentativa de reduzir os erros de medição uma vez que braços de medição com grandes comprimentos resultam nesse tipo de erro.

### **2.7.1 - HISTÓRICO DA FORMULAÇÃO**

Em 1941 G. B. Tebo, da comissão de Energia Hidroelétrica de Ontário – Canadá introduziu o conceito de deslocamento diferencial. Utilizou um transformador diferencial a fim de medir o deslocamento devido à vibração, a 89 mm (3,5”) do grampo de suspensão, sendo o transdutor de deslocamento fixado no grampo de suspensão (Tebo, 1941).

Em 1965 a atual IEEE (*Institute of Eletrical and Electronic Engineers*), organizou a formação de um grupo para investigar o problema de medição das vibrações em cabos de transmissão. Assim, em 1964 o grupo de trabalho (*Task Force*) recomendou que o método do deslocamento diferencial, ou de amplitude de flexão fosse adotado.

Em 1966, Boyd criou um instrumento para realizar medições de vibração em cabos de transmissão de linhas-vivas. Tendo como parâmetro os dados obtidos deste trabalho, Rawlins realizou experimentos para comparar as medições de deslocamento diferencial com as medições de extensômetros para diferentes níveis de tração e frequência (Boyd, 1966).

Em suas observações, pode-se verificar que a relação entre o deslocamento diferencial e a deformação do condutor era afetada pela tração, mas não pela frequência no condutor, resultados também corroborados por Fadel, 2010. Edwards persistiu realizando testes experimentais para outros cinco tipos de condutores, e também uma configuração utilizando armadura pré-formada, confirmando mais uma vez que a frequência não exercia influência, e que essa afirmação também seria válida para cabos com armaduras pré-formadas.

A partir destes dados considerou-se que fatores como diâmetro individual dos fios e a rigidez do condutor eram importantes para a relação entre a deformação e o deslocamento diferencial. Além disso, as curvas que relacionavam a deformação com o

deslocamento diferencial apresentavam não linearidades para níveis elevados de deslocamento.

Utilizando os princípios da teoria da elasticidade e da mecânica clássica, Poffenberger-Swart, 1965 definiu a relação entre o deslocamento e a deformação, considerando este fenômeno um problema estático, pois desta forma seria mais claro seu significado físico.

Para solucionar este problema, Poffenberger baseou-se na curva de deflexão do cabo, tendo em vista que a segunda derivada da curvatura correspondente ao momento fletor dividido pela rigidez à flexão. Segundo ele, com medições de amplitude e frequência seria possível obter uma aproximação do comprimento, mas como o grau de liberdade de fixação do suporte é desconhecido, não seria suficiente.

O equipamento utilizado por Poffenberger para medir amplitudes era fixado rigidamente no grampo de suspensão, assim era previsto que seu braço de sustentação apresentasse a mesma rotação angular que o grampo. Em consequência deste fato, as medições continham o deslocamento e simultaneamente a rotação angular do grampo, assim, o método da amplitude de flexão fazia uso de um pequeno segmento da curvatura de deflexão do cabo.

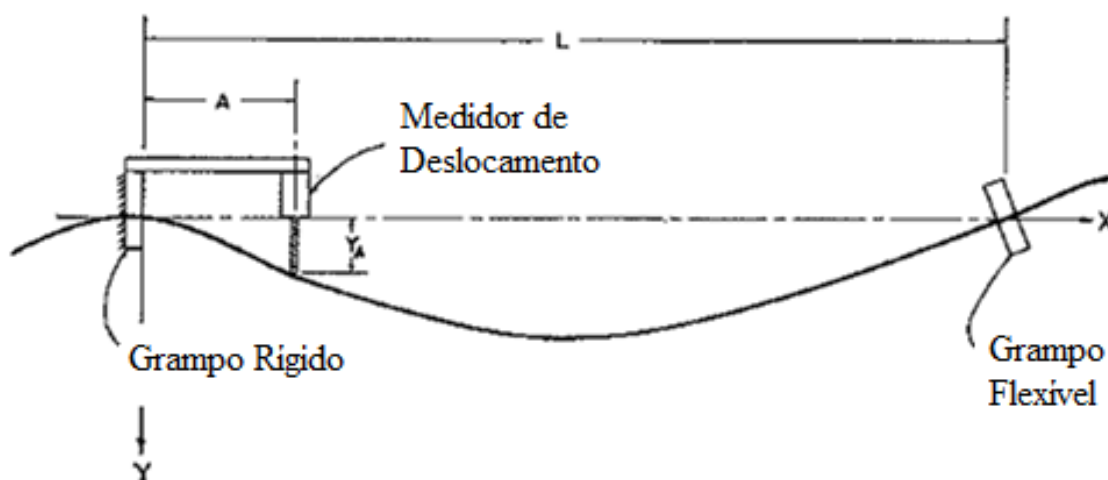


Figura 11 – Curva de deflexão do cabo considerando o grampo rígido (modificado – Poffenberger, 1965).

### 2.7.2 - FÓRMULA MATEMÁTICA

Temos que nas Juntas de fixação nas extremidades do cabo, as quais detêm o vão livre, o momento fletor será nulo. Consequentemente, a deformação nesses locais será



igualmente nula. Em contrapartida, o deslocamento diferencial do extensômetro ( $Y_D$ ) nesses locais é elevado para grandes comprimentos do braço de flexão ( $A$ ). Como mostra a Figura 12 a seguir, existirá assim um erro associado ao deslocamento do condutor ( $Y_A$ ) e do extensômetro ( $Y_D$ ).

A escolha em se realizar a medição no ponto a 89 mm é justificada pelo fato de braços de medição com grandes comprimentos induzirem a erros de medição. Neste caso, assume-se que a deflexão do cabo apresenta uma forma senoidal.

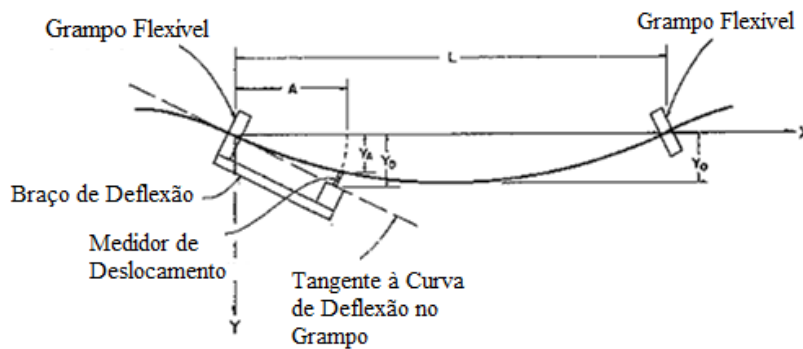


Figura 12 – Curva de deflexão (modificado – Poffenberger, 1965).

Inicialmente, irá se considerar um membro com rigidez  $EI$ , fixo em suas extremidades, sendo carregado com uma carga distribuída  $P$ , como mostra a Figura 13 a seguir.

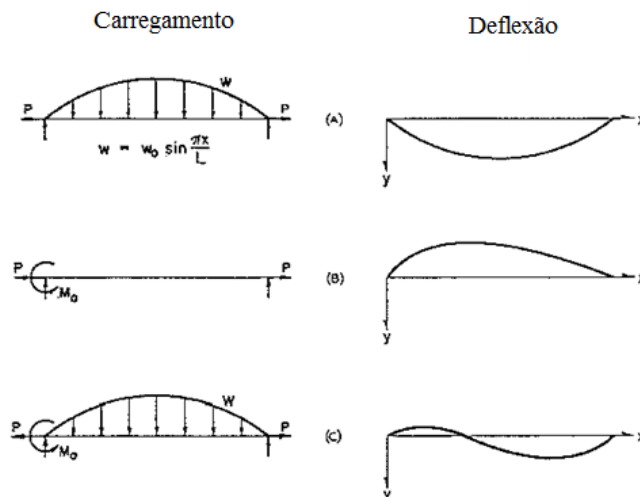


Figura 13 – Curvas de carregamento e de deflexão para subcasos para resolução do caso geral (Modificado – Poffenberger, 1965).

Tem-se que, baseando-se na curva senoidal apresentada, o carregamento distribuído é dado por:

$$w = w_0 \text{sen}(ax) \quad (18)$$

onde  $w_0$  corresponde ao carregamento no lado esquerdo da estrutura e  $a = \pi/L$ .

Assim, o momento fletor em qualquer ponto da curva é dado por:

$$M = \frac{w_0}{a^2} \text{sen}(ax) - P * y \quad (19)$$

por conveniência, escreve-se:

$$i^2 = \frac{EI}{P}; \phi = \frac{x}{j} \text{ e } \lambda = \frac{L}{j}$$

usando-se as condições de contorno  $y=0$  em  $x=0$  e em  $x=L$ , tem-se:

$$y = \frac{w_0 L^2 \lambda^2 \text{sen}\left(\frac{\pi x}{L}\right)}{P \pi^2 (\pi^2 + \lambda^2)} \quad (20)$$

Em um segundo caso, irá se considerar o caso da Figura 13(b), em que o momento fletor é aplicado do lado esquerdo do cabo, ao invés da carga distribuída ao longo do membro em análise. Tem-se que o momento fletor em qualquer ponto ao longo do comprimento da curva de deflexão é dado por:

$$M = M_0 \left(1 - \frac{x}{L}\right) - P * y \quad (21)$$

Sendo a solução para tal caso, utilizando o mesmo método do caso anterior:

$$y = \frac{-M_0}{P (\text{senh } \phi \text{ cotgh } \lambda - \cosh \phi + 1 - \frac{x}{L})} \quad (22)$$

Para o caso geral mostrado na Figura 13(c), onde se encontram combinados os casos 13(a) e 13(b), tem-se que as equações dos casos (a) e (b) são igualmente combinadas, resultando em:

$$y = \frac{w_0 L^2 \lambda^2 \text{sen}\left(\frac{\pi x}{L}\right)}{P \pi^2 (\pi^2 + \lambda^2)} - \frac{M_0}{P (\text{senh } \phi \text{ cotgh } \lambda - \cosh \phi + 1 - \frac{x}{L})} \quad (23)$$

onde P representa a tensão ao qual a estrutura encontra-se submetida e  $w = w_0 \text{sen}(ax)$  equivale à carga.

Considerando que a extremidade esquerda do cabo é fixa e não existe rotação nesse local, pode-se considerar que, aqui, a inclinação do cabo é nula. Assim, em  $x=0$ , tem-se:

$$y' = 0 = \frac{w_0 L^2 \lambda^2 \left(\frac{\pi}{L}\right)}{P \pi^2 (\pi^2 \lambda^2)} - \frac{M_0}{P} \left(\frac{1}{j} \cotgh \lambda - \frac{1}{L}\right) \quad (24)$$

Segundo Pofenberger et al.,  $\cotgh \lambda = 1$ , o qual serve para relacionar  $w_0$  e  $M_0$  de seguinte forma:

$$w_0 = M_0 \frac{\pi (\pi^2 \lambda^2)}{(L^2 \lambda^2) (\lambda - 1)} \quad (25)$$

Utilizando-se a equação (25), pode-se escrever a equação (22) como:

$$y = \frac{M_0}{P \left(\frac{\lambda - 1}{\pi} \text{sen} \frac{\pi x}{L} + e^{-\phi - 1 + \frac{x}{L}}\right)} \quad (26)$$

Para comprimentos de “L” maiores que 1,14 metros, podem-se simplificar  $\text{sen} \left(\frac{\pi x}{L}\right)$  por  $\frac{\pi x}{L}$  para o deslocamento diferencial do condutor. Assim, escreve-se:

$$y_a = \frac{M_0}{P \left(e^{-\frac{A}{j} - 1 + \frac{A}{j}}\right)} \quad (27)$$

A deformação na extremidade fixa esquerda é:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{M_0 c}{E I} = \frac{M_0 d}{2 E I} \quad (28)$$

onde “c” e “d” correspondem ao raio e diâmetro do fio ou condutor, respectivamente.

Substituindo a equação (27) na equação (28), se obtêm a relação entre deformação ( $\epsilon$ ) e deslocamento diferencial  $y_a$  quando  $x=A$ .

$$\epsilon = \frac{P y_a}{e^{-\frac{A}{j} - 1 + \frac{A}{j}} 2 E I} = \frac{y_a d}{2 j^2 \left(e^{-\frac{A}{j} - 1 + \frac{A}{j}}\right)} \quad (29)$$

Sendo que  $y_a$ , d, j, e A possuem as mesmas unidades e a deformação ( $\epsilon$ ) é dimensional. Por conveniência, se utiliza também a taxa de deformação-deslocamento, caracterizada pelo símbolo S:

$$S = \frac{\epsilon}{y_a} = \frac{d}{2j^2 \left( e^{-\frac{A}{j}} - 1 + \frac{A}{j} \right)} \quad (30)$$

## 2.8 - DETERMINAÇÃO DA TENSÃO NOMINAL NO FIO MAIS SOLICITADO

Para o cálculo da tensão dinâmica, utiliza-se uma metodologia estabelecida pelo IEEE como padrão para as medições de vibrações de condutores, a qual estabelece uma relação entre o movimento do condutor e a severidade da fadiga. Esse padrão baseia-se na Fórmula de Poffenberger-Swart.

Como não é possível obter a medida exata da tensão mecânica na região de falha do condutor, devido ao difícil acesso e ao estado extremamente complexo de tensões, é necessária a utilização de algum outro método. A partir dessa necessidade, a fórmula de Poffenberger-Swart (P-S), é usualmente utilizada para correlacionar uma tensão com a amplitude de deslocamento vertical (medido pico-a-pico) de um ponto do cabo distante 89 mm do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão (Figura 14). A fórmula de P-S está associada diretamente à tensão experimentada por um fio de alumínio da camada mais externa do cabo e na boca do grampo.

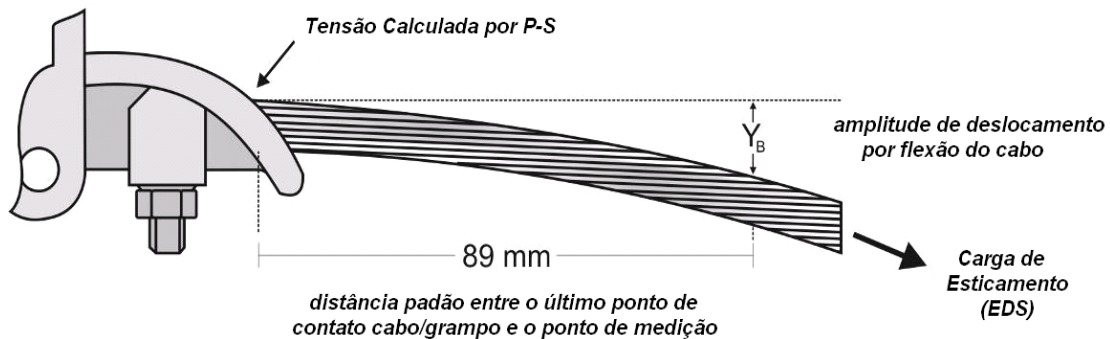


Figura 14 – Montagem esquemática cabo/grampo mostrando a posição padrão para medida de amplitude de deslocamento  $Y_b$  (Murça, 2011).

Assim, em termos práticos, é fácil converter amplitude de deslocamento vertical em uma tensão nominal de referência para a curva S-N de um cabo.

$$\sigma_a = K * Y_b \quad (31)$$

onde,  $\sigma_a$  é a faixa de tensão dinâmica (pico a pico),  $Y_b$  é a amplitude de deslocamento pico a pico, medida a partir de um ponto sobre o cabo distante 89 mm do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão, e

$$K = \frac{E_a d_{fio} p^2}{4*(e^{-px}-1+px)} \quad (32)$$

sendo,  $E_a$  [Mpa] o módulo de elasticidade (módulo de Young) e  $d$  [mm] o diâmetro dos fios de alumínio da camada externa do cabo,  $x$  é a distância ao longo do cabo entre o último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão e o ponto de medição, usualmente 89 mm, e

$$p = \sqrt{\frac{T}{EI}} \quad (33)$$

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

$$EI_{min} = n_a E_a \frac{\pi d_a^4}{64} + n_s E_s \frac{\pi d_s^4}{64} \quad (34)$$

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

## 2.9 - CRITÉRIOS DE PROJETO DE FADIGA APLICADOS A LINHAS DE TRANSMISSÃO

Um dos principais critérios a ser observado e definido durante o projeto de linhas de transmissão é o que visa proteger os condutores em relação ao processo de fadiga. Existem dois tipos de critérios que poder ser adotados neste caso: a metodologia EPRI e a metodologia IEEE.

Ambas estabelecem limites de vibração máximos que podem ser suportados pelos condutores de modo que eles trabalhem abaixo do limite de resistência à fadiga em uma região segura, visando vida infinita.

Porém, uma linha de transmissão em operação está sujeita a todo o tipo de intempéries que de certa forma são eventos aleatórios, sendo assim, observa-se que as condições reais em campo muitas vezes excedem as condições previstas em projeto. Para tentar prever a vida remanescente destes cabos que experimentaram níveis de tensão maiores que os originalmente previstos em projeto, a CIGRÉ, levou em consideração a regra de acúmulo do dano proposto por Miner em 1945.

### 2.9.1 - CIGRÉ WG 22-04

A metodologia CIGRÉ WG 22-04 para avaliação da vida remanescente em condutores considera o efeito cumulativo dos ciclos de vibração adquiridos pelo medidor de vibrações (EPRI, 1979). As amplitudes de deslocamento armazenadas na matriz gerada com os dados coletados são extrapoladas para o período de um ano, sendo posteriormente, essas amplitudes de deslocamento, convertidas em amplitude de tensão com o auxílio da relação proposta por Poffenberger-Swart. Utilizando a regra de Miner, pode-se então quantificar a fração de dano provocada por unidade de bloco de amplitude de tensão devidamente armazenado na matriz do vibrógrafo.

O cálculo da fração de dano por nível de amplitude de tensão necessita do número de ciclos de carregamento que o material resiste para um determinado nível de tensão (curva S-N) (Bellorio, 2009). Para isso, é possível obter curvas S-N em laboratório ou utilizar uma curva teórica obtida a partir de um banco de dados experimentais para cabos condutores denominada de Cigré Safe Border Line (CSBL) - Figura 15 (CIGRÉ WG 22-04). O resultado obtido por essa metodologia fornece a vida remanescente do condutor apresentada em anos.

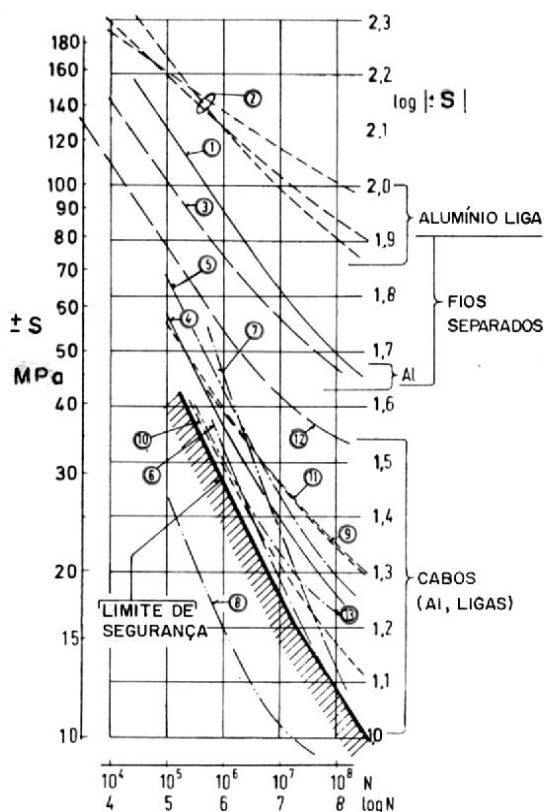


Figura 15 – Curva *Safe Border Line*, bem como as demais curvas compiladas pela Cigré em 1979.

### 2.9.1.1 - REGRA DE ACÚMULO DE DANO DE PALMGREN-MINER

No ano de 1924 Palmgren sugeriu a regra de dano linear para descrever o acúmulo de dano, posteriormente no ano de 1945, Miner expressou matematicamente o conceito da regra de dano linear proposta por Palmgren.

Durante esta época o progresso de métodos de análise de fadiga foi lenta devido à falta de informações básicas em relação ao comportamento dos materiais em estudo e mais importante do que isso, devido à falta de métodos de manipulação em relação à aquisição de dados experimentais. (Miner, 1945)

Para o desenvolvimento desta teoria de acúmulo de dano, Miner considerou outras abordagens que o levaram para a tentativa de simplificar as várias fases do problema do dano em fadiga. Como na sua época, as estruturas de aeronaves eram predominantemente feitas de ligas de alumínio, e este veículo era de suma importância, este material foi escolhido apesar de ligas de aço também terem sua respectiva relevância.

O fenômeno de acumulação de dano sobre blocos de carregamentos repetidos foi relacionado diretamente com o trabalho absorvido pelo componente, sendo assim, o número de ciclos de carregamento aplicados com certa porcentagem do número de ciclos até a falha em um dado nível de tensão deve ser proporcional a vida útil despendida.

Este conceito assegura que o dano pode ser expresso em termos do número de ciclos aplicados dividido pelo número de ciclos até a falha em uma dada tensão. Quando se faz a soma desses “incrementos de dano” em vários níveis de tensão e sua soma se torna unitária, a falha ocorre.

No desenvolvimento dessa teoria, algumas suposições e limitações foram feitas como:

- 1 – O ciclo de carregamento de senoidal;
- 2 – A quantidade total de trabalho que pode ser absorvida produz a falha;
- 3 – A relação entre os vários níveis de tensão (razão entre a tensão mínima e máxima) deve ser aproximadamente como o diagrama de Goodman modificado e do gráfico da tensão versus a razão da tensão mínima e máxima aplicada.
- 4 – O início da trinca, quando observado, é considerado por constituir uma falha.

O desenvolvimento do conceito de dano começa por assumir que se  $W$  representa o total de trabalho absorvido até a falha, então:

$$\frac{w_1}{W} = \frac{n_1}{N} \quad (35)$$

e similarmente para  $w_2, n_2, N_2$ , etc., e que  $w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_n = W$  na falha. Tendo em vista este fato, concluímos que:

$$\frac{w_1}{W} + \frac{w_2}{W} + \frac{w_3}{W} + \dots + \frac{w_n}{W} = 1 \quad (36)$$

substituindo os valores na equação 35, temos:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_n}{N_n} = 1 \quad (37)$$

Ou seja,

$$D = \sum r_i = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \quad (38)$$

Este modelo proposto admite que o dano referente a cada nível de carregamento pode ser quantificado pela razão entre o número  $n_i$  de ciclos aplicados em uma determinada amplitude de tensão  $\sigma_i$  e o número  $N_i$  de ciclos necessários para causar a falha nessa mesma amplitude, sendo que o número de ciclos  $N_i$  que a peça suportaria a uma tensão  $\sigma_i$  é obtido através da curva S-N do material.

Portanto, a energia acumulada leva a uma soma linear das razões de ciclo ou danos. A falha considerada é considerada quando  $\sum r_i = 1$ , onde  $r_i$  é a razão de ciclos correspondente a um nível de tensão.

A Figura 16 ilustra a situação da aplicação de uma tensão sobre certo número de ciclos sobre a curva S-N do material. Neste exemplo, supõe que já existiram as três primeiras solicitações com ocorrer ruptura. Ao aplicar a quarta solicitação, a ruptura ocorreria quando o número de ciclos satisfizesse a seguinte igualdade.

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \frac{n_4}{N_4} = 1 \quad (39)$$

No entanto a regra de dano linear apresenta alguns problemas, tais como: Despreza a interação entre carregamentos, não leva em conta a contribuição do dano para tensões inferiores ao limite de fadiga por possuir um caráter independente dos níveis de tensão.

Segundo a equação, se observa que não é relevante à ordem de aplicação dos ciclos de tensão, por exemplo, não seria importante aplicar o ciclo  $\frac{n_3}{N_3}$ , antes do ciclo  $\frac{n_1}{N_1}$ . No entanto, a experiência demonstra que a ordem de aplicação dos ciclos de tensões é de grande importância na resistência à fadiga. A aplicação de um ciclo de tensões com maior



amplitude em primeiro lugar causa mais dano do que a aplicação inicial de um ciclo com menor amplitude de tensões (Correia, 2001).

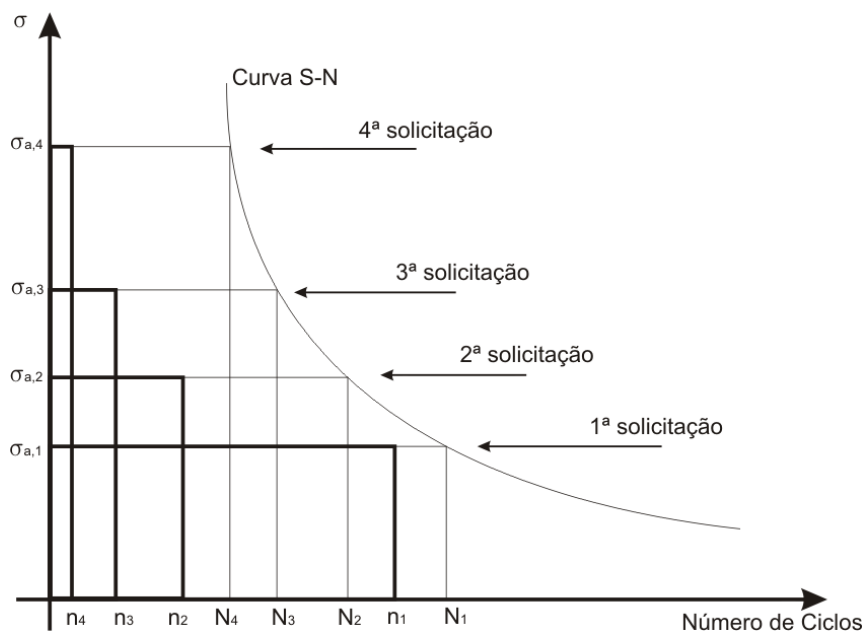


Figura 16 – Exemplo de uma curva S-N típica e quatro diferentes níveis de sollicitação (Domingues, 2003).

### 2.9.2 - IEEE

A metodologia do EPRI pode ser considerada excessivamente cautelosa, pois utiliza como parâmetro de projeto apenas a máxima amplitude de tensão correspondente ao limite de fadiga (EPRI, 1979). Na prática, esses limites podem ser ultrapassados por um número limitado de vezes sem efeitos práticos na integridade do cabo condutor.

A extrapolação do limite de resistência proposto pelo IEEE segue as regras de que a amplitude de flexão não pode ultrapassar o limite de fadiga do material em mais de 5% do total de ciclos e de que apenas 1% do total de ciclos poderá ultrapassar 1,5 vezes o limite de fadiga. Além disso, o IEEE considera que, em nenhum ciclo da história de carregamentos, a tensão ( $\sigma_a$ ) poderá alcançar duas vezes o limite de fadiga (Bellorio, 2009).

Os limites de segurança adotados pelo IEEE (Tabela 3) equivalem à deformações em torno de  $150\mu\text{strain}$ . Hoje já se sabe que esses valores são excessivamente conservadores. Dependendo do caso e das definições de projeto, costuma-se aplicar valores de uma a duas vezes maiores. Ou seja, algo em torno de  $300\mu\text{strain}$  (Murça, 2011).

Tabela 3 – Limites de resistência para o cabo de alumínio liga 6201 com duas ou mais camadas de fios de alumínio para o método IEEE

Números de camadas de fios de alumínio	Limites de resistência (Mpa) - EDS: 20%		
	1X Limite	1,5x Limite	2x Limite
2 ou mais	5,7	8,6	11,4

Vale lembrar que inicialmente para IEEE a máxima amplitude de deslocamento suportada por um condutor de alma de aço (ACSR), sem que este viesse a sofrer danos por fadiga, não poderia ser determinada precisamente. No passado especulava-se que este limite seria de 150 a 200 micro deformações (pico a pico), porém, mais tarde, eles se mostraram muito conservativos sendo substituídos pelos limites acima descritos.

Uma pesquisa sobre o critério adotado pelas empresas concessionárias para avaliação da severidade da vibração sobre condutores em linhas de transmissão foi conduzida revisando-se mais de 80 especificações técnicas das principais concessionárias de transmissão de energia no mundo durante os 20 últimos anos. Essa pesquisa revelou que 59% das especificações técnicas adotavam os limites de deformação devido à flexão como critério de avaliação preferencial. Mais ainda, dentre as empresas que adotaram esse critério, 51% prescreviam 300 micro deformações (pico a pico) como o valor limite. Também ficou claro na pesquisa que as empresas aplicam esse limite de forma indiscriminada, sem levar em consideração o tipo de cabo utilizado e a combinação cabo/grampo ou cabo/espaçador, etc. Neste relatório também utilizaremos o limite de 300 micro deformações para a avaliação da severidade de vibração do condutor – e esse critério será denominado como “*Utilities*”.

### 2.9.3 - EPRI

A metodologia do EPRI sugere valores máximos de amplitude de flexão e de amplitude de tensão, definidos como limites de resistência, para vários tipos de condutores. Caso esses patamares de amplitude fossem ultrapassados, a integridade do cabo estaria condenada pelo critério de fadiga. Esses valores são válidos para condutores do tipo ACSR.

Considerando um cabo ACSR com mais de uma camada de fios de alumínio, a amplitude máxima de flexão varia entre 0,2 e 0,3mm podendo ser considerado um único valor de 0,23mm, caso haja uma falta de precisão na estimativa do limite de resistência do condutor. Essas amplitudes de flexão foram calculadas por meio da equação invertida de

Poffenberger-Swart baseando-se nos limites de resistência à fadiga, obtidos mediante testes laboratoriais para diferentes tipos de cabos ACSR de diferentes tamanhos (Bellorio, 2009);

$$Y_b = \left( \frac{e^{-px_b} - 1 + px_b}{\frac{(E_a p^2 d_a)}{4}} \right) \sigma_a \quad (40)$$

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

No caso de condutores de alumínio homogêneos, não há disponível na literatura dados suficientes para a determinação dos limites de resistência à fadiga. Contudo, esses 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 (Bellorio, 2009).

### **3 - MATERIAIS E MÉTODOS**

Os editais de licitação de concessões de instalações de transmissão da Rede Básica do Sistema Interligado Nacional - SIN procedidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL possibilitam que pessoas jurídicas, nacionais ou estrangeiras, e fundos de investimentos em participação, isoladamente ou em consórcio, participem da disputa.

A ANEEL licitou até o primeiro semestre de 2010 aproximadamente 38,8 mil quilômetros de novas linhas de transmissão e um total de 60,6 mil MVA de potência de transformação, ampliando a Rede Básica do Sistema Interligado Nacional - SIN. Estes empreendimentos atraíram investidores nacionais e internacionais, principalmente de países como Espanha, Itália, Colômbia, Portugal e Argentina (ANEEL, 2013).

Os projetos de linhas de transmissão no Brasil, contra fadiga devido à vibração eólica, devem ser conduzidos com base nas exigências da norma NBR 5422/1985. Além da norma, devido a exigências legais, as linhas devem seguir o edital de licitação de concessão, específico para cada linha, proposto pela Aneel.

Neste estudo, constatou-se que o edital da Aneel não faz nenhuma exigência extra a não ser o cumprimento da norma NBR 5422/85. Após a análise dos relatórios enviados pela empresa pode-se constatar que a norma foi plenamente atendida.

Posteriormente, conduzir-se-á uma análise sobre a resistência a fadiga (durabilidade) do cabo a partir da aplicação das metodologias de avaliação da vibração (descritas no item 2.10) aos dados obtidos em campo por meio dos medidores de vibração.

Deve-se, no entanto, observar que tais metodologias ainda são objetos de debate em fóruns técnicos com especialistas do setor (como CIGRÉ e IEEE) e não tem força de norma por serem muitas das vezes baseadas em uma quantidade relativamente pequena de observações empíricas.

Cabe ressaltar que somente após a construção da linha seria possível obter-se dados de vibração em regiões críticas. Sem a linha de transmissão montada apenas seria possível, caso existisse, através dos registros de incidências de ventos na região, realizar uma estimativa da vibração que ocorreria no condutor.

Esses dados adquiridos por meio da instalação de vibrógrafos comerciais são de fundamental importância, pois é a partir deles, que se pode realizar o estudo de risco de ocorrência da fadiga no cabo.

### **3.1 - IDENTIFICAÇÃO DO CASO ESTUDADO**

As linhas de transmissão de 230 kV em estudo foram projetadas com circuito duplo, dois condutores por fase, dispostos na vertical, com espaçamento nominal de 457 mm, condutor de alumínio liga 6201 e carga média diária de tração (*Every Day Stress - EDS*) correspondente a 20% da carga limite de ruptura do cabo. Os cabos dessa linha de transmissão são protegidos contra vibração eólica com amortecedores de vibração do tipo *Stockbridge* (Modelo VSD) e espaçadores (Modelo AGSP).

O Espaçador é composto de varetas preformadas, braço e corpo em liga de alumínio, garra e articulação em material elastomérico. Para evitar corrosão galvânica, o material das varetas preformadas é sempre compatível com o material do condutor. Estes espaçadores são utilizados para manter o espaçamento nominal entre os dois cabos de uma mesma fase.

O estudo foi realizado para investigar a ocorrência de falhas devido à fadiga sob condições de *fretting* dos fios de alumínio provocada pela vibração eólica.

#### **3.1.1 - DESCRIÇÃO DO TERRENO**

A incidência de vibração induzida pelo vento em linhas de transmissão está diretamente ligada a sua localização, sua geometria e ao ângulo de incidência desse vento sobre a linha de transmissão. A localização exerce uma influência determinante devido à possível recorrência de ventos lisos, em locais de terreno plano com pouca ou nenhuma vegetação, ou de ventos turbulentos, em locais com alta densidade de vegetação.

Geralmente as leituras devem ser feitas onde se espera 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.

Uma área de planalto com pouca obstrução próxima ou, cruzando lagos ou rios, também potencializa a ação do vento sendo elas preferencialmente escolhidas para o posicionamento do vibrógrafo. A classificação do tipo de terreno, Tabela 4 deverá ser considerada, uma vez que sua influência é determinante na ação eólica sobre as linhas de transmissão:

Tabela 4 – Grau de influência do tipo de terreno para medição de vibração eólica. (ABNT – NBR 5422/85)

<b>Tipo de terreno</b>	<b>Grau de Influência</b>	<b>Categoria de Terreno</b>
Vastas extensões de água; áreas planas costeiras; desertos planos.	Elevado	A
Terrenos aberto com poucos obstáculos	Médio	B
Terrenos com obstáculos numerosos e pequenos	Médio baixo	C
Áreas urbanizadas; terrenos com muitas árvores altas.	Baixo	D

Na linha de transmissão em estudo podemos classificar o terreno onde se encontra a linha de transmissão como categoria “A”, pois a região onde está localizada a linha possui pouca ou quase nenhuma vegetação.

### 3.1.2 - VIBRÓGRAFO PAVICA

A fim de realizar testes de campo, foram desenvolvidos registradores de vibrações ou gravadores de linha viva. Esses gravadores progrediram de dispositivos predominantemente mecânicos da década de 50 para os sofisticados gravadores digitais de hoje. Usando uma recomendação da IEEE de 1996, praticamente todos os gravadores medem um parâmetro físico chamado de amplitude de flexão, que é a deflexão do condutor a uma certa distância (89mm) a partir do último ponto de contato do condutor com o grampo de suspensão.

O vibrógrafo pavica (Figura 17) é projetado para instalação em condutores de linhas de transmissão ou fios terra para medir a amplitude e frequência de vibrações eólicas nas proximidades de grampos e analisar seus possíveis efeitos da fadiga do condutor.

Este vibrógrafo pode ser instalado diretamente no condutor perto de qualquer tipo de grampo, o que é um diferencial perto de outros tipos de vibrógrafos. O aparelho é composto por uma lâmina equipada com extensômetros calibrados (Figura 18 (4)) fixada a um anel de montagem que suporta o invólucro cilíndrico (Figura 18 (2)), bem como a lâmina de medição de localização (Figura 18 (8)). Uma roda de profundidade (Figura 18 (5)) fica em contato com o condutor e transmite movimento ao sensor. O corpo do aparelho contém um microprocessador, circuitos eletrônicos, fonte de alimentação e um sensor de temperatura.

Este modelo de vibrógrafo possui como principais características:

- A possibilidade de ser montado direto no condutor;

- O instrumento pode ser utilizado para medir as vibrações na vizinhança de qualquer tipo de grampo, amortecedor ou espaçador com ou sem amortecimento.
- O instrumento mede a amplitude de deslocamento e a frequência de cada ciclo de vibração e armazena os dados na célula respectiva em uma larga matriz de acordo com o as ocorrências.

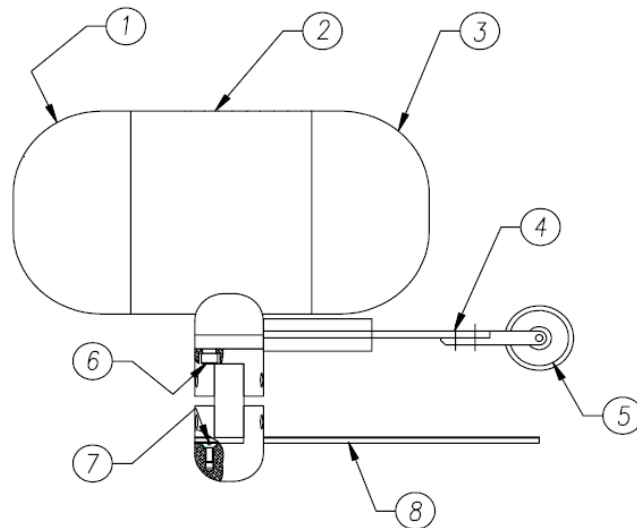


Figura 17 – Vibrógrafo Pavica.

O valor real de medição de cada amplitude de deslocamento é determinado a partir da calibração de cada instrumento. Um conversor analógico/digital de 10 bits é utilizado para medir a amplitude do pico, neste momento apenas a componente positiva de cada ciclo é olhada. A amplitude de pico é então multiplicada por dois e armazenada na matriz como um valor pico-a-pico.

A escala do eixo de amplitude nominal do contador é programável utilizando um dos 4 padrões disponíveis para configuração, cada um deles compreendendo 64 linhas de intervalos de amplitude, ou seja, caso ocorra um ciclo com  $470\mu\text{m}$  de amplitude de deslocamento ele será contabilizado como 1 ciclo na linha correspondente ao intervalo de amplitude de deslocamento entre  $468$  e  $476\mu\text{m}$ .

No caso da frequência o aparelho aceita valores de vibração de 1 a 127 Hz. Frequências de vibração acima do valor limite são desconsideradas, já para o limite inferior de medição do sinal sua atenuação é de -1dB. A escala do eixo de frequência da matriz é programável utilizando um dos dois padrões disponíveis, cada um compreendendo 64 colunas de intervalos de frequência.



- |                                |                                   |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Tampa do cilindro           | 5. Roda reguladora                |
| 2. Parte central do cilindro   | 6. Parafusos de fixação do anel   |
| 3. Tampa do cilindro           | 7. Parafusos de fixação da lâmina |
| 4. Lâmina com os extensômetros | 8. Lâmina de localização          |

Figura 18 – Figura esquemática do Pavica (Manual de instrução do pavica – modificado).

### 3.1.3 - POSICIONAMENTO DOS VIBRÓGRAFOS

Os dados utilizados nesse trabalho para a avaliação da fonte do dano por fadiga nos cabos condutores foram extraídos da linha de transmissão de 230kV e fornecidos pelos engenheiros da empresa.

A primeira análise (Análise 1) envolve as medições de vibração obtidas com o pavica em um vão com a presença de espaçadores e amortecedores (Figura 19). A segunda análise conduzida (Análise 2) considera medições de vibração apenas em vãos sem a presença dos espaçadores (Figura 20). O objetivo dessa estrutura de análise é avaliar o efeito da presença dos espaçadores no vão sobre a severidade da vibração eólica em termos de tensões/deformações dinâmicas de flexão nos pontos de conexão entre o cabo e estas ferragens.

#### 3.1.3.1 - ANÁLISE 1

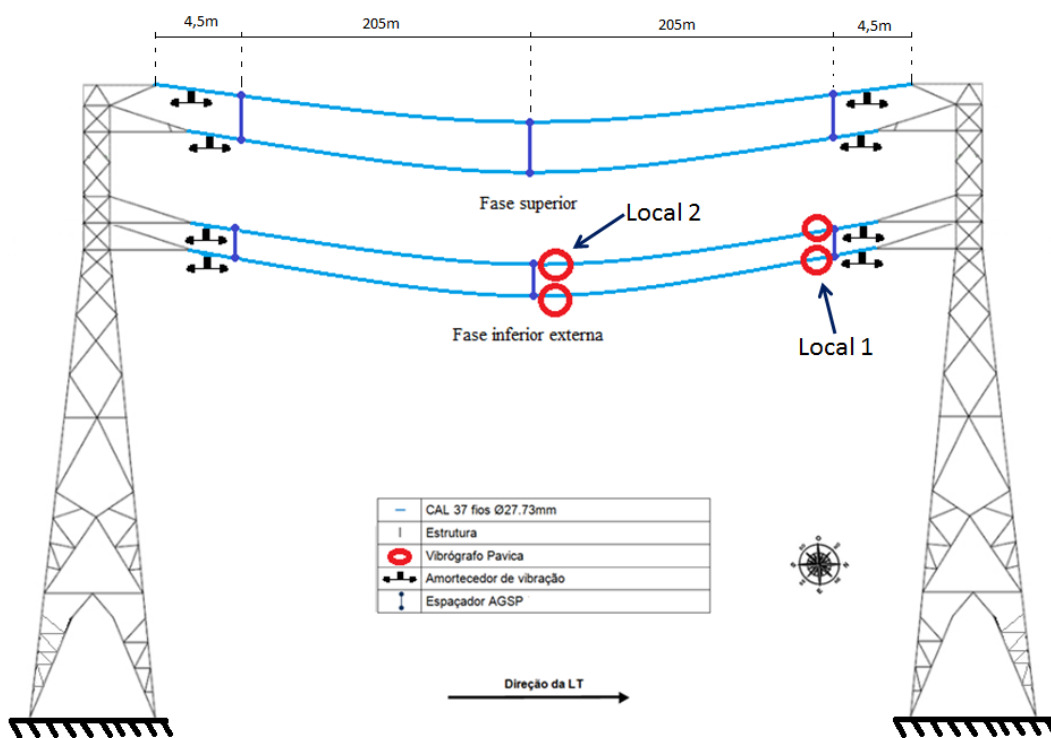
O primeiro conjunto de dados analisados considera medições de vibração obtidas com o PAVICA em um vão de 419 metros com a presença de espaçadores e amortecedores. Esses dados foram fornecidos pela empresa responsável pela linha de transmissão que instalou os vibrógrafos na garra do espaçador tipo AGSP-2452841 e enviaram as respectivas matrizes em formato eletrônico. Cada vibrógrafo ficou instalado



na linha durante 10 dias, realizando a aquisição dos dados por 10 segundos a cada 15 minutos.

O objetivo aqui é avaliar a severidade da vibração eólica no vão em estudo sobre as tensões dinâmicas de flexão no ponto de conexão entre o cabo e o espaçador. As medidas foram realizadas em um mesmo vão, mas com os vibrógrafos instalados em espaçadores posicionados em dois diferentes locais do vão. Cabe ressaltar que essas medidas foram realizadas em momentos distintos para cada local de aquisição de dados.

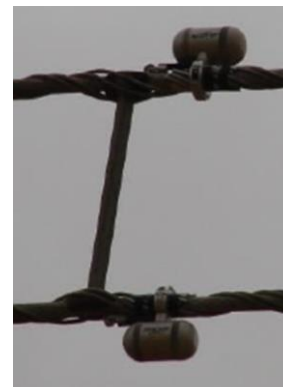
1. Local 1 – espaçador próximo a torre (Figura 19 (a))
2. Local 2 – espaçador no meio do vão (Figura 19 (a))



(a)



(b)

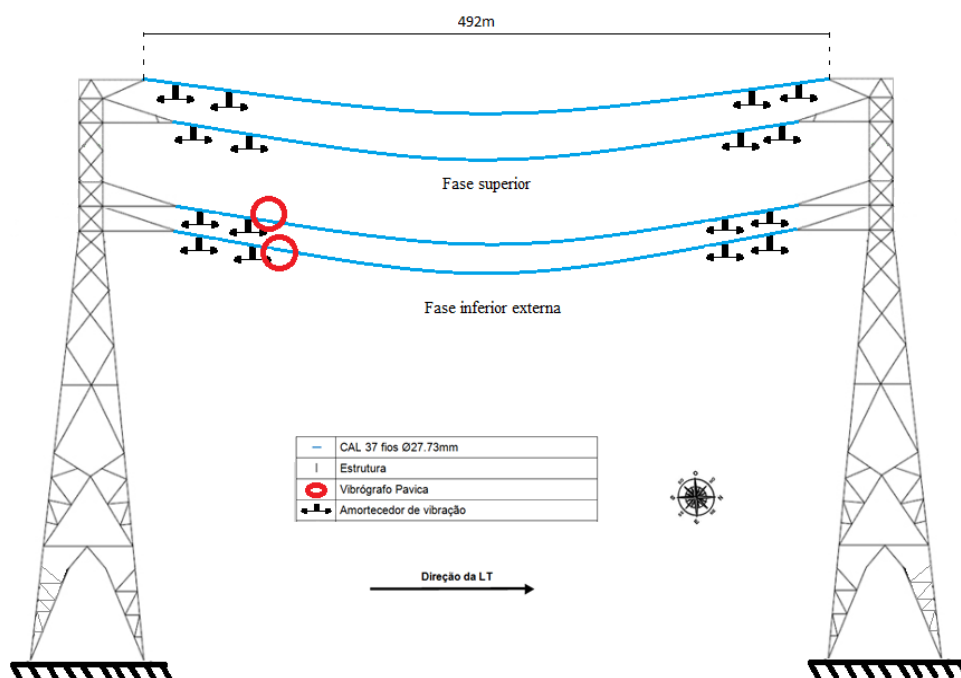


(c)

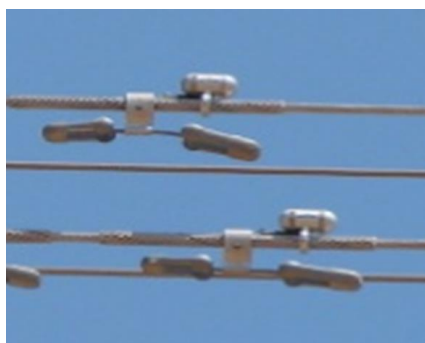
Figura 19 – (a) Esquemático da montagem dos PAVICAS (b) Detalhe da montagem dos pavicas no Local 1(c) Detalhe da montagem do pavicas no Local 2.

### 3.1.3.2 - ANÁLISE 2

O segundo conjunto de dados, Local 3, considera medições de vibração obtidas em um vão sem a presença dos espaçadores. As medidas foram realizadas a partir do posicionamento de um vibrógrafo próximo a garra dos amortecedores (Figura 20). Estes vibrógrafos também permaneceram na linha durante 10 dias, realizando a aquisição dos dados por 10 segundos a cada 15 minutos. Como nessa análise não há a presença dos espaçadores, não existe a necessidade de se colocar um vibrógrafo no meio do vão, pois neste ponto não existe mais uma restrição ao movimento, fazendo com que o cabo vibre livremente minimizando o seu desgaste. Além disso, é possível tentar realizar uma comparação na mudança do comportamento vibratório da linha após a retirada dos espaçadores.



(a)



(b)

Figura 20 – (a) Esquemático da montagem dos PAVICAS instalados próximos das garras dos amortecedores. (b) Detalhe da montagem do PAVICA.

## 3.2 - BASE NORMATIVA

### 3.2.1 - NORMA ABNT NBR 5422/85 – PRINCIPAIS PONTOS

Este tópico tem por objetivo abordar os pontos da norma que estão mais próximos a situação estudada, para que o leitor tome conhecimento desses principais pontos, porém, deve-se advertir que para um melhor conhecimento da norma é importante conhecê-la na íntegra.

Quanto à carga dos cabos a NBR 5422 define no seu item 5.4 que as cargas nos cabos decorrem de seu peso próprio, da pressão de vento horizontal, uniformemente distribuída ao longo do vão e da componente horizontal de tração axial. A determinação dessas cargas é encontrada no item 8.2 desta mesma norma. As seguintes recomendações devem ser consideradas no processo de seleção do condutor:

- a) Na condição de velocidade máximas de vento, os esforços de tração axial nos cabos não podem exceder a 50% da carga nominal da sua carga de ruptura;
- b) Na condição de temperatura mínima, recomenda-se que os esforços de tração nos cabos não ultrapassem 33% da sua carga de ruptura;
- c) Na condição de trabalho de maior duração, caso não tenham sido adotadas medidas de proteção contra os efeitos da vibração, recomenda-se limitar o esforço de tração nos cabos aos seguintes valores máximos apresentados na Tabela 5 abaixo.

Para garantir uma maior proteção dos cabos contra danos devido à vibração eólica, deve ser prevista a utilização de dispositivos especiais ou amortecedores de vibração, principalmente nos casos de grandes vãos situados em regiões planas, travessias de grandes rios e de lagos, ou ainda quando as características dos ventos locais, aliadas à tensão mecânica e diâmetro do cabo, favorecem a ocorrência de vibração eólica.

Tabela 5 – Cargas máximas recomendadas para cabos na condição de trabalho de maior duração, sem dispositivos de proteção contra vibração.

Tipo de Cabo	Carga Máxima (EDS) (% da Carga de Ruptura)
CA	21
CAA	20
CAL	18
CALA	16
CAA-EF	16

A análise dos documentos contendo dados e informações relevantes para o projeto contra fadiga da linha mostra que a única norma brasileira que aborda essa questão foi plenamente obedecida no projeto das linhas de transmissão. Como relatado anteriormente, a NBR 5422/85 recomenda que, na condição de trabalho de maior duração, cabos de alumínio liga (CAL) esticados com nível de EDS igual ou superior a 18% devem ser protegidos contra o efeito da vibração eólica, principalmente nos casos de grandes vãos situados em regiões planas, como é o caso das linhas de transmissão em estudo.

Nesse sentido, a análise do projeto mecânico da linha mostra que existe recomendação para sua proteção contra os efeitos da vibração eólica com o uso de amortecedores, tendo em vista que esta irá operar com um cabo CAL e, na condição de trabalho de maior duração, operará com uma EDS de 20%.

De fato, observa-se que a linha é protegida com o uso de amortecedores tipo Stockbridge VSD nas extremidades dos vãos, conforme constatado no projeto do sistema de amortecimento (identificou-se a presença de dois amortecedores em cada cabo do vão, instalados próximos ao grampo de suspensão) vide Figura 21.



Figura 21 – Foto com detalhe do sistema de amortecimento mostrando a presença de mais de um amortecedor próximo a uma torre de ancoragem

### 3.3 - CARACTERÍSTICAS DOS CABOS

A liga de alumínio liga 6201 pertence a série 6xxx, que são ligas que possuem magnésio e silício como principais elementos de liga, as quais se combinam e formam o elemento intermetálico  $Mg_2Si$ , que antes de atingir o equilíbrio no superenvelhecimento, é o responsável pelo seu endurecimento. Quando essa liga é tratada de forma adequada, a

presença desse elemento intermetálico favorece a formação de precipitados finos e uniformemente distribuídos, que acarretam um substancial aumento na dureza do material.

Apesar de não possuir características elétricas tão boas quanto as da liga alumínio liga 1350, liga mais utilizada em cabos de linhas da transmissão, sua condutividade elétrica é da ordem de 52% IACS (*International Annealed Copper Standard*). A liga 6201, devido a sua composição química, pode apresentar características de resistências a corrosão, abrasão e mecânica superiores a liga 1350. Como os cabos CAL foram concebidos com o objetivo de suprir as necessidades de um condutor econômico, para aplicação aérea, onde é requerida uma maior resistência mecânica do que a obtida com o condutor de alumínio CAA, a liga AA 6201 sofre, ainda um tratamento de solubilização, trabalho a frio e envelhecimento artificial até alcançar um grau específico de estiramento (o que confere a classificação T81). (Disponível em: <[www.infomet.com.br](http://www.infomet.com.br)>. Acesso em 7/5/2013)

### 3.3.1 - CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA LIGA

Com o intuito de realizar uma comparação dos componentes químicos utilizados em ambas as ligas a Tabela 6 mostra a composição da cada uma delas.

Tabela 6 – Composição química das ligas de alumínio 1350 e 6201 (Disponível em: <[www.matweb.com](http://www.matweb.com)>. Acesso em: 5/8/2013).

Componente químico	Liga de Alumínio	
	AA 1350 H19	AA 6201 T81
Al	≥ 99,5	97.3-98.9
B	≤0,05	≤0,06
Cr	≤0,01	≤0,03
Cu	≤0,05	≤0,1
Ga	≤0,03	-----
Fe	≤0,4	≤0,5
Mn	≤0,01	≤0,03
Mg	-----	0.6-0.9
Si	≤0,1	0.5 - 0.9
V+Ti	≥ 0,02	-----
Zn	≤0,05	≤0,1

### 3.3.2 - CARACTERÍSTICAS DO CONDUTOR

As características mecânicas do condutor utilizado são mostradas na Tabela 7.

Tabela 7 – Propriedades mecânicas básicas do condutor de alumínio liga 6201 utilizado na linha de transmissão (Relatório de monitoramento em campo das vibrações eólicas fornecido pela empresa.).

Tipo	CAL
Formação	37 fios
Diâmetro do Fio (mm)	3,96
Diâmetro do Condutor (mm)	27,73
Área Total (mm <sup>2</sup> )	456,2
Peso Unitário (kgf/m)	1,25
Carga de Ruptura (kgf)	13418
Liga	6201
Tempera	T81
Massa Especifica (g/cm <sup>3</sup> )	2,69
Dureza Brinnell	85
Tensão de Ruptura (MPa)	303 a 317
Alongamento em 250mm	3%
Módulo de Elasticidade (kgf/mm <sup>2</sup> )	Inicial: 5695
	Final: 6140
Coeficiente de Dilatação Linear (/ °C)	Inicial: 23,0x10 <sup>-6</sup>
	Final: 23,0x10 <sup>-6</sup>

### 3.4 - PROCEDIMENTO PARA ESTIMATIVA DA VIDA REMANESCENTE

Para o cálculo da vida remanescente do cabo iremos utilizar o procedimento descrito no item 2.9.1, metodologia proposta pela CIGRÉ WG 22-04, que considera o efeito cumulativo dos ciclos de vibração adquiridos por um medidor de vibrações comercial. Esses medidores, na maior parte dos casos, coletam os dados das amplitudes de deslocamento impostas ao condutor e os armazenam na forma de uma matriz. A taxa de armazenagem e o tempo total de medição desses dados podem ser configurados antes da instalação do vibrógrafo na linha e a partir dessa configuração podemos calcular qual deve ser a extrapolação dos dados finais para o período de um ano.

Após a extrapolação do número de ciclos em cada amplitude de vibração para o período de um ano, devem-se converter as amplitudes de deslocamento em amplitudes de tensão com o auxílio da relação proposta por Poffenberger-Swart.

Após a conversão, utilizando a regra de Miner, pode-se então quantificar a fração de dano provocada por unidade de bloco de amplitude de tensão devidamente armazenado na matriz do vibrógrafo e com o somatório quantificar o dano total.

A matriz gerada pelo pavica (Figura 22) possui o seguinte formato:

µm	mils	f = 0Hz	f = 1Hz	f = 2Hz	f = 3Hz	f = 4Hz	f = 5Hz	f = 6Hz	f = 7Hz
508 - 516	20.0 - 20.3	0	0	0	0	0	0	0	0
500 - 508	19.7 - 20.0	0	0	0	0	0	0	0	0
492 - 500	19.4 - 19.7	0	0	0	0	0	0	0	0
484 - 492	19.1 - 19.4	0	0	0	0	0	0	0	0
476 - 484	18.8 - 19.1	0	0	0	0	0	0	0	0
468 - 476	18.4 - 18.8	0	0	300	225	0	0	0	0
460 - 468	18.1 - 18.4	0	0	500	708	0	0	0	0
452 - 460	17.8 - 18.1	0	0	0	0	0	0	0	0
444 - 452	17.5 - 17.8	0	0	0	0	0	0	0	0
435 - 444	17.2 - 17.5	0	0	0	0	0	0	0	0
427 - 435	16.8 - 17.2	0	0	0	0	0	0	0	0
419 - 427	16.5 - 16.8	0	0	0	0	0	0	0	0
411 - 419	16.2 - 16.5	0	0	0	0	0	0	0	0
403 - 411	15.9 - 16.2	0	0	0	0	0	0	0	0
395 - 403	15.6 - 15.9	0	0	0	0	0	0	0	0
387 - 395	15.3 - 15.6	0	0	0	0	0	0	0	0
379 - 387	14.9 - 15.3	0	0	0	0	0	0	0	0
371 - 379	14.6 - 14.9	0	0	0	0	0	0	0	0
363 - 371	14.3 - 14.6	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 22 – Modelo da matriz gerada pelo medidor de vibração PAVICA

Alguns pontos devem ser observados nessa tabela. Primeiramente, observa-se que as frequências de excitação impostas no cabo estão dispostas na primeira linha da tabela, já as amplitudes de deslocamento estão nas demais linhas, podendo ser em  $\mu\text{m}$  ou em mils.

Como exemplo, observa-se que ocorreram 300 ciclos com deslocamento na faixa de 468-476 $\mu\text{m}$  com uma frequência de 2Hz e 225 ciclos na mesma faixa de amplitude de deslocamento, porém agora com uma frequência de 3Hz.

Para realizar o cálculo da vida remanescente de forma correta é necessário saber qual foi o tempo de total medição e a taxa de aquisição realizada pelo medidor de vibração. Por exemplo, o tempo total de medição foi de 10 dias com uma taxa de aquisição de dados de 10 segundos a cada 15 minutos. A partir desse dado podemos extrapolar o tempo de medição para um ano, ou seja, supondo que o medidor de vibração realize a aquisição dos dados durante 10 segundos a cada 15 minutos ao longo de 10 dias, teremos 9600 segundos ao término do período de monitoramento. Sabendo que em um ano existem 31557600 segundos devemos multiplicar cada célula da tabela gerada pelo medidor de vibração por 3287,25 para obter o número de ciclos em um ano.

O segundo ponto a ser observado é que a matriz nos mostra os dados de deslocamento pico a pico. Fato também relevante na hora de realizar os cálculos para estimativa da vida remanescentes, pois, dependendo da relação de Poffenberger-Swart utilizada, dever-se-á utilizar como valor entrada o deslocamento pico a pico. A Figura 23 mostra de forma esquemática o modelo de cálculo realizado.

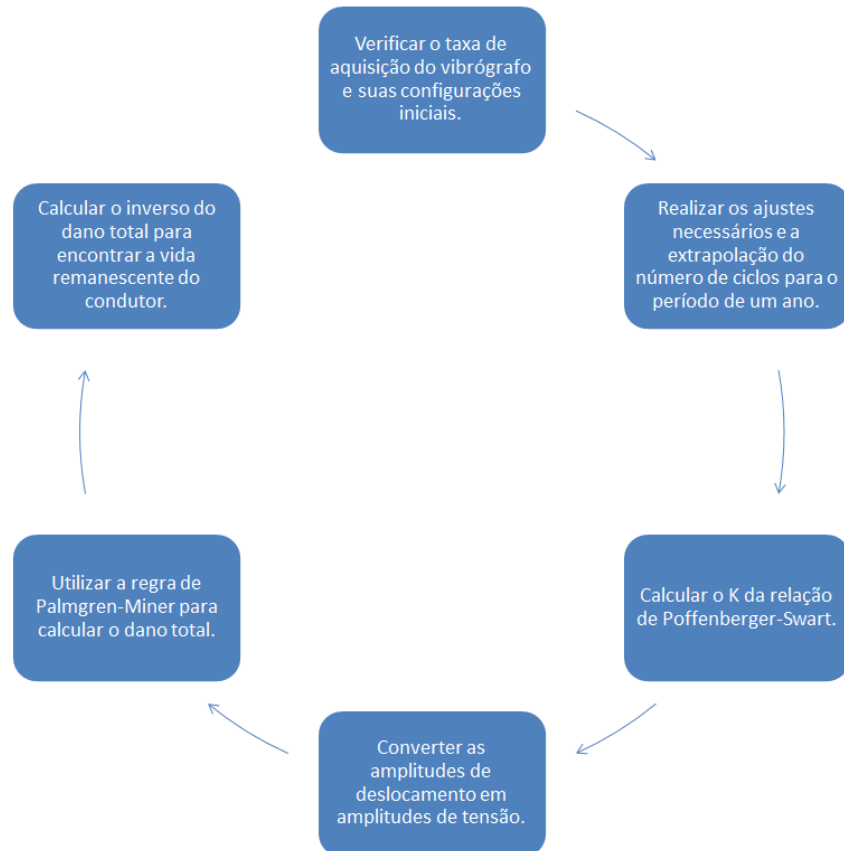


Figura 23 – Modelo esquemático procedimento de cálculo da vida remanescente.



## 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 - ANÁLISES DE RESISTÊNCIA À FADIGA

Para quantificar a resistência a fadiga do cabo condutor foi analisada todas as matrizes obtidas dos vibrógrafos, tanto para a análise 1 quanto para a análise 2. Entretanto, por uma questão de clareza, apenas os dados do vibrógrafo que corresponde à condição mais severa com relação à fadiga do cabo na análise 1 e na análise 2 serão apresentados.

#### 4.1.1 - ANÁLISE 1

Na análise 1 a situação mais severa (local 2) é descrita pela distribuição de megaciclos/ano disposta na Figura 24, esses dados foram retirados da matriz do vibrógrafo instalado em campo. A partir dessa distribuição foi realizada uma avaliação quantitativa da vida remanescente do condutor.

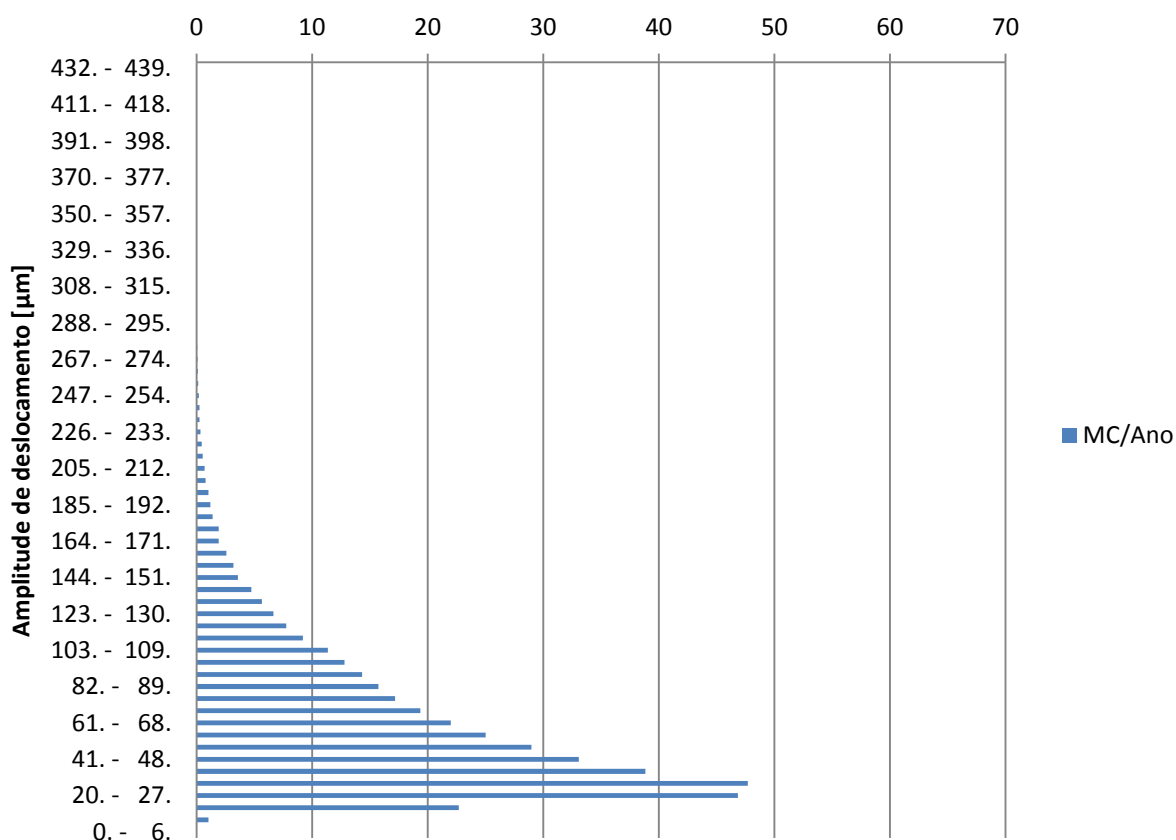


Figura 24 – Distribuição de megaciclos por ano da situação mais severa da análise 1.

O resultado da análise indicou uma vida remanescente de 227,8 anos a partir dos dados levantados da curva S-N do cabo de alumínio liga 6201 para 4 quebras. A planilha contendo os passos intermediários utilizados para o cálculo é apresentada no apêndice A.

Nesse sentido, a Figura 25 mostra, para cada faixa de deformação da matriz de frequência versus amplitude, o número de mega-ciclos ocorrido extrapolado para um ano contra a amplitude de deformação (pico a pico) para os pontos mais críticos do local 2. Nessa mesma figura também estão traçados os níveis aceitáveis de amplitude de deformação segundo as metodologias da IEEE (150  $\mu\text{s}$ ), da EPRI (165  $\mu\text{s}$ ) e das “Utilities” (300  $\mu\text{s}$ ).

Pode-se notar claramente que, no local 2 os níveis de vibração eólica excedem os limites de amplitude de deformação da IEEE, do EPRI e das “Utilities”. Estes limites admissíveis de deformação são considerados conservativos. Portanto, a violação desses limites pode ser interpretada apenas como um indicativo de que cabo não terá mais uma durabilidade “ilimitada”, mas a princípio não explica a ocorrência de falhas por fadiga em período inferior a 2 anos de operação da linha.

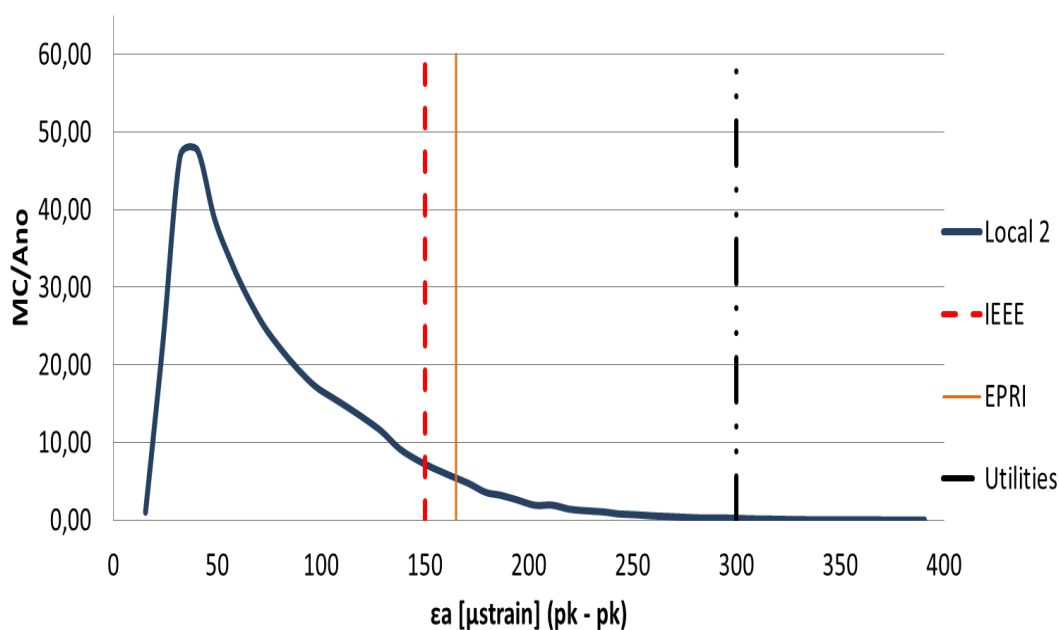


Figura 25 – Número de megaciclos por ano para cada faixa de deformação (pico a pico) para a situação mais severa.

#### 4.1.2 - ANÁLISE 2

Na análise 2, por só existir um local, a situação é descrita pela distribuição de megaciclos/ano disposta na Figura 26, esses dados foram retirados da matriz do vibrógrafo

instalado em campo. A partir dessa distribuição foi realizada uma avaliação quantitativa da vida remanescente do condutor.

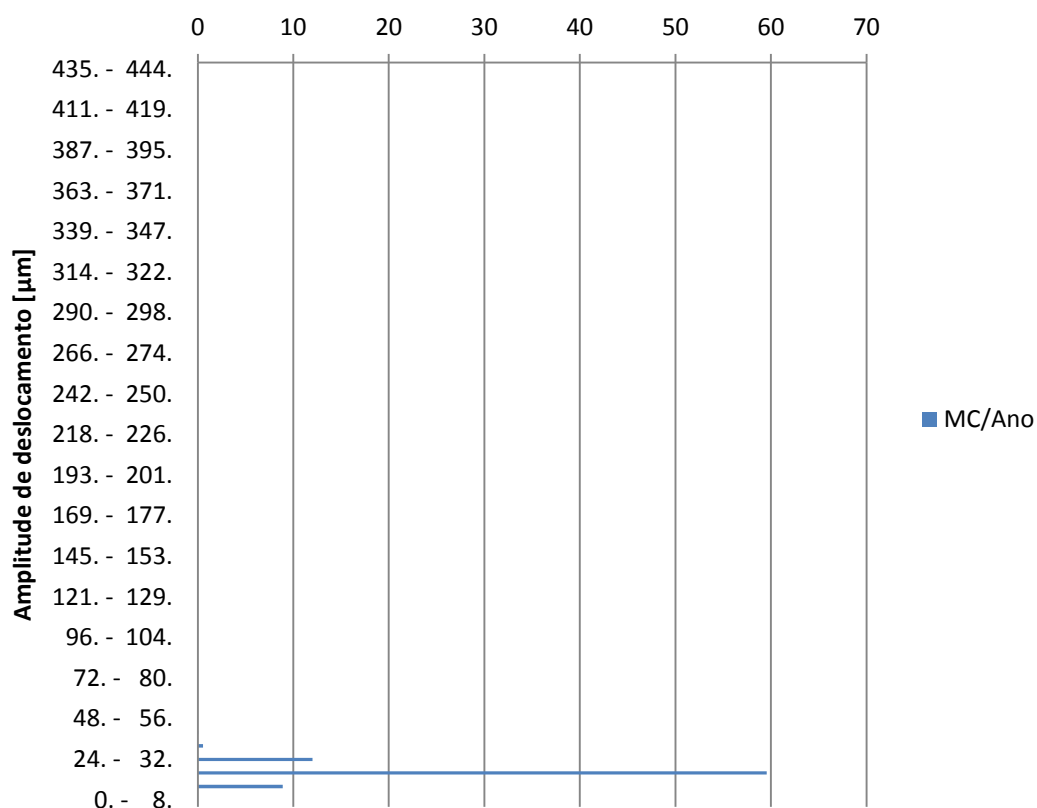


Figura 26 Número de megaciclos por ano para cada faixa de deformação (pico a pico) para a situação mais severa.

O resultado da análise indicou uma vida remanescente de  $7,4 \times 10^7$  anos a partir dos dados levantados da curva S-N do cabo de alumínio liga 6201 para 4 quebras. A planilha contendo os passos intermediários utilizados para o cálculo é apresentada no apêndice B.

Nesse sentido, a Figura 27 mostra, para cada faixa de deformação da matriz de frequência versus amplitude, o número de mega-ciclos ocorrido extrapolado para um ano contra a amplitude de deformação (pico a pico) para os pontos mais críticos do local 3. Nessa mesma figura também estão traçados os níveis aceitáveis de amplitude de deformação segundo as metodologias da IEEE (150 μs), da EPRI (165 μs) e das “Utilities” (300 μs).

Pode-se notar claramente que, no local 3 nenhum dos níveis de vibração eólica excedem os limites de amplitude de deformação da IEEE, do EPRI e das “Utilities”. Portanto, para este local pode-se interpretar que o cabo terá uma durabilidade “ilimitada”.

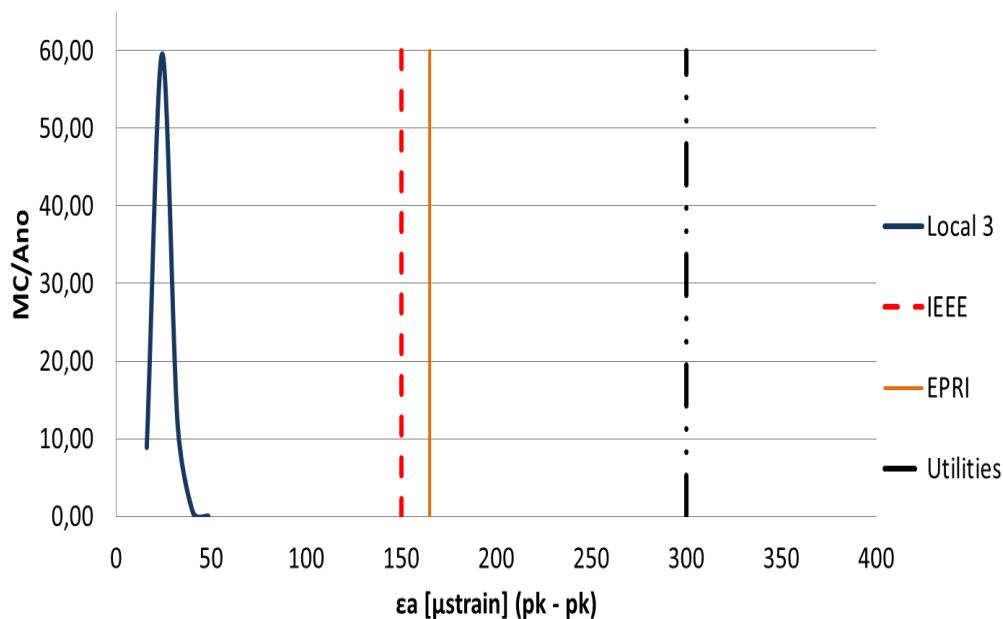


Figura 27 Número de megaciclos por ano para cada faixa de deformação (pico a pico) para a situação mais severa.

## 4.2 - POSSIVEL HIPÓTESE DA RUPTURA PREMATURA POR FADIGA NA LT

A conjunção de três fatores parece estar levando ao cabo de alumínio liga 6201 à ruptura por fadiga. Essa hipótese foi alcançada devido ao fato de que esses fatores existem separadamente ou em conjunto, aos seus pares, em outras linhas de transmissão não ocasionando a ruptura prematura da linha de transmissão.

### 4.2.1 - PRIMEIRO FATOR – INFLUÊNCIA DO MATERIAL

Dados comparativos extraídos no Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia da UnB mostram que o cabo de alumínio liga 6201, em regime de fadiga de alto número de ciclos, falha com vidas correspondentes a apenas 15 a 20% das observadas para cabos CAA (ACSR).

A Figura 28 compara as curvas S-N para um cabo CAA liga 1350 (ACSR) com o cabo de alumínio liga 6201 (CAL). Fica bastante evidente a partir dessa Figura que os cabos CAL, para uma mesma condição de amplitude de tensão, apresentam um tempo de vida muito inferior ao cabo com liga 1350 (ACSR). Esses dados são recentes e inéditos e, portanto não estavam disponíveis nem eram conhecidos em nível nacional ou internacional.

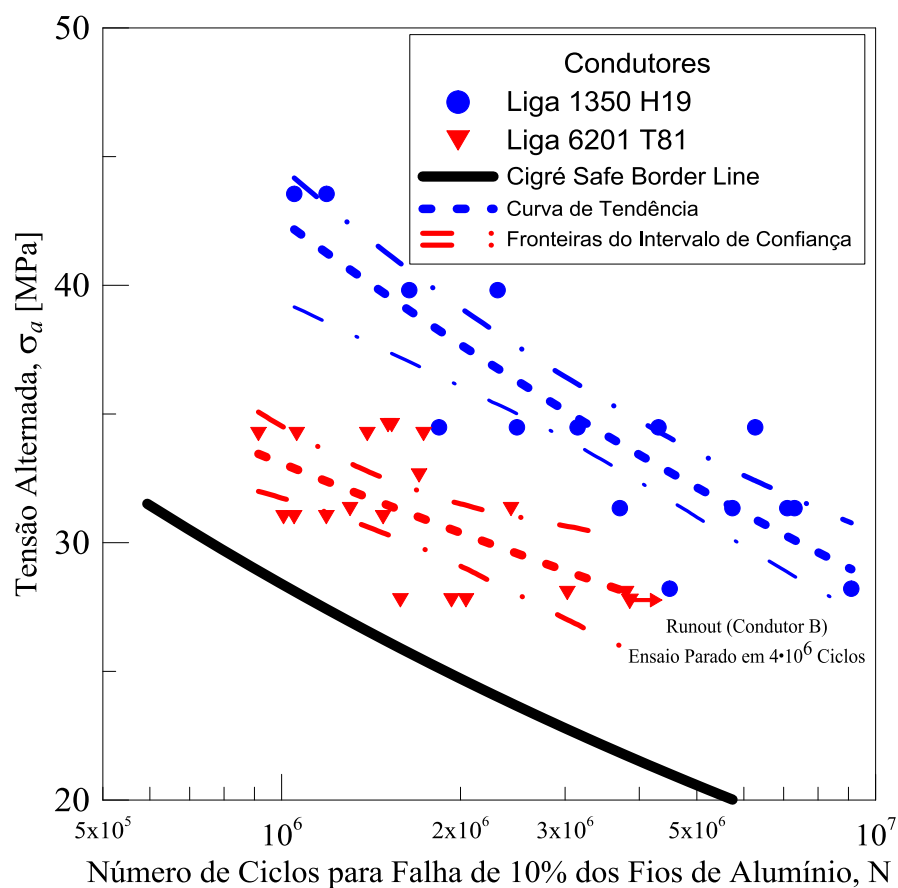


Figura 28 – Curva comparativa do condutor Liga 1350 com a curva do condutor Liga 6201.

#### 4.2.2 - SEGUNDO FATOR – DOBRAMENTO DO CONDUTOR NO ESPAÇADOR

Durante o lançamento de cabos dispostos em feixes verticais devido a grande dificuldade do procedimento, muitas das vezes, não é possível manter um espaçamento ideal entre os cabos igual ao especificado em projeto. Com isso, o uso de espaçadores verticais rígidos pode ocasionar um dobramento (flexão) localizado do cabo na ligação cabo/espaçador, aumentando a tensão média de flexão nos fios do condutor.

O efeito de tensões médias sobre a resistência a fadiga do cabo é pouco conhecido. Porém, Fadel 2010 mostra que pequenos aumentos nos níveis de tensão média de tração do cabo podem provocar uma severa redução na durabilidade do cabo.

Por outro lado, apesar do fenômeno do dobramento forçado do cabo causado por espaçadores verticais ser conhecido, não há recomendações ou restrições em normas ou em outras fontes na literatura com relação ao seu uso.

Mais ainda, há exemplos de feixes verticais em outros locais no Brasil e no exterior operando por décadas sem ruptura por fadiga. A Fig. 26 ilustra as diferentes configurações associadas a este efeito. Na Fig.26(b) apresenta-se a configuração idealizada em que o

espaçamento entre os cabos é igual ao comprimento do espaçador vertical rígido, não havendo dobramento do cabo. Nas Figuras 29(a) e 29(c) apresentam-se as configurações em que o espaçamento entre os cabos teve que ser forçadamente reduzido ou aumentado. Além disso, a presença desse espaçador rígido entre os cabos também constitui uma severa restrição a eventuais movimentos de corpo rígido em contra-fase associados à translação e ou rotação dos cabos. Isto pode gerar solicitações adicionais de flexão/dobramento combinados a torção. Na linha de transmissão em estudo, foi relatado, por alguns funcionários, que todas as situações estavam presentes, confirmando a grande dificuldade de se manter um espaçamento ideal.

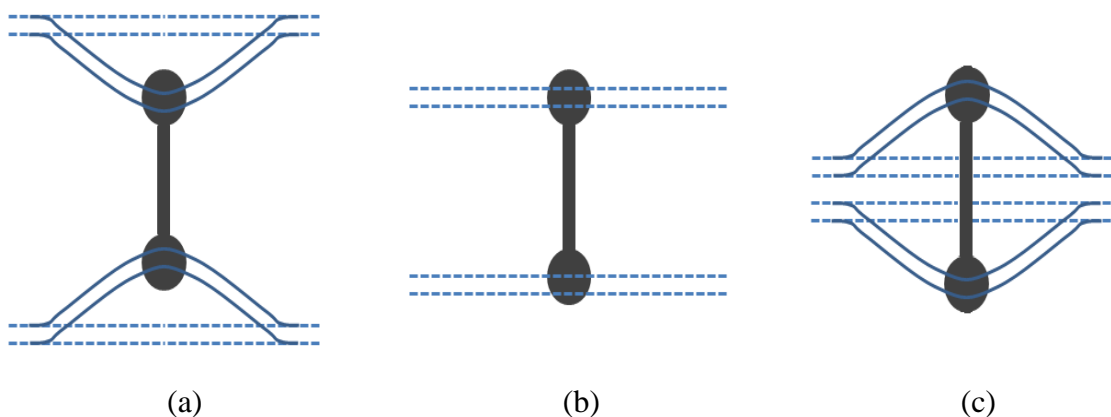


Figura 29 – Diferentes configurações da montagem do espaçador entre cabos (a) espaçamento entre cabos maior que o espaçador (b) Montagem ideal (c) espaçamento entre cabo menos que o espaçador.

#### 4.2.3 - TERCEIRO FATOR – INCIDÊNCIA CONSTANTE DE VENTOS

A análise dos dados de vibração coletados pelo PAVICA posicionado próximo ao espaçador no centro do vão do Local 2, mostra que há percentuais de dano muito elevados causados por ventos da ordem de 2,6 a 4,8 m/s que fazem o cabo vibrar continuamente em frequências elevadas (de 18 a 30 Hz) e amplitudes de deformação consideradas “admissíveis”. A Figura 30 ilustra o percentual de vida consumida do cabo para os eventos (ciclos de carregamento) registrados em uma determinada faixa de frequência (ou de velocidade de vento). Nota-se que apenas na frequência de 29 Hz (correspondente a ventos de aproximadamente 4,5 m/s) consumiu-se mais de 12 % da vida desse cabo condutor e que a grande parte da vida como um todo (aproximadamente 80%) foi consumido para frequências entre 18 e 30 Hz.

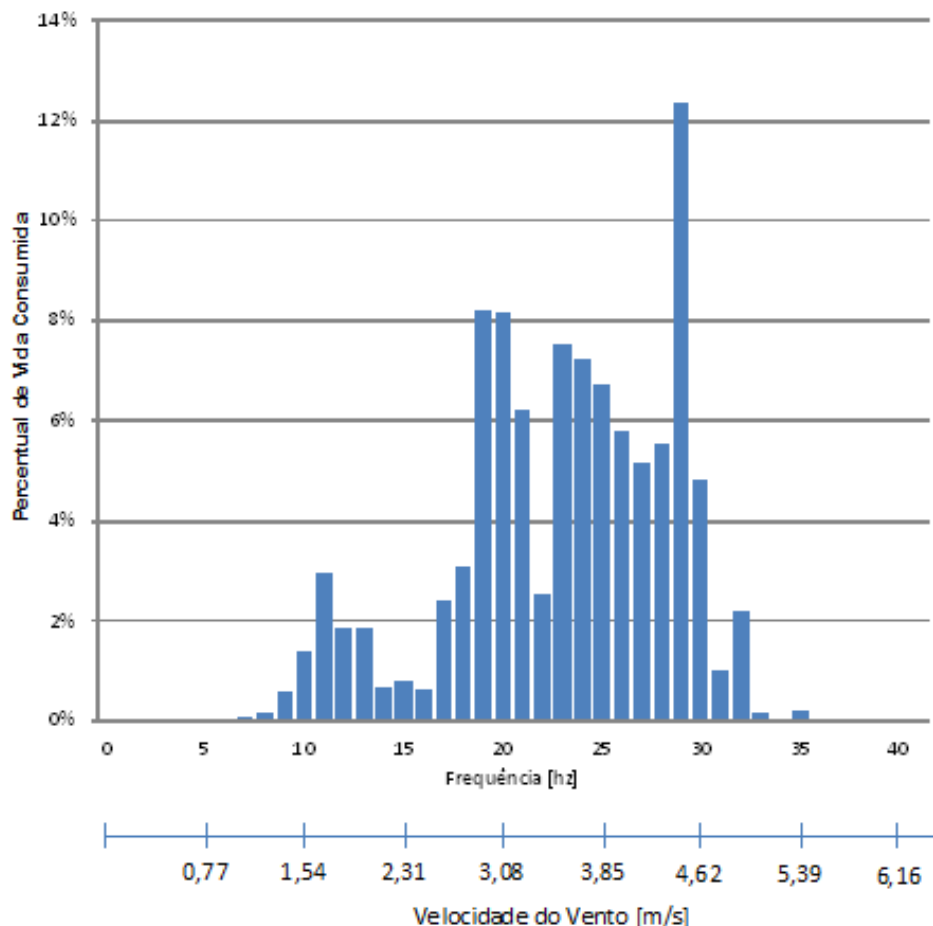


Figura 30 – Percentagem de vida consumida do cabo por faixa de frequência/faixa de velocidade de vento

### 4.3 - QUANTIFICAÇÃO DAS TENSÕES MÉDIAS CAUSADAS PELOS ESPAÇADORES

Na tentativa de quantificar o efeito das tensões médias, ocasionadas devido à utilização de espaçadores em feixes verticais, onde não foi possível manter um espaçamento ideal entre os condutores, realizaram-se novamente as contas da expectativa de vida, porém multiplicando as amplitudes de deslocamento por fatores inteiros.

A partir do estudo realizado no item 4.1 pode-se perceber que o Local 2 é o local crítico da análise, portanto a quantificação do efeito das tensões médias nos condutores somente foi realizada para este ponto.

Dentre os vários valores testados, observou-se que a ordem grandeza 2 foi a que melhor se adequou ao resultado encontrado, praticamente ajustando-se ao caso real da linha em estudo. Este resultado pode ser visto na Tabela 8, que contém a previsão de vida

para o condutor tanto para as condições da curva CSBL quanto para a curva S-N encontrada no laboratório. Em ambos os casos, está descrito os resultados para as amplitudes de deslocamento originais encontradas na matriz do Pavica e para as mesmas amplitudes de deslocamento, porém agora com os resultados multiplicados pela ordem de grandeza de 2.

Tabela 8 – Previsão de do condutor para os resultados originais e para as amplitudes de deslocamento multiplicadas pelo fator 2.

EDS - 20%		
	CSBL	Liga 6201
Original	33,5	227,8
Fator 2	0,7	2,7

#### 4.4 - ANÁLISE DAS FALHAS

Com o objetivo de identificar um possível motivo para a falha prematura dos cabos de alumínio liga 6201, realizou-se o mapeamento das falhas ocorridas nas amostras ensaiadas para obtenção da curva S-N e a análise das características das falhas.

##### 4.4.1 - MAPEAMENTO DA POSIÇÃO E DA ORDEM DE OCORRÊNCIA DAS FALHAS

O mapeamento das falhas considera dois aspectos principais:

- i. O registro da sequência das falhas segundo a camada (externa ou interna)
- ii. A posição de ocorrência da falha com referência à boca do grampo de suspensão

A partir desse mapeamento, com um conhecimento dos pontos de maior incidência de falha, é possível estabelecer metodologias de manutenção apropriadas, assim como propor modificações nas ferragens utilizadas nas linhas de transmissão, visando minimizar o efeito de fadiga por *fretting* nas linhas de transmissão.

Com o monitoramento realizado durante a execução do ensaio é possível identificar a ordem da quebra, essa análise é feita a partir do gráfico de rotação do cabo no tempo. Por exemplo, a Figura 31 apresenta um gráfico exemplificativo com os sinais relativos à rotação do cabo ao longo do tempo, nele podemos claramente notar que até 1,23 milhões de ciclos, o ângulo de rotação é negativo e permanece praticamente constante. A partir



desse instante há uma mudança no ângulo de rotação medido pelos sensores laser de deslocamento, de tal forma que esse agora passa para um novo patamar com valor positivo.

Esse evento discreto, onde ocorre a mudança de patamar para o ângulo de rotação, caracteriza o processo de ruptura do primeiro fio de alumínio. Entretanto, ainda não é possível afirmar em qual camada essa ruptura ocorreu. Pode-se também observar uma nova mudança de patamar quando o ensaio atinge a marca de 3,51 milhões de ciclos, nela o ângulo de rotação sofre novamente um incremento no sentido positivo, isso demonstra que a outra ruptura do fio ocorreu na mesma camada da ruptura anterior.

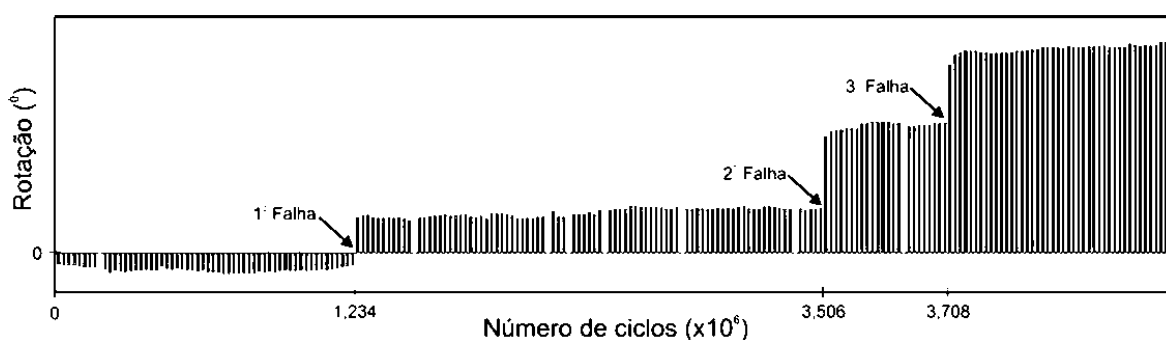


Figura 31 – Gráfico mostrando a rotação do cabo que indica o momento das quebras (Fadel, 2010).

Cabe ressaltar que, uma falha em outra camada seria caracterizada por uma rotação em sentido contrário, levando o ângulo de rotação para um patamar inferior e não superior como indicado. A terceira quebra é evidenciada no gráfico com 3,71 milhões de ciclos e implica em um giro no mesmo sentido da segunda quebra. Ao término do ensaio com a abertura do grampo de suspensão e o corte da amostra na região do grampo, se faz necessária a inspeção visual para assegurar que essas quebras realmente existiram.

A experiência de laboratório mostra que esta metodologia adota é bastante confiável, porém, imprecisões podem ocorrer devido a vários fatores, entre eles mudanças bruscas de temperatura, pausas prolongadas na realização do ensaio e deslocamentos do aparato de fixação do *shaker* ao cabo.

#### 4.4.2 - POSICIONAMENTO DAS FALHAS EM RELAÇÃO ÀS CAMADAS

Ao término dos ensaios com a abertura dos grampos de suspensão e o corte da amostra na região dele, foi realizada a inspeção visual para determinar os parâmetros das falhas e cumulativamente a análise de todos os gráficos.

Como exemplo das falhas ocorridas nas camadas externas, utilizaremos a Figura 32, onde é possível constatar que realmente existiam fios rompidos.

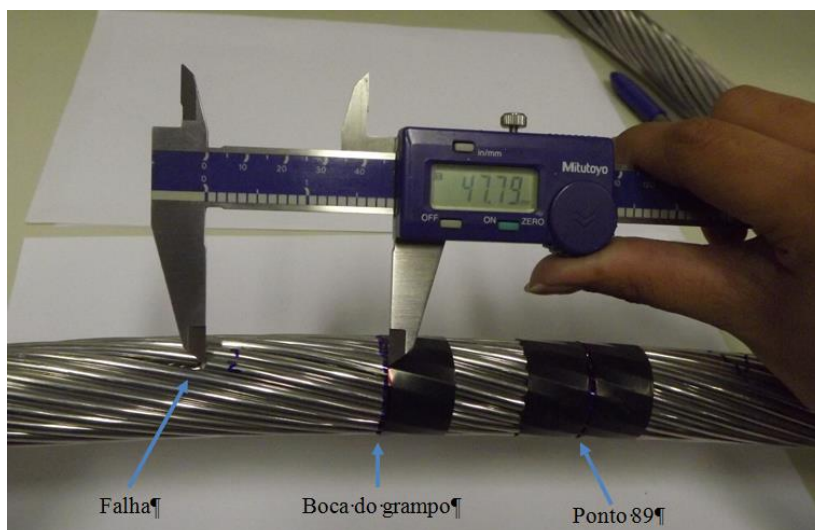


Figura 32 – Detalhe da amostra com falha na camada externa.

Já como exemplo das falhas ocorridas na camada interna, utilizaremos a Figura 33.

Por meio da análise da figura anterior, pode-se constatar que as falhas internas ocorridas na segunda camada de alumínio localizam-se sobre as marcas de desgaste por *fretting*, indicando que as trincas desenvolvem-se devido à combinação dos esforços estáticos (EDS) e dinâmicos (resultantes do dobramento alternado do condutor nos pontos de restrição de movimento). Entretanto seu processo de nucleação e crescimento inicial parece ser significativamente agravado pelo efeito de *fretting*.

Em casos mais simples seria possível computar o impacto do desgaste por *fretting*, ensaiando a amostra com e sem o *fretting*, para simular sua ação controlada, gerando dados para realizar a comparação. Entretanto, no caso dos condutores, esse efeito é muito complexo, pois envolve o contato de fio/grampo e de fio/fio, que geram alterações nos parâmetros da rigidez devidas tanto ao problema de contato quanto à tensão média, tornando essa abordagem extremamente complexa. (Fadel, 2010)



Figura 33 – Detalhe da amostra com falha na camada interna.

A Tabela 9 apresenta a distribuição das falhas de acordo com a camada de ocorrência, sendo E – falha na camada externa e I – falha na camada interna.

Tabela 9 – Ordem das falhas por camada.

EDS	Amostra	$Y_b$ [mm]	CAMADA DE OCORRÊNCIA DE FALHA					
			1ª quebra	2ª quebra	3ª quebra	4ª quebra	5ª quebra	6ª quebra
20%	2	0,80	E	I	E	I		
	5	0,80	I	E	E	I	I	
	7A	0,80	E	I	I			
	8B	0,80	E	I	I	I	E	E
	11	0,80	E	I	I	E	E	I
	3	0,89	I	I	E	E		
	4	0,89	I	E	I	E		
	9A	0,89	I	I	E	I	E	
	9B	0,89	I	E	I	E	I	E
	1	0,98	E	E	E	E	E	E
	6	0,98	I	E	I	E	E	
	7B	0,98	I	E	E	I	E	
	8A	0,98	I	E	I	I	E	E
	10	0,98	I	E	I	E	E	

Foram contabilizadas 70 falhas nos 14 ensaios, sendo 38 falhas externas (54,28%) e 32 falhas internas (45,71%). Se considerarmos até a quarta quebra, ou seja, o próximo número inteiro a partir de 10% do número de fios, a distribuição muda para 47% e 53% respectivamente, como pode ser visto da Figura 34.

Com o objetivo de entender melhor o fenômeno ocorridos nos ensaios, a Figura 35 apresenta os percentuais de todas as falhas ocorridas nas camadas externas e internas para cada nível de deslocamento dinâmico ensaiado, não se considerando, portanto, o limite de 4 quebras por ensaio.

De acordo com o gráfico da Figura 35, parece haver uma tendência à redução das falhas internas com o aumento do deslocamento dinâmico imposto ao cabo. Já para as falhas externas essa tendência parece ser contrária. Esta observação também pode ser constatada nos ensaios realizados por Fadel (2010) em sua tese de doutorado para pequenas amplitudes.

Outra análise feita é em relação da posição da falha com o grampo de suspensão, podendo ela ser, nesse caso, no topo ou na base do grampo.

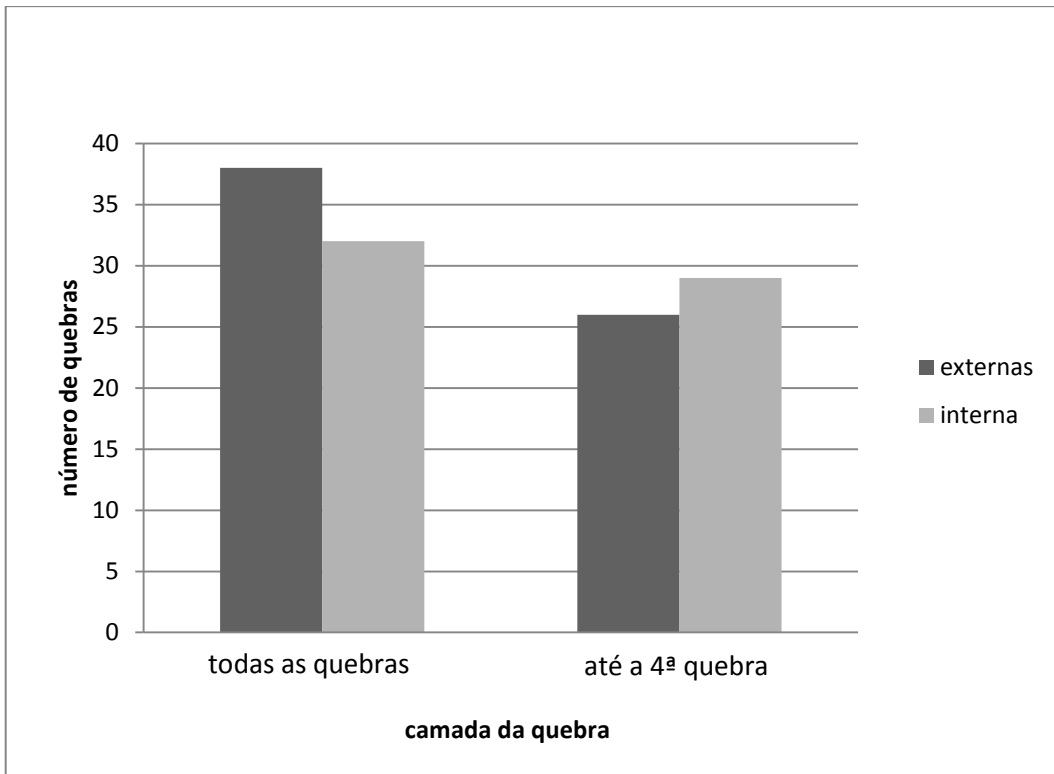


Figura 34 – Distribuição das falhas por camada para todos os ensaios e até a 4ª quebra.

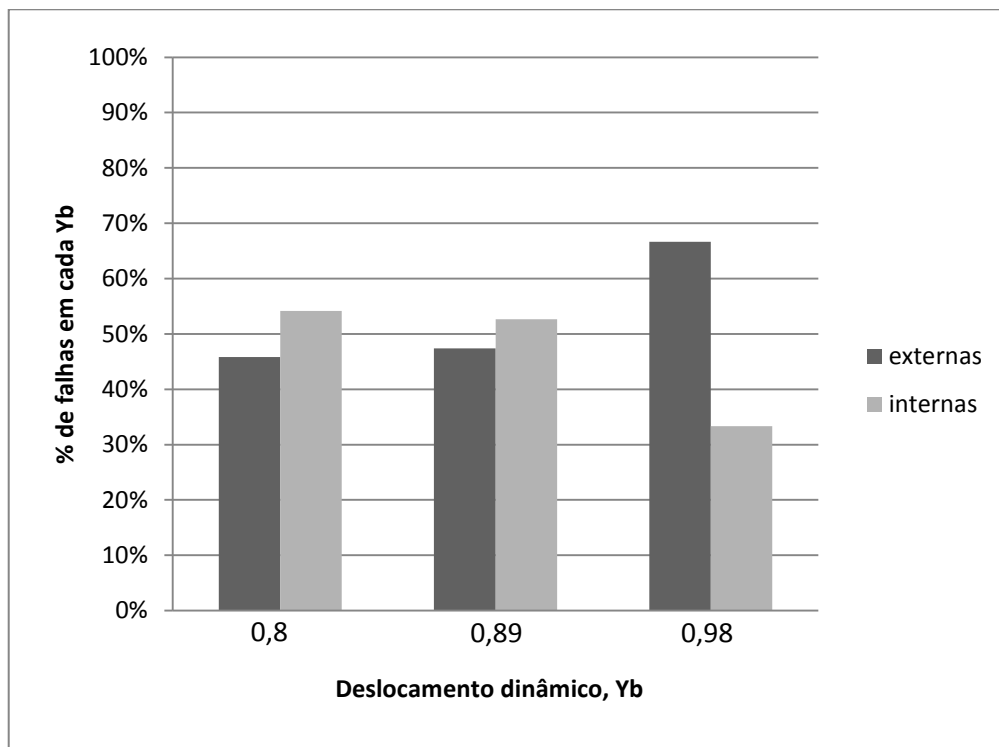


Figura 35 – Percentuais das falhas externas e internas para cada nível de deslocamento dinâmico.

A Tabela 10 mostra a distribuição das falhas em relação ao topo ou a base do grampo de suspensão.

Tabela 10 – Posicionamento da falha em relação ao grampo.

Amostra	Yb [mm]	POSIÇÃO DA FALHA EM RELAÇÃO AO GRAMPO					
		1ª quebra	2ª quebra	3ª quebra	4ª quebra	5ª quebra	6ª quebra
2	0,80	T	T	T	T		
5	0,80	T	T	T	T	T	
7A	0,80	T	T	T			
8B	0,80	T	T	T	T	B	T
11	0,80	T	T	T	T	B	T
3	0,89	T	T	T	T		
4	0,89	T	T	T	T		
9A	0,89	T	T	T	T	T	
9B	0,89	T	T	T	T	T	T
6	0,98	T	T	T	T	T	
7B	0,98	T	T	T	T	T	
8A	0,98	T	T	T	T	T	T
10	0,98	T	T	T	T	T	
1	0,98	T	T	T	T	T	T

Da tabela, observamos que 97% do total de falhas ocorreram no topo do cabo, enquanto somente 3% delas ocorreram na base.

Um dos possíveis motivos dessa predominância de falhas no topo do cabo é devido ao fato de o grampo de suspensão utilizado para realizar os testes estar no seu limite dimensional, explicando: cada grampo de suspensão possui limites inferior e superior da dimensão do cabo a ser utilizado nesse grampo. Nesses ensaios foram utilizados grampos com limites superiores de 29 mm e inferiores de 17 mm. Pode-se observar então que o limite superior dimensional do grampo está muito próximo ao diâmetro do cabo (27,7mm) o que pode justificar essa tendência. A partir desse fato surge a pergunta, porque não utilizar outro grampo de suspensão? Bem, estes grampos são padronizados, sendo assim o próximo grampo da sequência possui limite inferior de 28 mm e superior de 33 mm não tornando prudente utiliza-lo.

Cabe ressaltar que esses testes são realizados nas condições mais severas possíveis, tornando o resultado final do ensaio conservador. Por esse motivo não foi solicitado à confecção de grampos de suspensão ótimos para a realização do ensaio, fato que deve ser observado caso empresas desejem utilizar esse cabo condutor.

Foram registras 68 falhas no topo e somente 2 na base, contabilizando todas as falhas. Se considerarmos a incidência de falhas até a 4ª quebra serão contabilizadas 55 falhas no topo e nenhuma na base.

A Figura 36 evidencia a presença de desgaste no topo do cabo durante a realização do ensaio.

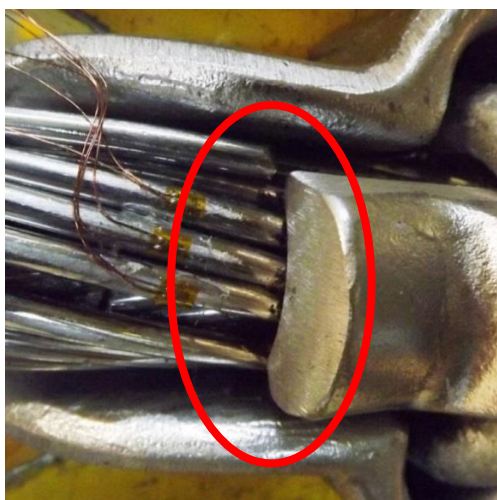


Figura 36 – Evidência de desgaste no topo do cabo.

#### 4.4.3 - POSICIONAMENTO DAS FALHAS EM RELAÇÃO AO GRAMPO

A seguir será realizada a análise da posição da falha em relação à boca do grampo de suspensão.

Para melhor esclarecer como foi realizada a medida da posição da falha, a Figura 37 ilustra um caso exemplificativo.

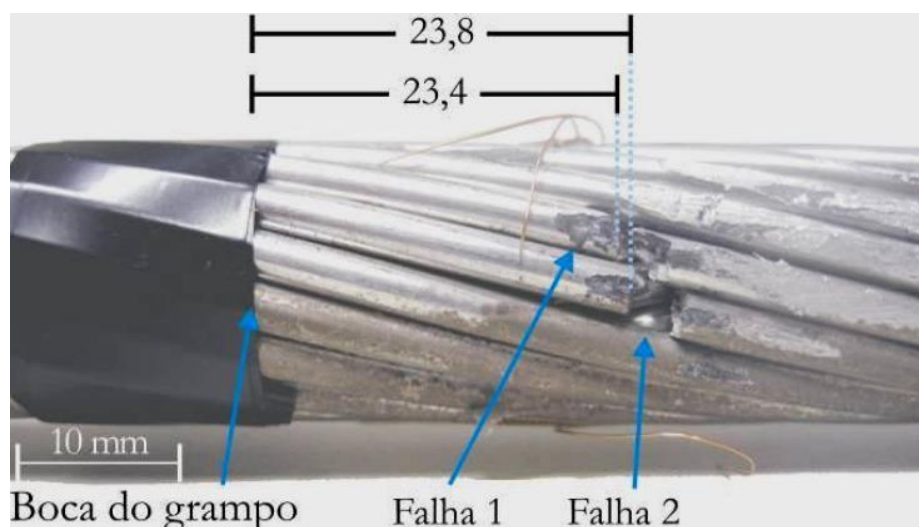


Figura 37 – Localização da distância das falhas (Fadel, 2010).

Analisando a figura anterior, observa-se que os posicionamentos dos pontos de falha foram determinados através da distância entre o fio rompido e a boca do grampo de suspensão pelo lado do vão ativo.

A Figura 38 permite visualizar o procedimento de medição da falha em relação ao grampo.

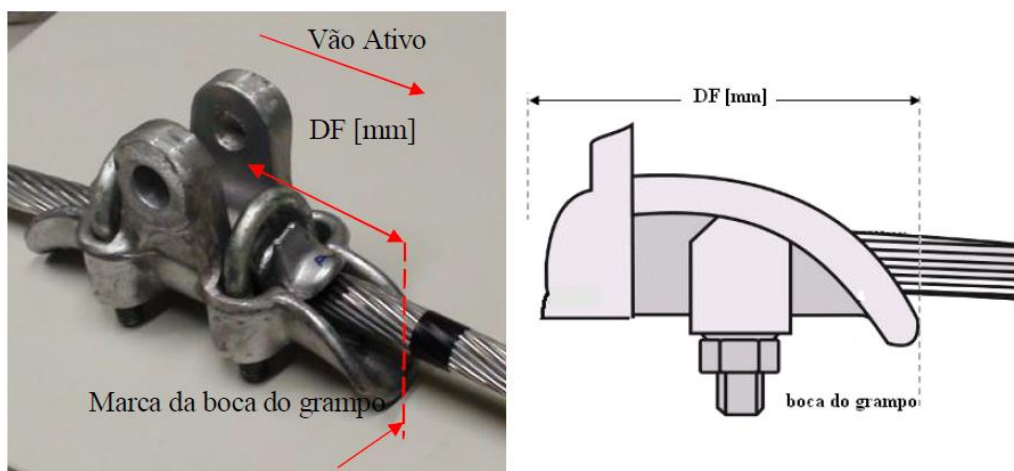


Figura 38 – Referencial para medição da posição da falha (Fadel, 2010).

onde DF é a distância da falha.

A distribuição das quebras nos 14 ensaios realizados, de acordo com a medida da distância da boca do grampo à falha, está disposta na Tabela 11. Essa tabela apresenta ainda a distribuição da distância média da falha, DMF, na camada externa e na camada interna.

Tabela 11 – Posição das falhas nos fios das amostras dos cabos ensaiados

Amostra	$Y_b$ [mm]	CAMADA DE OCORRÊNCIA DE FALHA						DMF <sub>ext</sub> [mm]	DMF <sub>int</sub> [mm]
		Distância até a boca do grampo [mm]							
2	0,80	48,78 <sup>T</sup>	34,59 <sup>T</sup>	46,51 <sup>T</sup>	39,69 <sup>T</sup>			47,65	37,14
5	0,80	23,32 <sup>T</sup>	50,68 <sup>T</sup>	49,79 <sup>T</sup>	31,16 <sup>T</sup>	20,29 <sup>T</sup>		50,24	24,92
7A	0,80	54,59 <sup>T</sup>	33,32 <sup>T</sup>	29,60 <sup>T</sup>				54,58	31,46
8B	0,80	41,85 <sup>T</sup>	24,30 <sup>T</sup>	20,30 <sup>T*</sup>	34,66 <sup>T*</sup>	33,23 <sup>b</sup>	44,15 <sup>T</sup>	39,74	26,42
11	0,80	41,04 <sup>T</sup>	25,05 <sup>T</sup>	36,12 <sup>T</sup>	42,89 <sup>T</sup>	31,30 <sup>b</sup>	25,07 <sup>T</sup>	38,41	28,75
3	0,89	35,26 <sup>T</sup>	39,39 <sup>T</sup>	41,16 <sup>T</sup>	41,76 <sup>T</sup>			41,46	37,33
4	0,89	36,08 <sup>T</sup>	39,46 <sup>T</sup>	22,28 <sup>T</sup>	45,96 <sup>T</sup>			42,71	29,18
9A	0,89	36,67 <sup>T</sup>	46,57 <sup>T</sup>	46,24 <sup>T</sup>	42,09 <sup>T</sup>	46,24 <sup>T</sup>		46,24	41,78
9B	0,89	35,04 <sup>T</sup>	48,05 <sup>T</sup>	47,11 <sup>T</sup>	48,05 <sup>T</sup>	32,26 <sup>T</sup>	48,05 <sup>T</sup>	48,05	38,17
6	0,98	32,90 <sup>T</sup>	36,82 <sup>T</sup>	27,59 <sup>T</sup>	43,51 <sup>T</sup>	40,55 <sup>T</sup>		40,29	30,25
7B	0,98	42,03 <sup>T</sup>	47,95 <sup>T</sup>	47,49 <sup>T</sup>	36,58 <sup>T</sup>	47,48 <sup>T</sup>		47,64	39,31
8A	0,98	34,77 <sup>T</sup>	43,91 <sup>T</sup>	36,21 <sup>T</sup>	39,49 <sup>T</sup>	48,14 <sup>T</sup>	45,24 <sup>T</sup>	46,10	36,82
10	0,98	33,29 <sup>T</sup>	41,47 <sup>T</sup>	46,13 <sup>T</sup>	43,60 <sup>T</sup>	51,21 <sup>T</sup>		45,43	39,71
1	0,98	45,13 <sup>T</sup>	36,19 <sup>T</sup>	39,45 <sup>T</sup>	39,87 <sup>T</sup>	41,23 <sup>T</sup>	53,15 <sup>T</sup>	42,50	42,93

\* quebra no mesmo fio

Podemos concluir que em média as falhas externas ocorrem a 45,07mm da boca do grampo, já as falhas internas ocorrem a 34,58mm. A distribuição das quebras de acordo com sua posição relativa ao grampo pode ser visualizada através da Figura 39. Essa dispõe o valor da média total da distância média de todos os ensaios realizados.

A seguir será realizado o mapeamento das falhas com relação ao nível de amplitude  $Y_b$  aplicado à amostra, lembrando que todos os ensaios foram realizados com uma EDS de 20%. Serão avaliadas quantidades e distribuição em relação às camadas. Com esse mapeamento poder-se-á identificar se as rupturas ocorridas no cabo possuem uma maior frequência dentro ou fora do grampo.

A análise da Figura 40 permite concluir que com o aumento do deslocamento dinâmico existe uma maior concentração da posição das falhas. No caso do  $Y_b$  de 0,98 mm, a distância média das falhas varia de 44,39 mm para a camada externa e 37,80 mm para a camada interna, observando-se uma maior quantidade de falhas em uma área menor.

Além disso, podemos perceber que grande parte das falhas internas ocorre no interior do grampo, ressaltando a importância de métodos preditivos para avaliação da resistência à fadiga da montagem cabo/grampo nas linhas de transmissão.

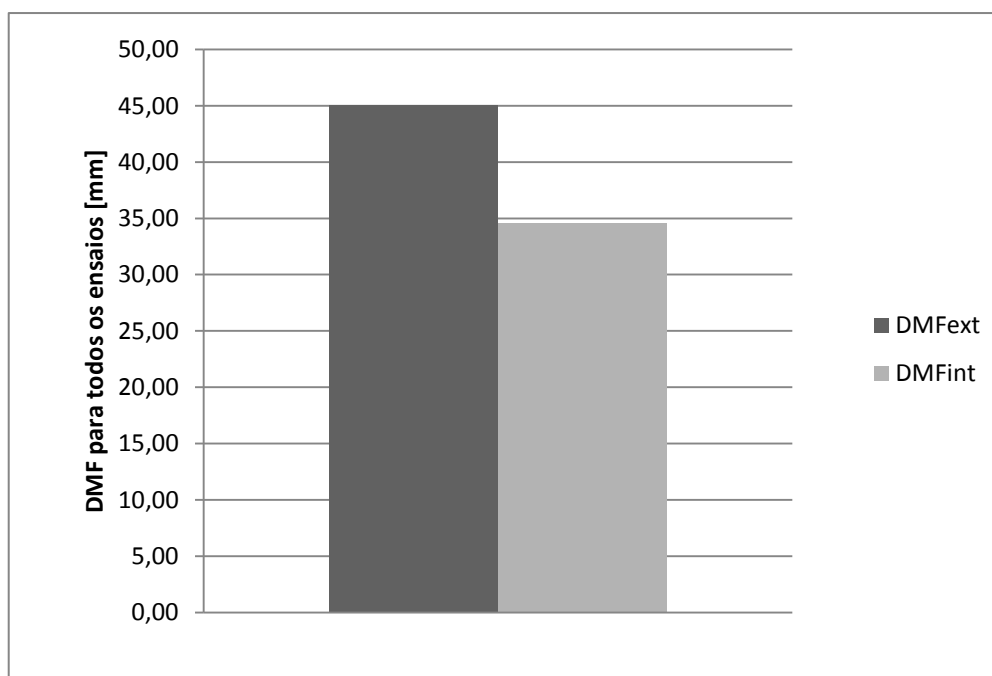


Figura 39 – Distância média total das falhas.



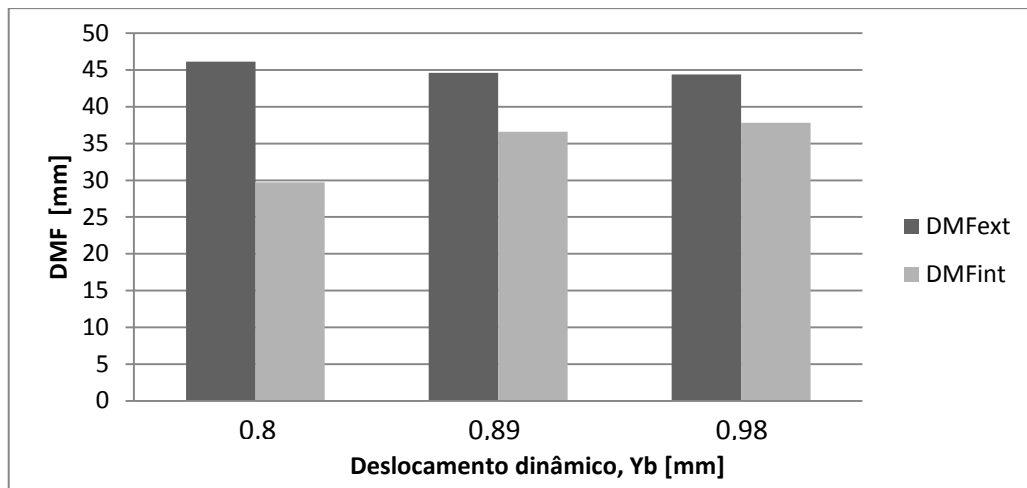


Figura 40 – Análise da distância média das falhas (DMF) nos fios de alumínio por  $Y_b$

Constitui-se, então, de fundamental importância para o projeto dessas linhas a adequada atenção à manutenção aliada a métodos de monitoramento de vibrações das linhas instaladas.

#### 4.4.4 - AVALIAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE FALHA

As falhas em metais ocorrem de diversas maneiras e, normalmente, estabelecem um padrão morfológico que aliado a indícios complementares, como a composição química do material, permite a determinação da causa da falha.

Neste ponto do trabalho será realizada uma avaliação das falhas propriamente ditas, quanto ao formato (macro e microscópico) da zona de falha. Com essa análise buscamos, através da superfície da fratura, indicar o registro detalhado do histórico da falha, bem como de algumas condições de ensaio como: histórico de carga aplicada, alterações ambientais, aspectos de qualidade do material, entre outros, de modo a nos permitir entender o comportamento do material.

##### 4.4.4.1 - AVALIAÇÃO MACROSCÓPICA DAS SUPERFÍCIES DE FALHA

A configuração macroscópica da falha depende, entre outros motivos, da amplitude de deslocamento imposta e da quantidade de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) produzido pela vibração devido ao contato.

Como é possível observar pela Figura 41, o óxido de alumínio acumula-se no grampo, provocando assim um desgaste mútuo. Esse fato nos leva a crer que partículas de óxido de silício estarão presentes no processo de desgaste dos fios em contato com o grampo visto que o material do grampo contém silício. (Fadel, 2010)

O estudo de Azevedo realizado no ano de 2009 aponta para o fato de as partículas e óxido de alumínio, outro tipo de óxido dessa vez formada devido ao contato fio/fio, encontradas presentes em cabos de linhas de transmissão, apresentam um formato acicular. Estudos revelam que esse formato é capaz de cortar a superfície do fio, de dureza bem menor. Assim pode-se apontar esse processo de formação de óxido de alumínio como um possível motivo para a aceleração do desgaste na camada externa e interna do cabo condutor (Azevedo, 2002).

A análise aqui realizada consiste num esforço para compilar as falhas obtidas dos ensaios e lançar possíveis hipóteses para o estabelecimento de um padrão de comportamento que podem vir a ser mostrar úteis.

As falhas em cabos desenvolvem-se segundo um padrão bastante conhecido, tendo origem frequentemente nos pontos onde o desgaste mostra-se mais acentuado como, por exemplo, as marcas elipsoides de *fretting* fio/fio (Figura 42), sendo essas mais definidas nas camadas internas.

Mas também podemos encontrar pontos de falha recorrentes nas marcas de desgaste plano entre o grampo de suspensão e o fio (Figura 43), comuns na camada externa.

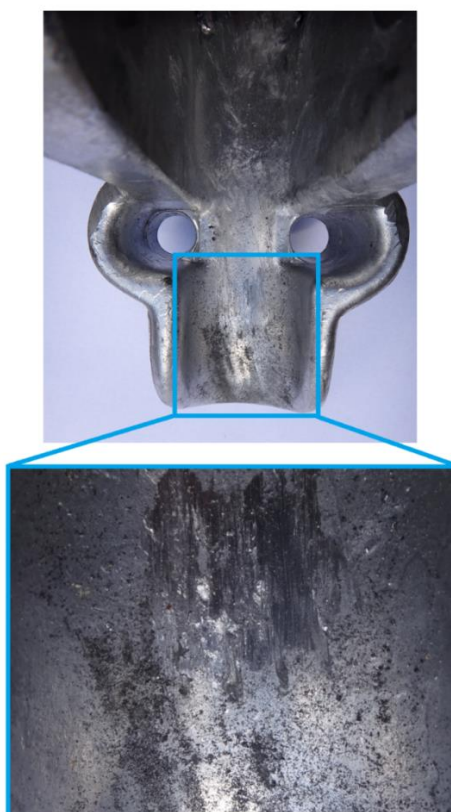


Figura 41 – Detalhe do grampo de suspensão após o ensaio.

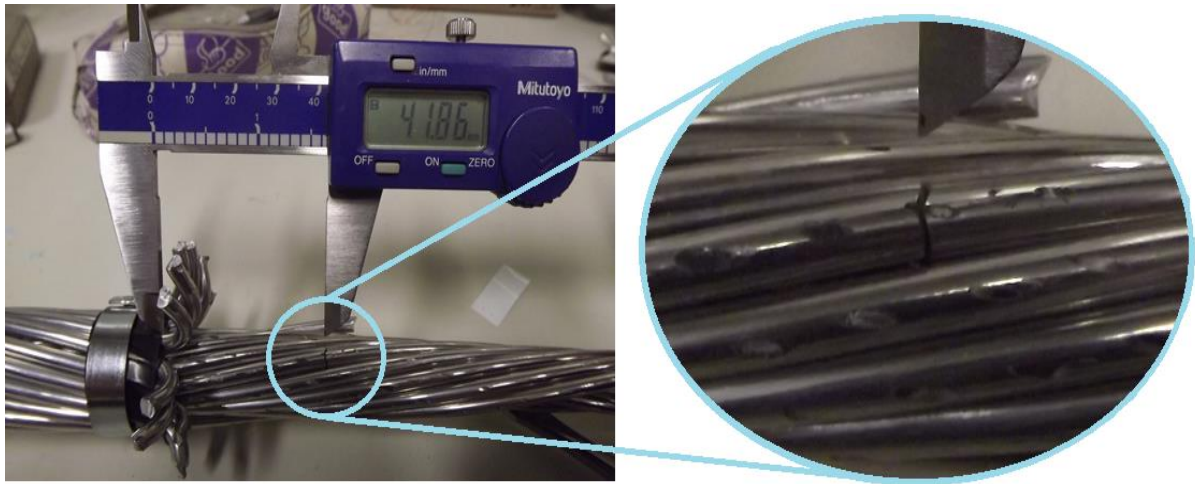


Figura 42 – Quebras nas camadas internas sobre as marcas elípticas de *fretting*.

De acordo com Fadel no ano de 2010, nas quebras decorrentes do desgaste cabo/grampo, a trinca origina-se nas bordas onde o material arrancado pelo *fretting* se acumula, formando pequenos “montes”. (Fadel, 2010)

A mesma observação foi realizada por Waterhouse em sua revisão acerca de *fretting* em cabos e cordas, da coletânea de artigos que gerou o livro *Fretting Fatigue*, editado pela ASTM (Mutoh *et al*, 2001).

Podemos observar esse fenômeno também presente nos ensaios laboratoriais conforme mostra a Figura 43

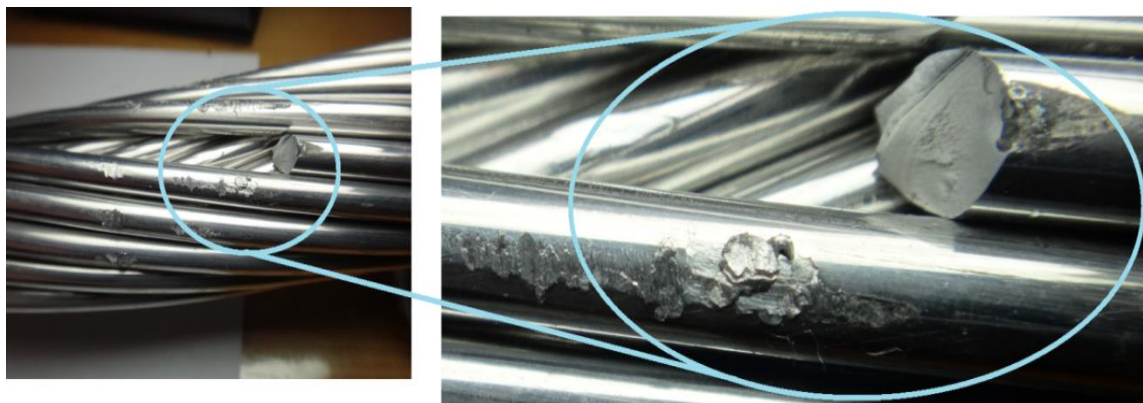


Figura 43 – “Montes” formados pela acumulação de material devido ao *fretting*.

Com o decorrer do processo de desgaste o acumulo do material na borda da falha é triturado pelo movimento persistente formando o pó do óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ), o qual é mais duro que o material da base (Al) e resulta no arranchamento de significativa quantidade de material dos fios, resultando na aceleração do desgaste da superfície de *fretting* (Figura 44).

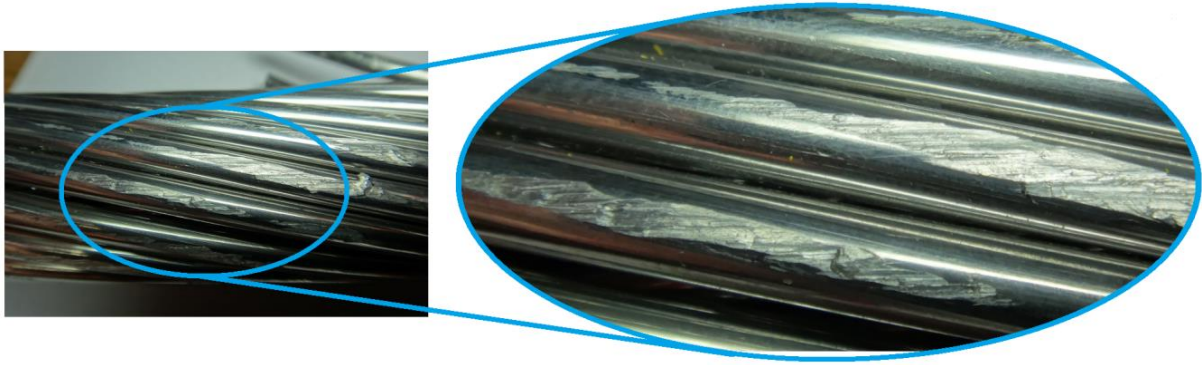


Figura 44 – Vista do desgaste avançado dos fios de alumínio.

Quanto ao formato das quebras há três padrões típicos de quebra:

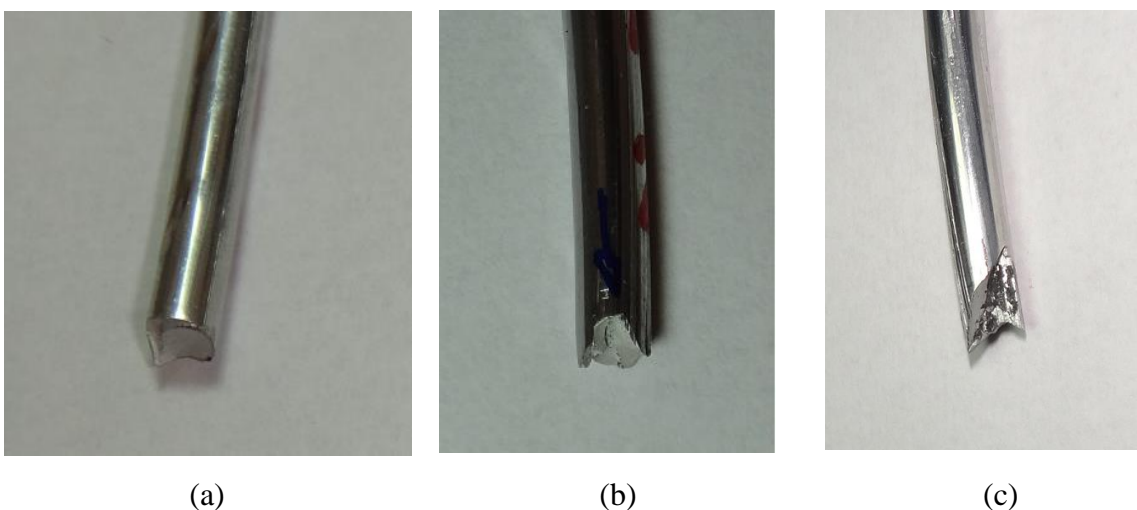
- i. a falha quasi-plana
- ii. a falha em “V”
- iii. a falha inclinada a 45°

As falhas **quasi-planas** (QP) (Figura 45 (a)) ocorrem com a evolução da trinca em um plano transversal à superfície do fio durante grande parte de seu crescimento, até que ocorra um arrancamento ou uma mudança de direção de 45°.

As falhas **em “V”** (V) (Figura 45 (b)) iniciam-se a 45° com a superfície e evolui até encontrar outra falha nascida na face oposta, ou até que a área remanescente entre as duas trincas não mais suporte a carga no fio.

As falhas **com inclinação de 45°** (45°) (Figura 45 (c)) avançam a 45° com a superfície até que seja arrancada em sua parte final.

A Figura 45 mostra esses tipos de falha, sendo a Q1 as falhas do tipo quasi-planas, Q2 as falhas em “V” e Q3 as falhas inclinadas a 45°



(a)

(b)

(c)

Figura 45 – Tipos de falhas catalogadas.

A distribuição das falhas nos 14 ensaios foi catalogada de acordo com o tipo de falha e estão dispostas da Tabela 12.

As falhas do tipo quasi-plana ocorrem com maior frequência nos ensaios em que a amplitude de vibração ( $Y_b$ ) é alta e são mais comuns no topo, especialmente nos fios da camada externa. Contabilizando todas as falhas, elas representam 10% das falhas externas e 7% das falhas internas. Já considerando apenas as quatro primeiras falhas, correspondem a 7% em ambos os casos. A Figura 46 mostra em detalhe um exemplo de falha quasi-plana.

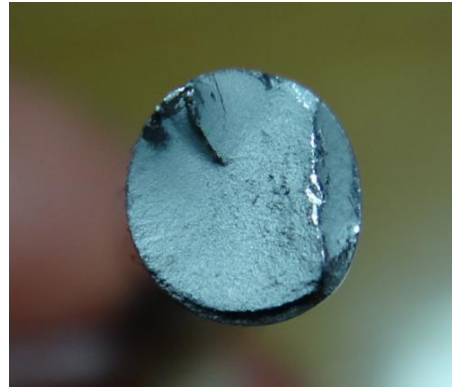
As falhas em “V” (Figura 47), talvez pelo modelo de grampo utilizado, possuem uma distribuição parecida em amplitudes de vibração ( $Y_b$ ) baixas e altas. Este tipo de falha é resultante de uma interação mais forte entre os fios da camada externa e interna e entre o grampo e os fios da camada externa, aumentando as forças de contato, que passam a gerar a fadiga por *fretting* nas duas faces do fio simultaneamente.

Tabela 12 – Tipologia das falhas.

Amostra	$Y_b$ [mm]	TIPOLOGIA DAS FALHAS					
		1ª quebra	2ª quebra	3ª quebra	4ª quebra	5ª quebra	6ª quebra
2	0,80	V <sup>E</sup>	45 <sup>oI</sup>	V <sup>E</sup>	V <sup>I</sup>		
5	0,80	V <sup>I</sup>	V <sup>E</sup>	45 <sup>oE</sup>	V <sup>I</sup>	QP <sup>I</sup>	
7A	0,80	V <sup>E</sup>	V <sup>I</sup>	45 <sup>oI</sup>			
8B	0,80	V <sup>E</sup>	45 <sup>oI</sup>	45 <sup>oI</sup>	V <sup>I</sup>	45 <sup>oE</sup>	V <sup>E</sup>
11	0,80	V <sup>E</sup>	V <sup>I</sup>	45 <sup>oI</sup>	45 <sup>oE</sup>	V <sup>E</sup>	45 <sup>oI</sup>
3	0,89	V <sup>I</sup>	45 <sup>oI</sup>	V <sup>E</sup>	QP <sup>E</sup>		
4	0,89	V <sup>I</sup>	V <sup>E</sup>	QP <sup>I</sup>	V <sup>E</sup>		
9A	0,89	45 <sup>oI</sup>	45 <sup>oI</sup>	QP <sup>E</sup>	45 <sup>oI</sup>	45 <sup>oE</sup>	
9B	0,89	45 <sup>oI</sup>	V <sup>E</sup>	45 <sup>oI</sup>	V <sup>E</sup>	45 <sup>oI</sup>	QP <sup>E</sup>
1	0,98	V <sup>E</sup>	V <sup>E</sup>	QP <sup>E</sup>	45 <sup>oE</sup>	V <sup>E</sup>	V <sup>E</sup>
6	0,98	45 <sup>oI</sup>	V <sup>E</sup>	V <sup>I</sup>	V <sup>E</sup>	QP <sup>E</sup>	
7B	0,98	V <sup>I</sup>	QP <sup>E</sup>	45 <sup>oE</sup>	QP <sup>I</sup>	QP <sup>E</sup>	
8A	0,98	V <sup>I</sup>	45 <sup>oE</sup>	QP <sup>I</sup>	45 <sup>oI</sup>	45 <sup>oE</sup>	45 <sup>oE</sup>
10	0,98	QP <sup>I</sup>	V <sup>E</sup>	45 <sup>oI</sup>	V <sup>E</sup>	V <sup>E</sup>	



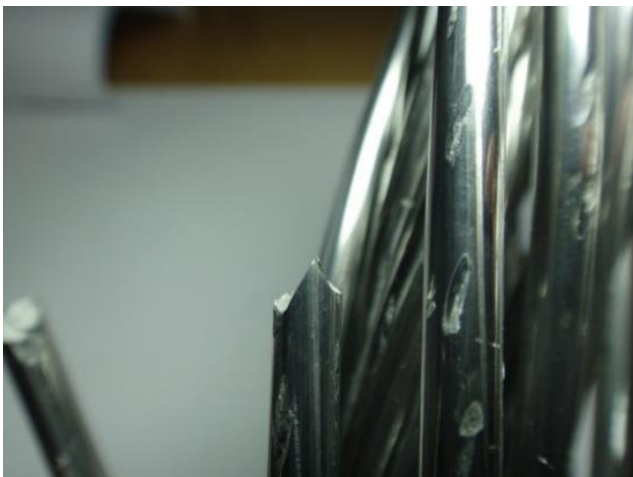
(a)



(b)

Figura 46 – (a) Falha quase-plana na camada externa (b) Detalhe da falha quase-plana

No total de ensaios realizados, este tipo de falhas represente um índice de 13% das falhas externas e 23% das falhas internas. Contabilizando somente as quatro primeiras falhas esse valor se altera para 9% e 25% respectivamente.



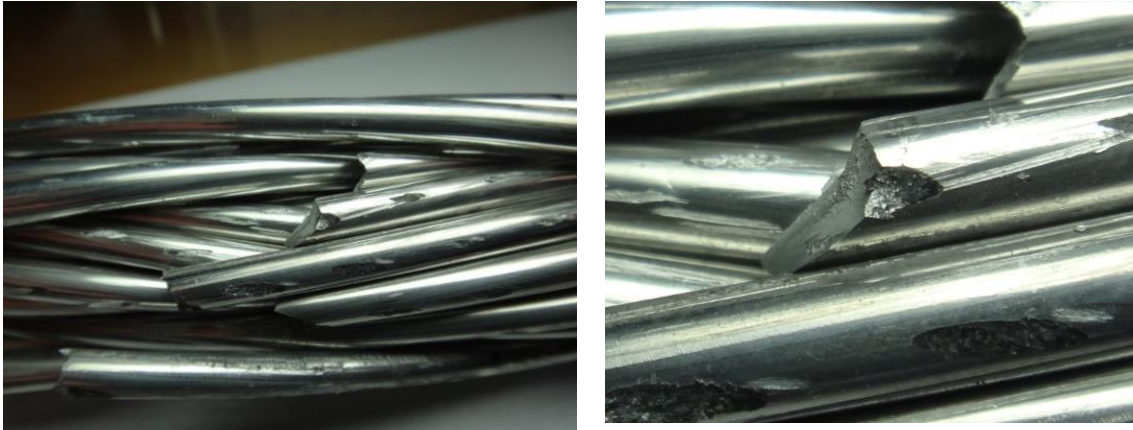
(a)



(b)

Figura 47 – (a) Falha “V” na camada interna (b) Detalhe da falha em “V” com a marca de *fretting*.

As falhas em 45° (Figura 48) aparecem distribuídas, quase uniformemente, em todas as amplitudes, porém, observa-se uma clara predominância da presença delas nos fios externos. No total das falhas, esse tipo represente um percentual de 31% na camada externa e 16% na camada interna. No caso de se analisar somente as quatro primeiras falhas este valor representa respectivamente 31% e 20%.



(a)

(b)

Figura 48 – (a) Falha 45° na camada interna (b) Detalhe da falha em 45°

A seguir, a Figura 49 representa a distribuição do total da tipologia das falhas em relação às camadas do cabo.

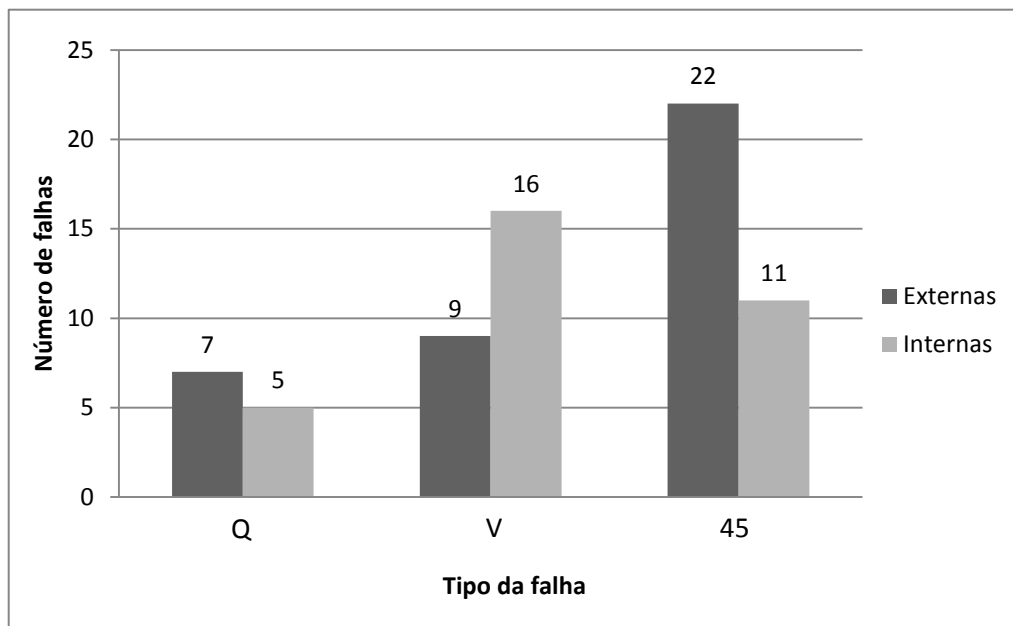


Figura 49 – Número de falhas de acordo com a tipologia quasi-plana, em V e 45°.

A Figura 50 mostra a distribuição da tipologia das falhas de acordo com a amplitude de vibração  $Y_b$ .

A partir dessa figura, podemos observar que com o aumento da amplitude de vibração, as falhas do tipo quasi-plana sofrem a tendência de aumentar, caso que não ocorre com os demais tipos. A falha do tipo quasi-plana parece estar associado à redistribuição de carregamento sobre os fios remanescentes que aumenta a tensão média sobre o fio, causando uma trinca inicial e, logo após, um arrancamento abrupto do fio.

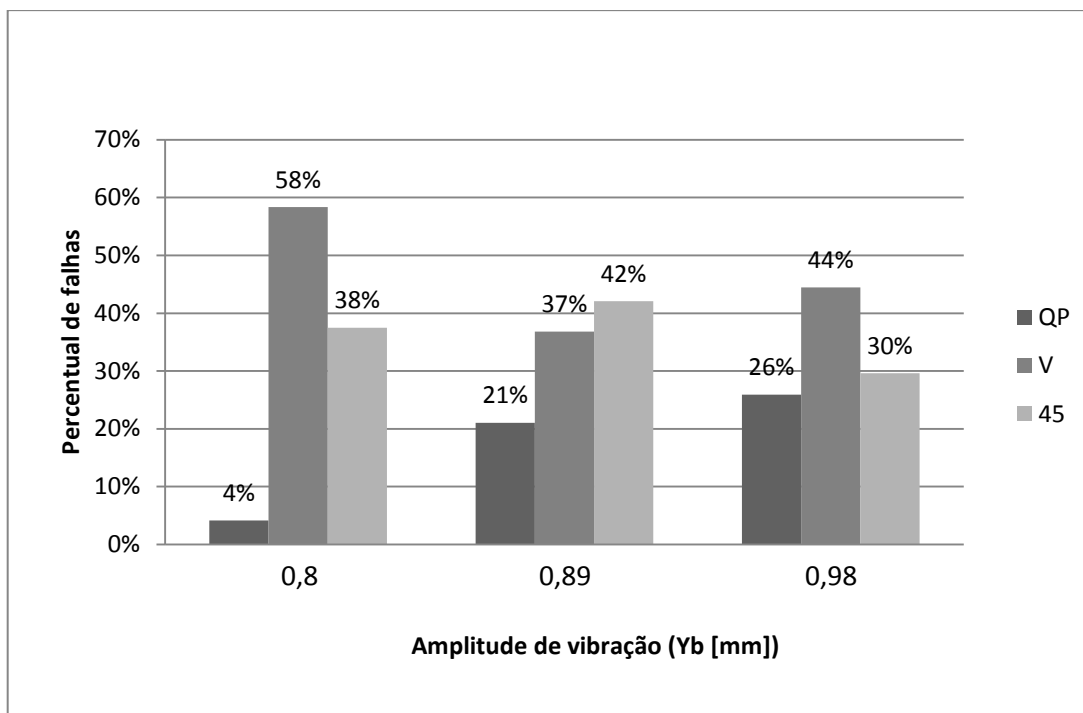


Figura 50 – Distribuição da tipologia da falha de acordo com as amplitudes de vibração.

#### 4.4.4.2 - AVALIAÇÃO MICROSCÓPICA DAS SUPERFÍCIES DE FALHA

Esta avaliação microscópica das superfícies de falha é uma tentativa de demonstrar a importância que teria um estudo aprofundado em relação ao tema. Pontos relevantes, ainda não estudados das características microscópicas das falhas dos fios de condutores, podem ser analisados através da microscopia eletrônica. Este estudo visa mostrar pontos iniciais dessa possível análise.

A fractografia eletrônica é comumente utilizada na análise da superfície da falha, sendo realizada por meio de visualizações com ampliações óptica e principalmente com a utilização de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Em comparação à microscopia óptica, a técnica de MEV permite a obtenção de uma imagem com melhor resolução e profundidade de campo, assim como, dependendo dos acessórios utilizados, possibilita a análise da composição química de regiões da amostra.

Foram analisadas duas falhas em locais distintos, uma na base e uma entre fios. A Figura 51 mostra a falha ocorrida na base do grampo.



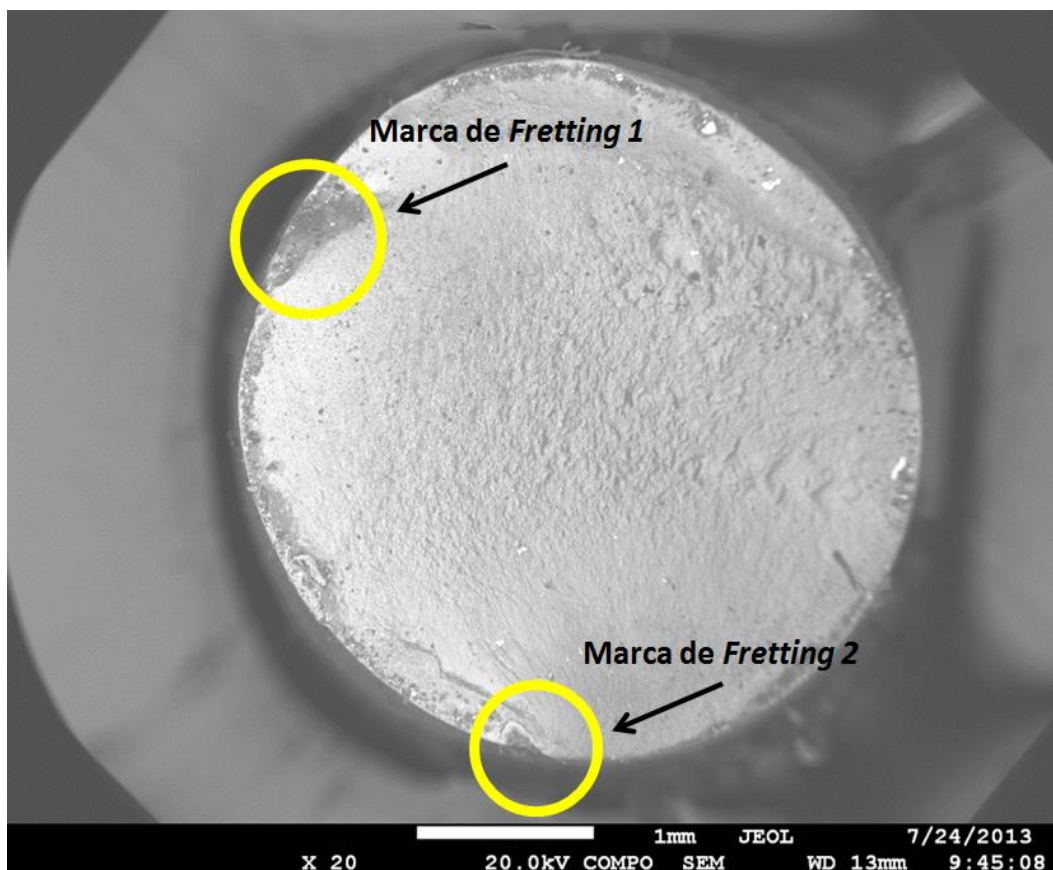
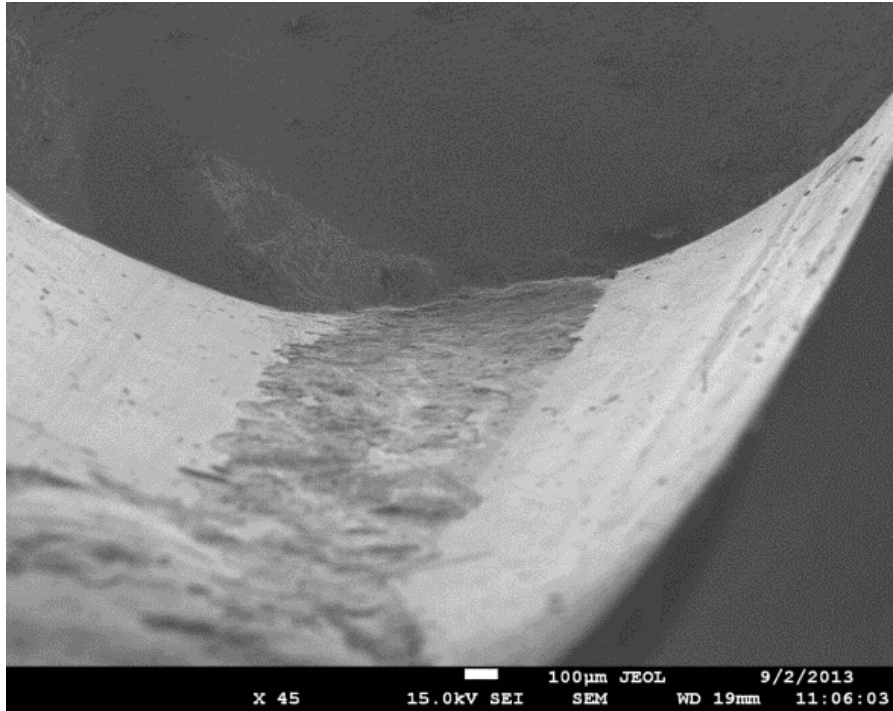


Figura 51 – Micrografia de topo da falha na base do condutor realizada no MEV – Falha 45°.

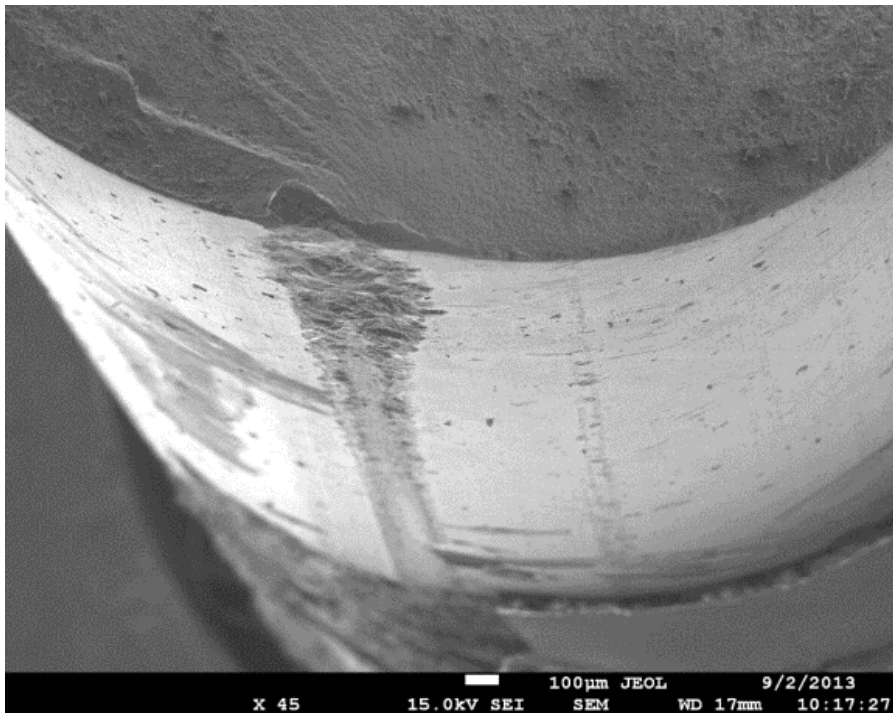
Na Figura 51 destaca-se duas marcas de *fretting*. A marca de *fretting* 1 é devido ao contato do condutor com o grampo (Figura 52(a)). Já a marca de *fretting* 2 é devido ao contato fio-fio, porém, como os fios da base do condutor sofrem um esmagamento e seu contato é exclusivamente lateral, a marca final não é elipsoide como a marca de *fretting* entre fio-fio no interior do condutor (Figura 52(b)).

Nessa amostra, pode-se observar um terceiro ponto de contato a olho nu, porém, devido a uma limitação do microscópio utilizado, não foi possível realizar uma análise detalhada. Observando a falha como um todo se pode concluir que existiram 3 pontos de iniciação de propagação das trincas, um em cada ponto de contato.

Pela Figura 51, pode-se observar que a trinca surgida na marca de *fretting* 2 conseguiu se propagar por um período maior, enquanto que as trincas surgidas nos outros dois pontos se propagaram menos até uma situação limite onde ocorreu a fratura frágil do fio.



(a)



(b)

Figura 52 – (a) Detalhe da marca de *fretting* devido ao contato do condutor com o grampo na base  
(b) Detalhe de marca de *fretting* devido ao contato exclusivamente lateral fio-fio na base.

Ao se analisar com cuidado a proximidade da marca de *fretting* 2 vê-se marcas que podem ser classificadas como marcas de rio (Figura 53).

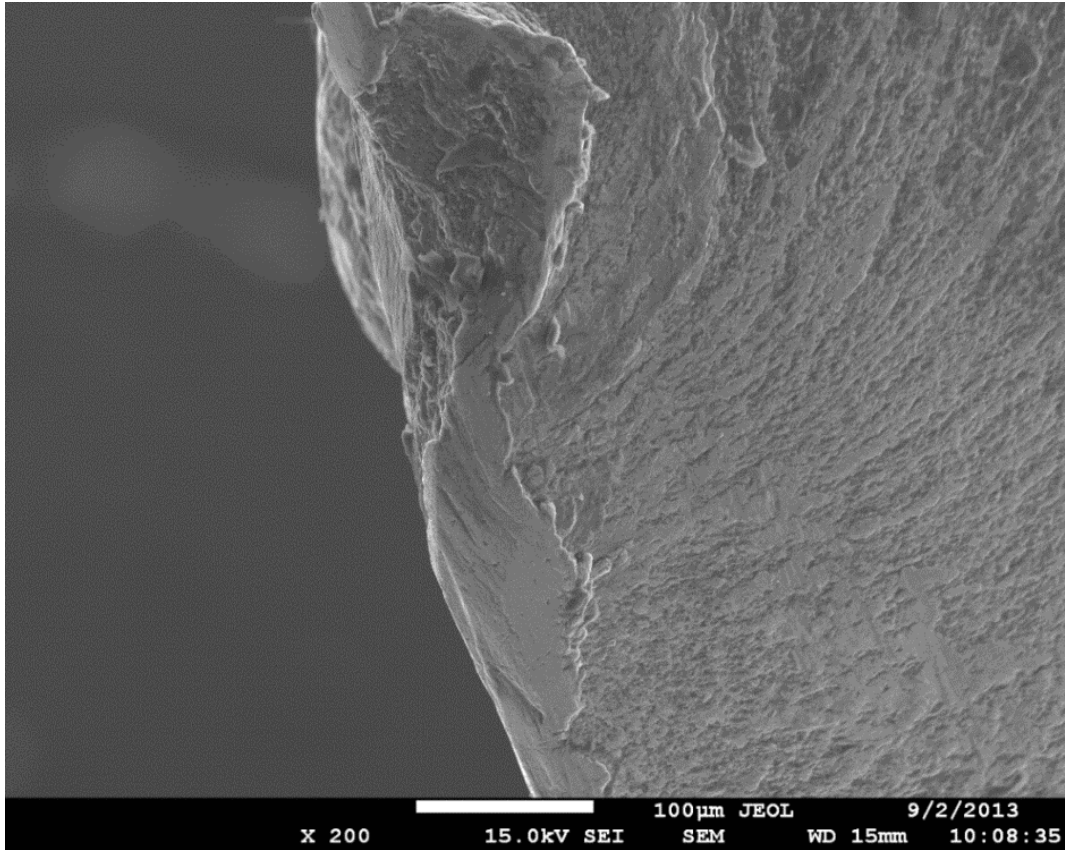


Figura 53 – Possíveis marcas de rio encontradas na proximidade da marca de *fretting* 2.

A Figura 54 mostra a tipologia da falha localizada na base.



Figura 54 – Tipologia da falha localizada na base do condutor.

A segunda amostra analisada estava presente no interior do condutor, a Figura 55 mostra a microscopia de topo realizada na amostra.

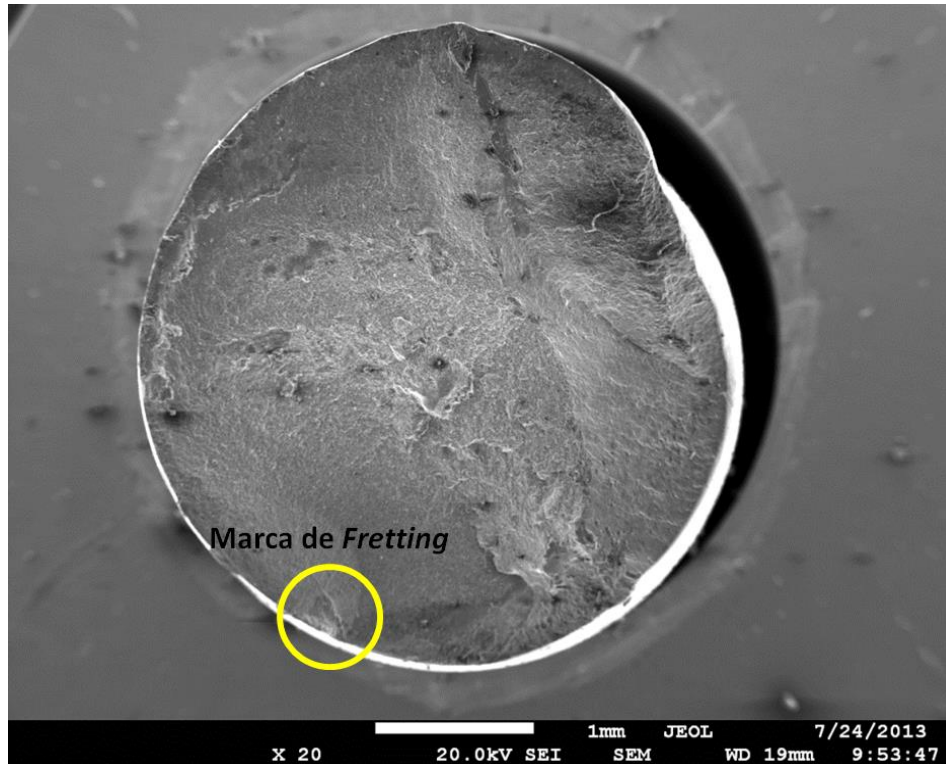
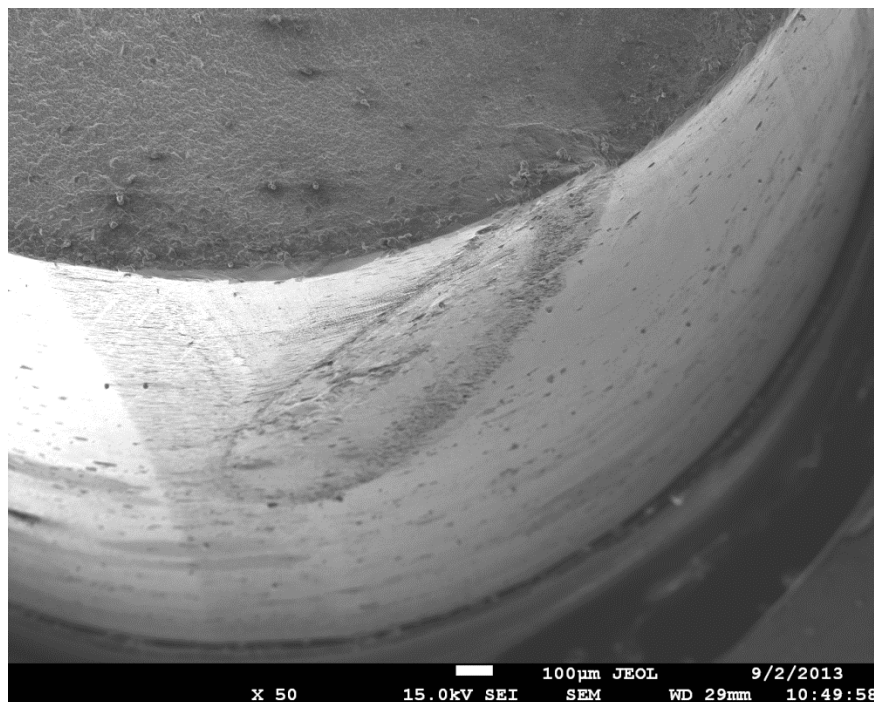
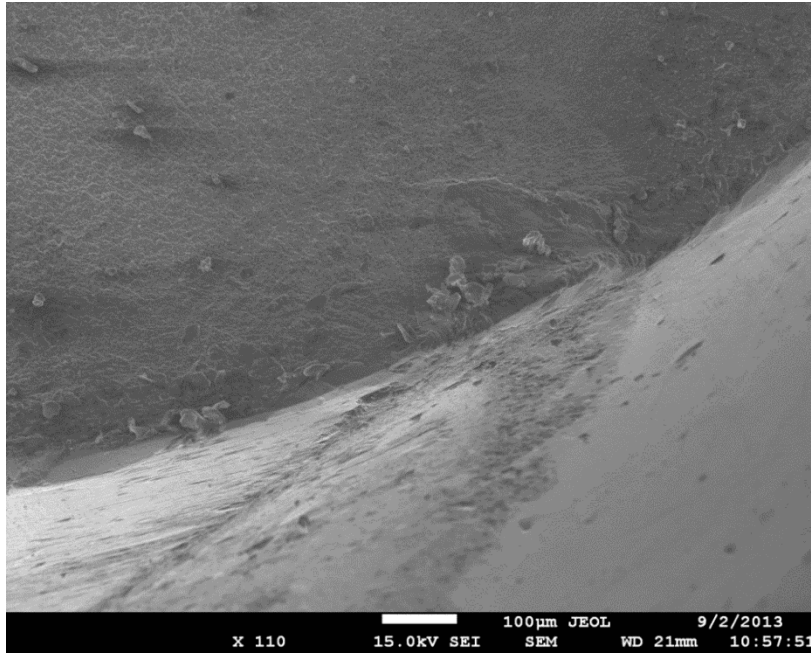


Figura 55 – Microscopia de topo da amostra entre fios.

Nesta amostra, pelo fato de o fio estar localizado na camada interna do condutor, é possível observar a marca elipsoide característica do *fretting* na amostra (Figura 56).



(a)



(b)

Figura 56 – (a) Aumento microscópico de 50 vezes na região da marca de *fretting* (b) Aumento microscópico de 110 vezes na região da marca de *fretting*.

A Figura 57 mostra a micrografia da falha utilizando o detector de elétrons retro espalhados (BSD - *Back Scattered Detector*). Neste tipo de técnica o contraste na imagem é fortemente influenciado pelo peso atômico encontrado na amostra, deste modo é possível notar pela foto uma região com evidências de acumulo de óxido de alumínio no canto superior esquerdo da amostra, identificada pela área mais escura.

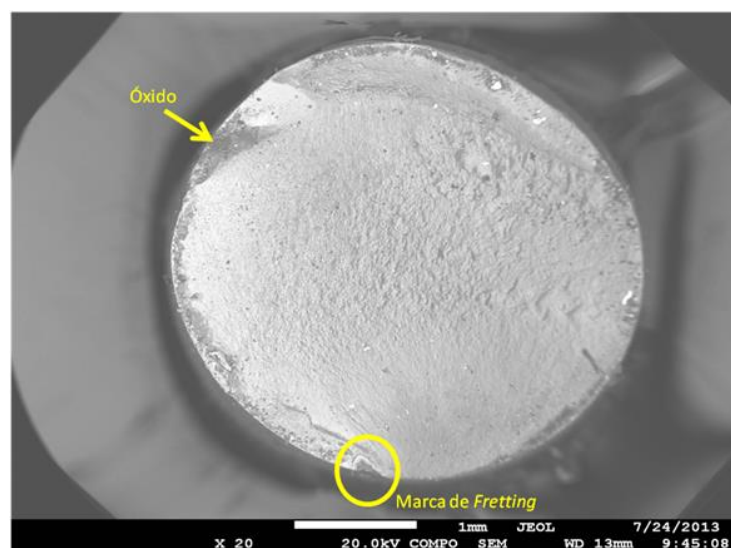


Figura 57 - Micrografia da falha do fio usando o detector de elétrons retro espalhados com indicação da fadiga por *fretting* e zona de acumulação de óxido.

Para consolidar essa evidência foi realizado um espectro de composição química em dois pontos, um no centro da amostra (Ponto 1) e outra na região mais escura onde ocorre a concentração do óxido (Ponto 2) como se pode ver pela Figura 58.

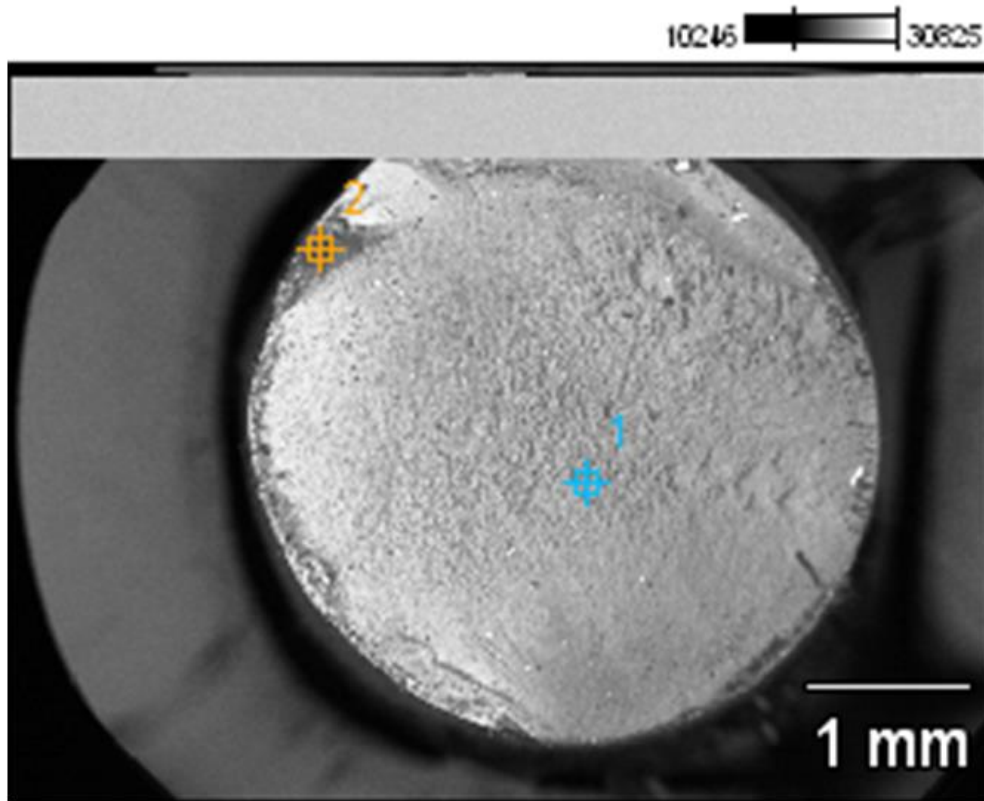


Figura 58 - Pontos onde foi realizada a composição química do material.

A composição química do ponto 1 está descrita pela Figura 59.

Full scale counts: 29

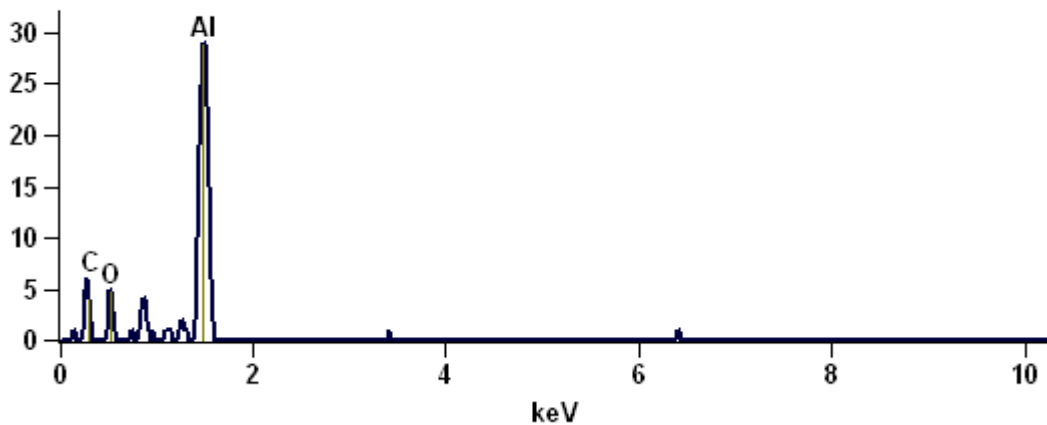


Figura 59 - Composição química encontrada no ponto 1.

Já a composição química do ponto 2 está descrita pela Figura 60.

Full scale counts: 5748

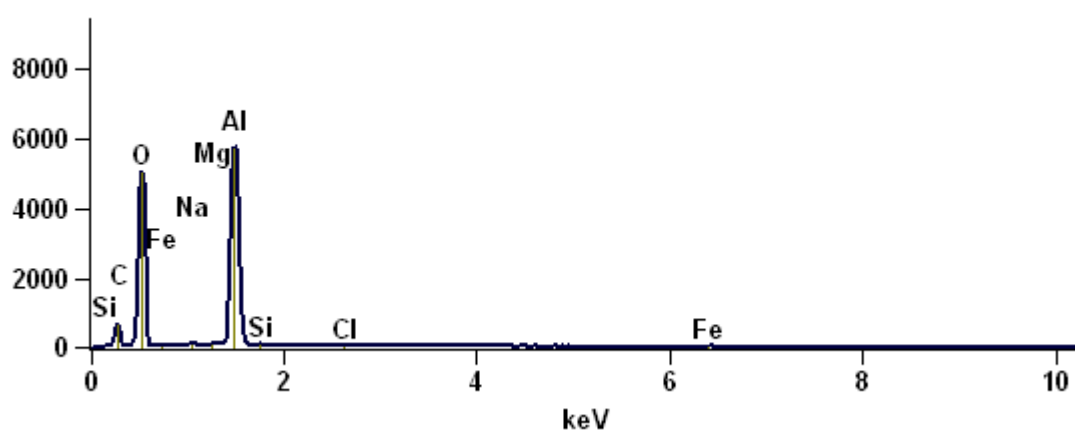


Figura 60 - Composição química encontrada no ponto 2.

O percentual da composição química em cada ponto está descrito pela Tabela 13.

Tabela 13 - Percentual de composição química.

%	<i>C</i>	<i>O</i>	<i>Na</i>	<i>Mg</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Cl</i>	<i>Fe</i>
<b>Ponto 1</b>	34.07	27.84	-	-	38.09	-	-	-
<b>Ponto 2</b>	12.03	59.05	0.39	0.25	27.39	0.23	0.28	0.38

## 5 - CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma avaliação crítica sobre a ocorrência de falhas por fadiga dos cabos condutores de alumínio liga 6201, dispostos em feixe duplo vertical, instalados em uma linha de transmissão de 230Kv localizada no Centro-Oeste brasileiro. Com base nessa avaliação foi possível verificar que as falhas ocorreram por uma combinação não usual de fatores, que sob o ponto de vista prático, são difíceis de serem detectados antes da construção da linha de transmissão.

Estes fatores, ou não eram de domínio público ou não eram impedidos por norma ou literatura técnica, quais sejam:

- A montagem dos cabos em feixe vertical com uso de espaçador rígido causando a incidência de uma tensão média imprevista e complicada de ser quantificada em projeto. (Não há restrições em norma ou na literatura técnica contra esse tipo de montagem e há outras linhas operando normalmente com essa configuração);
- O uso de um cabo reconhecidamente com ótima resistência estática, mas com durabilidade contra fadiga muito baixa e desconhecida (não disponível na literatura técnica); e
- A existência de ventos laminares contínuos que excitam o cabo em amplitudes de deformação relativamente baixas, mas por um número elevadíssimo de ciclos.

Com base na análise das falhas observadas sob condições de laboratório, foi possível também inferir as seguintes características associadas ao processo de falha dos fios:

Parece haver uma tendência à redução das falhas internas com o aumento do deslocamento dinâmico imposto ao cabo. Já para as falhas externas essa tendência parece ser contrária. Observação também constatada nos ensaios realizados por Fadel (2010) em sua tese de doutorado.

A predominância das falhas ocorridas no topo do cabo pode ser justificada devido ao fato de o grampo de suspensão utilizado para realizar os testes estar no seu limite dimensional, ocasionando um contato severo entre a cama do grampo e o condutor.



A análise do posicionamento das falhas confirmou que elas ocorrem no interior do grampo de suspensão onde a inspeção visual não é possível.

.

## REFERÊNCIAS

- ABNT - NBR 5422/1985. Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, 1985.
- ANEEL (2013) – Agência Nacional de Energia Elétrica (Disponível em: <[www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br)>)
- ASM HANDBOOK. (2002) “Fatigue properties in engineering. “ Fatigue and fracture, Book 19
- ASTM E 793-91 (2004) “*Standard Practices for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life ( $\epsilon$ -N) Fatigue Data*”– Designation E 739 - 91. ASTM International, EUA.
- ASTM STP E1823 (1996), “*Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing Definitions of Terms Relating to Fatigue*” Annual Book of Standards, ASTM, Philadelphia, PA, Vol. 3.01, pp. 740-49.
- Azevedo, C. R. F. and CESCO, T. (2002), “Failure Analysis of Aluminum Cable Steel Reinforced (ACSR) Conductor of The Transmission Line Crossing the Paraná River”, Engineering Failure Analysis, 16, pp 136-151.
- Bellorio, M.B. (2009) “Revisão Sobre os Critérios de Fadiga para Cabos Condutores de Energia e Uso de Metodologia para Estimativa de sua Vida Remanescente.”. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília-UnB, Brasília, Brasil.
- Boyd, J. M. (1966), “*Galloping on Bundle Conductors - Ontario Hydro Experience*”, *Addendum 9, Summary of Proceedings of Conference on Conductor Galloping, Ontario Hydro W. P. Dobson Research Laboratory, Toronto, September 1966.*
- Branco C. M., Fernandes A. A., Castro, M.S. T. (1986), “Fadiga de Estrutura Soldadas” , Ed. Gulbenkian, Lisboa, Portugal.
- Callister, W. D. Jr. (2002) “Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução”. Rio de Janeiro: LTC.
- Carvalho, G. B. (2003) “Estudo experimental do escoamento em torno de cilindros circulares em movimento de rotação” Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.
- CIGRÉ, SC22, WG04 (1985).”*Guide for endurance tests of conductors inside clamps.*” *Electra, No 100, pp. 77-86, May.*
- Correia, V. F. (2001) “Órgãos de maquina – M27, Texto de apoio”, Escola náutica de infante D Henrique, PP. 73.
- Domingues, J. S. (2003) “Órgãos de máquinas - Fadiga”, ISEP (Instituto Superior de Engenharia do Porto), Portugal, PP. 1-25.
- Dowling, N. E. (2007) “Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture and fatigue.” Prentice Hall, Third Edition.
- EPE (2013) - Empresa de Pesquisa Energética (Disponível em: <[www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br)>)

- EPRI (1979) Transmission Line Reference Book “The Orange Book”. Electric Power Research Institute. Palo Alto,CA.
- Fadel, A.A. (2010) “Avaliação do Efeito de Tracionamento em Elevados Níveis de EDS sobre a Resistência em Fadiga do Condutor IBIS (CAA 397,5MCM).”. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília – UnB, Departamento de Engenharia Mecânica. Brasília/DF. Brasil.
- Fox, R W., Mcdonald, A. T. (2001) “Introdução a mecânica dos fluidos”, LTC Eeditora, Edição 5.
- Frontin, S. O., Saavedra, A.R., Araújo, A. A., Murça, L. B, Fragelli, R. R, Rêgo, V. B. (2010) “Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas aplicadas a linhas de transmissão.”, Goya, PP. 334.
- Hills, D. A., Nowell, D. (1994) “Mechanics of Fretting Fatigue” Kluwer Academic Publishers. 1994,pp. 1-20.
- Lee, Y-L., Pan, J., Hathaway, R. B., Barkey, M. E., (2005) “Fatigue Testing and Analysis (Theory and Practice)”, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
- Miner, M. A. (1945). “Cumulative damage in fatigue.” Journal of applied mechanics, 67, A159-A169.
- Murça, L. B. (2011) “Um estudo experimental do efeito da sequência de carregamento sobre a resistência à fadiga de cabos condutores” Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília.
- Mutoh, Y., Kynion, S. E., Hoepfner, D. W. (2001), Fretting Fatigue: Advances in the basic understanding and applications, ASTM Special Technical Publication, Stock number 1425
- Norton, R. L. (2005) “Projeto de Máquinas – Uma abordagem integrada” Ed. Bookman – 7ª Edição.
- Poffenberger, J. C. and Swart, R. L. (1965) “Differential displacement and dynamic conductor strain” IEEE transaction paper, Vol. PAS 84, pp. 281-289.
- Post, N. L., Case, S. W. e Lesko, J. J. (2008). “Modeling the variable amplitude fatigue of composite materials: a review and evaluation of the state of the art for spectrum loading” International Journal of Fatigue 30: 2064-2086.
- Rawlings, C. B., (1979) "Fatigue of Overhead Conductors", Transmission Line Reference Book, Electrical Power Research Institute, Palo Alto CA, pp 51-81.
- Schijve, J. (2003). “Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art.” Materials Science, 39(3).
- Schutz, W. (1996) “A history of fatigue” Engineering fracture mechanics 54 (2):263-300.
- Sharp, M.L.; Nordmark, G.E.; Menzemer, C.C. (1996) “Fatigue Design of Aluminium Componentes & Structures”.
- Souza, S. A. (1982) “Ensaio mecânicos de materiais metálicos”, PP. 172-200.
- Tebo, G. B. (1941), “Measurement and Control of Conductor Vibration”. A IEEE Transaction Vol. 60, pp. 1188-93.

Teixeira, R. S. (2004) “Metodologia de análise de fadiga em componentes estruturais de aço baseada na mecânica da fratura”, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas. Universidade Federal de Minas Gerais.

## APÊNDICE A - PROCEDIMENTO DE CÁLCULO (LOCAL 2)

Tensão Pavica [N/mm <sup>2</sup> ]	N (Curva S-N)	Total Ciclos (1 ano)	Dano (n/N) /ano
13,48	2,0E+08	6,6E+03	3,2E-05
13,19	2,3E+08	9,9E+03	4,2E-05
12,90	2,7E+08	1,6E+04	6,1E-05
12,62	3,1E+08	2,3E+04	7,4E-05
12,37	3,5E+08	2,3E+04	6,5E-05
12,08	4,1E+08	2,6E+04	6,4E-05
11,80	4,8E+08	4,3E+04	8,9E-05
11,51	5,6E+08	5,6E+04	1,0E-04
11,22	6,6E+08	8,2E+04	1,2E-04
10,94	7,8E+08	1,2E+05	1,6E-04
10,65	9,2E+08	1,5E+05	1,7E-04
10,40	1,1E+09	2,1E+05	2,0E-04
10,12	1,3E+09	2,7E+05	2,1E-04
9,83	1,5E+09	2,5E+05	1,6E-04
9,54	1,9E+09	3,4E+05	1,8E-04
9,26	2,3E+09	4,5E+05	2,0E-04
8,97	2,8E+09	5,4E+05	2,0E-04
8,68	3,4E+09	6,9E+05	2,0E-04
8,40	4,2E+09	8,0E+05	1,9E-04
8,15	5,1E+09	1,0E+06	2,0E-04
7,86	6,4E+09	1,2E+06	1,9E-04
7,58	8,2E+09	1,4E+06	1,7E-04
7,29	1,0E+10	1,9E+06	1,8E-04
7,00	1,4E+10	1,9E+06	1,4E-04
6,72	1,8E+10	2,6E+06	1,5E-04
6,43	2,3E+10	3,2E+06	1,4E-04
6,18	3,0E+10	3,6E+06	1,2E-04
5,90	4,1E+10	4,7E+06	1,2E-04
5,61	5,6E+10	5,7E+06	1,0E-04
5,32	7,8E+10	6,6E+06	8,5E-05
5,04	1,1E+11	7,8E+06	6,9E-05
4,75	1,6E+11	9,2E+06	5,6E-05
4,46	2,4E+11	1,1E+07	4,7E-05
4,22	3,5E+11	1,3E+07	3,7E-05
3,93	5,5E+11	1,4E+07	2,6E-05
3,65	8,9E+11	1,6E+07	1,8E-05
3,36	1,5E+12	1,7E+07	1,1E-05
3,07	2,7E+12	1,9E+07	7,3E-06
2,79	5,0E+12	2,2E+07	4,4E-06
2,50	1,0E+13	2,5E+07	2,5E-06
2,21	2,2E+13	2,9E+07	1,3E-06
1,97	4,7E+13	3,3E+07	7,1E-07
1,68	1,3E+14	3,9E+07	3,0E-07
1,39	4,2E+14	4,8E+07	1,1E-07
1,11	1,9E+15	4,7E+07	2,5E-08
0,82	1,3E+16	2,3E+07	1,8E-09
0,53	2,0E+17	1,0E+06	5,1E-12
0,25	2,9E+19	0,0E+00	0,0E+00
<b>Dano Total (SOMA)</b>			<b>0,004388936</b>
<b>Vida 900MCM [anos]</b>			<b>227,8</b>

## APÊNDICE B – PROCEDIMENTO DE CALCULO (ANÁLISE 2)

Tensão Pavica [N/mm <sup>2</sup> ]	N (Curva S-N)	Total Ciclos (1 ano)	Dano (n/N) /ano
13,20	2,3E+08	0,0E+00	0,0E+00
12,92	2,7E+08	0,0E+00	0,0E+00
12,64	3,1E+08	0,0E+00	0,0E+00
12,36	3,5E+08	0,0E+00	0,0E+00
12,09	4,1E+08	0,0E+00	0,0E+00
11,81	4,8E+08	0,0E+00	0,0E+00
11,53	5,5E+08	0,0E+00	0,0E+00
11,22	6,6E+08	0,0E+00	0,0E+00
10,94	7,8E+08	0,0E+00	0,0E+00
10,66	9,2E+08	0,0E+00	0,0E+00
10,38	1,1E+09	0,0E+00	0,0E+00
10,10	1,3E+09	0,0E+00	0,0E+00
9,82	1,5E+09	0,0E+00	0,0E+00
9,54	1,9E+09	0,0E+00	0,0E+00
9,26	2,3E+09	0,0E+00	0,0E+00
8,99	2,7E+09	0,0E+00	0,0E+00
8,71	3,4E+09	0,0E+00	0,0E+00
8,43	4,1E+09	0,0E+00	0,0E+00
8,15	5,1E+09	0,0E+00	0,0E+00
7,87	6,4E+09	0,0E+00	0,0E+00
7,59	8,1E+09	0,0E+00	0,0E+00
7,28	1,1E+10	0,0E+00	0,0E+00
7,00	1,4E+10	0,0E+00	0,0E+00
6,72	1,8E+10	0,0E+00	0,0E+00
6,44	2,3E+10	0,0E+00	0,0E+00
6,16	3,1E+10	0,0E+00	0,0E+00
5,89	4,1E+10	0,0E+00	0,0E+00
5,61	5,6E+10	0,0E+00	0,0E+00
5,33	7,8E+10	0,0E+00	0,0E+00
5,05	1,1E+11	0,0E+00	0,0E+00
4,77	1,6E+11	0,0E+00	0,0E+00
4,49	2,3E+11	0,0E+00	0,0E+00
4,21	3,5E+11	0,0E+00	0,0E+00
3,94	5,4E+11	0,0E+00	0,0E+00
3,62	9,3E+11	0,0E+00	0,0E+00
3,34	1,5E+12	0,0E+00	0,0E+00
3,06	2,7E+12	0,0E+00	0,0E+00
2,79	5,0E+12	0,0E+00	0,0E+00
2,51	9,8E+12	0,0E+00	0,0E+00
2,23	2,1E+13	0,0E+00	0,0E+00
1,95	4,9E+13	0,0E+00	0,0E+00
1,67	1,3E+14	3,3E+03	2,5E-11
1,39	4,2E+14	5,4E+05	1,3E-09
1,11	1,8E+15	1,2E+07	6,8E-09
0,84	1,1E+16	6,0E+07	5,3E-09
0,56	1,5E+17	8,9E+06	5,9E-11
0,28	1,3E+19	0,0E+00	0,0E+00
		<b>Dano Total (SOMA)</b>	<b>1,3E-08</b>
		<b>Vida 900MCM [anos]</b>	<b>7,4E+07</b>