



PROJETO DE GRADUAÇÃO

ANÁLISE COMPARATIVA DE APARELHOS PARA MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO EM CABOS CONDUTORES DE ENERGIA E CÁLCULO DA VIDA REMANESCENTE EM CABOS

Por,
Filipe Bastos Gomes

Brasília, 27 de Novembro de 2015

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**ANÁLISE COMPARATIVA DE APARELHOS
PARA MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO EM CABOS
CONDUTORES DE ENERGIA E CÁLCULO DA
VIDA REMANESCENTE EM CABOS**

POR,

Filipe Bastos Gomes

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. José Alexander Araújo, UnB/ ENM (Orientador) _____

Prof. Jorge Luiz de Almeida Ferreira, UnB/ ENM _____

Prof. Aida Alves Fadel, UnB/ ENM _____

Brasília, 27 de Novembro de 2015

Agradecimentos

Aos meus pais pelo carinho e compreensão e por sempre estarem presentes me amparando nos momentos difíceis.

A todos da minha família e aos meus amigos pelo apoio e compreensão.

Ao professor Alex pelo tempo dedicado e pelas palavras de incentivo e apoio.

Aos professores Jorge e Aida que contribuíram com críticas construtivas para o aperfeiçoamento deste trabalho.

Aos meus colegas de laboratório Remy, Miélle, Thiago, Gustavo, Marcão, Pedro e Silmar que foram imprescindíveis na realização dos ensaios, sempre me incentivaram e se mostraram dispostos a ajudar.

Aos meus colegas e amigos de graduação que foram igualmente importantes na minha formação.

A Deus, aquele que me fortalece.

Filipe Bastos Gomes

RESUMO

O objetivo deste trabalho é estabelecer uma análise crítica sobre vibrógrafos, aparelhos utilizados para registrar parâmetros de vibração em cabos condutores de eletricidade. Para avaliar as limitações destes instrumentos, dois modelos comerciais de vibrógrafos (Pavica e Vibrec 500 WT) foram instalados na bancada de testes da Universidade de Brasília. Os registros de frequência e deslocamento efetuados pelos equipamentos foram comparados com os parâmetros de vibração monitorados por instrumentos calibrados e de alta precisão instalados na bancada de testes do laboratório. As medições de frequência efetuadas pelos aparelhos em análise corresponderam com a frequência de vibração imposta pelo *shaker*, no entanto, as medições de deslocamento (amplitude de flexão) não ficaram dentro dos intervalos de valores esperados. As amplitudes registradas foram menores do que os valores monitorados por meio de um acelerômetro piezoelétrico e os resultados indicam que há uma limitação dos equipamentos em registrar grandes níveis de amplitude de flexão. Dados disponíveis na literatura de um vibrógrafo instalado em uma linha de transmissão também foram utilizados para demonstrar o procedimento adotado na aplicação da metodologia CIGRÉ WG-22-04, a qual conduz à estimativa da vida remanescente do cabo condutor.

ABSTRACT

The aim of this work is to critically analyse vibration recorders, equipments which record vibration parameters in overhead transmission lines. In order to evaluate the limitations of these instruments, two commercial models of vibration recorders (Pavica and Vibrec 500 WT) were installed in experimental fatigue workbench mounted in the University of Brasília. The records of frequency and displacement done by the equipments were compared with the vibration parameters monitored by calibrated and high precision instruments installed in the laboratory workbench. The frequency measurements done by the devices under consideration corresponded to the frequency of vibration imposed by the shaker, however, the displacement (bending amplitude) measurements were not within the range of expected values. The recorded amplitudes were lower than monitored values by a piezoelectric accelerometer and the results indicate a limitation of vibration recorders in register large levels of bending amplitude. Data available in the literature of a vibration recorder installed in an overhead line also were used to demonstrate the procedure executed in the CIGRÉ WG-22-04 methodology, which leads to predict the remaining lifetime of the conductor.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	1
1.2	OBJETIVO	4
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	5
2	FADIGA (REVISÃO TEÓRICA)	7
2.1	O MECANISMO DE FALHA POR FADIGA	7
2.2	TIPOS DE TENSÕES CÍCLICAS	10
2.3	MÉTODOS DE PROJETO CONTRA FALHA POR FADIGA	12
2.4	MÉTODO DA TENSÃO-VIDA	13
2.4.1	Curva S-N	13
2.4.2	Fatores que afetam a vida em fadiga	15
2.4.3	Consideração da tensão média em carregamentos simples	17
2.4.4	Consideração de combinações de carregamentos	19
2.5	TEORIA DO DANO ACUMULATIVO (REGRA DE PALMGREN-MINER)	20
2.6	CONTAGEM DE CICLOS (MÉTODO RAINFLOW)	21
3	FADIGA EM CABOS CONDUTORES	26
3.1	VIBRAÇÕES EM CABOS CONDUTORES AÉREOS DE ENERGIA ELÉTRICA	26
3.1.1	Tipos de vibrações em cabos condutores	26
3.1.2	Mecanismo de excitação da vibração eólica	30
3.1.3	Fatores que influenciam na vibração de cabos condutores	33
3.2	ANÁLISE DA FALHA DE FADIGA POR <i>FRETTING</i> EM CABOS	34
3.3	EQUAÇÃO DE POFFENBERGER-SWART	37
3.4	METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DO CABO	40
3.4.1	Metodologia IEEE – Máxima deformação de flexão admissível	40
3.4.2	Metodologia EPRI – Limites de resistência à fadiga	41
3.4.3	Metodologia CIGRÉ WG-22-04 – Estimativa do tempo de vida do condutor	42
4	VIBRÓGRAFOS	45
4.1	AVALIAÇÃO DAS VIBRAÇÕES EM CABOS CONDUTORES	45
4.2	HISTÓRICO DE DESENVOLVIMENTO DOS VIBRÓGRAFOS	46
4.3	MÉTODO DE MEDIÇÃO DOS VIBRÓGRAFOS	50
4.4	ANÁLISE CRÍTICA DO MÉTODO DE MEDIÇÃO	51
4.5	NOVAS TECNOLOGIAS	53
5	ANÁLISE COMPARATIVA DE VIBRÓGRAFOS	54
5.1	DESCRIÇÃO GERAL	54
5.2	DESCRIÇÃO DA BANCADA DE TESTE	54
5.3	CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS	57
5.3.1	Monitoramento na região da montagem cabo/grampo	57
5.3.2	Monitoramento da quebra de fios	58
5.3.3	Controle do <i>shaker</i>	59
5.3.4	Aspectos adicionais para o controle dos testes	60
5.4	METODOLOGIA	61
5.5	PARÂMETROS E MATERIAIS	63
5.5.1	Carga de tração aplicada no cabo condutor	64
5.5.2	Torque de aperto nos parafusos do grampo de suspensão	65
5.5.3	Ângulo de mergulho do cabo condutor	66

5.5.4	Amplitudes de flexão utilizadas nos ensaios	66
5.5.5	Frequências de teste utilizadas nos ensaios (discussão)	67
5.5.6	Conjunto de amostras.....	68
5.6	DETALHES ESPECÍFICOS DA MONTAGEM DOS ENSAIOS	70
5.6.1	Adaptação e montagem do ensaio com o vibrógrafo Pavica	70
5.6.2	Adaptação e montagem do ensaio com o vibrógrafo Vibrec 500 WT.....	72
5.7	PROCEDIMENTOS REALIZADOS NA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS	75
5.8	RESULTADOS DAS MEDIÇÕES COM OS VIBRÓGRAFOS	77
5.8.1	Resultados obtidos em relação ao número de ciclos contabilizados	78
5.8.2	Resultados obtidos sobre a amplitude de flexão – Amostras de 143 µm .	80
5.8.3	Resultados obtidos sobre a amplitude de flexão – Amostras de 250 µm .	84
5.8.4	Resultados obtidos sobre a amplitude de flexão – Amostras de 350 µm .	87
5.8.5	Discussão geral sobre os resultados obtidos com os vibrógrafos.....	90
5.9	RESULTADOS DA EXTENSÔMETRIA E DISCUSSÃO.....	93
6	ESTUDO DE CASO: AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DO CABO CONDUTOR	96
6.1	DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO	96
6.2	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA CIGRÉ WG-22-04.....	97
6.2.1	Conversão de amplitude inversa em amplitude padrão.....	99
6.2.2	Cálculo da tensão gerada em cada nível de amplitude de flexão.....	99
6.2.3	Cálculo do número de ciclos até a falha em cada nível de amplitude de flexão	99
6.2.4	Extrapolação do número de ciclos contados em cada classe de amplitude	100
6.2.5	Cálculo do dano acumulado e do tempo de vida do condutor	101
6.3	APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS IEEE (1966) E EPRI (1979).....	103
6.4	DISCUSSÃO	104
7	CONCLUSÃO.....	105
7.1	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES DO TRABALHO.....	105
7.2	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	107
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
	ANEXOS.....	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Composição atual e projeção até o final de 2015 das linhas que formam o Sistema Interligado Nacional (ABRADEE).....	1
Figura 1.2 – a) Marcas de <i>fretting</i> e rupturas nos fios causadas por trincas iniciadas nestas marcas (FADEL, 2010); b) Exemplo de ruptura completa de um cabo causada por fadiga (CLOUTIER & LEBLOND, 2011).....	2
Figura 1.3 – Dois tipos de vibrógrafos instalados em linhas de transmissão (modificado: CLOUTIER & LEBLOND, 2011).	3
Figura 2.1 – Exemplos de locais onde geralmente ocorre a nucleação de trincas (modificado: GARCIA <i>et al.</i> , 2012).....	8
Figura 2.2 – Ilustração de uma trinca formada no processo de fadiga de um material (modificado: STEPHENS <i>et al.</i> , 2001).	8
Figura 2.3 – Marcas típicas em uma superfície que sofreu fratura por fadiga (GARCIA <i>et al.</i> , 2012).	9
Figura 2.4 – Formação de estrias no processo de falha por fadiga (GARCIA <i>et al.</i> , 2012).9	
Figura 2.5 - Tipos de tensões cíclicas senoidais: a) Tensão flutuante; b) Tensão repetida; c) Tensão completamente reversa (modificado: SHIGLEY <i>et al.</i> , 2005).	10
Figura 2.6 – Padrões de tensão variando de forma aleatória (a) e em blocos (b) (modificado: BRANCO <i>et al.</i> , 1986).	11
Figura 2.7 – Ensaio de flexão rotativa de R. R. Moore (modificado: JUVINALL & MARSHEK, 2011).....	13
Figura 2.8 - Curvas S-N típicas para dois casos: a) Ligas ferrosas; b) Ligas não-ferrosas. (modificado: CALLISTER, 2011).....	14
Figura 2.9 – Variação do gradiente de tensão normal (devido à flexão) em função do tamanho (modificado: JUVINALL & MARSHEK, 2011).	16
Figura 2.10 – Influência da tensão média na vida em fadiga (CALLISTER, 2011).	17
Figura 2.11 – Diagrama mostrando os principais critérios de falha de fadiga (SHIGLEY <i>et al.</i> , 2005).	17
Figura 2.12 – Regra de Palmgren-Miner (teoria do dano acumulativo) (modificado: GARCIA <i>et al.</i> , 2012).	20
Figura 2.13 – Ilustração mostrando a analogia utilizada no método <i>Rainflow</i> de contagem de ciclos.	22
Figura 2.14 – Exemplo de aplicação do algoritmo de contagem <i>Rainflow</i>	24

Figura 3.1 – Velocidade média anual dos ventos brasileiros (modificado: CEPEL, 2001).	27
Figura 3.2 – Dois tipos de oscilação de esteira induzida: a) Oscilação sub-vão; b) Oscilação de giro do feixe como corpo único (EPRI, 2006).	28
Figura 3.3 – Principais tipos de vibração que ocorrem em linhas de transmissão de energia elétrica (modificado: EPRI, 2006).	28
Figura 3.4 – Fenômeno físico envolvido no aparecimento da vibração eólica (modificado: COSMAI, 2009).	30
Figura 3.5 – Regimes de escoamento sobre cilindros lisos (modificado: LIENHARD, 1966).	30
Figura 3.6 – Relação entre os números de Strouhal e de Reynolds para cilindros circulares (modificado: plotado por MIT OCW a partir dos dados de Lienhard (1966), Achenbach e Heinecke (1981) e Roshko (1955)).	31
Figura 3.7 – Amplitude de vibração do condutor em função do tempo. Registro feito em vão de 275 metros com um condutor do tipo <i>Drake</i> (modificado: EPRI,2006).	32
Figura 3.8 – Detalhe da montagem cabo/grampo de suspensão em um linha de transmissão (modificado: CLOUTIER & LEBLOND, 2007).	34
Figura 3.9 – Exemplo demonstrativo da construção de um cabo condutor.	34
Figura 3.10 – Exemplos de grampos de suspensão convencionais (modificado: EPRI, 2006).	35
Figura 3.11 – Superfícies em contato na montagem cabo/grampo (modificado: FADEL <i>et al.</i> , 2011).	36
Figura 3.12 – Ilustração de uma marca típicas desenvolvidas devido ao <i>fretting</i> (modificado: CLOUTIER & LEBLOND, 2011).	36
Figura 3.13 – Parâmetros indicadores da intensidade de vibração do cabo (modificado: CLOUTIER & LEBLOND, 2011).	37
Figura 3.14 – <i>CIGRÉ Safe Border Line</i> (CIGRÉ, 1995).	42
Figura 4.1 – Instalação de vibrógrafos: a) Em linhas fora de serviço; b) Em linhas energizadas (modificado: COSMAI, 2009).	46
Figura 4.2 – Principais vibrógrafos desenvolvidos: a) OHVR; b) HILDA; c) Sclar III; d) Pavica; e) Vibrec 500 WT (modificado: COSMAI, 2009).	48
Figura 4.3 – Ilustração esquemática dos tipos de instalação do vibrógrafo Pavica: a) Instalação padrão; b) Instalação com <i>offset</i> . (modificado: ROCTEST, 2003).	49
Figura 4.4 – Pavica instalado próximo a um espaçador (COSMAI, 2009).	49
Figura 5.1 – Ilustração esquemática da bancada do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB (modificado: FADEL <i>et al.</i> , 2011).	54
Figura 5.2 – Vista geral das três bancadas e do vão do laboratório.	55

Figura 5.3 – Fotos da bancada próximo ao vão passivo: a) Talha de alavanca; b) Grampo de ancoragem; c) Montagem do grampo de suspensão; d) Vista do bloco móvel. .56	56
Figura 5.4 – Fotos da bancada no vão ativo: a) <i>Shaker</i> eletromecânico conectado no cabo; b) Vista do cabo preso no braço de alavanca passando pela polia até chegar ao <i>shaker</i> ; c) Montagem da célula de carga e grampo de ancoragem; d) Pesos usados para tração do cabo até a EDS especificada para o ensaio.56	56
Figura 5.5 – Sensores utilizados próximos da montagem cabo/grampo em ensaios de fadiga: a) Extensômetros; b) Acelerômetros; c) Sensor ótico (<i>Laser</i>).58	58
Figura 5.6 – Dispositivo de detecção da quebra dos fios: a) Ilustração esquemática (FADEL, 2010) ; b) Dispositivo operando na bancada.58	58
Figura 5.7 – Diagramas esquemáticos de funcionamento da bancada: a) Processo de controle do <i>shaker</i> (FADEL, 2010) ; b) Aquisição de todos sinais possíveis na bancada e ilustração do processo de controle do <i>shaker</i> (HENRIQUES, 2006).59	59
Figura 5.8 – Aquisitor de dados ADS 2000.59	59
Figura 5.9 – Controlador LDS LASER USB da empresa Brüel & Kjaer.60	60
Figura 5.10 – Acelerômetro no ponto de excitação do <i>shaker</i>60	60
Figura 5.11 – Sistema de ar-condicionado central.61	61
Figura 5.12 – Ilustração esquemática da seção transversal do cabo ACAR 750.64	64
Figura 5.13 – Ilustração esquemática da seção transversal do cabo CAL 900.65	65
Figura 5.14 – Desenho esquemático do modelo de grampo de suspensão utilizado (FORJASUL, 2013).65	65
Figura 5.15 – Gráfico de varredura do cabo CAL 900 (utilizado no ensaio com o Vibrec): Gráfico fornecido pelo <i>software</i> de controle do <i>shaker</i> na varredura de frequências de 12 a 48 Hz.68	68
Figura 5.16 – Dimensões da braçadeira original preservadas para garantir: a) O permanente contato do sensor com o cabo; b) Referência na localização do Ponto 89.70	70
Figura 5.17 – Instalação com <i>offset</i> utilizada no ensaio com o vibrógrafo Pavica.71	71
Figura 5.18 – Extensômetros colados nos fios de topo do cabo condutor no ensaio com o Pavica.72	72
Figura 5.19 – Detalhes construtivos internos do equipamento sem uma das tampas de cobertura.72	72
Figura 5.20 – Verificação da posição do sensor no <i>software</i> (LIFE 500) do equipamento.73	73
Figura 5.21 – Desenho ilustrativo do suporte projetado para o Vibrec.73	73
Figura 5.22 – Resultado final da adaptação e montagem do Vibrec.73	73
Figura 5.23 – Localização do Ponto 89: a) Posição do Ponto 89 marcada de caneta com uma linha; b) Ilustração do dispositivo de posicionamento do equipamento.74	74
Figura 5.24 – Alinhamento dos sensores com o Ponto 89.74	74

Figura 5.25 – Alinhamento vertical dos sensores: a) Sensor do Vibrec; b) Acelerômetro.	74
Figura 5.26 – Extensômetros colados no ensaio com o Vibrec.	75
Figura 5.27 – Histograma referente ao ensaio com o Pavica no nível de amplitude de 143 µm: Número total de ciclos obtido em cada classe de amplitude de flexão.	81
Figura 5.28 – Histograma referente ao ensaio com o Vibrec no nível de amplitude de 143 µm: Número total de ciclos obtido em cada classe de amplitude de flexão.	82
Figura 5.29 – Dispersão observada nos dois ensaios com as amostras de deslocamento no nível de 143 µm.	83
Figura 5.30 – Histograma referente ao ensaio com o Pavica no nível de amplitude de 250 µm: Número total de ciclos obtido em cada classe de amplitude de flexão.	84
Figura 5.31 – Histograma referente ao ensaio com o Vibrec no nível de amplitude de 250 µm: Número total de ciclos obtidos em cada classe de amplitude de flexão.	85
Figura 5.32 – Dispersão observada nos dois ensaios com as amostras de deslocamento no nível de 250 µm.	86
Figura 5.33 – Histograma referente ao ensaio com o Pavica no nível de amplitude de 350 µm: Número total de ciclos obtidos em cada classe de amplitude de flexão.	87
Figura 5.34 – Histograma referente ao ensaio com o Vibrec no nível de amplitude de 350 µm: Número total de ciclos obtidos em cada classe de amplitude de flexão.	88
Figura 5.35 – Dispersão observada nos dois ensaios com as amostras de deslocamento no nível de 350 µm.	89
Figura 5.36 – Extensometria do cabo ACAR 750: Gráfico da tensão dinâmica 0-pico em função da amplitude de flexão pico-a-pico.	94
Figura 5.37 – Extensometria do cabo CAL 900: Gráfico da tensão dinâmica 0-pico em função da amplitude de flexão pico-a-pico.	94
Figura 6.1 – Diagrama geral de aplicação dos métodos de avaliação da integridade do cabo condutor.	97
Figura 6.2 – Ilustração do passo-a-passo necessário para o cálculo da vida remanescente do cabo condutor de acordo com a metodologia CIGRÉ WG-22-04.	98
Figura 6.3 – Contribuição de cada classe de deslocamento no dano acumulado.	101
Figura 6.4 – Contribuição de cada classe de frequência no dano acumulado.	102
Figura 6.5 – Gráfico da amplitude de flexão máxima registrada em cada classe de frequência.	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resultado do exemplo utilizado para demonstrar o método de contagem <i>Rainflow</i>	25
Tabela 3.1 – Comparação entre os tipos de vibrações em cabos condutores de energia elétrica (modificado: EPRI, 2006).	29
Tabela 3.2 – Principais tipos de construções de cabos condutores (FADEL, 2010).	35
Tabela 3.3 – Limites de resistência à fadiga aplicados na metodologia do EPRI.....	41
Tabela 3.4 – Valores das constantes empregadas na CSBL genérica.....	43
Tabela 3.5 - Valores das constantes empregadas na CSBL para cabos ACSR de 1 camada.	43
Tabela 4.1 – Comparativo entre os principais vibrógrafos desenvolvidos.....	47
Tabela 4.2 – Especificações mínimas recomendadas aos vibrógrafos.	51
Tabela 4.3 – Detalhes de gravação de diferentes vibrógrafos.	51
Tabela 5.1 – Especificações técnicas do cabo ACAR 750 usado no ensaio com o vibrógrafo Pavica. (NEXANS, 2013).....	64
Tabela 5.2 – Especificações técnicas do cabo CAL 900 usado no ensaio com o vibrógrafo Vibrec. (NEXANS, 2013).	65
Tabela 5.3 – Especificações dos grampos de suspensão utilizados (FORJASUL, 2013)....	66
Tabela 5.4 – Deformações e tensões gerados pelas amplitudes de flexão pico-a-pico testadas no cabo ACAR 750 utilizado no ensaio com o vibrógrafo Pavica.....	66
Tabela 5.5 – Deformações e tensões gerados pelas amplitudes de flexão pico-a-pico testadas no cabo CAL 900 utilizado no ensaio com o vibrógrafo Vibrec.	67
Tabela 5.6 – Combinações de amplitude e frequência utilizadas em cada amostra de verificação no ensaio com o vibrógrafo Pavica.	69
Tabela 5.7 – Combinações de amplitude e frequência utilizadas em cada amostra de verificação no ensaio com o vibrógrafo Vibrec 500 WT.....	69
Tabela 5.8 – Comparação da faixa de frequência e do número total de ciclos obtido em cada amostra do ensaio com o Pavica.	78
Tabela 5.9 – Comparação da faixa de frequência e do número total de ciclos obtido em cada amostra do ensaio com o Vibrec.....	79
Tabela 5.10 – Dados referentes ao ensaio com o Pavica no nível de amplitude de 143 μm : Indicação da quantidade de ciclos obtida em cada amostra e em cada classe de amplitude de flexão.	80

Tabela 5.11 – Estatísticas calculadas a partir dos dados referentes ao ensaio com o Pavica no nível de amplitude de 143 μm .	81
Tabela 5.12 – Dados referentes ao ensaio com o Vibrec no nível de amplitude de 143 μm : Indicação da quantidade de ciclos obtida em cada amostra e em cada classe de amplitude de flexão.	81
Tabela 5.13 – Estatísticas calculadas a partir dos dados referentes ao ensaio com o Vibrec no nível de amplitude de 143 μm .	82
Tabela 5.14 – Dados referentes ao ensaio com o Pavica no nível de amplitude de 250 μm : Indicação da quantidade de ciclos obtida em cada amostra e em cada classe de amplitude de flexão.	84
Tabela 5.15 – Estatísticas calculadas a partir dos dados referentes ao ensaio com o Pavica no nível de amplitude de 250 μm .	84
Tabela 5.16 – Dados referentes ao ensaio com o Vibrec no nível de amplitude de 250 μm : Indicação da quantidade de ciclos obtida em cada amostra e em cada classe de amplitude de flexão.	85
Tabela 5.17 – Estatísticas calculadas a partir dos dados referentes ao ensaio com o Vibrec no nível de amplitude de 250 μm .	85
Tabela 5.18 – Dados referentes ao ensaio com o Pavica no nível de amplitude de 350 μm : Indicação da quantidade de ciclos obtida em cada amostra e em cada classe de amplitude de flexão.	87
Tabela 5.19 – Estatísticas calculadas a partir dos dados referentes ao ensaio com o Pavica no nível de amplitude de 350 μm .	87
Tabela 5.20 – Dados referentes ao ensaio com o Vibrec no nível de amplitude de 350 μm : Indicação da quantidade de ciclos obtida em cada amostra e em cada classe de amplitude de flexão.	88
Tabela 5.21 – Estatísticas calculadas a partir dos dados referentes ao ensaio com o Vibrec no nível de amplitude de 350 μm .	88
Tabela 5.22 – Resultados obtidos na extensometria dos dois ensaios.	93

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

C	Constante que forma a curva S-N	
D	Dano acumulativo	
D_c	Comprimento característico do corpo	[m]
E	Módulo de elasticidade	[MPa]
Er	Erro relativo	
F_e	Fator de extrapolação	
H	Carga de tração no cabo condutor	[N]
I	Momento de inércia de área	[mm ⁴]
K	Constante da fórmula de Poffenberger-Swart	[N/mm ³]
L_v	Comprimento do vão	[m]
N	Número de ciclos até a falha	
P	Ponto médio de uma classe de medição arbitrária	
R	Razão de tensões na fadiga	
R'	Fator de conversão entre amplitude de flexão direta e inversa	
S	Resistência do material	[MPa]
Td	Tendência de uma medição arbitrária	
U	Velocidade de escoamento do fluido	[m/s]
V	Vida	
Z	Constante que forma a curva S-N	
Y_a	Amplitude de flexão pico-a-pico inversa	[mm]
Y_b	Amplitude de flexão pico-a-pico	[mm]
c	Distância de <i>offset</i> utilizada no posicionamento do vibrógrafo Pavica	[mm]
d	Diâmetro do cabo condutor	[mm]
f	Frequência	[Hz]
k_a	Fator de Marin para condição de superfície	
k_b	Fator de Marin para o tamanho	
k_c	Fator de Marin para o carregamento	
k_d	Fator de Marin para temperatura	
k_e	Fator de Marin para confiabilidade	
k_v	Fator de Marin para efeitos variados	
l	Deslocamento medido para a detecção das quebras de fios	[mm]
n	Número de ciclos ocorridos	
n_m	Número de modos de vibração	
n_s	Fator de segurança	
q	Número de classes	
s	Desvio padrão de uma grandeza arbitrária	
t	Tempo	[s]
w	Massa por unidade de comprimento do cabo	[kg/m]
x	Grandeza arbitrária	
y	Amplitude de vibração vertical	[mm]

Símbolos Gregos

Δ	Indica a variação de uma grandeza arbitrária	
α	Ângulo de rotação do detector de quebras de fios	[°]

β	Ângulo de vibração do condutor	[°]
ν	Viscosidade cinemática	[m ² /s]
π	Constante	
σ	Tensão normal	[MPa]
τ	Tensão de cisalhamento	[MPa]

Grupos Adimensionais

Re	Número de Reynolds
St	Número de Strouhal

Subscritos

R	remanescente
St	Strouhal
a	alternada ou amplitude
al	composto pelo material alumínio
b	bending (flexão)
e	associado ao limite de resistência à fadiga do material
f	parâmetro associado à fadiga ou à falha
i	indicador de contagem
m	médio
max	valor máximo em um grupo
min	valor mínimo em um grupo
n	natural
o	operação
r	variação de tensões na fadiga
$aço$	composto pelo material aço
ut	associado à resistência última de tração do material
y	associado ao escoamento do material

Sobrescritos

—	Valor médio
---	-------------

Siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTM	<i>American Society for Testing Materials</i>
CIGRÉ	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques</i>
EDS	<i>Everyday Stress</i>
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Services</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
UnB	Universidade de Brasília
UPC	Último Ponto de Contato entre o cabo e o grampo de suspensão
VVC	Valor Verdadeiro Convencional

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

O acesso à energia elétrica, que é indispensável ao progresso de qualquer atividade moderna, somente é possível por meio de uma vasta rede de transmissão que conecta as unidades geradoras aos centros consumidores. Geralmente, os centros consumidores estão localizados a centenas ou milhares de quilômetros das usinas geradoras que são formadas predominantemente por hidrelétricas instaladas no interior do país.

Para transpor as imensas distâncias entre as usinas geradoras e os consumidores, o Brasil utiliza um conjunto extenso de linhas de transmissão que formam o chamado Sistema Interligado Nacional (SIN). O SIN conecta a maioria dos estados permitindo o uso eficiente da capacidade energética do país de forma que a energia gerada por uma usina pode ser direcionada a uma região distante de acordo com a necessidade do local, a qual geralmente está vinculada ao regime hidrológico sazonal dos rios abastecedores da região.

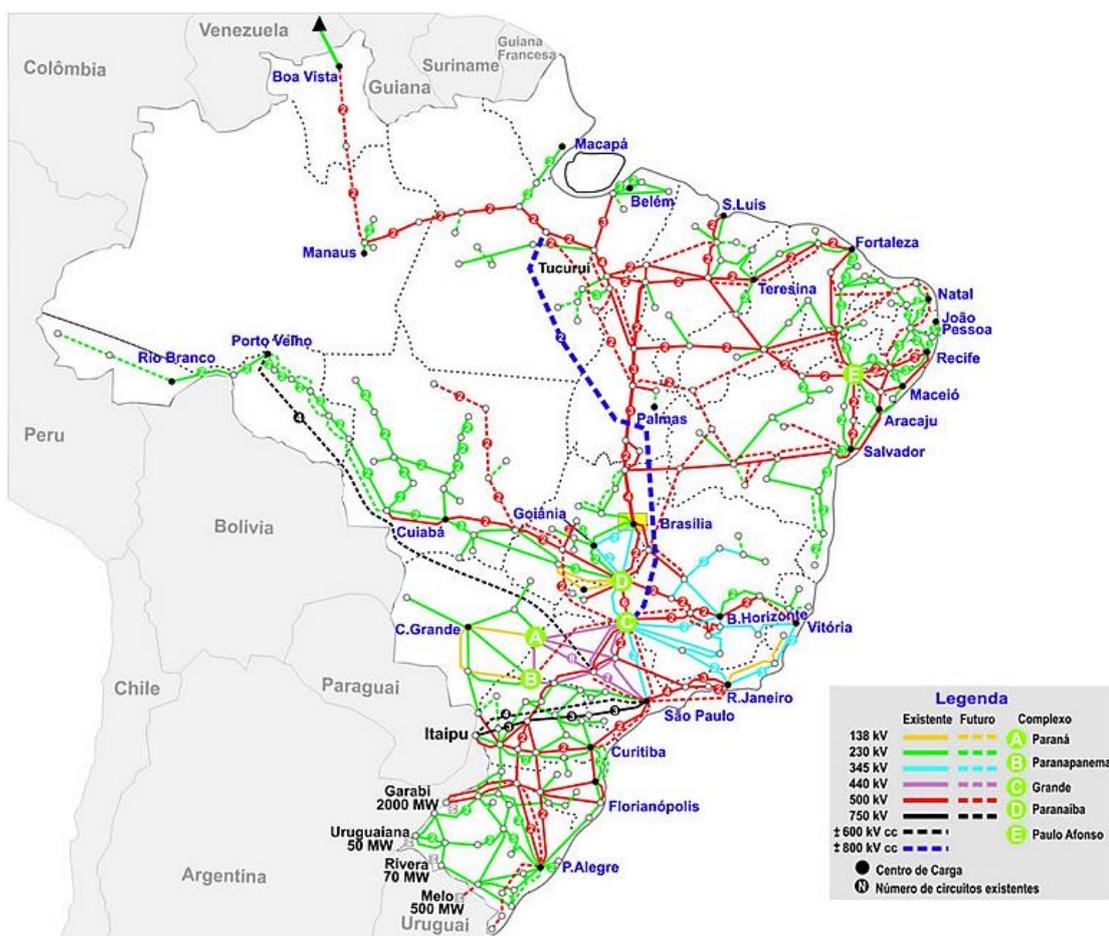


Figura 1.1 - Composição atual e projeção até o final de 2015 das linhas que formam o Sistema Interligado Nacional (ABRADEE).

De acordo com dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o SIN contava com pouco mais de 111 mil quilômetros de linhas de transmissão no final de 2013 (ANEEL, 2013) e a tendência é que este número aumente cada vez mais devido ao crescente interesse de conectar sistemas isolados ao SIN (ANEEL, 2008). Atualmente, os sistemas isolados servem apenas demandas locais de energia e estão presentes principalmente na região Norte do país onde a densa vegetação, as características geográficas e os grandes rios que atravessam a região criam obstáculos à integração ao Sistema Interligado Nacional.

Neste contexto de expansão e manutenção das extensas linhas existentes, deve-se ter em mente a relevância do estudo do cabo condutor de eletricidade que é o elemento mais importante da rede de transmissão, pois além do papel fundamental exercido, ele constitui com quase 40% dos custos investidos na construção da rede (FRONTIN *et al.*, 2010).

Os cabos condutores estão sujeitos a dois tipos principais de carregamentos mecânicos: Carregamento estático devido à força de tração que geralmente corresponde a 20% da carga de ruptura do cabo e carregamentos dinâmicos que são causados pela vibração imposta pela ação dos ventos nas linhas de transmissão aéreas. A vibração causada pela excitação eólica impõe ao cabo tensões cíclicas de flexão que danificam progressivamente o material por meio da nucleação e propagação de trincas até o mesmo falhar, este mecanismo de falha é conhecido como fadiga, no entanto, o processo de fadiga em cabos é ainda mais complexo, pois envolve a ocorrência de *fretting*.

O *fretting* ocorre quando há movimento relativo de pequena amplitude e de forma repetitiva entre superfícies em contato. No caso dos cabos condutores, as superfícies em contato sob movimento repetitivo de fricção podem estar presentes entre os fios que compõem o cabo ou entre os fios e os elementos que se fixam ao condutor ou que restringem a sua movimentação, tais como grampos de suspensão e espaçadores. O *fretting* provoca danos superficiais nos fios do condutor resultando na nucleação de mais trincas e aceleração do processo de fadiga. Portanto, o mecanismo de falha recebe a denominação de fadiga por *fretting* devido à ocorrência deste fenômeno que intensifica e acelera os efeitos de fadiga.



Figura 1.2 – a) Marcas de *fretting* e rupturas nos fios causadas por trincas iniciadas nestas marcas (FADEL, 2010); b) Exemplo de ruptura completa de um cabo causada por fadiga (CLOUTIER & LEBLOND, 2011).

O processo de fadiga por *fretting* gera sucessivas rupturas nos fios dos cabos que culminam na ruptura completa do mesmo configurando-se em uma falha catastrófica (Fig. 1.2 b) que conseqüentemente provoca interrupção do fornecimento de energia elétrica e grandes prejuízos econômicos, como o caso que ocorreu em 2001, quando aproximadamente 67 milhões de pessoas das regiões mais produtivas do país ficaram sem energia elétrica por várias horas devido à ruptura por fadiga em uma linha de transmissão de 460 kV do estado de São Paulo (FRONTIN *et al.*, 2010).

Para evitar o grande impacto causado pela falha por fadiga nos cabos, as empresas concessionárias das linhas de transmissão investem em técnicas de monitoração que buscam aumentar a confiabilidade do sistema. Uma técnica bastante empregada é a utilização de vibrógrafos, aparelhos que registram os ciclos de vibração do cabo de acordo com a amplitude de vibração e a frequência de excitação eólica.



Figura 1.3 – Dois tipos de vibrógrafos instalados em linhas de transmissão (modificado: CLOUTIER & LEBLOND, 2011).

Os registros feitos pelos vibrógrafos em conjunto com as teorias e metodologias desenvolvidas (Poffenberger & Swart, 1965; IEEE, 1966; EPRI, 1979; CIGRÉ, 1985) permitem não só avaliar se o nível de vibração detectado compromete a integridade do cabo, mas também a previsão de quando a falha poderá ocorrer pelo cálculo da vida útil remanescente deste elemento, que conforme já foi comentado, representa cerca de 40% dos custos de uma linha de transmissão. Perante tudo isto, o uso das medições registradas pelos vibrógrafos em conjunto com as metodologias criadas mostra-se uma ferramenta extremamente importante na orientação de tomada de decisão por parte das empresas para a definição de parâmetros de projeto e para o estabelecimento de intervalos racionais de inspeção e manutenção das linhas de transmissão, com o intuito de se evitar falhas catastróficas e os prejuízos incorridos por elas.

Apesar das medições feitas por vibrógrafos serem essenciais para a atuação de forma preventiva contra as falhas por fadiga em cabos condutores, atualmente existem poucos modelos comerciais disponíveis e os mesmos apresentam várias limitações em relação ao registro da vibração real do cabo: Os vibrógrafos desenvolvidos utilizam algoritmos que simplificam a aquisição de dados e são capazes de registrar apenas poucas amostras de vibração durante curtos períodos de tempo, características que decorrem de limitações tecnológicas envolvidas na construção dos equipamentos relativas ao processo de coleta e armazenamento de dados e à autonomia dos aparelhos que funcionam por baterias.

Como consequência destes fatores, os dados adquiridos podem corresponder a valores incoerentes ou pouco significativos em relação ao histórico de vibrações no qual o cabo é submetido durante a sua vida útil, conduzindo a uma estimativa incorreta da integridade do condutor e ao direcionamento de ações inconsistentes para a preservação da linha de transmissão.

1.2 OBJETIVO

A partir do problema exposto, o objetivo geral do trabalho é estabelecer uma análise comparativa entre vibrógrafos visando o estudo das limitações e da aplicabilidade desses equipamentos na avaliação da severidade da vibração e na previsão do dano causado pela fadiga em cabos condutores de energia elétrica.

As limitações serão estudadas por meio de análises qualitativas e quantitativas. A análise qualitativa foi realizada por meio da discussão crítica do método empregado pelos equipamentos comerciais para medir a amplitude de flexão e a frequência de vibração do cabo e por meio da comparação entre as principais características de cada modelo comercial desenvolvido. A análise quantitativa refere-se à comparação das medições feitas pelos vibrógrafos Pavica e Vibrec 500 WT com as medições registradas por instrumentos presentes na bancada de testes do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB.

A demonstração da aplicabilidade dos equipamentos ficará a cargo de um estudo de caso, este estudo foi realizado utilizando um conjunto de dados (matriz: Amplitude – Frequência) obtido na literatura referente a um vibrógrafo instalado em uma linha de transmissão. Ao conjunto de dados, foram empregadas as metodologias existentes para avaliação da integridade do cabo em relação ao dano à fadiga, com destaque à metodologia CIGRÉ WG 22-04 que permite o cálculo da vida remanescente do condutor.

Portanto, para alcançar o objetivo geral é possível destacar os seguintes objetivos que estão dentro do escopo do trabalho:

- 1) Revisão teórica acerca de formulações e conceitos envolvidos para quantificar o dano causado pela fadiga por *fretting* em cabos condutores;
- 2) Revisão teórica das metodologias criadas para avaliação da integridade do cabo;
- 3) Estudo e análise dos equipamentos comerciais destinados a realizar as medições dos níveis de vibração em cabos com o intuito de identificar as limitações associadas a eles;
- 4) Aplicação das metodologias existentes a um conjunto de dados registrado por um vibrógrafo instalado em uma linha de transmissão com o objetivo de demonstrar o procedimento utilizado na avaliação da severidade do dano causado por fadiga.

Com este trabalho, pretende-se contribuir com as áreas de projeto, manutenção e inspeção de linhas de transmissão agregando conhecimento informativo a respeito dos equipamentos desenvolvidos para o registro de dados em campo e sobre a forma de aplicação destes dados na avaliação da integridade do cabo condutor e na previsão de sua vida residual.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em sete capítulos nos quais são tratados os seguintes temas:

- **Capítulo 1:** Introdução

O problema mecânico de fadiga por *fretting* em cabos condutores de energia elétrica é apresentado dentro de um contexto que revela a importância do estudo de temas nessa área e mais precisamente é exposta a motivação da realização deste trabalho: Avaliação crítica das medições feitas por vibrógrafos considerando as limitações destes equipamentos e o estudo da aplicação dos dados registrados por estes aparelhos em metodologias úteis na avaliação da integridade do cabo e na previsão de sua vida residual.

- **Capítulo 2:** Fadiga (revisão teórica)

Conceitos básicos, mas fundamentais sobre fadiga dos materiais são abordados com a finalidade de prover o ferramental necessário para o entendimento do problema mais específico de fadiga em cabos condutores que é tratado no capítulo subsequente.

- **Capítulo 3:** Fadiga em cabos condutores

O mecanismo de falha de fadiga por *fretting* em cabos condutores é tratado mais especificamente partindo da descrição detalhada do fenômeno de excitação eólica, apresenta-se a equação de Poffenberger -Swart que é utilizada no cálculo da tensão dinâmica desenvolvida no cabo e por último são apresentadas as metodologias usadas na avaliação da integridade do condutor.

- **Capítulo 4:** Vibrógrafos

Capítulo destinado ao estudo dos vibrógrafos apresentando o desenvolvimento dos primeiros aparelhos até às tecnologias atuais encontradas nos dispositivos comerciais. Posteriormente, o método de medição empregado por estes equipamentos é apresentado e em sequência é feita uma análise crítica do mesmo.

- **Capítulo 5:** Análise comparativa de vibrógrafos

Capítulo que expõe a metodologia e os resultados da análise quantitativa que foi realizada para comparar as os registros efetuados pelos vibrógrafos com os parâmetros de vibração monitorados por instrumentos presentes na bancada experimental do laboratório de cabos da UnB.

- **Capítulo 6:** Estudo de caso – Avaliação da integridade do cabo condutor

As metodologias criadas (IEEE, 1966; EPRI, 1979; CIGRÉ, 1985) para avaliação da integridade do cabo em relação aos danos causados pela fadiga por *fretting* foram empregadas aos dados obtidos na literatura de vibrógrafo instalado em uma linha de transmissão real.

- **Capítulo 7:** Discussão dos resultados e conclusão

Capítulo destinado a expor os principais resultados e conclusões encontrados com o trabalho principalmente em relação à análise dos vibrógrafos.

2 FADIGA (REVISÃO TEÓRICA)

2.1 O MECANISMO DE FALHA POR FADIGA

A fadiga é um mecanismo de falha que ocorre quando o material é submetido ciclicamente à tensões que variam entre diferentes níveis. A longa exposição do material às oscilações de tensão justifica o termo “fadiga” ser utilizado para denominação deste mecanismo de falha que acomete estruturas sobre carregamentos dinâmicos.

O estudo da fadiga é importante porque ela é a maior causa de falhas em metais, estima-se que seja responsável por 90% das falhas de todos os componentes metálicos (CALLISTER, 2011). Adicionalmente, deve ser alertado que a falha por fadiga é extremamente perigosa, pois ocorre repentinamente de forma similar à fratura em material frágil e ocorre em níveis de tensão inferiores ao limite de resistência à tração dos materiais ou, em alguns casos, até mesmo em níveis inferiores ao limite de escoamento do material.

A fratura final do componente mecânico, a qual caracteriza a falha por fadiga, ocorre devido ao processo de nucleação e propagação de trincas no material que são induzidas pelas oscilações de tensão. Mais especificamente, o processo de falha por fadiga é dividido em três estágios:

- **Estágio I:** Nucleação de trincas.

Trincas microscópicas que se estendem entre dois a cinco grãos do material surgem nos locais onde as tensões no componente mecânico são máximas (SHIGLEY *et al.*, 2005), estes locais geralmente ocorrem na superfície do material e em pontos de concentração de tensão, que podem ser formados devido a diversos fatores, os quais são discutidos e exemplificados (Fig. 2.1) a seguir:

- a) Riscos ou defeitos superficiais que podem ser causados no processo de fabricação, pela criação de marcas de identificação em locais inapropriados ou por danos superficiais causados pela abrasão (*fretting*) entre superfícies (Fig. 2.1 a);
- b) Mudanças bruscas de seção transversal, como as causadas por cantos vivos na peça ou pelo posicionamento de furos e rasgos de chaveta (Fig. 2.1 b);
- c) Descontinuidades ou defeitos internos do próprio material que podem surgir devido à inclusão de material estranho (impurezas), presença de poros ou pelo deslizamento de discordâncias no material causadas pelas cargas cíclicas (Fig. 2.1 c).

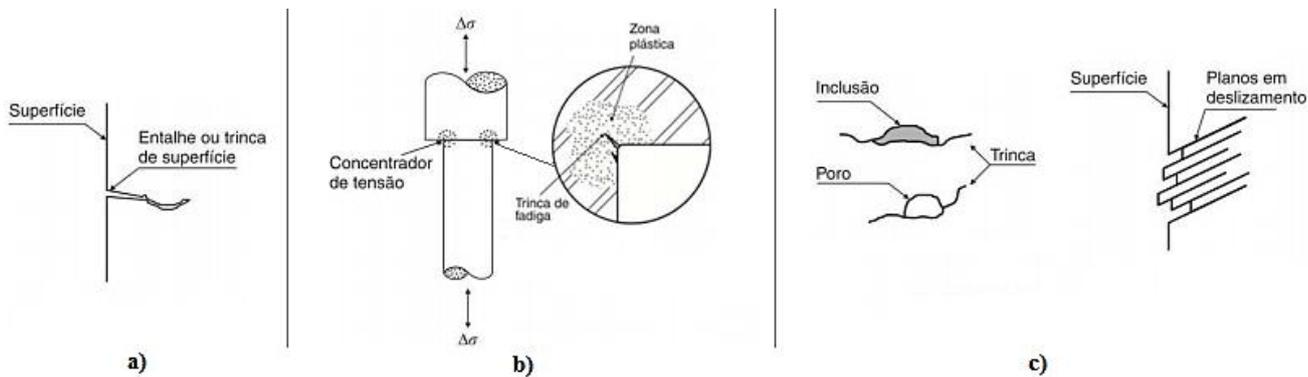


Figura 2.1 – Exemplos de locais onde geralmente ocorre a nucleação de trincas (modificado: GARCIA *et al.*, 2012).

- **Estágio II:** Propagação das trincas.

Neste estágio, as trincas tornam-se macroscópicas (SHIGLEY *et al.* 2005). Cada ciclo de tensão provoca sucessivas deformações na ponta da trinca que promovem a sua propagação em uma direção predominantemente perpendicular à tensão de tração aplicada (CALLISTER, 2011; STEPHENS *et al.*, 2001).

A Figura (2.2) ilustra uma trinca formada no processo de fadiga. Por meio desta figura, algumas diferenças entre os estágios I e II podem ser notadas, tais como, a extensão do comprimento da trinca e a direção predominante de propagação que é governada principalmente pela tensão cisalhante no estágio I e pela tensão normal no estágio II (STEPHENS *et al.*, 2001).

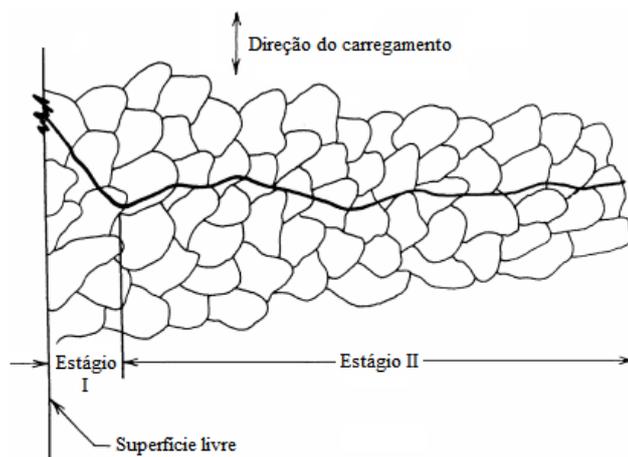


Figura 2.2 – Ilustração de uma trinca formada no processo de fadiga de um material (modificado: STEPHENS *et al.*, 2001).

- **Estágio III:** Fratura final (falha do componente mecânico).

A trinca se propaga até atingir um tamanho crítico, momento no qual o material não resiste mais e ocorre a fratura completa do corpo. A fratura que ocorre por fadiga é similar à fratura em material frágil, é repentina e não dá indícios que ocorrerá (estricções ou deflexões observáveis).

A superfície típica de uma peça que sofreu fratura devido à fadiga é caracterizada pela presença de marcas de praia e estrias. Marcas de praia são marcas visíveis ao olho nu e possuem formato circular que se repete em um padrão apontando para a direção de propagação da trinca (Fig. 2.3).

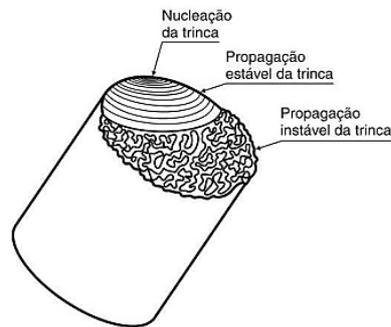


Figura 2.3 – Marcas típicas em uma superfície que sofreu fratura por fadiga (GARCIA *et al.*, 2012).

A aparência deste tipo de marcas está associada à natureza corrosiva do ambiente e às variações na frequência e intensidade do carregamento (SHIGLEY *et al.*, 2005). Cada banda da marca de praia representa um período de propagação da trinca em que não houve interrupção na aplicação do carregamento (CALLISTER, 2011) e a cor de cada banda representa o nível de tensões aplicado, bandas mais claras ocorrem em menores níveis de tensão e bandas mais escuras, em maiores (GARCIA *et al.*, 2012).

As estrias estão contidas dentro das marcas de praia e somente é possível observá-las com o uso de microscópio eletrônico, cada estria corresponde ao avanço da trinca em um ciclo de aplicação da carga (CALLISTER, 2011), conforme mostra a Figura (2.4).

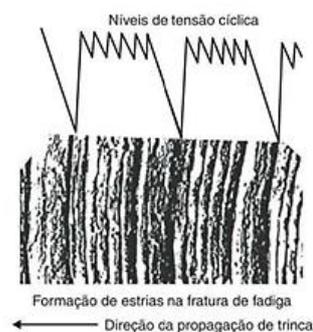


Figura 2.4 – Formação de estrias no processo de falha por fadiga (GARCIA *et al.*, 2012).

Diferentemente do aspecto liso da região onde há a presença das marcas de praia (propagação estável da trinca), surge uma região irregular que corresponde ao ponto de ruptura súbita do material após a trinca atingir um comprimento crítico (Fig. 2.3). A presença das marcas de praia e das estrias em superfícies fraturadas confirmam que a fadiga foi a causa da falha do componente e a análise destas marcas pode ser útil para esclarecer a forma como se sucedeu a aplicação dos carregamentos e a forma em que houve a propagação das trincas até a falha, entretanto, a ausência dessas marcas não descarta a fadiga como mecanismo de falha em uma peça (CALLISTER, 2011).

2.2 TIPOS DE TENSÕES CÍCLICAS

A oscilação da tensão com o tempo em um componente sujeito à fadiga segue o formato imposto pela natureza do carregamento, frequentemente, o padrão observado é senoidal (Eq. 2.1) por causa do tipo de tensão desenvolvido em máquinas rotativas.

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a \text{sen}(2\pi ft) \quad (2.1)$$

Onde:

σ_m = Tensão média

t = Tempo

σ_a = Tensão alternada

f = Frequência de aplicação da carga

A frequência de aplicação da carga ou da oscilação da tensão é dada pela razão entre o número de ciclos (n) e o intervalo de tempo (Δt) em que ocorreram estes ciclos, conforme mostra a equação abaixo:

$$f = \frac{n}{\Delta t} \quad (2.2)$$

Os conceitos de tensão alternada e média podem ser compreendidos de forma mais fácil ao observar os formatos assumidos pelos tipos de tensões cíclicas. Alguns formatos seguidos por tensões senoidais são ilustrados nos gráficos presentes na Figura (2.5), nos quais o eixo das ordenadas é representado pela tensão (sentido positivo indica tração e o negativo, compressão) e o eixo das abscissas é representado pelo tempo.

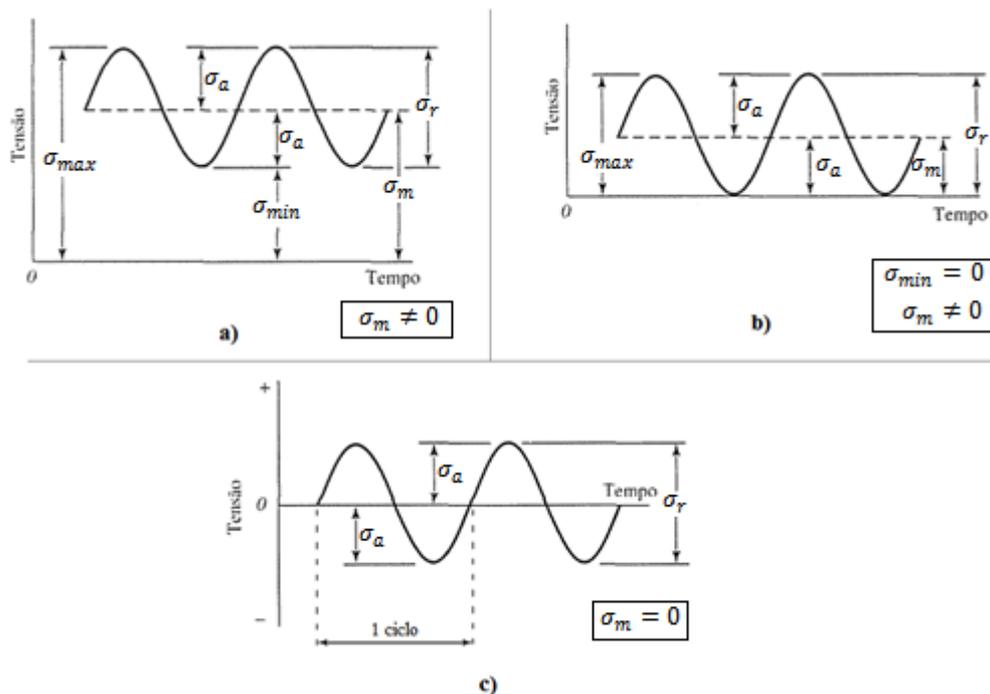


Figura 2.5 - Tipos de tensões cíclicas senoidais: a) Tensão flutuante; b) Tensão repetida; c) Tensão completamente reversa (modificado: SHIGLEY *et al.*, 2005).

Os parâmetros utilizados para caracterizar os padrões de tensões mostrados na Figura (2.5) são definidos por equações que relacionam a tensão máxima (σ_{max}) e mínima (σ_{min}), conforme é descrito abaixo:

- **Tensão alternada ou amplitude de tensão (σ_a)**

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

- **Tensão média (σ_m)**

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (2.4)$$

- **Variação de tensão (σ_r)**

$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (2.5)$$

- **Razão de tensões (R)**

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

Contudo, nem sempre o padrão de tensão imposto pelo carregamento é regular. A natureza de alguns carregamentos provocam padrões irregulares em que a amplitude da tensão pode variar com os ciclos, isto pode acontecer de forma aleatória como as tensões desenvolvidas na suspensão de um carro que passa por uma estrada acidentada ou sob a forma de “blocos” em que um nível de amplitude de tensão se repete por determinado número de ciclos e depois se altera.

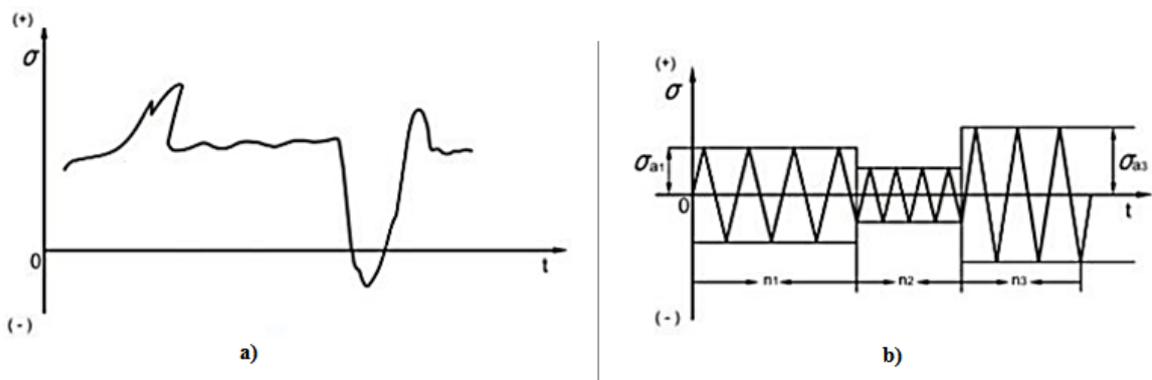


Figura 2.6 – Padrões de tensão variando de forma aleatória (a) e em blocos (b) (modificado: BRANCO *et al.*, 1986).

2.3 MÉTODOS DE PROJETO CONTRA FALHA POR FADIGA

A fadiga é um fenômeno complexo que pode ser influenciado por diversos fatores, para compreensão deste fenômeno foram criadas diferentes abordagens visando a análise e o projeto de um componente contra falha por fadiga. Os principais métodos utilizados para assegurar que um componente não falhe por fadiga ou então para acompanhar o dano causado pela fadiga de forma que a falha não ocorra com o equipamento em serviço são discutidos a seguir:

- **Método da Tensão-Vida**

Em relação aos outros métodos, o método da Tensão-Vida é o mais simples de ser aplicado, pois utiliza apenas valores de tensão nos locais mais solicitados da peça para calcular a vida em fadiga de um componente (número N de ciclos até a falha), esta relação entre a tensão e a vida do componente somente é possível porque o método é apoiado em um vasto conjunto de dados experimentais levantados para cada tipo material. Na seção seguinte que trata sobre curva S-N, será esclarecido de uma forma melhor como esta relação é obtida em ensaios experimentais.

Em oposição à simplicidade gerada pela apropriação de dados experimentais para prever a vida em fadiga, o método da Tensão-Vida é adequado somente para os casos de vida em fadiga de alto ciclo ($N > 10^3$). O método não é preciso para vidas de baixo ciclo ($N \leq 10^3$), pois não utiliza conceitos de tensão-deformação verdadeira em sua formulação e na vida de baixo ciclo existem níveis significativos de plasticidade localizada induzidos pelas tensões que são maiores nas vidas $N \leq 10^3$ ciclos.

- **Método da Deformação -Vida**

Diferentemente do método Tensão-Vida, o método Deformação-Vida considera as deformações plásticas localizadas, portanto é adequado para aplicações de vidas em baixo ciclo. O método basicamente consiste em relacionar a amplitude de deformação com o número de ciclos até a falha, o que é feito por intermédio da equação de Manson-Coffin.

Do ponto de vista de projeto, o método da Deformação-Vida é difícil de ser aplicado porque quantificar o nível de deformação nos pontos mais solicitados da peça é uma tarefa complexa, o emprego de técnicas de elementos finitos pode ser útil nessa questão, no entanto, o método da Deformação-Vida ainda utiliza outras idealizações que geram incertezas nos resultados (SHIGLEY *et al.*, 2005).

- **Método da Mecânica da Fratura Linear Elástica**

O método baseia-se no acompanhamento do tamanho de trincas de acordo com o nível de tensão aplicado no componente. A aplicação do método somente é possível aliada a códigos computacionais e programas de inspeção que permitem o uso do critério de falha segura, no qual se tolera certo nível de dano desde que não se comprometa a integridade da estrutura que deve ser submetida a reparo ou substituição antes da falha. Este método é adequado para aplicações em estruturas grandes, como em asas e fuselagens de avião.

Neste trabalho, será considerado apenas o método Tensão-Vida, pois por verificação experimental e pela análise das falhas em campo, sabe-se que as falhas por fadiga em cabos condutores ocorrem geralmente em alto ciclo o que exclui a análise pelo método da Deformação-Vida, e o método da Mecânica da Fratura Linear é impraticável para o problema com condutores devido às dificuldades envolvendo o processo de acompanhamento e verificação da trinca nos cabos das linhas de transmissão. Portanto, nas seções seguintes deste capítulo serão apresentados conceitos e teorias envolvendo a análise de tensões, conforme é previsto pelo método da Tensão-Vida.

2.4 MÉTODO DA TENSÃO-VIDA

2.4.1 Curva S-N

Analogamente à determinação de outras propriedades mecânicas, a resistência à fadiga de um material também é verificada por ensaios experimentais. Um dos ensaios que já foi muito utilizado é o de flexão rotativa proposto por R. R. Moore. Neste tipo de ensaio, um corpo-de-prova padronizado do material estudado é submetido a ciclos de tensão completamente reversa, nos quais a tensão média é nula e a amplitude de tensão é causada pela tensão normal decorrente do momento fletor puro e constante na seção de teste do corpo-de-prova.

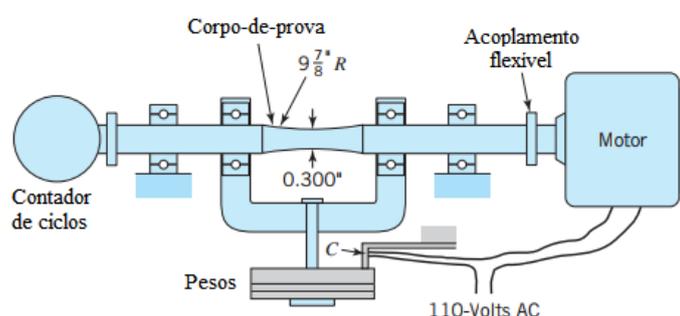


Figura 2.7 – Ensaio de flexão rotativa de R. R. MOORE (modificado: JUVINALL & MARSHEK, 2011).

Inicialmente, o corpo-de-prova é carregado por pesos de forma que a amplitude de tensão fique próxima à resistência última à tração do material (S_{ut}) e assim o número de ciclos até a falha é contado, posteriormente, o mesmo procedimento é repetido por várias vezes, porém aplicando níveis de tensão cada vez menores. O resultado de ensaios como este é compilado em um gráfico cujo eixo das ordenadas é representado pela resistência à fadiga (S_f) e o eixo das abscissas pelo número de ciclos (N), o padrão seguido pelos pontos do conjunto de dados forma a chamada curva S-N (*Stress-Number*) ou também chamada de curva de Wöhler (em homenagem ao precursor do estudo dessas curvas), a Figura (2.8) ilustra o padrão típico assumido pelas curvas S-N:

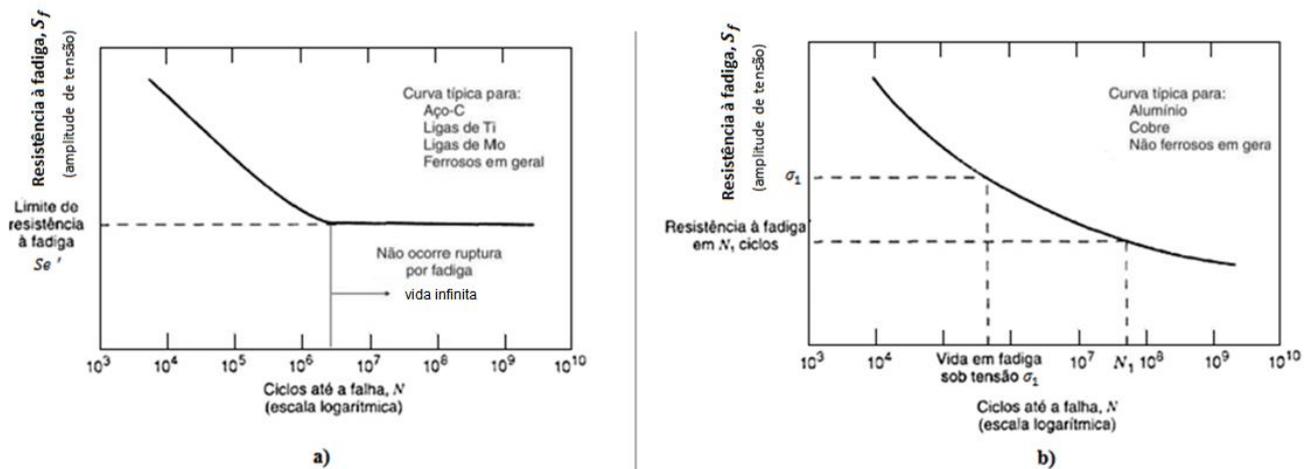


Figura 2.8 - Cursas S-N típicas para dois casos: a) Ligas ferrosas; b) Ligas não-ferrosas. (modificado: CALLISTER, 2011).

A Figura (2.8) indica que conforme se reduz o nível de tensão oscilante aplicado no material, maior é a vida em fadiga do mesmo. Para ligas ferrosas, existe um limite no qual qualquer tensão aplicada abaixo deste nível não provocará a falha por fadiga no material independentemente da quantidade de ciclos a que ele seja submetido, este limite é denominado de limite de resistência à fadiga (S'_e) e abre a possibilidade para o projeto de componentes utilizando o critério de vida segura, critério em que se evita a falha dentro das características de carregamento para as quais o componente foi projetado.

Contudo, materiais não-ferrosos (como as ligas de alumínio) não possuem um limite de resistência à fadiga (a curva S-N não fica horizontal) o que significa que a falha ocorrerá inevitavelmente após certo número de ciclos. A resistência à fadiga para ligas não-ferrosas é geralmente indicada para um número específico (suficientemente grande) de ciclos, no caso de ligas de alumínio, costuma-se definir um valor dentro da faixa de 10^7 a 10^8 ciclos.

Em 1910, Basquin propôs que a relação observada na curva S-N seguia uma lei de potência dada de acordo com a Equação (2.7):

$$S_f = a N^b \tag{2.7}$$

Onde, a e b são constantes que dependem do material testado.

A Equação (2.7) também pode ser expressa em função do coeficiente de resistência à fadiga (σ'_f), conforme indica a Equação (2.8):

$$S_f = \sigma'_f (2 N^b) \tag{2.8}$$

Devido à natureza da relação indicada nas Equações (2.7) e (2.8), é uma prática comum representar a curva S-N em gráficos com escala logarítmica para linearização dos dados.

2.4.2 Fatores que afetam a vida em fadiga

Os ensaios de flexão, tração-compressão (*push-pull*) e de torção utilizados para verificar a resistência à fadiga dos materiais são feitos com corpos-de-prova padronizados e em condições controladas diferentes das condições de operação e de geometria observadas no componente real. Para adequar os valores encontrados experimentalmente à situação real em que se quer empregar o elemento mecânico, foram propostos fatores (fatores de Marin) que quantificam a influência de condições variadas na vida em fadiga pela correção do limite de resistência à fadiga encontrado para o corpo-de-prova, conforme é mostrado pela equação abaixo:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_v S'_e \quad (2.9)$$

Onde:

k_a = Fator de condição de superfície;

k_d = Fator de temperatura;

k_b = Fator de tamanho;

k_e = Fator de confiabilidade;

k_c = Fator de carregamento;

k_v = Fator de efeitos variados;

S_e = Limite de resistência à fadiga do componente mecânico com geometria e em condições reais de operação;

S'_e = Limite de resistência à fadiga do material ensaiado em laboratório (em condições controladas).

Cada fator será discutido brevemente a seguir:

- **Fator de condição de superfície (k_a)**

As superfícies dos corpos de prova utilizados nos ensaios são rigorosamente controladas, sofrem polimento radial e axial para eliminação de qualquer tipo de concentração de tensão. A função do fator de condição superficial é adequar a resistência à condição de acabamento do componente real, pois conforme foi discutido em seções anteriores, a trinca tende a se iniciar na superfície onde as tensões geralmente são máximas, portanto o acabamento pode influenciar consideravelmente na vida em fadiga do elemento mecânico real.

- **Fator de tamanho (k_b)**

O tamanho influencia no gradiente de tensão que um material sofre quando é submetido à flexão ou torção e isto implica na resistência à fadiga do material que deve ser modificada pelo fator (k_b). A Figura (2.9) ilustra que componentes menores experimentam um maior gradiente de tensão, este rápido decaimento na tensão é favorável à resistência à fadiga do material (JUVINALL & MARSHEK, 2011). Adicionalmente, deve ser considerado que componentes maiores têm maior probabilidade de apresentar alguma descontinuidade na microestrutura do material (variação de propriedades) que pode afetar negativamente a resistência do componente (STEPHENS *et al*, 2011).

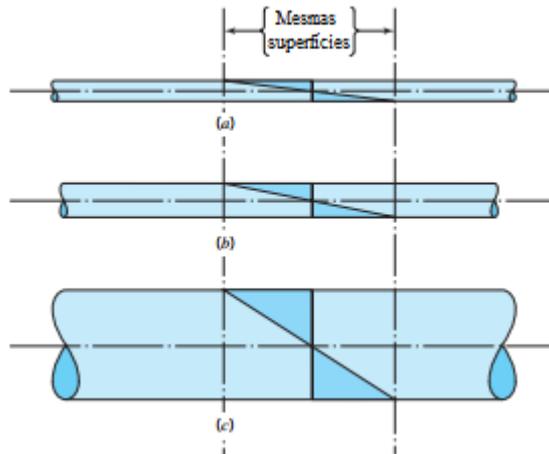


Figura 2.9 – Variação do gradiente de tensão normal (devido à flexão) em função do tamanho (modificado: JUVINALL & MARSHEK, 2011).

- **Fator de carregamento (k_c)**

Leva em consideração o tipo de ensaio executado (flexão, axial ou de torção) que influencia na obtenção da curva S-N e nas propriedades em fadiga.

- **Fator de temperatura (k_d)**

A temperatura influencia na resistência do material, em componentes que operam em condições de temperatura adversas é necessário utilizar o fator para correção do limite de resistência à fadiga.

- **Fator de confiabilidade (k_e)**

Como existem vários fatores que influenciam a vida em fadiga, ocorre certa dispersão mesmo nos dados experimentais obtidos em laboratório. O fator de confiabilidade considera intervalos de confiança relacionados ao espalhamento nos dados.

- **Fator de efeitos variados (k_v)**

Usado para quantificar os efeitos de fontes variadas que podem afetar de forma significativa o limite de resistência à fadiga, como exemplo, podem ser citados os efeitos de tensões residuais de tração, efeitos de corrosão no material, de jateamento e da aplicação de revestimento metálico.

Detalhes sobre como quantificar cada fator de Marin podem ser encontrados em literaturas específicas listadas nas referências bibliográficas. O trabalho não entrará neste mérito, pois as curvas S-N geradas para analisar a vida em fadiga de cabos condutores são feitas por meio de ensaios experimentais com o componente mecânico real (cabo condutor e grampo de suspensão), portanto o ensaio já se aproxima das condições reais e não é necessário empregar os fatores corretivos, esta seção tem somente a finalidade didática de expor e alertar que existem diversos fatores que influenciam na vida em fadiga de um material. Maiores detalhes sobre o ensaio de fadiga experimental em cabos condutores são dados no capítulo 5 sobre análise comparativa de vibrógrafos.

2.4.3 Consideração da tensão média em carregamentos simples

Na maior parte dos casos, os resultados de fadiga apresentados na literatura foram obtidos em ensaios nos quais o nível de tensão média é nulo (GARCIA *et al.*, 2012), contudo, a presença da componente média de tensão pode reduzir consideravelmente a vida em fadiga de um elemento, conforme mostra a Figura (2.10).

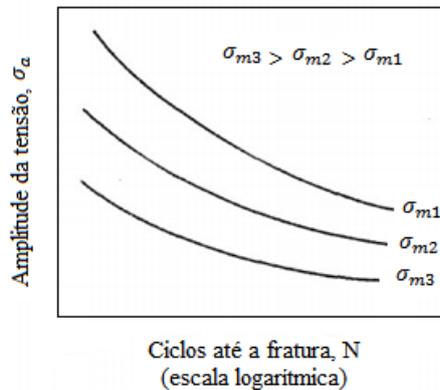


Figura 2.10 – Influência da tensão média na vida em fadiga (CALLISTER, 2011).

Para considerar este efeito, vários critérios de falha foram desenvolvidos com a finalidade de aplicar os dados de resistência do material aos casos em que há a presença da tensão média em conjunto com a tensão alternada. A seguir, são apresentados os principais critérios desenvolvidos que se encarregam da tarefa de delimitar uma região segura na qual a combinação de tensões σ_a e σ_m não comprometa a integridade do material em relação à fadiga, a Figura (2.11) ilustra cada critério descrito a seguir:

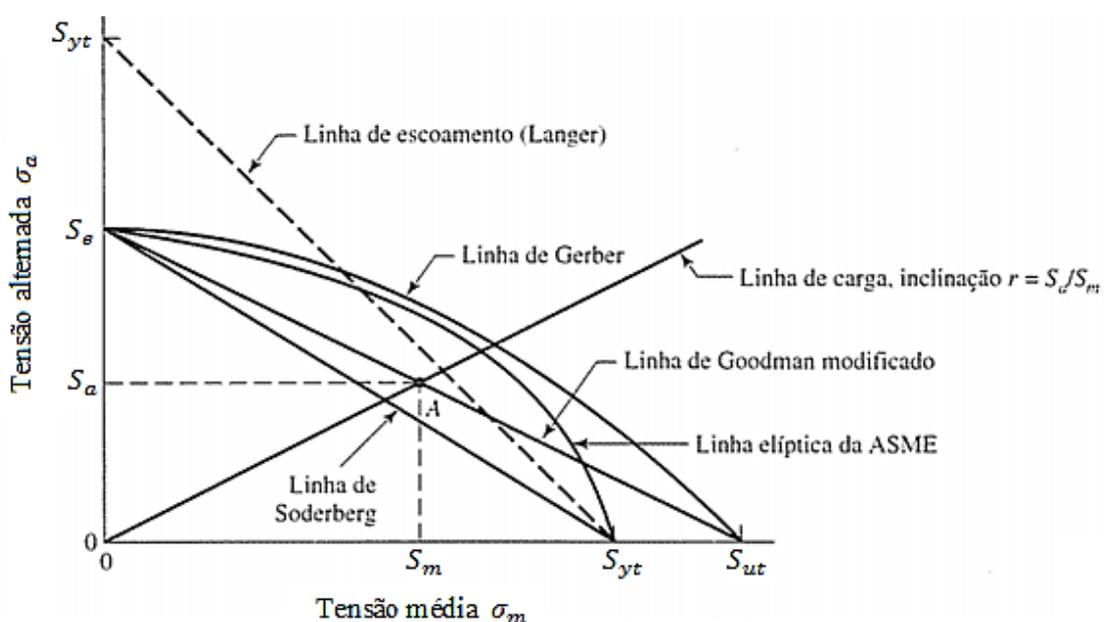


Figura 2.11 – Diagrama mostrando os principais critérios de falha de fadiga (SHIGLEY *et al.*, 2005).

- **Critério de Soderberg**

Utiliza uma reta para delimitar a região em que a combinação de tensões σ_a e σ_m aplicada no ponto mais solicitado do material não resultará em falha, a região abaixo da reta representa a região de segurança contra falha. A equação que define esta “fronteira” é dada por:

$$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_y} = 1 \quad (2.10)$$

Onde, S_y é a resistência ao escoamento do material, S_a e S_m são representadas graficamente pela coordenada de um ponto sobre a linha do critério de falha. Substituindo S_a por $n_s \sigma_a$ e S_m por $n_s \sigma_m$, encontra-se a equação de projeto segundo o critério utilizado em que n_s é o fator de segurança empregado.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{1}{n_s} \quad (2.11)$$

- **Critério de Goodman modificado**

Utiliza uma linha menos conservadora que Soderberg para delimitar a região de segurança contra falha por fadiga.

$$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_{ut}} = 1 \quad (2.12)$$

Equação de projeto:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n_s} \quad (2.13)$$

- **Critério de Gerber**

Delimita a região por meio de uma parábola descrita pela seguinte equação:

$$\frac{S_a}{S_e} + \left(\frac{S_m}{S_{ut}}\right)^2 = 1 \quad (2.14)$$

Equação de projeto:

$$\frac{n_s \sigma_a}{S_e} + \left(\frac{n_s \sigma_m}{S_{ut}}\right)^2 = 1 \quad (2.15)$$

- **Critério ASME – elíptico**

Uma elipse é utilizada com a finalidade de separar a região segura da região de falha.

$$\left(\frac{S_a}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{S_m}{S_y}\right)^2 = 1 \quad (2.16)$$

Equação de projeto:

$$\left(\frac{n_s \sigma_a}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{n_s \sigma_m}{S_y}\right)^2 = 1 \quad (2.17)$$

- **Linha de Langer**

Não é um critério de falha contra fadiga, mas é importante colocá-lo no diagrama ($\sigma_a \times \sigma_m$) para considerar o escoamento de primeiro ciclo como causa de falha, ao invés da fadiga. A equação da linha de Langer e a equação de projeto são dadas a seguir:

$$S_a + S_m = S_y \quad (2.18)$$

$$\sigma_a + \sigma_m = \frac{S_y}{n_s} \quad (2.19)$$

O critério de Soderberg tende a ser muito conservador e por isso é pouco empregado, Goodman também tem um grande nível de conservadorismo, no entanto, costuma ser utilizado em projetos que necessitam desse tipo de abordagem. ASME elíptico é mais conservador que Gerber, mas ambos são boas práticas no sentido de aliar conservadorismo com segurança.

Como observação final, vale ressaltar que σ_a e σ_m empregadas nas fórmulas são as tensões máximas que ocorrem no corpo estudado, portanto, se houver algum concentrador de tensão no ponto crítico da peça, essas tensões devem corrigidas apropriadamente levando em consideração a sensibilidade ao entalhe no cálculo do fator de concentração de tensão em fadiga e o limite de resistência à fadiga indicada nas fórmulas (S_e) é o do componente real, ou seja, devem ser aplicados os fatores de Marin para corrigir o limite encontrado em corpos-de-prova padronizados.

2.4.4 Consideração de combinações de carregamentos

As equações mostradas para cada critério de falha podem ser aplicadas aos casos em que existem combinações de carregamentos (flexão, tração/compressão ou torção) induzindo tensões normais e cisalhantes oriundas de várias fontes, este processo é feito pelo cálculo da tensão equivalente de Von Mises para as componentes de tensão alternada (σ'_a) e média (σ'_m), conforme mostram as Equações (2.20) e (2.21), e pela aplicação destes valores nas equações do critério de falha escolhido para análise.

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_a^2 + 3 \tau_a^2} \quad (2.20)$$

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_m^2 + 3 \tau_m^2} \quad (2.21)$$

2.5 TEORIA DO DANO ACUMULATIVO (REGRA DE PALMGREN-MINER)

Conforme foi discutido em seções anteriores, cada ciclo de tensão provoca a formação de danos permanentes e irreversíveis no material, ou seja, provoca a nucleação e propagação de trincas. Em 1924, Palmgren propôs que os danos causados pela fadiga se acumulam linearmente até atingir um ponto em que ocorre a falha do componente, posteriormente em 1945, Miner traduziu e aplicou esta teoria do dano acumulativo formulando a seguinte expressão matemática conhecida como Regra de Palmgren-Miner:

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (2.22)$$

Em que D é o dano acumulado, n_i é o número de ciclos correspondente a certo nível de tensão σ_i ao qual o componente foi submetido e N_i é o número de ciclos em que provocaria a falha no nível de tensão σ_i aplicado, valor que pode ser encontrado pela curva S-N do material utilizado. A Figura (2.12) ilustra o conceito empregado na Regra de Palmgren-Miner:

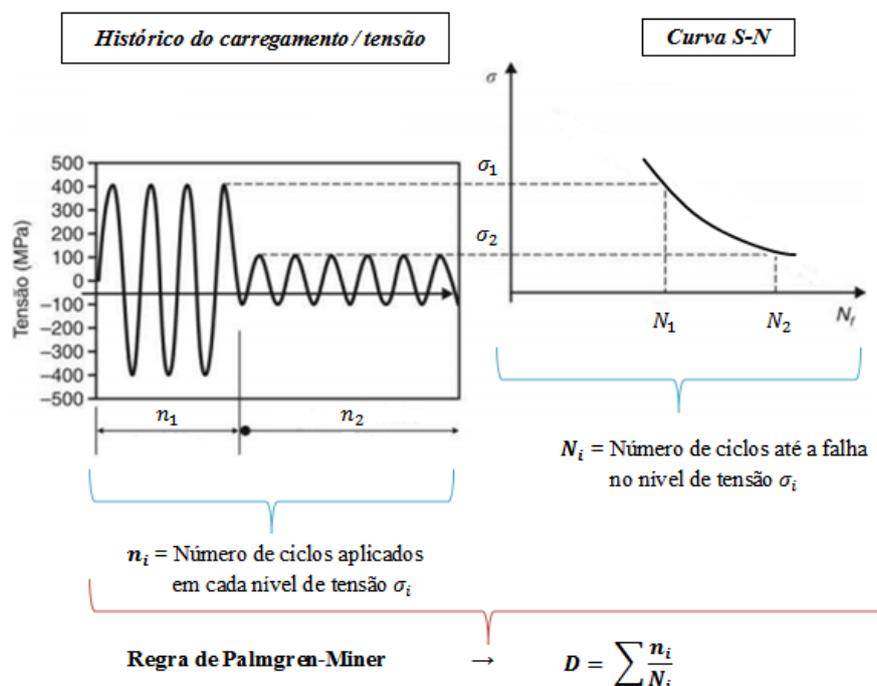


Figura 2.12 – Regra de Palmgren-Miner (teoria do dano acumulativo) (modificado: GARCIA *et al.*, 2012).

De acordo com a Equação (2.22), cada nível de tensão alternada contribui com o dano no material em uma parcela proporcional à razão entre a quantidade de ciclos que efetivamente ocorreram e a quantidade de ciclos que causaria a falha completa no nível de tensão considerado. Um valor de dano acumulado nulo ($D = 0$) significa que o componente está com a sua integridade completa, não foi afetado por nenhum dano de fadiga, porém, um valor de dano acumulado igual à unidade ($D = 1$) indica que o dano alcançou um nível que representa a falha total do componente e, por conseguinte não resta vida remanescente.

Se o dano acumulado D for correspondente ao período de um ano ou for extrapolado para este período, o tempo de vida do material (V) pode ser estimado pela razão entre o dano total até a falha ($D = 1$) e o dano acumulado observado (D):

$$V = \frac{1}{D} \quad (2.23)$$

O tempo de vida (V) informa quantos anos o componente suportará os danos causados pela fadiga assumindo que eles seguirão o “histórico de carregamentos” representado por D (conjunto de níveis de tensão e quantidade de ciclos nos quais foram aplicados). Se o valor da vida for menor que a unidade ($V \leq 1$), o componente já falhou porque o dano acumulado se igualou ou ultrapassou a unidade, por outro lado, se a o valor da vida for maior que um ($V > 1$), ainda há vida remanescente no material (V_R) que pode ser calculada pela Equação (2.24).

$$V_R = V - V_o \quad (2.24)$$

Em que, V_o é o tempo (vida em anos) de operação do componente até o momento das medições.

Resultados experimentais conduzidos para validar a Regra de Palmgren-Miner demonstram que existe certa imprecisão na regra formulada, pois muitas vezes a falha ocorre em valores de dano acumulado diferentes de $D = 1$. As fontes de tal imprecisão estão relacionadas ao fato que a teoria de dano acumulativo é linear e desconsidera importantes fatores como a sequência de aplicação e a interação entre os carregamentos de diferentes intensidades, características que influenciam no processo de aceleração e atraso da propagação da trinca (GARCIA *et al.*, 2012) e ainda deve ser considerada a contribuição causada pela dispersão intrínseca que há nos dados experimentais utilizados para formar a curva S-N do material. Apesar da simplicidade e das imprecisões envolvidas, a teoria de dano acumulativo mostra-se adequada na previsão da vida de um componente mecânico sob o efeito de fadiga quando comparada a outros métodos mais complexos desenvolvidos, no entanto, os resultados devem ser interpretados no âmbito de fornecer apenas uma estimativa do valor correspondente à vida remanescente do componente.

2.6 CONTAGEM DE CICLOS (MÉTODO *RAINFLOW*)

A aplicação da Regra de Palmgren-Miner é vinculada ao registro da informação do número de ciclos em que houve a ocorrência de certo nível de amplitude de tensão, embora pareça simples contar o número de ciclos para os casos em que a amplitude de tensão é constante, como os exemplos da Figura (2.5), tal tarefa não é trivial nos casos em que a amplitude de tensão varia com o tempo (Fig. 2.6). Nestes casos, observa-se que a tensão alternada assume vários “picos e vales” ao longo do tempo, levando a uma condição em que cada ciclo não fica claramente delimitado nem a correspondente amplitude de tensão.

Segundo Dowling (2007), diferentes métodos de contagem de ciclos foram propostos nos últimos anos para identificar o número de ciclos nos casos em que a amplitude de tensão varia de forma aleatória ou irregular, todavia, apenas houve um consenso sobre a melhor abordagem quando o método *Rainflow Counting* foi desenvolvido. Posteriormente, a *American Society for Testing Materials* (ASTM), visando reunir procedimentos aceitáveis para a contagem de ciclos, criou a norma ASTM E 1049-85 na qual são descritos o método *Rainflow* e dois outros métodos similares, o *Range-Pair Counting* e o método *Rainflow* simplificado para histórias repetidas. Devido à grande aceitabilidade conferida ao método *Rainflow* para análises de fadiga, a metodologia será discutida a seguir sob a ótica de duas abordagens equivalentes:

- **Analogia com o fluxo de chuva**

A lógica utilizada pelo método *Rainflow* para contagem de ciclos foi proposta originalmente em 1968 por Tatsuo Endo e M. Matsuishi, podendo ser entendida por meio da analogia entre o desenvolvimento do histórico de tensões e o fluxo de chuva escorrendo sobre um tipo de telhado encontrado em construções tradicionais do Japão.

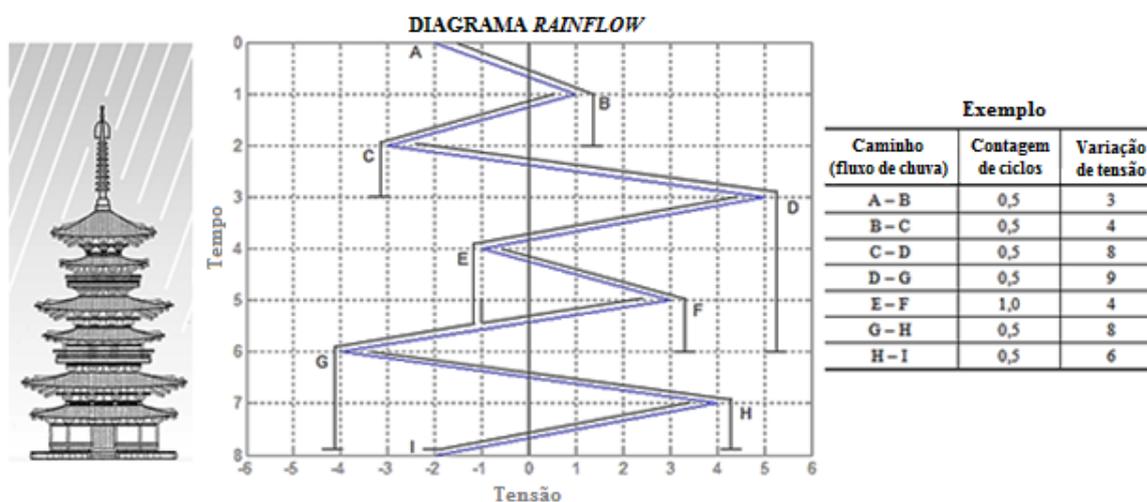


Figura 2.13 – Ilustração mostrando a analogia utilizada no método *Rainflow* de contagem de ciclos.

Segundo esta abordagem do método *Rainflow*, o procedimento para contagem de ciclos se inicia aproximando o desenvolvimento da tensão ao longo do tempo em termos de uma sequência de picos e vales identificados por letras que representam os pontos de reversão do carregamento, posteriormente, o histórico da tensão é disposto de forma que o eixo do tempo fique na vertical apontando para baixo, no sentido em que se desenvolverá o fluxo de chuva. O fluxo de chuva, por sua vez, pode se iniciar em um pico (tensão positiva) ou em um vale (tensão negativa), caracterizando a presença de fluxos de chuva da direita para esquerda ou em sentido oposto, sendo que cada fluxo é contabilizado como sendo metade de um ciclo de tensão. A distinção entre cada fluxo de chuva é feito segundo os seguintes critérios (FIGUEIREDO, 2004):

- a) Se um fluxo se inicia em um vale, o seu término ocorre quando ele passa por um valor menor que o seu ponto de partida;
- b) Se um fluxo se inicia em um pico, o seu término ocorre quando ele passa por um valor maior que o seu ponto de partida;
- c) Os fluxos também podem terminar se encontrarem o fluxo originado de outro telhado ou se alcançarem o final do histórico de tensões registrado.

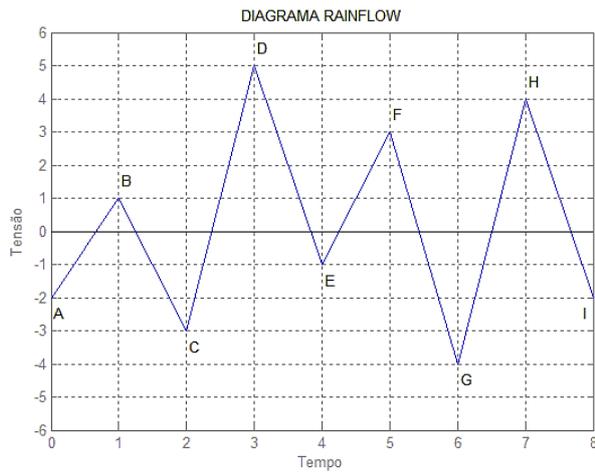
Os passos posteriores são referentes ao agrupamento da quantidade de ciclos contada em cada nível de amplitude de tensão observado no histórico de carregamento (verificação do início e fim de cada fluxo de chuva).

- **Algoritmo *Rainflow* para contagem de ciclos**

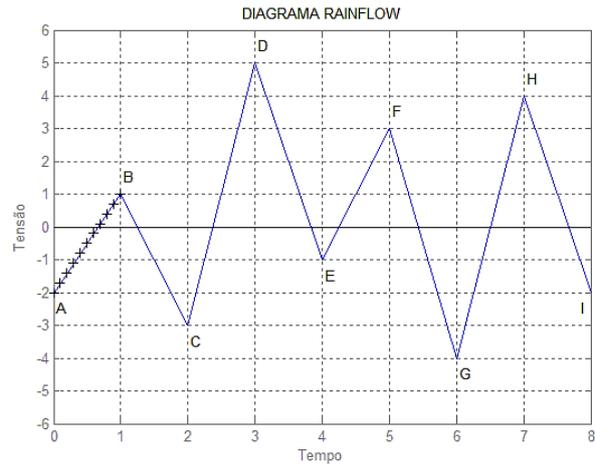
Para facilitar a implementação computacional, a lógica utilizada pelo método *Rainflow* pode ser traduzida em um algoritmo que é descrito pela norma ASTM E 1049-85. Essencialmente, este algoritmo compara as sucessivas variações de tensão, as quais são definidas pela diferença algébrica da tensão entre dois pontos consecutivos de reversão do carregamento (diferença entre um pico e um vale ou entre um vale e um pico), sendo que se define como X o intervalo de variação da tensão em consideração na análise e como Y o intervalo anterior e adjacente ao X. O algoritmo adaptado da norma é apresentado em detalhes a seguir:

- 1) Defina as variações X e Y consideradas na análise (começando pelo início do histórico de tensões na primeira iteração);
- 2) Compare os valores absolutos de X e Y:
 - a) Se $X < Y$: Considere o próximo pico ou vale e retorne ao primeiro passo alterando os intervalos X e Y em consideração;
 - b) Se $X \geq Y$: Contabilize o número de ciclos de acordo com as instruções do passo seguinte;
- 3) Contabilize o número de ciclos:
 - a) Se foi necessário realizar 1 iteração no passo 2: Conte o intervalo Y como correspondente à metade de um ciclo e descarte do histórico o primeiro ponto (pico ou vale) do intervalo Y. Em seguida, retorne ao passo 1;
 - b) Se foi necessário realizar mais de uma iteração no passo 2: Conte o intervalo Y como correspondente à um ciclo completo e descarte os dois pontos de reversão do carregamento que formam o intervalo Y. Em seguida, retorne ao passo 1;
- 4) Ao chegar no final do histórico de tensão, contabilize os intervalos restantes ainda não considerados como sendo metade de um ciclo.

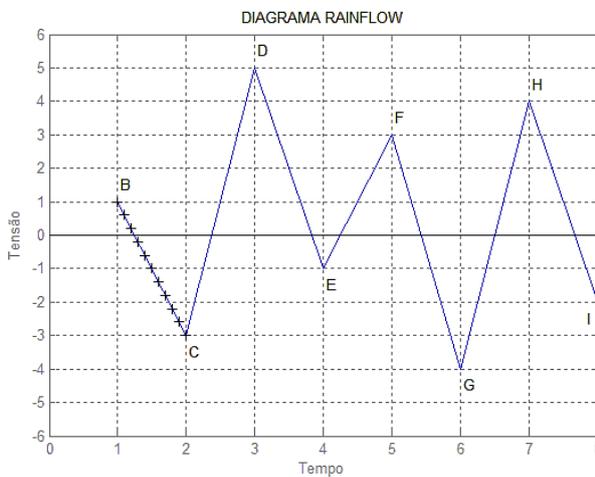
O exemplo mostrado a seguir, com o auxílio da Figura (2.14), esclarece de forma prática o procedimento empregado na contagem de ciclos pelo método *Rainflow*:



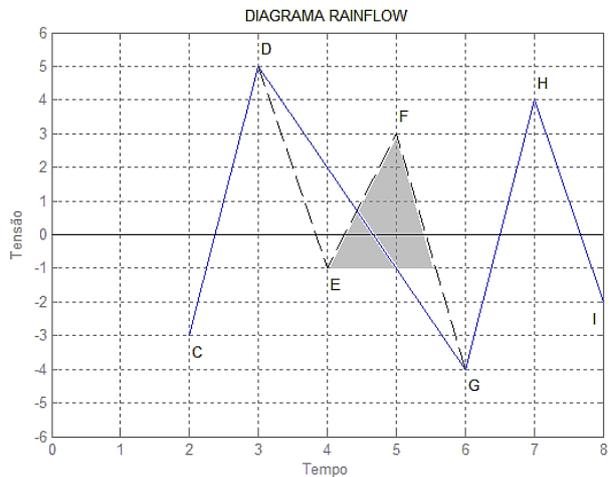
a)



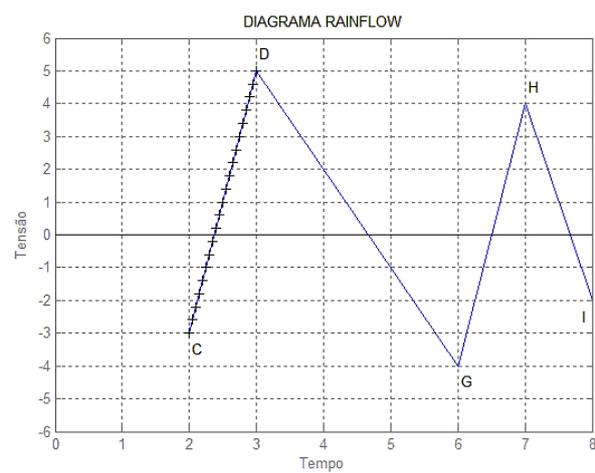
b)



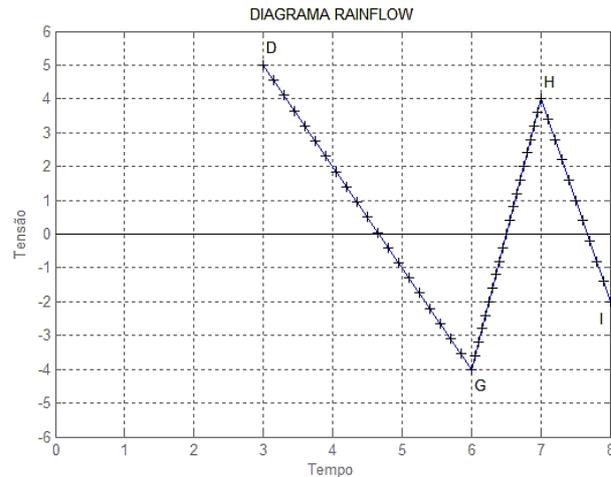
c)



d)



e)



f)

Figura 2.14 – Exemplo de aplicação do algoritmo de contagem *Rainflow*.

Descrição do exemplo:

- 1) Comece definindo $Y = |A-B|$ e $X = |B-C|$. $X > Y$, então conte Y como correspondente a meio ciclo. Posteriormente, descarte o ponto A do histórico e prossiga a análise (Fig. 2.14 b);
- 2) $Y = |B-C|$ e $X = |C-D|$. $X > Y$, então Y corresponde a meio ciclo. Posteriormente, descarte o ponto B e prossiga a análise (Fig. 2.14 c);
- 3) $Y = |C-D|$ e $X = |D-E|$. $X < Y$, então nenhum ciclo é contado e a análise deve seguir considerando o próximo ponto de reversão do carregamento (Fig. 2.14 d);
- 4) $Y = |D-E|$ e $X = |E-F|$. $X < Y$, então nenhum ciclo é contado (Fig. 2.14 d);
- 5) $Y = |E-F|$ e $X = |F-G|$. $X > Y$ e foi necessário realizar mais de uma comparação, então um ciclo completo deve ser contabilizado e os pontos E e F devem ser descartados do histórico (Fig. 2.14 d);
- 6) $Y = |C-D|$ e $X = |D-G|$. $X > Y$, então é contado meio ciclo e o ponto C deve ser descartado (Fig. 2.14 e);
- 7) $Y = |D-G|$ e $X = |G-H|$. $X < Y$, então nenhum ciclo é contado (Fig. 2.14 f);
- 8) $Y = |G-H|$ e $X = |H-I|$. $X < Y$ e fim do histórico de tensão, então cada um dos intervalos que sobraram devem ser contados como meio ciclo (Fig. 2.14 f).

O resultado final da contagem de ciclos encontra-se sumarizado na Tabela (2.1), este resultado é equivalente ao mostrado no exemplo da Figura (2.13) que trata do problema sob a perspectiva da analogia com o fluxo de chuva.

Tabela 2.1 – Resultado do exemplo utilizado para demonstrar o método de contagem *Rainflow*.

Eventos	Contagem de ciclos	Variação de tensão
A - B	0,5	3
B - C	0,5	4
E - F	1	4
C - D	0,5	8
D - G	0,5	9
G - H	0,5	8
H - I	0,5	6

3 FADIGA EM CABOS CONDUTORES

3.1 VIBRAÇÕES EM CABOS CONDUTORES AÉREOS DE ENERGIA ELÉTRICA

O problema de fadiga dentro do contexto de cabos condutores foi introduzido no primeiro capítulo deste trabalho, onde foi apresentado que o mecanismo de falha é ocasionado pelo desenvolvimento de elevadas tensões originadas do movimento de vibração (flexão) do cabo, que por sua vez, é provocado pela ação dos ventos sobre os condutores nas linhas de transmissão aérea. Portanto, torna-se fundamental a compreensão dos tipos de vibrações induzidos pelos ventos em cabos condutores, do fenômeno físico por trás da excitação eólica do cabo e dos fatores que influenciam nas vibrações para evitar a ocorrência de níveis severos de vibração que provocam as falhas por fadiga, isto pode ser feito por meio da concepção adequada das linhas de transmissão desde a fase de projeto ou por meio de ações atenuadoras dos altos níveis de vibração, como a instalação de amortecedores (*dampers*) ou espaçadores (*spacer-dampers*).

3.1.1 Tipos de vibrações em cabos condutores

Basicamente, a ação dos ventos em cabos condutores induz três principais tipos de vibrações:

- **Vibração eólica:**

Causada por ventos de baixa velocidade que induzem vibrações de alta frequência e pequena amplitude de forma que o deslocamento do cabo é quase imperceptível, pois raramente a amplitude de vibração pico-a-pico ultrapassa o valor correspondente ao diâmetro do próprio condutor. Embora pareça que esta vibração de pequena amplitude seja “inofensiva”, ela é a maior responsável pela fadiga nos cabos condutores, pois os ventos facilmente alcançam velocidades capazes de induzir este tipo de vibração (velocidades de 1 a 7 m/s) e a alta frequência associada (3 a 150 Hz) submete o condutor a vários ciclos de vibração que consomem rapidamente a sua vida útil.

Ao observar a Figura (3.1), nota-se que o Brasil é um país extremamente propenso a desenvolver o tipo de vibração eólica nos cabos condutores, pois no Brasil predominam ventos com velocidade média de até 7,5 m/s, faixa que corresponde justamente à ocorrência da vibração eólica. Portanto, o fenômeno de fadiga em cabos condutores não pode ser ignorado para a consolidação de uma rede de transmissão confiável no país.

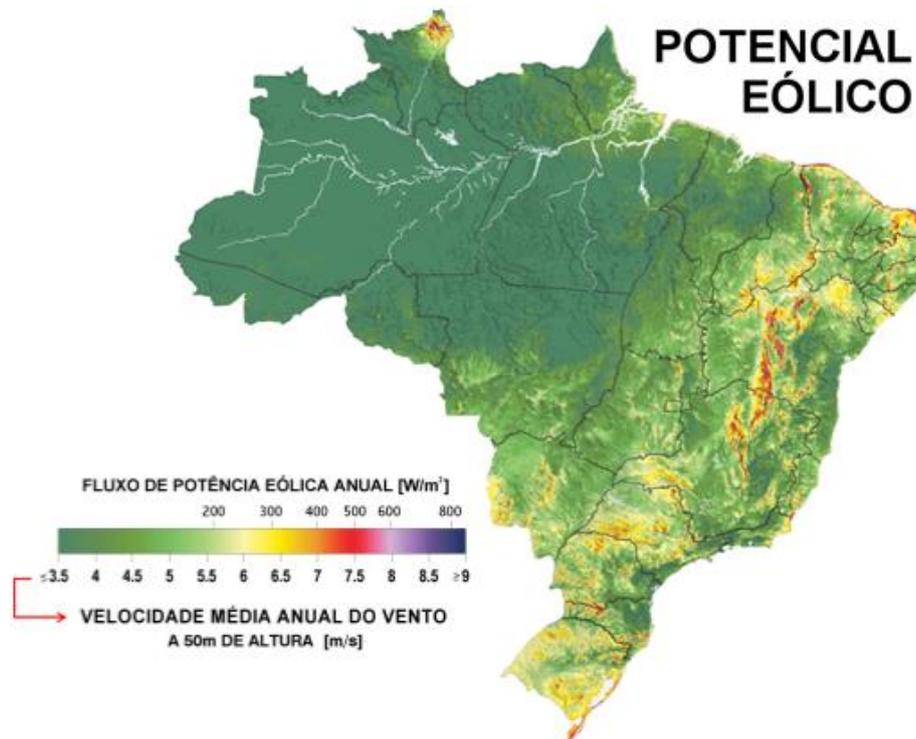


Figura 3.1 – Velocidade média anual dos ventos brasileiros (modificado: CEPEL, 2001).

- **Galope:**

Ocorre quando ventos moderados a fortes incidem transversalmente sobre cabos condutores com a superfície coberta por uma camada assimétrica de gelo, esta configuração faz com que haja grandes variações na força de sustentação resultando em vibrações verticais de alta amplitude e baixa frequência. O galope é o tipo de vibração capaz de gerar mais prejuízos em curto período de tempo e os danos não ficam limitados aos condutores, se estendem aos diversos componentes da torre de transmissão, como por exemplo, pontos de ancoragem, grampos de suspensão, isoladores e a própria fundação da torre. Os danos ocorrem devido aos grandes esforços dinâmicos envolvidos e não pelo mecanismo de fadiga, contudo, as ocorrências de galope são raras e quase inexistentes em países como o Brasil em que não há relatos comuns sobre a formação de gelo nas linhas de transmissão.

- **Oscilação de esteira induzida:**

Tipo de vibração que afeta cabos condutores agrupados por espaçadores em forma de feixes. Quando o vento incide transversalmente com velocidades moderadas a fortes sobre o feixe de cabos condutores, o cabo à montante perturba o escoamento do vento induzindo esteiras que atuam no cabo à jusante, este passa a oscilar de forma complexa dependendo da ação do vento e acaba transmitindo esforços ao cabo anterior por meio dos elementos que agrupam os condutores em feixe. As oscilações de esteira induzida podem ocorrer em diversas formas, pois dependem da magnitude e da fase das forças atuando sobre o feixe de cabos (EPRI, 2006), a Figura (3.2) ilustra duas formas de oscilação de esteira induzida, a oscilação de sub-vão e um tipo de oscilação que atua girando o feixe de cabos.

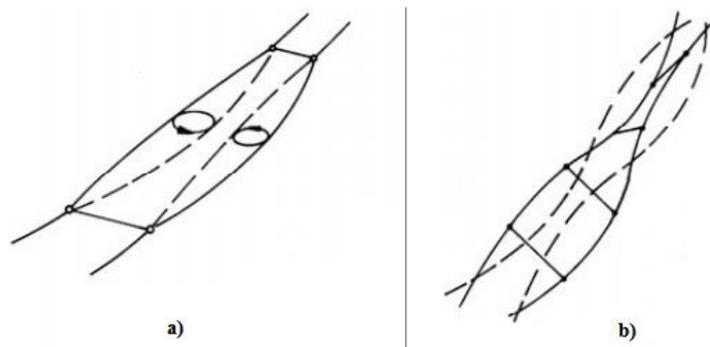


Figura 3.2 – Dois tipos de oscilação de esteira induzida: a) Oscilação sub-vão; b) Oscilação de giro do feixe como corpo único (EPRI, 2006).

A figura abaixo ilustra de forma didática os três principais tipos de vibração que ocorrem em cabos condutores e a Tabela (3.1) transcrita da referência *EPRI Transmission Line Reference Book: Wind-Induced Conductor Motion (2006)* resume mais detalhadamente as características gerais de cada tipo de vibração.

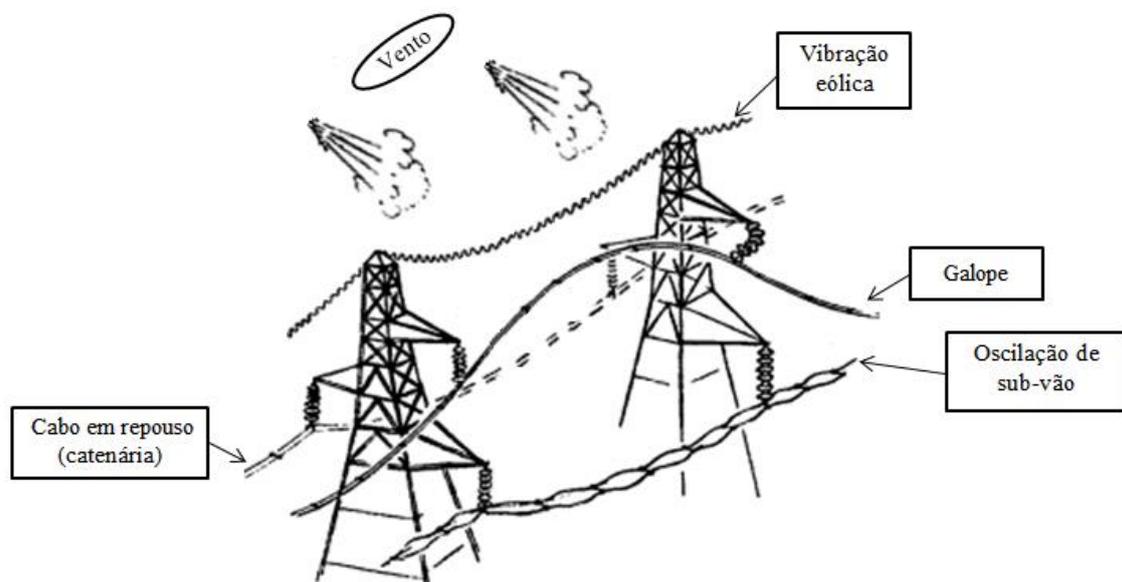


Figura 3.3 – Principais tipos de vibração que ocorrem em linhas de transmissão de energia elétrica (modificado: EPRI, 2006).

Tabela 3.1 – Comparação entre os tipos de vibrações em cabos condutores de energia elétrica
(modificado: EPRI, 2006).

Características da vibração	Vibração eólica	Galope	Oscilação de esteira induzida
Tipos de linhas de transmissão afetadas	Todos	Todos	Limitado às linhas com condutores agrupados em feixe
Faixa de frequência (Hz)	3 – 150	0,08 - 3	0,15 - 10
Faixa de amplitude (pico-a-pico) de vibração (valor expresso em relação ao número de diâmetros do condutor)	0,01 - 1	5 - 300	Oscilação de corpo: 0,5-80 Oscilação sub-vão: 0,5 - 20
Condições favoráveis	Vibração eólica	Galope	Oscilação de esteira induzida
Característica do vento	Estável	Estável	Estável
Velocidade do vento (m/s)	1 - 7	7 - 18	4 - 18
Condição de superfície do condutor	Livre ou coberta com camada uniforme de gelo	Coberta por camada assimétrica de gelo	Livre e seca
Condições de projeto da linha que afetam o movimento do condutor	Tração do cabo, auto amortecimento do cabo, uso de <i>dampers</i> e armadura (<i>armor rods</i>)	Razão entre as frequências naturais vertical e de torção, ângulo de mergulho e condições de suporte	Separação dos subcondutores, inclinação do feixe, arranjo dos subcondutores no feixe e distância entre os espaçadores
Danos causados	Vibração eólica	Galope	Oscilação de esteira induzida
Tempo para dano severo se desenvolver	3 meses a 20 anos ou mais	1 a 48 horas	1 mês a 8 anos ou mais
Causas diretas do dano	Fadiga do metal devido à tensão normal cíclica de flexão	Elevados carregamentos dinâmicos	Impacto dos cabos ou alto nível de desgaste nos pontos de fixação
Componentes da linha mais afetados pelos danos	Cabos condutores e cabos para-raios	Condutores, todos os elementos de fixação, isoladores e estrutura da torre de transmissão	Elementos de suspensão, espaçadores, <i>dampers</i> e os cabos

3.1.2 Mecanismo de excitação da vibração eólica

A vibração eólica, principal causadora do dano por fadiga, ocorre em virtude do aparecimento de uma esteira de vórtices na parte posterior do cabo condutor. Os vórtices são gerados de forma alternada resultando em uma distribuição de pressão que provoca a oscilação vertical do cabo com a passagem transversal do vento, conforme ilustra a figura abaixo:

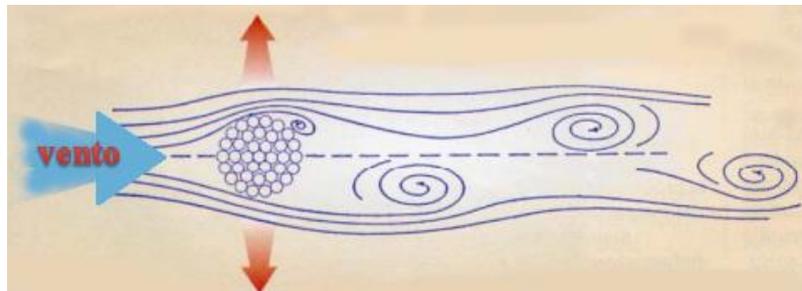


Figura 3.4 – Fenômeno físico envolvido no aparecimento da vibração eólica (modificado: COSMAI, 2009).

O surgimento da esteira de vórtices está relacionado às características do escoamento desenvolvido pelo fluido cujo regime (comportamento) pode ser descrito pelo número adimensional de Reynolds, o qual estabelece uma relação entre as forças inerciais e as forças viscosas no escoamento do fluido.

$$Re = \frac{U D_c}{\nu} = \frac{\text{forças inerciais}}{\text{forças viscosas}} \quad (3.1)$$

Onde:

Re = Número de Reynolds;

U = Velocidade do escoamento não perturbado (m/s);

ν = Viscosidade cinemática do fluido = $1,51 \cdot 10^{-5}$ m²/s para o ar à 20°C;

D_c = Comprimento característico do corpo, no caso de cabos e cilindros equivale ao diâmetro (m).

A Figura (3.5) mostra o desenvolvimento da esteira de vórtices em função do número de Reynolds para o caso de um cilindro liso:

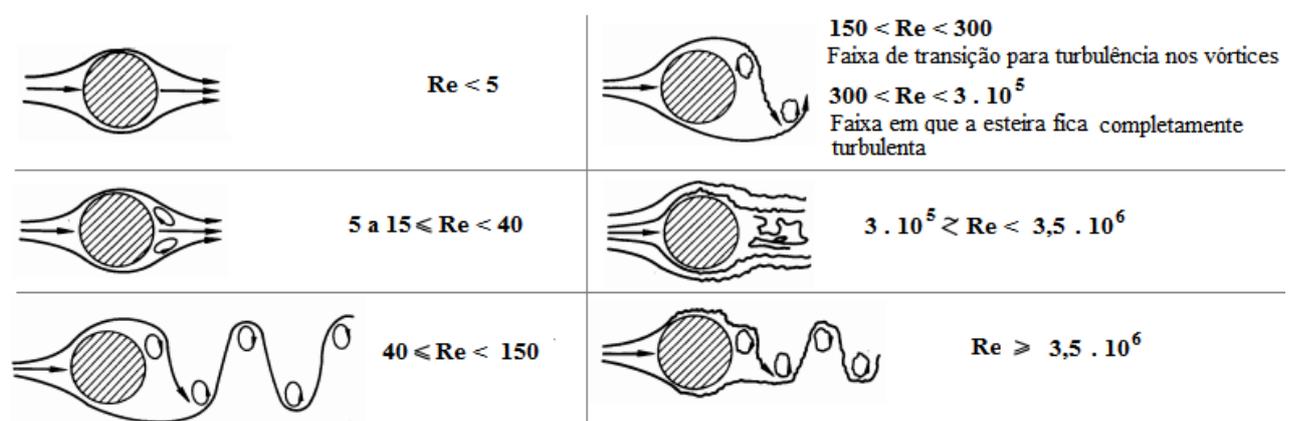


Figura 3.5 – Regimes de escoamento sobre cilindros lisos (modificado: LIENHARD, 1966).

Outro número adimensional importante para caracterização do fenômeno físico da vibração eólica é o número de Strouhal. Conforme mostra a Equação (3.2), o número de Strouhal (St) relaciona os seguintes parâmetros: Frequência de desprendimento dos vórtices da esteira (f_{St}), velocidade do escoamento e o diâmetro do cilindro ou cabo.

$$St = \frac{f_{St} D_c}{U} \quad (3.2)$$

Ao traçar um gráfico do número de Strouhal em função do número de Reynolds, pode ser observado que existe uma relação entre esses dois números que é representada na figura a seguir:

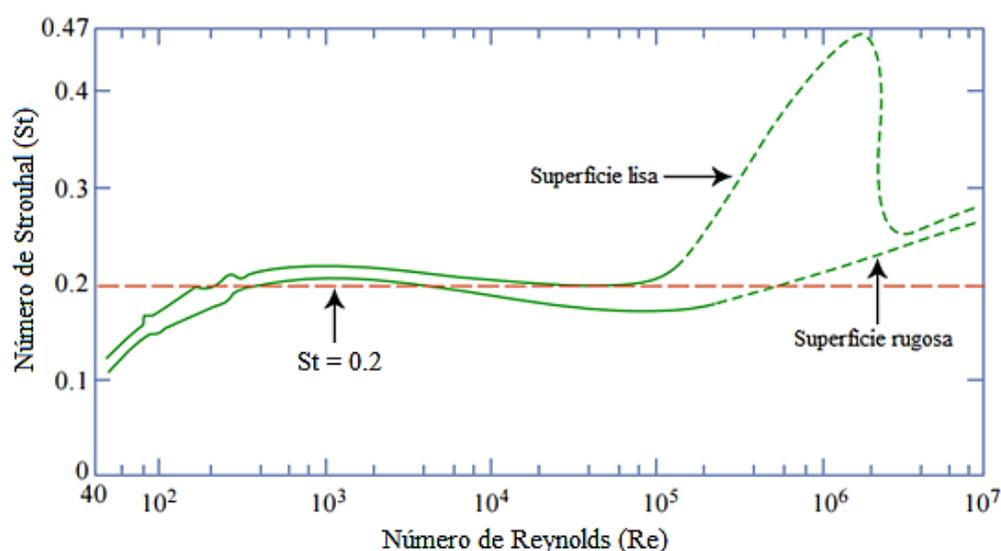


Figura 3.6 – Relação entre os números de Strouhal e de Reynolds para cilindros circulares (modificado: plotado por MIT OCW a partir dos dados de Lienhard (1966), Achenbach e Heinecke (1981) e Roshko (1955)).

A relação refere-se ao número de Strouhal que fica praticamente constante em um intervalo de valores de número de Reynolds. Segundo a Equação (3.1), pode ser verificado que a faixa de números de Reynolds compreendida entre $1 \cdot 10^3$ e $3 \cdot 10^4$ corresponde à ocorrência da vibração eólica para uma grande gama de cabos condutores com diâmetros usuais de 15 a 55 mm sobre a ação de ventos com velocidades de 1 a 7m/s (velocidades indutoras da vibração eólica), considerando nos cálculos a viscosidade cinemática do ar à 20°C que é $1,51 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Neste regime de escoamento, é razoável aproximar o número de Strouhal a uma constante cujo valor equivale à 0,185, esta aproximação possibilita reescrever a Equação (3.2) em uma expressão (Eq. 3.3) que descreve a frequência de desprendimento de vórtices para o caso do escoamento de ar sobre cabos condutores (frequência de excitação eólica):

$$f_{St} = 0,185 \frac{U}{D_c}{}^1 \quad (3.3)$$

¹ Usa-se o diâmetro em metros na equação com esta notação.

As Equações (3.2) e (3.3) são válidas para os casos de cilindros ou cabos estacionários. Quando a velocidade do vento causa o desprendimento de vórtices em uma frequência f_{St} próxima a uma das frequências naturais do cabo (Eq. 3.4), este passa a vibrar pela ação das forças alternadas associadas à distribuição de pressão causada pelos vórtices. Após o cabo estar vibrando, a frequência de desprendimento dos vórtices passa a ser controlada pelo próprio movimento de vibração do condutor em um mecanismo conhecido como *lock-in* ou sincronização, de forma que mesmo que a velocidade do vento oscile e induza uma frequência diferente (mas próxima) da frequência natural, o cabo tende a se manter vibrando pelo desprendimento de vórtices controlado pela própria vibração do condutor, mecanismo auto excitado.

$$f_n = \frac{n_m}{2 L_v} \sqrt{\frac{H}{w}} \quad (3.4)$$

Onde:

f_n = Frequências naturais do cabo (Hz)

n_m = Modos de vibração (1, 2,3 ...)

L_v = Comprimento do vão em que o cabo está fixado (m)

H = Carga de tração do cabo (N)

w = Massa por unidade de comprimento do cabo (kg/m)

Outra característica observada na vibração eólica do cabo é que ela ocorre no formato de batimento, conforme mostra a Figura (3.7). O batimento é um padrão assumido pela variação da amplitude de vibração (*beats*) devido à adição de ondas com frequências aproximadamente iguais. A vibração em forma de batimento acontece nos cabos condutores, pois o fenômeno de *lock-in* pode induzir simultaneamente frequências de excitação muito próximas uma da outra que se interferem sucessivamente em padrões construtivos ou destrutivos (EPRI, 2006).

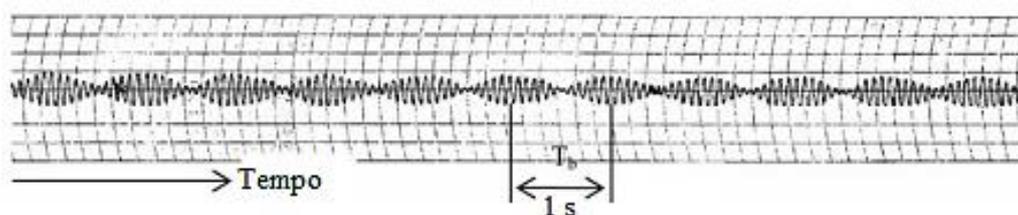


Figura 3.7 – Amplitude de vibração do condutor em função do tempo. Registro feito em vão de 275 metros com um condutor do tipo *Drake* (modificado: EPRI,2006).

3.1.3 Fatores que influenciam na vibração de cabos condutores

Os principais fatores que influenciam na vibração eólica dos cabos são:

- 1) Características do vento;
- 2) Carga de tração nos condutores;
- 3) Características do tipo de condutor usado na linha de transmissão;
- 4) Comprimento do vão entre duas torres de transmissão.

Como pode ser visto pela Equação (3.3), a frequência de despreendimento dos vórtices é proporcional à velocidade transversal do vento, portanto existe uma relação direta entre essas duas grandezas, no entanto, ventos estáveis de baixa a moderada velocidade influenciam mais na vibração eólica do cabo, pois ventos de alta velocidade provocam maior turbulência que atua reduzindo a periodicidade da formação de vórtices (HENRIQUES, 2006), conforme pode ser verificado pela Figura (3.5). Uma consequência disto é que em terrenos planos com pouca ondulação ou em travessias de rios há maior possibilidade de ocorrência de vibração eólica severa do que em terrenos irregulares ou de densa vegetação, condições que induzem maior turbulência.

Quanto maior é a tração nos cabos, menor é o efeito de autoamortecimento dos condutores aumentando assim a severidade da vibração. O autoamortecimento está relacionado à dissipação de energia pela movimentação relativa entre os fios do cabo, o aumento na tração reduz este grau de movimentação e conseqüentemente o autoamortecimento. A utilização de trações reduzidas contribui para o efeito de autoamortecimento, entretanto, menores trações implicam na utilização de torres mais altas ou em maior número (HENRIQUES, 2006).

Os efeitos do tipo de condutor e do comprimento do vão podem ser verificados pela Equação (3.4), ambos são inversamente proporcionais à frequência de natural, portanto um vão muito longo ou o uso de um condutor de maior diâmetro e conseqüentemente maior massa linear resultam em frequências de ressonância menores, nas quais ocorrem maiores amplitudes de vibração e maiores danos por fadiga nos fios do condutor.

Porém, o que se observa na realidade é uma relação delicada entre os quatro fatores mencionados e as características do condutor, como o autoamortecimento e a rigidez à flexão. Somente após estudos aprofundados, pode ser analisado o grau de influência e de relação entre cada um desses fatores na contribuição para os níveis de vibração e para os efeitos de fadiga, tais estudos são fundamentais para orientar a definição de características de projeto com o intuito de reduzir a severidade dos danos causados pela fadiga e os custos na construção das linhas de transmissão.

3.2 ANÁLISE DA FALHA DE FADIGA POR *FRETTING* EM CABOS

As rupturas por fadiga dos fios dos cabos condutores ocorrem próximas aos pontos de restrição da movimentação do cabo, principalmente nos locais de suspensão (Fig. 3.8). Nestes locais, são desenvolvidas maiores tensões de flexão nos fios, pois há uma maior mudança na curvatura do cabo e há maior ocorrência de *fretting* devido ao contato mais intenso entre as superfícies que ocorre em virtude da restrição imposta ao movimento.

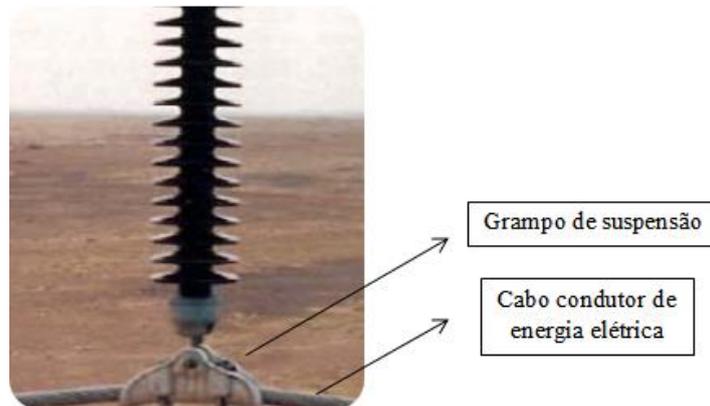


Figura 3.8 – Detalhe da montagem cabo/grampo de suspensão em uma linha de transmissão (modificado: CLOUTIER & LEBLOND, 2007).

Existem diversas superfícies em contato no caso da montagem cabo/grampo que estão associadas à ocorrência de *fretting*, para descrevê-las será dada uma pequena explicação a seguir sobre a forma como os cabos condutores são estruturados e posteriormente fixados aos grampos de suspensão:

- **Cabos condutores de energia elétrica**

Os cabos são constituídos por camadas de fios torcidos de forma helicoidal e em direções opostas em relação a um fio central que em conjunto com outros fios centrais compõem a alma do condutor, conforme ilustra a Figura (3.9):



Figura 3.9 – Exemplo demonstrativo da construção de um cabo condutor.

Cabos condutores de energia elétrica são formados principalmente por fios de alumínio ou ligas de alumínio com a possibilidade de conter fios de aço para agregar maior resistência. A Tabela (3.2) mostra os principais tipos de construções de cabos condutores com a nomenclatura empregada:

Tabela 3.2 – Principais tipos de construções de cabos condutores (FADEL, 2010).

Nomenclatura	Descrição
CA (AAC)	Cabos de Alumínio (<i>All Aluminium Conductor</i>)
CAA (ACSR)	Cabos de Alumínio com alma de Aço (<i>Aluminium Conductor Steel Reinforced</i>)
CAL (AAAC)	Cabos de Alumínio Liga (<i>All Aluminium Alloy Conductor</i>)
ACAR	Cabos de Alumínio com Alma de Liga de Alumínio (<i>Aluminium Conductor Alloy Reinforced</i>)
TW	Fios Trapezoidais (<i>Trapezoidal Wires</i>)

- **Grampos de suspensão**

Possuem a função de sustentar os cabos nas torres de transmissão de forma segura ao minimizar a possibilidade da ocorrência de danos causados por diversas naturezas. Existem vários tipos de grampos (Fig. 3.10), grampos convencionais são constituídos de material metálico resistente à corrosão e com perfil suave que propicia a curvatura natural do cabo sem danificá-lo, também são articulados para acomodar pequenos movimentos de vibração do cabo condutor.

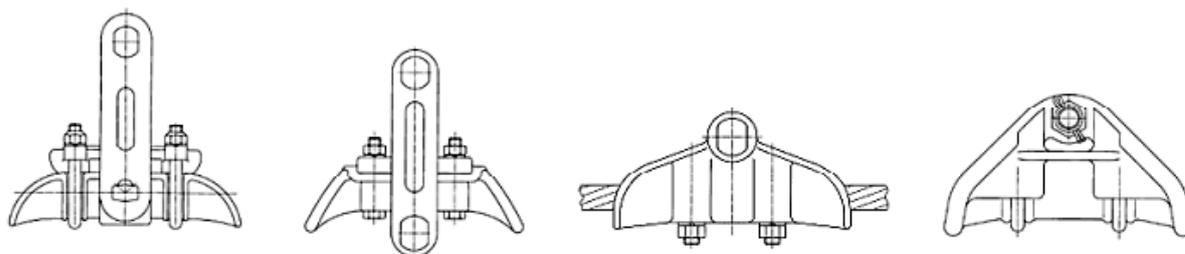


Figura 3.10 – Exemplos de grampos de suspensão convencionais (modificado: EPRI, 2006).

- **Montagem cabo/grampo**

Na montagem cabo/grampo, ocorre contato entre as superfícies de fio com fio, podendo cada fio ser do mesmo ou de diferente tipo de material (alumínio, liga de alumínio ou aço) e ocorre contato entre as superfícies de fio com grampo, podendo ser a parte do topo ou da base do mesmo. Os pontos em contato na montagem cabo/grampo são mostrados mais detalhadamente na Figura (3.11).

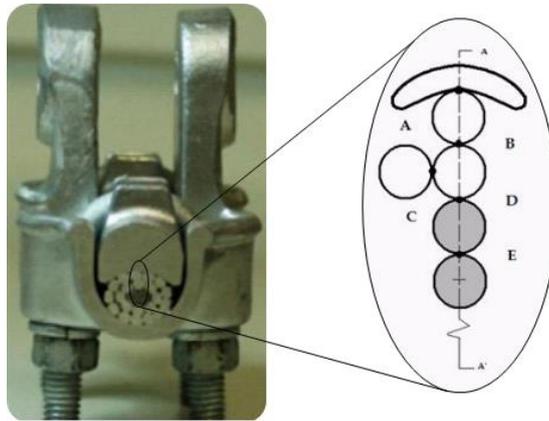


Figura 3.11 – Superfícies em contato na montagem cabo/grampo (modificado: FADEL *et. al*, 2011).

As superfícies em contato do condutor são pressionadas umas contra as outras devido às componentes de força que surgem do entrelaçamento dos fios do cabo quando tracionado e também por causa do aperto do cabo contra o grampo no processo de fixação, adicionalmente, forças de fricção são desenvolvidas quando as superfícies tendem a se movimentar devido à vibração eólica. Este estado é característico de casos em que há a ocorrência de *fretting* que tem início quando as superfícies são mantidas em contato por forças normais compressivas com a adição de forças tangenciais oscilatórias que provocam pequenos movimentos relativos (da ordem de micrômetros) entre as superfícies em contato.

Se as forças tangenciais forem iguais ou maiores que o coeficiente de atrito multiplicado pela força normal, ocorre o regime de escorregamento total e no caso contrário se estabelece o regime de escorregamento parcial. Em ambos os regimes, as superfícies do material são danificadas gerando um concentrador de tensão que favorece a nucleação de trincas, no entanto, no regime de escorregamento total pode-se dizer que “a abrasão compete contra a fadiga”, o desgaste superficial causa remoção de material em uma taxa que reduz progressivamente o tamanho da trinca evitando a sua propagação. O regime de escorregamento parcial, por sua vez, danifica as superfícies em contato em um padrão de marca elíptico (Fig. 1.2 a) em que são observadas duas zonas distintas, a zona de adesão e a zona de escorregamento (Fig. 3.12), nesta última há o favorecimento da nucleação e da propagação de trincas quando o material é submetido às cargas cíclicas, o que causará a falha do cabo no processo conhecido como fadiga por *fretting*.

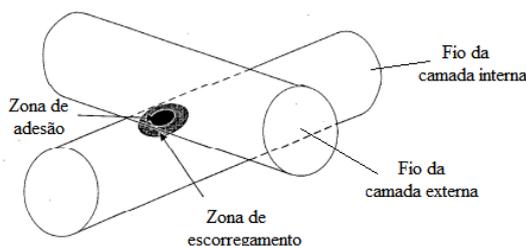


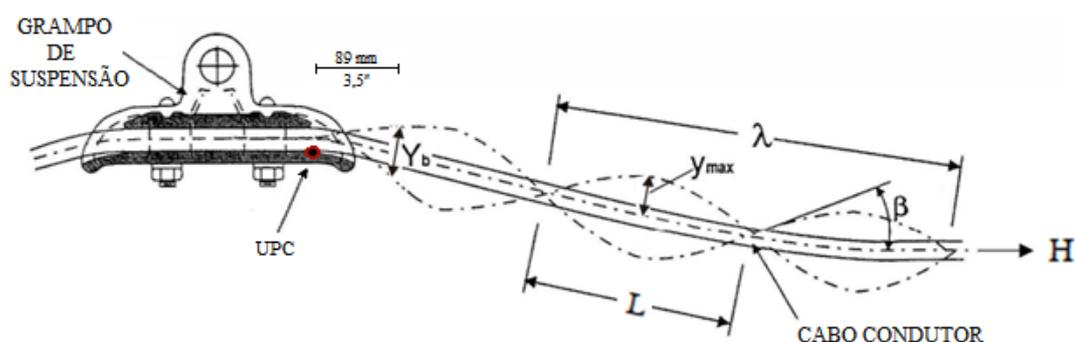
Figura 3.12 – Ilustração de uma marca típicas desenvolvidas devido ao *fretting* (modificado: CLOUTIER & LEBLOND, 2011).

Segundo Azevedo *et al.* (2009), as trincas que causam ruptura dos fios do cabo geralmente se iniciam nas marcas de *fretting* e há formação de um pó escuro de elevada dureza que é gerado pela remoção e oxidação de partículas de alumínio na presença do ar, estas ocorrências evidenciadas (marcas de desgaste e presença de pó de alta dureza) reduzem drasticamente a resistência do material e aceleram a fadiga, revelando a importância da contribuição do *fretting* no processo de falha.

3.3 EQUAÇÃO DE POFFENBERGER-SWART

Em 1961, a necessidade de estudar os efeitos das vibrações eólicas nos cabos condutores resultou na formação de um grupo do IEEE (*Task Force on the Standardization of Conductor Vibration Measurements*) cujo objetivo era padronizar um método para avaliar a severidade das vibrações eólicas em cabos condutores. Os métodos possíveis de serem cogitados relacionam a intensidade de vibração do cabo a parâmetros que podem ser mensurados ou observados, alguns destes parâmetros são indicados mais detalhadamente abaixo:

- Ângulo de vibração do condutor (β):** Corresponde ao ângulo de flexão do cabo;
- Deformação (ou tensão) dinâmica no fio do cabo condutor:** Parâmetro medido por extensômetros (*strain gauges*) localizados nos fios de topo da camada externa do cabo condutor, onde há maior tensão normal devido à flexão.
- Amplitude máxima de vibração (y_{max}):** Corresponde à amplitude de vibração (0-pico) medida no anti-nó de um “loop” de vibração livre;
- Amplitude de flexão (Y_b):** Corresponde à amplitude de vibração (pico-a-pico) medida em relação ao grampo de suspensão em um local situado a uma distância de 89 mm (3,5 polegadas) do Último Ponto de Contato entre o cabo e o grampo (UPC);



Legenda adicional:

- L** = Comprimento de um “loop” de vibração;
λ = Comprimento de onda;
H = Tração aplicada no condutor.

Figura 3.13 – Parâmetros indicadores da intensidade de vibração do cabo (modificado: CLOUTIER & LEBLOND, 2011).

Entretanto, apenas a amplitude de flexão é um parâmetro prático de ser medido em campo durante o período de atividade da linha de transmissão. Este fato conduziu a um estudo direcionado ao método da amplitude de flexão por parte de vários pesquisadores que compuseram o grupo de estudos do IEEE, o objetivo era verificar se a complexidade do movimento de vibração e do fenômeno de fadiga poderia ser adequadamente caracterizada pela simples medição da vibração de um ponto específico do cabo.

Após a realização de vários ensaios experimentais em cabos condutores, os pesquisadores concluíram que existia uma relação consistente entre a amplitude de flexão e a tensão dinâmica de flexão que foi medida pelos laboratórios por meio de extensometria. Em 1965, uma contribuição importante foi feita por J. C. Poffenberger e R. L. Swart que exploraram mais a fundo o tema formulando uma equação analítica que correlaciona a deformação dinâmica na vizinhança do ponto mais solicitado à amplitude de flexão medida nas proximidades do grampo de suspensão.

A relação proposta por Poffenberger-Swart (equação P-S) foi deduzida aplicando a teoria elástica e princípios da mecânica em que foi assumido que o cabo nas proximidades do grampo de suspensão atua de forma análoga a uma viga de Euler ligeiramente encurvada por pequeno deslocamento vertical. A equação foi originalmente desenvolvida para o caso de condutores rigidamente fixados a grampos de suspensão convencionais (contato metal-metal) e sem estarem envoltos por hastes de armadura preformada (*armor rods*). A expressão matemática que correlaciona o movimento de vibração do cabo à tensão dinâmica é dada segundo a equação P-S descrita abaixo:

$$\sigma_a = K Y_b \quad (3.5)$$

Onde, σ_a é a tensão dinâmica de flexão 0-pico no fio de topo da camada externa do cabo (ponto diametralmente oposto ao UPC), Y_b é amplitude de flexão pico-a-pico medida em uma posição x que segundo a padronização do IEEE equivale à distância de 89 mm do UPC e K (N/mm³) é uma constante dada pela Equação (3.6):

$$K = \frac{E d p^2}{4 (e^{-px} - 1 + px)} \quad (3.6)$$

Em que d é o diâmetro do fio de alumínio da camada externa do cabo (mm), E é o seu respectivo módulo de elasticidade (MPa) e p (1/mm) é um parâmetro dado pela seguinte expressão (Eq. 3.7):

$$p = \sqrt{\frac{H}{EI}} \quad (3.7)$$

H é a carga de tração aplicada no cabo (N), esta carga gera uma tensão estática no condutor denominada de *Everyday Stress* (EDS) que é expressa em termos de um percentual da resistência à ruptura do cabo. O produto entre o módulo de elasticidade (E) e o momento de inércia (I) resulta na rigidez à flexão do condutor (N. mm²).

Uma importante consideração feita na equação P-S é que a rigidez à flexão do cabo é calculada como sendo o somatório entre a rigidez individual de cada fio, conforme mostra a seguinte expressão:

$$EI = n_{al}E_{al}\frac{\pi d_{al}^4}{64} + n_{aço}E_{aço}\frac{\pi d_{aço}^4}{64} \quad (3.8)$$

Onde, n_{al} e $n_{aço}$ representam, respectivamente, a quantidade de fios de alumínio e aço que constituem o cabo e E_{al} e $E_{aço}$ são os módulos de elasticidade de cada material.

O cálculo da rigidez à flexão do cabo condutor segundo a Equação (3.8) traz implicitamente a consideração que os fios do cabo se comportam de forma independente, tal hipótese foi feita baseada na observação da existência de marcas de *fretting* entre os fios que compõem o cabo. O *fretting* é um indicativo que os fios podem atuar com certo grau de liberdade, pois a sua ocorrência implica na condição de haver deslocamento relativo entre as superfícies em contato, contudo, também é necessário que haja pressão entre as superfícies e, por conseguinte existe certa restrição ao movimento (principalmente próximo ao grampo de suspensão), o que gera um afastamento da condição de fios agindo de forma completamente independente.

O que se observa na realidade é uma variação da rigidez à flexão do cabo ocasionada devido à complexidade da construção dos condutores (fios enrolados helicoidalmente em várias camadas opostas). Os fios do cabo podem se movimentar de forma mais conjunta ou independente de acordo com a carga de tração aplicada e com o nível de amplitude de flexão (Y_b) imposto: Quando a amplitude de flexão é baixa, os fios do cabo agem em conjunto fazendo com que o condutor se comporte como um elemento único (unido) e assim a rigidez à flexão assume o seu valor máximo (EI_{max}), nos casos em que é imposta uma maior amplitude à flexão (Y_b), os fios do cabo agem de forma mais independente e a rigidez à flexão assume o seu valor mínimo (EI_{min}) que pode ser aproximado segundo a Eq. (3.8).

Apesar das considerações e simplificações realizadas na dedução da fórmula de Poffenberger-Swart, a proposta de relação linear entre a tensão dinâmica no fio do cabo e a amplitude de flexão no ponto situado à distância de 89 mm do UPC mostra-se bastante consistente com os resultados experimentais levando à aceitação da fórmula, recomendação e padronização do método da amplitude de flexão pelo grupo de estudos do IEEE.

A equação de Poffenberger-Swart permitiu uma maior compreensão dos parâmetros que influenciam a tensão dinâmica nos fios do cabo sujeitos a flexão cíclica devido à vibração eólica. Segundo equação P-S (Eq. 3.5), a tensão dinâmica é afetada principalmente pela carga de tração do cabo (EDS) e pela rigidez à flexão cuja variação, devido ao comportamento do cabo, induz desvios entre os resultados experimentais e a teoria.

Outro fator que pode causar desvios entre os resultados teóricos e práticos é a frequência de vibração do cabo. Segundo os experimentos realizados por membros do grupo de estudos do IEEE, a relação linear entre tensão e amplitude de flexão é praticamente insensível à frequência, entretanto, frequências altas que geram “*loops*” de vibração (metade de um comprimento de onda) menores que 35 polegadas causam não linearidades na fórmula, mas do ponto de vista prático, esta condição é raramente encontrada em campo (POFFENBERGER & SWART, 1965).

A equação P-S também pode ser escrita em outros formatos equivalentes ao da equação (3.5), porém relacionando a tensão dinâmica alternada a outros parâmetros indicadores da intensidade de vibração, conforme mostram as equações abaixo (EPRI, 2006):

$$\sigma_a = \frac{d E}{2} \sqrt{\frac{H}{EI}} \beta \quad (3.9)$$

$$\sigma_a = \pi d E \sqrt{\frac{W}{EI}} f y_{max} \quad (3.10)$$

3.4 METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DO CABO

A padronização do método da amplitude de flexão pelo IEEE e o desenvolvimento da fórmula de Poffenberger-Swart estabeleceram os alicerces para o estudo da fadiga em cabos condutores, viabilizando a comparação de resultados obtidos por diversas fontes e a criação de metodologias para a avaliação da integridade do cabo. Existem três principais metodologias que em conjunto com as medições de amplitude de flexão registradas pelos vibrógrafos permitem avaliar a severidade dos danos causados pela fadiga:

- 1) Metodologia IEEE (1966) – Máxima deformação de flexão admissível;
- 2) Metodologia EPRI (1979) – Limites de resistência à fadiga;
- 3) Metodologia CIGRÉ WG 22-04 (1985) – Estimativa do tempo de vida do condutor.

3.4.1 Metodologia IEEE – Máxima deformação de flexão admissível

Em 1966, o *IEEE Task Force on the Standardization of Conductor Vibration Measurements* sugeriu o estabelecimento de um limite de segurança de 150 *microstrains* de deformação dinâmica pico-a-pico no local correlacionado à medição do ponto padrão distante 89 mm do UPC. No entanto, o próprio IEEE enfatizou que este limite era excessivamente conservador e deveria ser interpretado apenas como um guia (IEEE, 1966) que foi dado com base em observações dos danos gerados em um tipo de cabo ACSR. Na época em que foi dada a recomendação, ainda não havia um conjunto de informações suficiente para determinar um limite que indicasse com precisão a segurança de cabos condutores em relação aos danos causados pela fadiga.

Reconhecendo o conservadorismo, foi dada uma recomendação adicional que o estabelecimento de limites admissíveis de deformação da ordem de 200 *microstrains* pico-a-pico poderiam levar a uma condição igualmente segura em que nenhum dano severo de fadiga seria ocasionado. Segundo dados contidos no *EPRI Transmission Line Reference Book* (2006), o que ocorre na prática é a consideração de limites de deformação baseados na experiência adquirida pelas empresas, as quais definem valores próximos aos recomendados pelo IEEE como aceitáveis, geralmente, são prescritos limites de segurança entre 150 e 300 *microstrains* de deformação para avaliar a integridade do cabo condutor.

3.4.2 Metodologia EPRI – Limites de resistência à fadiga

Fundamentado em um extenso conjunto de dados proveniente de ensaios de fadiga com vários tipos de condutores (maioria cabos ACSR) montados rigidamente em grampos convencionais constituídos de metal e com perfil suave, o EPRI sugere valores gerais de tensão 0-pico, nos quais a vida em fadiga é suficientemente alta para tratá-los como limites de resistência. Estes limites são indicados na Tabela (3.3):

Tabela 3.3 – Limites de resistência à fadiga aplicados na metodologia do EPRI.

Tipo de cabo condutor (material – camadas)	Limites de resistência EPRI tensão 0-pico (MPa)
ACSR - 1 camada Alumínio 1350 ou liga de alumínio 5005 - 1 camada	22,5
ACSR - multicamadas Alumínio 1350 ou liga de alumínio 5005 - multicamadas	8,5
Ligas de alumínio 6201 e similares - 1 camada	15
Ligas de alumínio 6201 e similares - multicamadas	5,7

Os limites recomendados também podem ser apresentados em termos da amplitude de flexão pico-a-pico, bastando colocar Y_b da equação P-S em função do limite de resistência da EPRI e do parâmetro K (Eq. 3.6), que por sua vez, depende do tipo de cabo e da EDS empregada, assumindo que é empregada a distância padrão de 89 mm de medição da amplitude de flexão.

Posteriormente, foi proposto que os limites de resistência mencionados poderiam ser interpretados de uma forma menos rígida, pois observações mostraram que tais limites podem ser ligeiramente ultrapassados por um número restrito de vezes sem que o cabo seja condenado pelos danos causados pela fadiga, mais precisamente, o critério propõe que:

- 1) Até 5% do total de ciclos podem conter níveis de amplitude de flexão que excedem o limite de resistência;
- 2) Porém, não pode haver mais que 1% do total de ciclos ultrapassando 1,5 vezes o limite de resistência à fadiga;
- 3) E nenhum ciclo pode ultrapassar 2 vezes o limite de resistência à fadiga.

3.4.3 Metodologia CIGRÉ WG-22-04 – Estimativa do tempo de vida do condutor

Materiais não ferrosos sujeitos a carregamentos cíclicos vão falhar inevitavelmente por fadiga após certa quantidade de ciclos, exceto se houver a interrupção da aplicação do carregamento dinâmico. Portanto, a questão que deve ser levantada sobre a falha em cabos condutores é relativa apenas ao momento em que ocorrerá a falha (ruptura dos fios), pergunta cuja resposta pode estimada por meio da aplicação de teorias preditivas, como a regra de Palmgren-Miner que é fundamentada na teoria do dano acumulativo.

A metodologia CIGRÉ WG-22-04 utiliza uma abordagem diferente dos outros dois critérios apresentados, ao invés de estabelecer um limite de segurança, o método emprega a regra de Palmgren-Miner para o cálculo da vida remanescente do condutor. A aplicação da regra de Palmgren-Miner está pautada no conhecimento do “histórico de carregamentos aplicados” e no conhecimento da curva S-N do material ou da montagem cabo/grampo, como é o caso.

O histórico de carregamentos é viabilizado pelos registros das amplitudes de flexão pico-a-pico feitos por vibrógrafos ao longo de determinado tempo representativo que depois é extrapolado ao período de um ano e a curva S-N pode ser obtida por meio de ensaios de fadiga em montagens cabo/grampo correspondentes às condições encontradas nas linhas de transmissão reais ou por meio do uso da *CIGRÉ Safe Border Line* (CSBL).

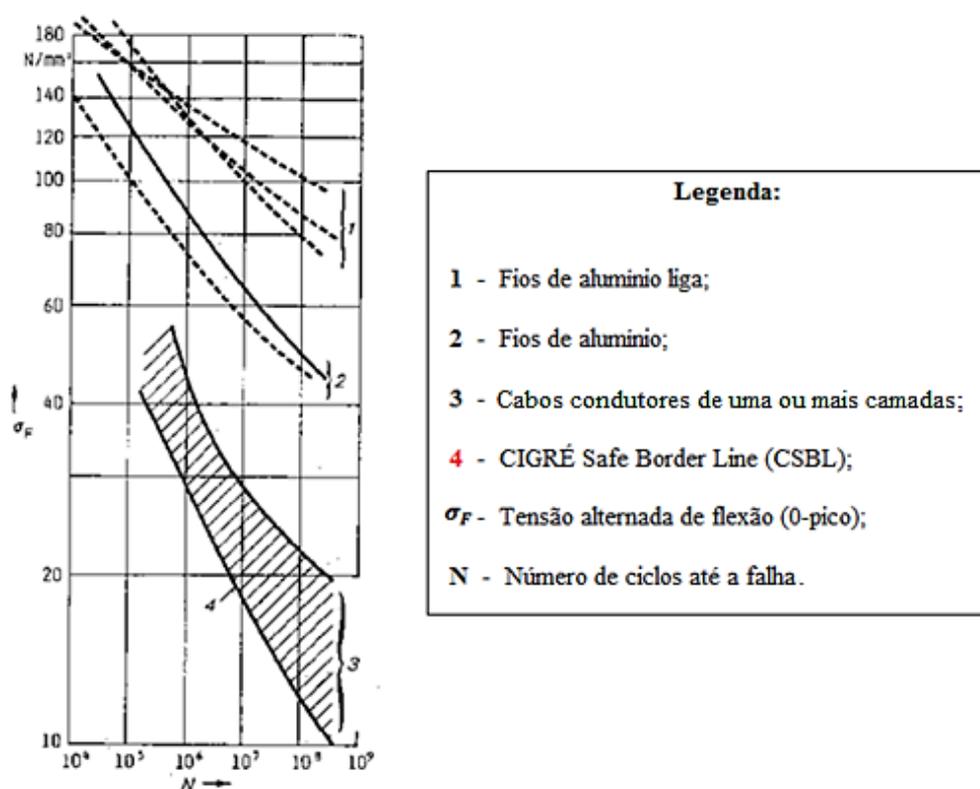


Figura 3.14 – *CIGRÉ Safe Border Line* (CIGRÉ, 1995).

A CSBL é uma curva S-N montada após diversos ensaios de fadiga com várias combinações entre grampos de suspensão e condutores (alumínio, alumínio liga e ACSR), a curva fica abaixo de todos os resultados ensaiados, dessa forma, ela representa uma fronteira de segurança genérica que pode ser empregada quando não se conhece a curva S-N específica da montagem cabo/grampo que está sendo analisada. A CSBL é representada matematicamente de acordo com a equação abaixo:

$$\sigma_a = C N^Z \quad (3.11)$$

Onde C e Z são constantes definidas conforme indica a Tabela (3.4):

Tabela 3.4 – Valores das constantes empregadas na CSBL genérica.

Condição	Constante C	Constante Z
$N < 2 \cdot 10^7$	450	-0,2
$N > 2 \cdot 10^7$	263	-0,17

Para cabos ACSR de uma camada de fios de alumínio, pode ser considerada uma curva menos conservativa dada pela utilização das constantes da Tabela (3.5):

Tabela 3.5 - Valores das constantes empregadas na CSBL para cabos ACSR de 1 camada.

Condição	Constante C	Constante Z
$N < 2 \cdot 10^7$	730	-0,2
$N > 2 \cdot 10^7$	430	-0,17

No capítulo 6, o procedimento de aplicação da metodologia CIGRÉ WG-22-04 é demonstrado por meio de um exemplo prático (estudo de caso). A seguir, são listados resumidamente os procedimentos necessários para a aplicação da metodologia em questão:

- 1) Utilização de vibrógrafos para o registro das amplitudes de flexão pico-a-pico em um período de tempo considerado representativo das vibrações ao longo de um ano;

O CIGRÉ TF 22.11.2 recomenda um período de 3 meses como satisfatório, enquanto a IEEE Std. 1368 indica que valores entre 2 a 6 semanas são práticas comuns. A orientação geral é a escolha de um período de testes que englobe mudanças na velocidade do vento (fator que altera na vibração do cabo) e mudanças na temperatura (fator que altera a tensão de tração do cabo), ou seja, é desejável que se escolha um período de testes que acompanhe mudanças de estações climáticas.

- 2) Cálculo dos níveis de tensão gerados por cada registro de amplitude de flexão efetuado pelo vibrógrafo, cálculo realizado com o uso da equação P-S;
- 3) Por intermédio da curva S-N da montagem cabo/grampo ou da CSBL (Eq. 3.11), calcula-se o número de ciclos necessários para a falha nos níveis de tensão registrados pelo vibrógrafo;
- 4) Extrapolação do número de ciclos registrados durante o período de teste para o tempo de 1 ano;
- 5) Cálculo do dano acumulativo pela regra de Palmgren-Miner (Eq. 2.22) e da vida remanescente do cabo (Eq. 2.24) com a utilização do número de ciclos calculados até a falha e da quantidade de ciclos extrapolada para o período de um ano.

Após o cálculo da vida remanescente, verifica-se se o cabo está apto a atingir a expectativa de uma vida economicamente satisfatória, que para condutores é de 30 anos, caso não esteja e a vida residual calculada seja baixa, podem ser orientadas atividades de inspeção e manutenção na linha de transmissão evitando-se a ocorrência de falhas que poderiam gerar a interrupção do fornecimento de energia elétrica e prejuízos econômicos.

A metodologia do CIGRÉ WG-22-04 se apresenta vantajosa em relação aos dois outros critérios de avaliação da integridade do condutor, pois fornece uma estimativa do estado atual do cabo em relação ao momento da falha. Entretanto, a metodologia do CIGRÉ é a menos utilizada no mundo segundo consta em uma pesquisa reportada na referência *EPRI Transmission Line Reference Book (2006)*, de acordo com esta pesquisa, a metodologia do IEEE é a mais empregada pelas empresas do setor elétrico e a metodologia do EPRI ocupa o segundo lugar de utilização no mundo.

4 VIBRÓGRAFOS

4.1 AVALIAÇÃO DAS VIBRAÇÕES EM CABOS CONDUTORES

Segundo o *EPRI Transmission Line Reference Book* (2006), os seguintes métodos podem ser empregados na avaliação da intensidade da vibração nos cabos condutores de eletricidade:

- 1) Previsão analítica do nível de vibração em condutores por meio de modelos matemáticos (simulações computacionais) que se baseiam no princípio de conservação de energia, no qual se faz um balanço entre a energia introduzida pelos ventos e a energia dissipada pela vibração, pelo autoamortecimento dos cabos e por mecanismos de dissipação, tais como, amortecedores (*dampers*) que possam estar instalados na linha de transmissão;
- 2) Testes experimentais em vãos dentro de ambientes controlados de laboratório;
- 3) Testes experimentais em vãos abertos que buscam replicar as condições naturais nas quais as linhas de transmissão são expostas;
- 4) Medições do nível de vibração em linhas de transmissão ativas.

Cada método permite enxergar o problema por meio de uma abordagem diferente. Usualmente, emprega-se mais de um método, pois os resultados se complementam e permitem a avaliação da integridade do condutor em relação à intensidade de vibração desde a fase de concepção da linha de transmissão até a o momento em que a linha está em operação por anos.

Neste capítulo, são abordados em maiores detalhes os instrumentos utilizados nas medições dos níveis de vibração em campo, o instrumento que é mais aplicado para este fim é denominado de vibrógrafo (*vibration recorder*). Os vibrógrafos mais antigos eram analógicos e registravam a amplitude de flexão em rolos de filmes pela ampliação mecânica das vibrações. Os aparelhos subsequentes passaram a ser digitais e registram a amplitude de flexão dos cabos em uma matriz de dados (matriz Amplitude - Frequência), cada ciclo de vibração contabilizado pelo aparelho é gravado em uma célula da matriz em que cada linha representa uma faixa de amplitude de flexão e cada coluna representa uma faixa de frequência da excitação do cabo, ou seja, vibrógrafos contabilizam e categorizam cada ciclo de vibração em classes de amplitude de flexão (Y_b) e em classes de frequência.

A instalação de vibrógrafos nas linhas de transmissão é uma atividade onerosa devido ao elevado custo dos equipamentos e à exigência de mobilizar trabalhadores qualificados para esta operação de risco (Fig. 4.1), no entanto, as medições realizadas pelos vibrógrafos fornecem valiosos dados que podem ser utilizados para diversas finalidades práticas, tais como:

- a) Avaliação e comparação do desempenho de um sistema de amortecimento constituído por *dampers* instalados na linha de transmissão;
- b) Identificação da intensidade de vibração em uma linha de transmissão recém-instalada;
- c) Identificação da intensidade de vibração em uma linha de transmissão que apresenta danos visíveis verificados por inspeção;
- d) Avaliação da vida útil dos condutores com base na estimativa da vida remanescente calculada de acordo com a metodologia CIGRÉ WG-22-04.

O objetivo geral da coleta de dados é o estabelecimento de medidas preventivas para evitar que os danos causados pela fadiga assumam valores que comprometam a integridade do cabo, isto é feito pela adoção racional de intervalos de manutenção e inspeção das linhas ou pela verificação da necessidade da instalação de amortecedores (*dampers*) ou de outros mecanismos atenuadores da vibração nos condutores.

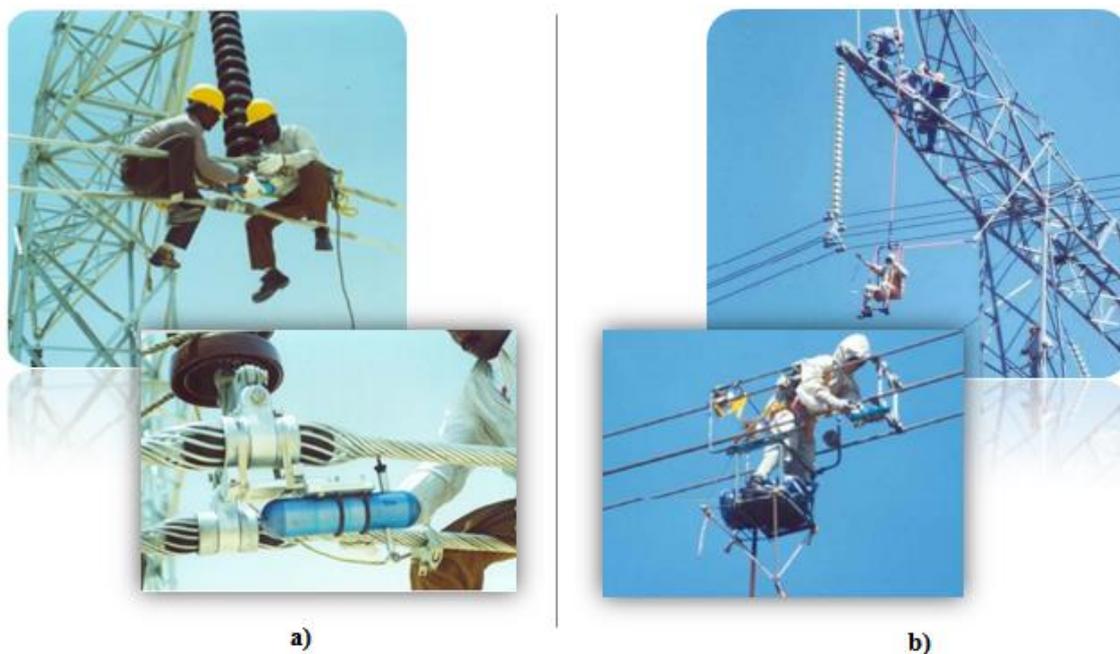


Figura 4.1 – Instalação de vibrógrafos: a) Em linhas fora de serviço; b) Em linhas energizadas (modificado: COSMAI, 2009).

4.2 HISTÓRICO DE DESENVOLVIMENTO DOS VIBRÓGRAFOS

Em 1941, o engenheiro Gordon Tebo introduziu o conceito de medição da amplitude de flexão que passaria a ser recomendado posteriormente pelo IEEE (1966). Tebo criou um dispositivo no qual era empregado um transformador linear diferencial para medição da amplitude de flexão (pico-a-pico) do cabo à distância de 3 ½ polegadas (89 mm) do último ponto de contato entre o cabo e o grampo.

A escolha do local de medição feita por Tebo foi baseada na observação que os rompimentos dos fios ocorriam próximos ao grampo de suspensão, onde o movimento do condutor é influenciado principalmente pela rigidez à flexão do cabo e os efeitos das forças inerciais podem ser negligenciados (IEEE, 2006). A escolha do ponto de medição também está relacionada à resolução do instrumento, distâncias inferiores à 3 ½ polegadas necessitariam de um aparelho apto à detectar deslocamentos cada vez menores e locais de medição distantes de 3 ½ polegadas introduziriam maiores erros de medição. À medida que trabalhos subsequentes passaram a adotar o mesmo ponto de referência, o ponto situado à distância de 3 ½ polegadas (89 mm) do UPC passou a ser recomendado como padrão a ser adotado para facilitar a comparação de resultados (IEEE, 2006).

Em 1963, Edwards e Boyd aprimoraram o dispositivo experimental de Tebo e criaram o Ontario Hydro Vibration Recorder (OHVR) que era capaz de fazer medições em campo (linhas energizadas). O OHVR foi utilizado por anos até o desenvolvimento de vibrógrafos mais modernos que são descritos na tabela comparativa mostrada a seguir:

Tabela 4.1 – Comparativo entre os principais vibrógrafos desenvolvidos².

		OHVR	HILDA	Scolar III	Pavica	Vibrec 500 WT
Tipo		Analógico	Analógico	Digital	Digital	Digital
Faixa de leitura	f (Hz)	0 - 150	0 - 100	0 - 100	0 - 127	0 - 200
	Y_b (mm)	0 - 1,27	0 - 2,54	0 - 2,54	0 - 1,29	0 - 2,00
Autonomia das baterias ³		3 semanas	...	3 meses	3 meses	1 ano
Massa ⁴ (Kg)		4,5	0,64	3,10	0,50	0,70
Comunicação dos dados		Coleta do filme gravado	Telemetria	Conexão direta com o computador	Conexão direta com o computador (cabo RS232)	Conexão USB ou Wireless
Sensores adicionais		Sem	Anemômetro	Sem	Sensor de temperatura	Anemômetro e sensor de temperatura

² Tabela criada com as informações retiradas de catálogos e do *EPRI Transmission Line Reference Book*;

³ Varia de acordo com as condições de temperatura e com os períodos programados de gravação;

⁴ Sem considerar o peso dos acessórios de fixação do vibrógrafo.

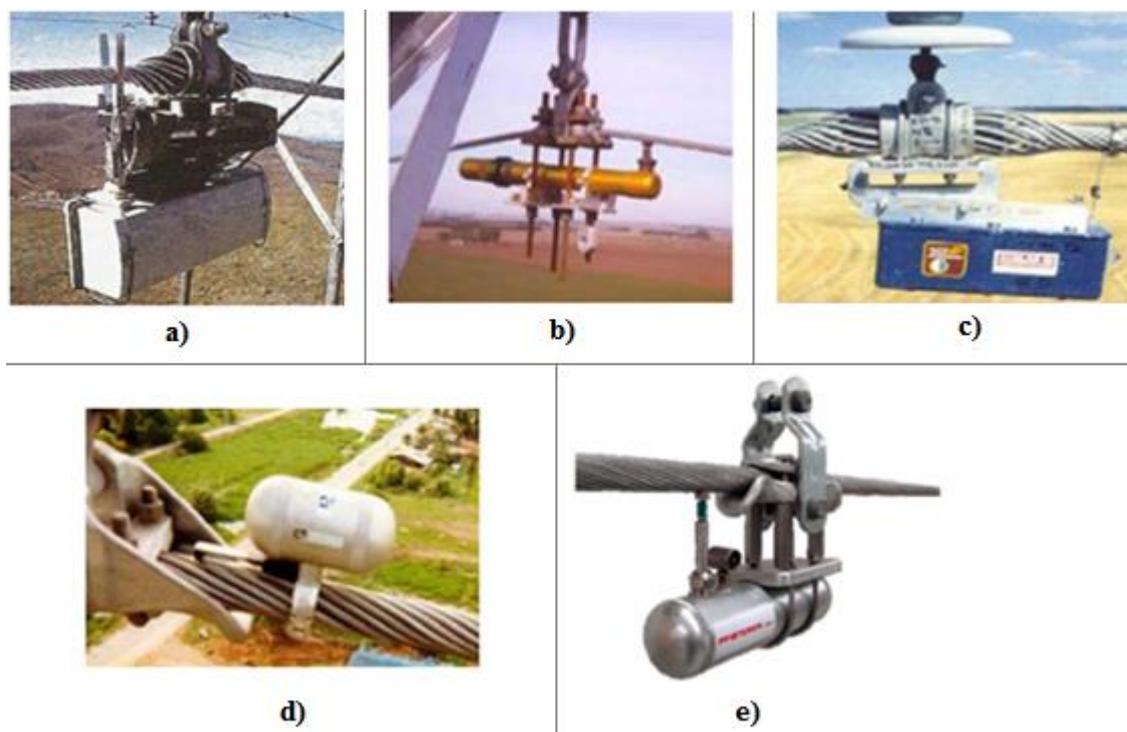


Figura 4.2 – Principais vibrógrafos desenvolvidos: a) OHVR; b) HILDA; c) Sclar III; d) Pavica; e) Vibrec 500 WT (modificado: COSMAI, 2009).

Atualmente, apenas a linha de vibrógrafos Vibrec 500 da empresa suíça PFISTERER encontra-se disponível no mercado, porém, o vibrógrafo Pavica da empresa canadense Roctest ainda é muito utilizado em virtude da interrupção recente de fabricação do produto. Neste trabalho, foram utilizados os vibrógrafos Pavica e Vibrec 500 WT em ensaios que objetivam a comparação das medições efetuadas por estes equipamentos com os valores monitorados por instrumentos presentes na bancada de ensaios do laboratório de cabos da UnB, a metodologia e os resultados destes ensaios serão apresentados no Capítulo 5 deste trabalho.

Observando a Figura (4.2) pode ser notado que o vibrógrafo Pavica apresenta uma particularidade construtiva em relação aos demais: O Pavica é preso diretamente no cabo sobre o local à 89 mm de distância do último ponto de contato entre o cabo e o grampo (UPC) e mede a amplitude de flexão no ponto localizado sobre o UPC tendo como referência o próprio condutor, caso contrário aos demais vibrógrafos que são rigidamente fixados ao grampo e o têm como referência de medição.

A Figura (4.3 a) ilustra a forma em que é feita a instalação padrão do vibrógrafo Pavica e indica um tipo de instalação alternativo (instalação com *offset*) que é utilizado quando o tipo de grampo ou elemento de restrição impossibilita a localização do sensor sobre o UPC. Neste caso, o vibrógrafo é instalado deslocado da posição padrão em uma distância suficiente para proporcionar a movimentação do sensor sem que haja qualquer tipo de restrição (Fig. 4.3 b).

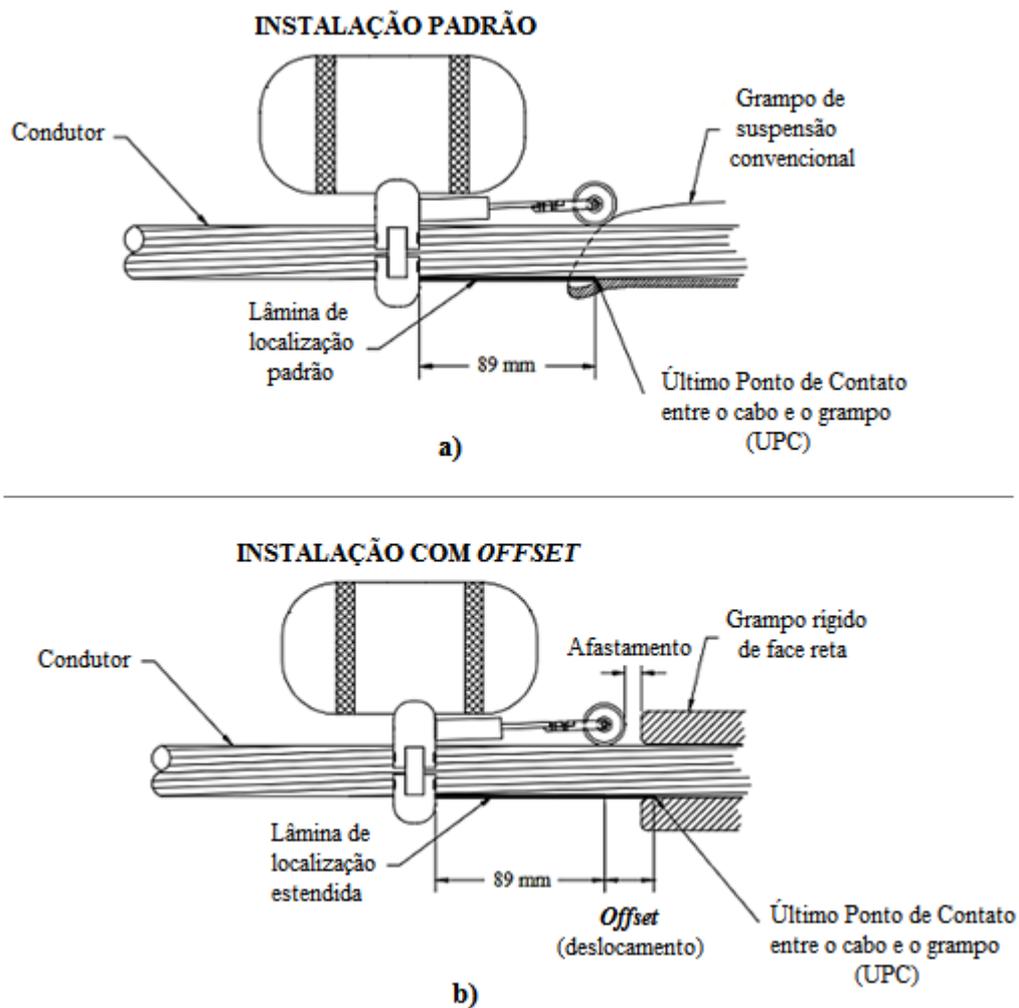


Figura 4.3 – Ilustração esquemática dos tipos de instalação do vibrógrafo Pavica: a) Instalação padrão; b) Instalação com *offset*. (modificado: ROCTEST, 2003).

O método de medição empregado pelo Pavica é chamado de amplitude de flexão inversa, o benefício de utilizar este método consiste na possibilidade de construir um equipamento mais compacto e que pode ser fixado com maior facilidade, outra vantagem que surge da fixação direta no cabo é a possibilidade de registrar as vibrações em outros elementos de restrição do condutor, tais como em amortecedores e espaçadores (Fig. 4.4).



Figura 4.4 – Pavica instalado próximo a um espaçador (COSMAI, 2009).

Entretanto, a medição de amplitude inversa feita pelo Pavica deve ser convertida na amplitude de flexão (Y_b) padrão para permitir a comparação dos resultados obtidos com os limites convencionais de resistência descritos na Seção (3.4). A conversão entre a amplitude de flexão no ponto 89 mm e a amplitude inversa (Y_a) é feita por um fator (R') que é expresso pela seguinte fórmula (HARDY & BRUNELLE, 1991):

$$R' = \frac{Y_b}{Y_a} = \frac{pa - 1 + e^{-pa}}{e^{-pc}[1 - (1 + pa)e^{-pa}]} \quad (4.1)$$

Onde, p é o parâmetro dado pela Eq. (3.7) obtido com o uso da rigidez à flexão efetiva (segundo o manual do equipamento, este valor é calculado como sendo 40% da rigidez à flexão máxima do condutor, quando se assume que os fios agem em conjunto), a é a distância padrão de instalação do Pavica que vale 89 mm e c é a distância de *offset* utilizada na montagem (deslocamento existente entre o UPC e o sensor do Pavica), caso exista.

4.3 MÉTODO DE MEDIÇÃO DOS VIBRÓGRAFOS

Os vibrógrafos comerciais não registram as informações de forma contínua, as medições são feitas em amostras retiradas em intervalos regulares de tempo. O intervalo entre o início de duas amostras consecutivas é composto por um período ativo de medições e por um período de espera, no qual o equipamento fica inativo. A maioria dos vibrógrafos possibilita a escolha do tempo entre cada amostragem, do tempo ativo de medição e do período no qual o vibrógrafo vai ficar na linha de transmissão realizando todas as medições de teste. A escolha do período total de teste pode ser feita por meio das seguintes formas de programação:

- a) Início e término em determinada data e hora definidas pelo usuário (*automatic start-stop*);
- b) Início e término pelo pressionamento de botões de controle no vibrógrafo (*manual start-stop*);
- c) Intercâmbio entre os métodos anteriores, podendo programar o início e término do período de testes de forma manual ou automática (*automatic start – manual stop / manual start – automatic stop*).

Na padronização do método da amplitude de flexão realizada em 1966, o IEEE definiu especificações mínimas que os vibrógrafos deveriam ter para a obtenção de dados relevantes sobre a vibração dos condutores, no entanto, estas especificações definidas foram altamente influenciadas pelas limitações do vibrógrafo disponível na época, o OHVR (IEEE, 2006). Posteriormente, o CIGRÉ TF 22.11.2 (*Guide to Vibration Measurements on Overhead Lines*, 1995) acrescentou recomendações sobre as características desejáveis aos vibrógrafos. As principais recomendações dadas por ambas as instituições em relação ao processo de medição efetuado pelos vibrógrafos encontram-se sumarizadas na Tabela (4.2):

Tabela 4.2 – Especificações mínimas recomendadas aos vibrógrafos.

Requisitos mínimos de medição dos vibrógrafos	IEEE (1966)	CIGRÉ (1995)
Tempo ativo das medições (s)	1	1 – 10
Período de amostragem: tempo ativo + tempo de espera (min.)	15	15 (no mínimo)
Duração mínima dos testes	14 dias	3 meses
Amplitude de flexão máxima registrada (mm)	1,27	2
Frequência máxima registrada (Hz)	150	200

O avanço que ocorreu em relação à possibilidade de gravação de dados por meio de vibrógrafos pode ser acompanhado pelas informações apresentadas na Tabela (4.3):

Tabela 4.3 – Detalhes de gravação de diferentes vibrógrafos.

Especificações	OHVR	HILDA	Scolar III	Pavica	Vibrec 500 WT
Tempo ativo das medições (s)	1	1 – 3	1 - 4	1 - 12	1 – 10
tempo ativo + tempo de espera	15 min.	15 min.	10 min.	1 – 60 min.	15 s – 60 min
Saída de dados	Gravação temporal da amplitude em função do tempo	...	Matriz com 21 classes de amplitude e 10 classes de frequência	Matriz com 64 classes de amplitude e 64 classes de frequência	Matriz com 32 classes de amplitude e 32 classes de frequência

O vibrógrafo Vibrec 500 WT ainda possibilita a realização de gravações temporais da amplitude de flexão, da velocidade do vento e da temperatura. Porém, existem limitações quanto à duração e à quantidade de gravações temporais que podem ser registradas: Só podem ser realizados até 1000 registros temporais de amplitude de flexão e a duração máxima em que o sinal de amplitude pode ser gravado em função do tempo é de 5 segundos.

4.4 ANÁLISE CRÍTICA DO MÉTODO DE MEDIÇÃO

O padrão de medições recomendado originalmente pelo IEEE reflete as restrições do modelo de vibrógrafo disponível na época, que era altamente limitado em relação à autonomia das baterias e à forma de gravação dos dados. As recomendações feitas posteriormente por guias do CIGRÉ e IEEE mostraram se mais condizentes com as tecnologias atuais resultando na obtenção de dados capazes de

descrever as vibrações dos condutores de forma mais plausível, contudo, nota-se que mesmo utilizando um vibrógrafo recente como o Pavica gravando 10 segundos de dados a cada 15 minutos e durante 3 meses (de acordo com as recomendações da CIGRÉ e com as limitações do equipamento⁵), seriam registrados apenas 24,8 horas de dados (89280 segundos) o que equivale à aproximadamente 0,3% do período de 1 ano para o qual os dados são extrapolados na aplicação da metodologia CIGRÉ WG 22-04.

Houve grande avanço no desenvolvimento dos vibrógrafos, entretanto, os equipamentos comerciais apresentam limitações técnicas inerentes à construção e ao processamento de dados que são discutidas a seguir:

a) Baixa amostragem de dados:

É necessário que os equipamentos funcionem coletando amostras de dados em intervalos regulares de tempo, nos quais há um período de inatividade necessário para preservar a memória e a bateria dos aparelhos que, de acordo com as condições de temperatura e os tempos programados de gravação, raramente dura tempo suficiente para a coleta de informações durante um período que acompanhe mudanças climáticas sazonais;

b) Simplificações no registro da frequência e da amplitude:

Os algoritmos utilizados nos vibrógrafos podem conter filtros para evitar o registro de ruídos no sinal de amplitude, estes filtros podem prejudicar a gravação das informações ao ignorar grande quantidade de ciclos de baixa amplitude, o que implica na contabilização de entradas de baixa frequência e alta amplitude (EPRI, 2006). Alguns vibrógrafos (os mais modernos) processam cada ciclo individualmente, porém, alguns outros registram todos os ciclos de um período ativo de medições referentes apenas à amplitude máxima desta amostra de período ativo (IEEE, 2006).

Outro alerta dado à utilização dos vibrógrafos é a possibilidade da obtenção de medidas com pouca acurácia devido às diferentes fontes de erros que podem surgir no sistema de medições, tais como:

- 1) Fontes aleatórias causadas pela exposição dos vibrógrafos ao ambiente hostil da linha de transmissão: Variações de temperatura, exposição ao sol, chuva e à interferência eletromagnética gerada pela corrente elétrica transportada nos cabos;
- 2) Erros sistemáticos causados pela calibração incorreta dos equipamentos ou pela perda de calibração após longos períodos de utilização;
- 3) Posicionamento incorreto do sensor: Resultados completamente diferentes são obtidos se as medições forem realizadas em um ponto diferente do especificado (comumente utiliza-se o padrão de 89 mm de distância do UPC) ou se o sensor não for alinhado verticalmente de forma correta;

⁵ O manual do Pavica cita como exemplo que a autonomia de 3 meses das baterias do equipamento é para condição em que há gravação de 10 segundos a cada 30 minutos na temperatura externa de 20°C.

- 4) Perda de contato do sensor: Mudanças no ângulo de mergulho do cabo ou ajustes incorretos do sensor reduzem a restrita faixa de medições e podem levar a perda de contato do mesmo com o cabo;
- 5) Vibrógrafos com massa elevada adicionam inércia ao sistema modificando a movimentação natural do condutor e conseqüentemente resulta em um registro incorreto das informações;
- 6) O dispositivo de fixação dos vibrógrafos no grampo (ou cabo, no caso do Pavica) também pode introduzir erros nas medições, caso não seja leve e rígido;
- 7) Movimentos dos operadores para a ativação ou desativação manual dos aparelhos durante a montagem em campo podem levar ao registro de entradas de dados indevidas.

Os vibrógrafos são ferramentas valiosas para a obtenção de dados que permitem identificar o nível de vibração dos condutores em campo, porém é necessário compreender que estes equipamentos ainda apresentam características construtivas que limitam a sua aplicação. Os usuários dos vibrógrafos devem conhecer tais limitações para escolher de forma apropriada a duração do período de testes (tempo representativo das mudanças climáticas) e o melhor local para instalação desses aparelhos (locais da linha de transmissão sujeitos a maior vibração, conforme discutido na seção 3.1.3) para que seja possível a interpretação correta dos dados em relação à identificação do nível de vibração nos vãos mais críticos da linha e assim sejam tomadas decisões preventivas mais apropriadas contra os danos causados pela fadiga.

4.5 NOVAS TECNOLOGIAS

Recentemente, esforços foram orientados à criação de vibrógrafos capazes de suprir as deficiências encontradas nos modelos comerciais desenvolvidos até o momento. No Brasil, há o registro da criação de alguns protótipos de aparelhos para medição de vibração em cabos condutores:

- 1) Acelerômetro biaxial (BRAGA *et. al*, 2005 ; NOGUEIRA, 2005): Equipamento que emprega sensoriamento óptico com redes de Bragg permitindo a medição das vibrações em dois eixos perpendiculares, o que é útil para medições de meio-de-vão e de sub-vão. O emprego do sensor ótico resulta em um dispositivo compacto e menos sujeito às interferências eletromagnéticas.
- 2) Vibrógrafo autônomo para aquisição remota de dados (SCHIMITH, 2012): Desenvolvido na Universidade Estadual de Londrina, o equipamento utiliza extensômetro como sensor para coleta de dados e apresenta particularidades como o carregamento da bateria por meio de painel fotovoltaico e transmissão de dados via rede GPRS (*General Packet Radio Services*).
- 3) Vibrógrafo para medir e armazenar dados de vibração (OLIVEIRA, 2013): Desenvolvido na Universidade de Brasília, utiliza extensômetro como sensor para coleta de dados e se diferencia dos demais por armazenar dados de amplitude em função do tempo.

5 ANÁLISE COMPARATIVA DE VIBRÓGRAFOS

5.1 DESCRIÇÃO GERAL

O principal objetivo da parte experimental do trabalho é validar as medições dos vibrógrafos Pavica e Vibrec 500 WT. Os ensaios foram conduzidos colocando o cabo condutor para vibrar em várias combinações de frequência e deslocamento Y_b (amplitude de flexão) com o intuito de verificar se os registros dos vibrógrafos são acurados e precisos nas diferentes condições testadas. Um objetivo secundário é a comparação da tensão dinâmica de flexão calculada pela equação de Poffenberger-Swart (Eq. 3.5) com o valor registrado por extensômetros colados nos fios de topo do cabo condutor.

A bancada e os sensores utilizados serão explicados nas seções seguintes. Para facilitar o entendimento do processo de operação da bancada, será mostrado como é efetuado o controle e a aquisição de dados em testes típicos de fadiga de condutores, que é uma das principais aplicações da bancada. Posteriormente, serão descritos e apresentados os detalhes referentes aos ensaios com os vibrógrafos: Metodologia, parâmetros, materiais utilizados, detalhes específicos da montagem dos vibrógrafos nas bancadas, procedimentos executados e os resultados dos ensaios obtidos com ambos os equipamentos.

5.2 DESCRIÇÃO DA BANCADA DE TESTE

Atualmente, o laboratório construído na Universidade de Brasília dispõe de três bancadas de teste. Cada bancada tem aproximadamente 47 metros de comprimento o qual é dividido em duas partes, o vão passivo e o vão ativo. O vão passivo tem a finalidade de ancorar o cabo em um bloco fixo e o vão ativo é o local no qual o cabo é excitado pelo movimento vibratório do *shaker* eletromecânico. A figura esquemática abaixo (Fig. 5.1) ilustra a configuração da bancada de teste:

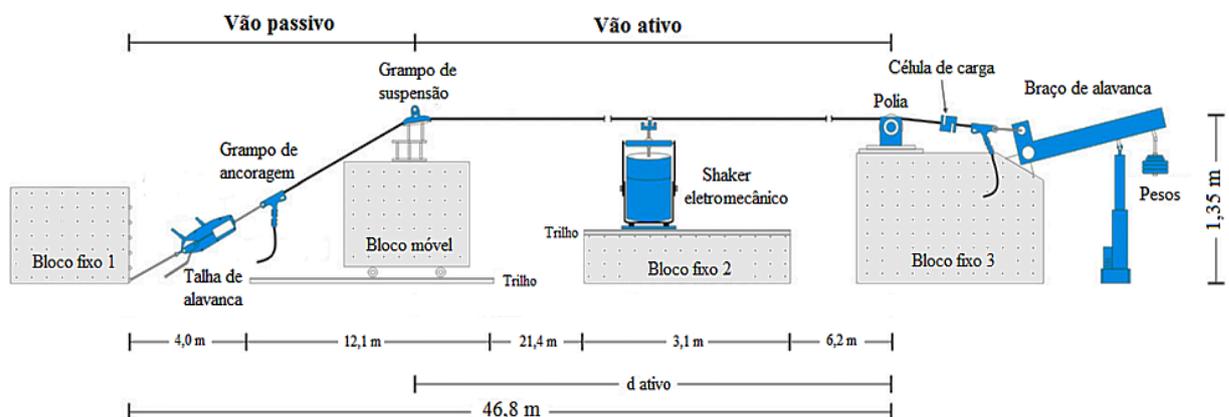


Figura 5.1 – Ilustração esquemática da bancada do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB (modificado: FADEL et al., 2011).

Pode ser observado que a ancoragem do cabo no bloco fixo (vão passivo) é feita por meio de uma talha de alavanca e um tipo específico de grampo, a manipulação da talha permite a realização de ajustes na aplicação da carga de tração do cabo.

Sobre o bloco móvel indicado na Figura (5.1), fica o grampo de suspensão que é o local onde fica a maior parte dos sensores de monitoração e aquisição de dados (acelerômetros, extensômetros e sensores *laser*), pois esta é a região de maior interesse por ser o local onde ocorrem as quebras dos fios do cabo.

O *shaker* eletromecânico é conectado ao condutor por meio de um dispositivo de alinhamento que evita a transmissão de cargas tangenciais ao *shaker*, que são prejudiciais ao equipamento. O *shaker* é disposto sobre o bloco fixo 2, porém, pode ser movimentado sobre um trilho para um melhor posicionamento em relação ao nó e anti-nó de vibração do cabo, o que contribui para uma maior estabilização do ensaio de acordo com o modo de vibração excitado (FADEL, 2010).

Na extremidade oposta da bancada, encontra-se o bloco fixo 3 que é utilizado para prender a polia e o braço de alavanca. Pesos são conectados ao braço de alavanca para o tracionamento do cabo até ser obtida a EDS especificada para o ensaio, o valor da carga de tração aplicada no cabo é verificado por um visor digital que indica a leitura da célula de carga que é conectada ao grampo de ancoragem.

As figuras abaixo contêm fotos das bancadas de testes para uma melhor visualização dos equipamentos utilizados e a disposição dos mesmos no espaço físico do laboratório:



Figura 5.2 – Vista geral das três bancadas e do vão do laboratório.

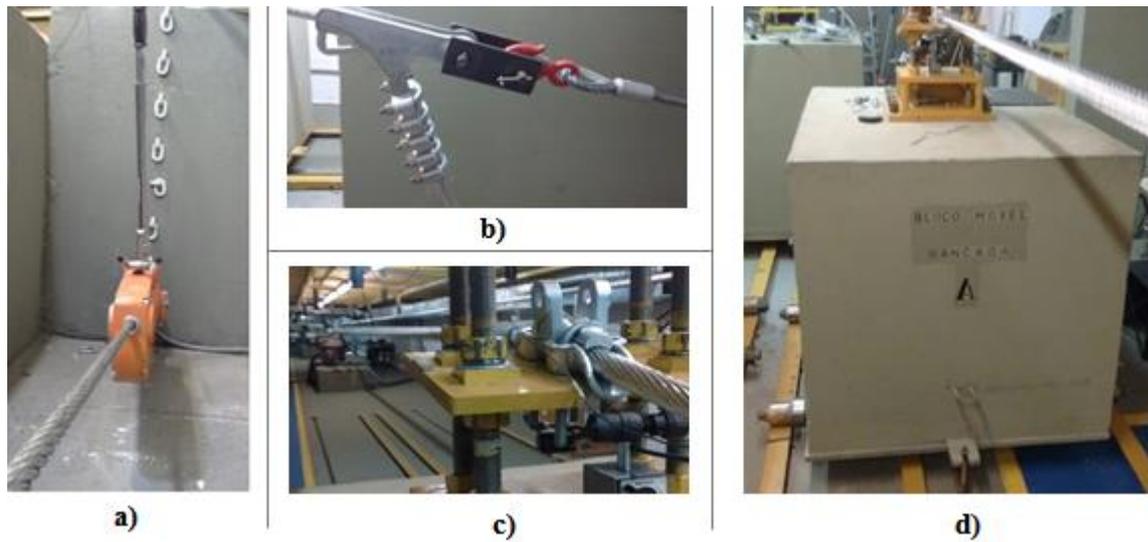


Figura 5.3 – Fotos da bancada próximo ao vão passivo: a) Talha de alavanca; b) Grampo de ancoragem; c) Montagem do grampo de suspensão; d) Vista do bloco móvel.

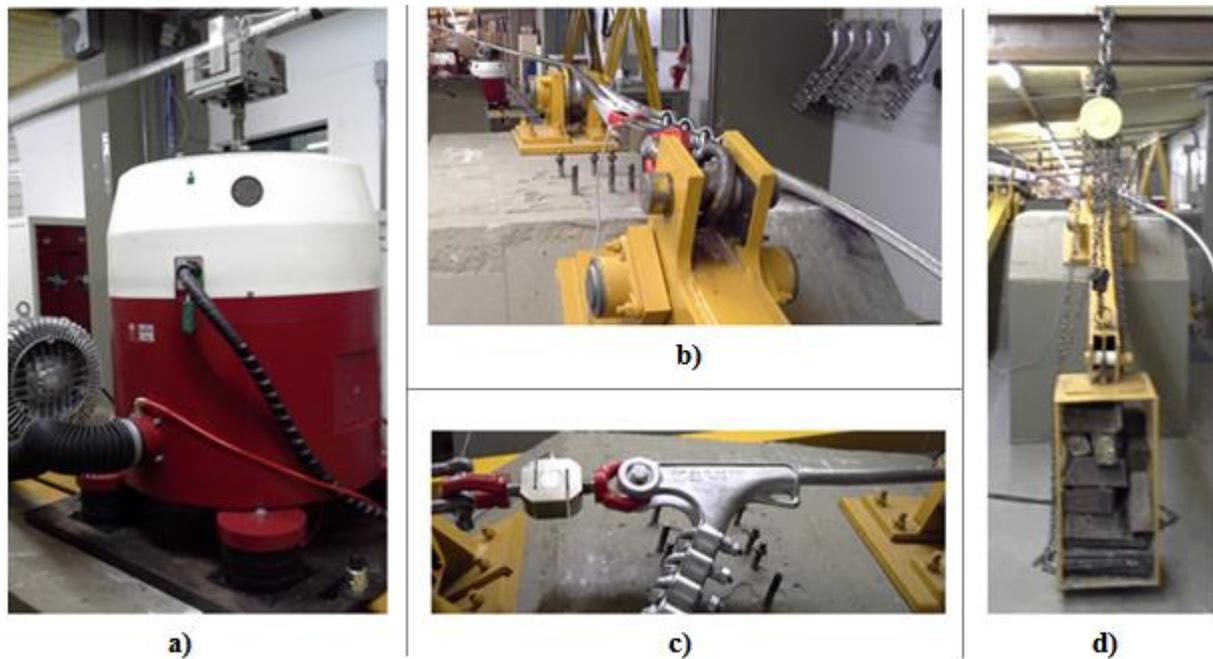


Figura 5.4 – Fotos da bancada no vão ativo: a) *Shaker* eletromecânico conectado no cabo; b) Vista do cabo preso no braço de alavanca passando pela polia até chegar ao *shaker*; c) Montagem da célula de carga e grampo de ancoragem; d) Pesos usados para tração do cabo até a EDS especificada para o ensaio.

5.3 CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS

Ensaio de fadiga em cabos condutores de energia elétrica são executados com o objetivo de se obter a curva S-N do corpo-de-prova (montagem cabo/grampo). Cada ensaio é realizado com um deslocamento Y_b (amplitude de flexão pico-a-pico medida no ponto à 89 mm de distância do UPC) definido previamente, o que implica que cada ensaio é executado em um nível específico de tensão dinâmica de flexão (Eq. 3.5). Após a definição do deslocamento Y_b do ensaio ou do nível de tensão dinâmica, o cabo é colocado para vibrar em uma frequência próxima a uma de suas frequências naturais, o *software* de controle do *shaker* mantém a frequência e o deslocamento Y_b prescritos para o ensaio até o seu término. O término do teste ocorre quando 3 fios ou 10% da quantidade de fios do cabo se romperem, adota-se o menor valor como critério de falha segundo as definições do CIGRÉ. O procedimento de contagem de ciclos até a falha é repetido para vários níveis de deslocamento Y_b (níveis de tensão dinâmica) até se obter uma quantidade significativa de pontos para formar a curva S-N do corpo-de-prova.

Ao longo do vão, vários parâmetros são medidos por sensores para monitoração (controle) ou para aquisição de dados, destaque é dado à região de interesse onde ocorrem as rupturas dos fios (região envolvida pelo grampo de suspensão). A seguir, serão explicados os sensores utilizados em cada parte da bancada para o controle e aquisição de dados em ensaios típicos de fadiga, posteriormente, será mostrado como os sensores foram utilizados nos testes com os vibrógrafos.

5.3.1 Monitoramento na região da montagem cabo/grampo

Basicamente, são utilizados três tipos de sensores nesta região da bancada:

1) Acelerômetros:

Acelerômetros podem medir a aceleração, velocidade ou deslocamento. Nos ensaios executados no laboratório, um acelerômetro é empregado para monitorar e controlar precisamente o deslocamento do Ponto 89 (ponto localizado à 89 mm de distância horizontal do UPC) no nível prescrito para o ensaio.

O último ponto de contato entre o cabo e o grampo (UPC) fica situado internamente ao grampo. Para localizar o Ponto 89, insere-se um gabarito de 89 mm no espaço livre existente entre o cabo e a base do grampo até o momento no qual o gabarito atinge o UPC e fica impossibilitado de movimentar, neste instante marca-se com uma fita isolante o Ponto 89 situado na extremidade final (livre) do gabarito.

2) **Sensores *laser*:** Um sensor laser é colocado abaixo do Ponto 89 para realizar a contagem de ciclos.

3) **Extensômetros:** Tipicamente, três extensômetros são colados nos fios de topo da camada externa do cabo condutor. Os extensômetros são colados alinhados com a linha que marca a localização

do UPC, o fio mais centralizado e mais próximo do ponto diametralmente oposto ao UPC é designado de fio de topo e os dispostos ao seu lado são chamados de fio direito e fio esquerdo.

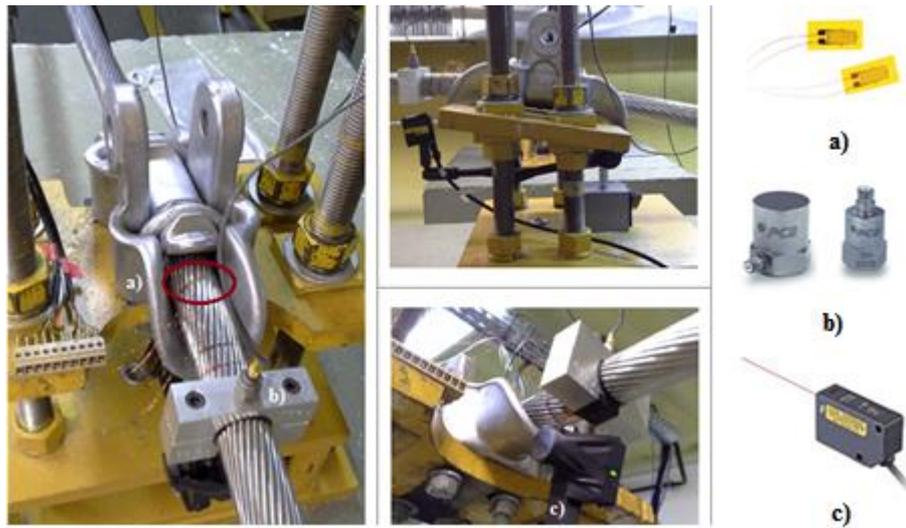


Figura 5.5 – Sensores utilizados próximos da montagem cabo/grampo em ensaios de fadiga: a) Extensômetros; b) Acelerômetros; c) Sensor óptico (*Laser*).

5.3.2 Monitoramento da quebra de fios

A forma construtiva dos cabos, fios enrolados helicoidalmente em camadas concêntricas e opostas, faz com que o cabo gire em torno do seu eixo quando um fio se rompe para que se reestabeleça o equilíbrio. Para detectar tal movimento, um dispositivo é instalado no primeiro nó de vibração, este aparato é constituído de duas réguas metálicas e uma braçadeira para a fixação com o cabo. Dois sensores *laser* apontam para as réguas e detectam o movimento de rotação quando há o deslocamento simultâneo das réguas em igual amplitude e em sentidos opostos, depois é feita a conversão dos deslocamentos em ângulo de rotação para facilitar o monitoramento.

$$\alpha = \arctg \left[\frac{(l_1 - l_2)}{200} \right] \quad (5.1)$$

Os parâmetros descritos na fórmula são indicados pela figura abaixo:

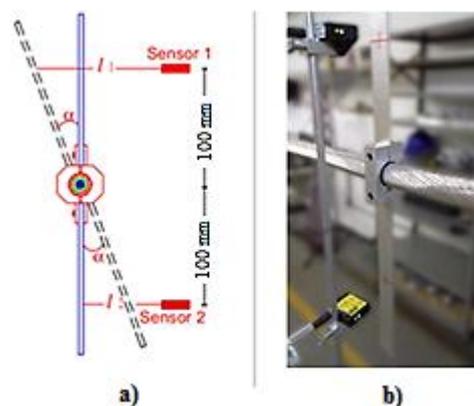
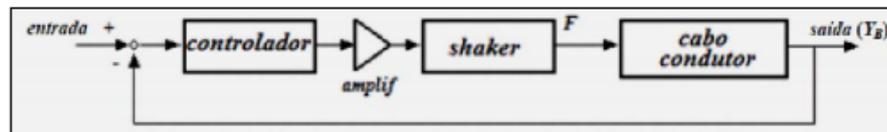


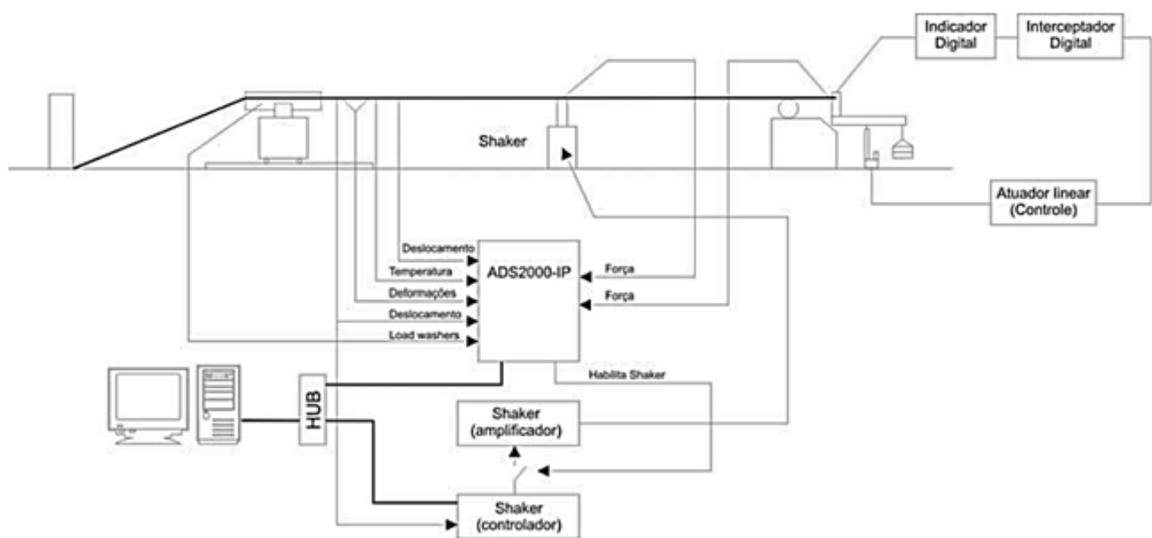
Figura 5.6 – Dispositivo de detecção da quebra dos fios: a) Ilustração esquemática (FADEL, 2010) ; b) Dispositivo operando na bancada.

5.3.3 Controle do *shaker*

Os sinais dos diversos sensores instalados na bancada são transmitidos ao aquisitor de dados ADS 2000 e ao controlador que repassa as informações aos computadores. O *software* de controle do *shaker* verifica se os sinais estão perto dos valores prescritos para deslocamento Y_b e para a frequência do ensaio, emitindo outros sinais como resposta que são amplificados para o controle do *shaker* na realização de modificações necessárias de força, velocidade e deslocamento, a finalidade de tais modificações é manter a vibração do cabo dentro dos valores especificados para o ensaio. A figura abaixo ilustra o processo de controle e aquisição de dados na bancada de testes:



a)



b)

Figura 5.7 – Diagramas esquemáticos de funcionamento da bancada: a) Processo de controle do *shaker* (FADEL, 2010); b) Aquisição de todos sinais possíveis na bancada e ilustração do processo de controle do *shaker* (HENRIQUES, 2006).

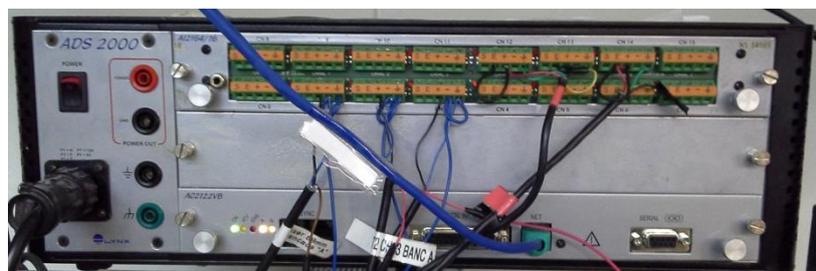


Figura 5.8 – Aquisitor de dados ADS 2000.



Figura 5.9 – Controlador LDS LASER USB da empresa Brüel & Kjaer.

Antes de cada ensaio, executa-se um procedimento de varredura (*sweep*) das frequências naturais do cabo instalado no vão do laboratório. O comando da varredura é feito por um *software* que coloca o *shaker* para vibrar em várias frequências dentro de uma faixa estabelecida pelo usuário, tipicamente, a faixa de frequências escolhida fica entre 18 e 35 Hz para facilitar a estabilização do ensaio (FADEL *et al*, 2011). Neste procedimento, o software cria uma função de transferência que relaciona o deslocamento Y_b no ponto 89 com o deslocamento no ponto de excitação do *shaker*, que também é medido por um acelerômetro (Fig. 5.10). Após a função de transferência ser definida, torna-se possível identificar as frequências que geram maiores deslocamentos ou acelerações (frequências naturais) e torna-se possível controlar o deslocamento do Ponto 89 em um valor definido para o ensaio com a excitação do *shaker*.



Figura 5.10 – Acelerômetro no ponto de excitação do *shaker*.

5.3.4 Aspectos adicionais para o controle dos testes

Para garantir a estabilidade dos ensaios, a parte elétrica do laboratório foi reforçada por transformadores isoladores e também foi instalado um sistema de ar-condicionado central (Fig. 5.11) que mantém a temperatura em 20 ± 1 °C.



Figura 5.11 – Sistema de ar-condicionado central.

5.4 METODOLOGIA

Os ensaios com os vibrógrafos Pavica e Vibrec 500 WT foram conduzidos colocando o cabo para vibrar em três níveis de amplitude de flexão (Y_b) e em cada um destes níveis foram testadas quatro frequências de excitação, resultando em um total de 12 amostras de verificação para cada um dos dois ensaios executados. Nos ensaios, foram escolhidos valores de deslocamento pico-a-pico próximos ao valor médio medido pelas classes da matriz de dados dos vibrógrafos e foi dada preferência à escolha por níveis pequenos de amplitude de flexão, tendo em vista que as vibrações eólicas ocorrem normalmente a baixos níveis de tensão, outro motivo desta escolha foi a dificuldade de se estabilizar grandes deslocamentos em todas as frequências testadas. As frequências de teste foram escolhidas com base no processo de varredura (*sweep*), onde o critério de seleção foi a escolha de frequências consideravelmente espaçadas, porém dentro de uma faixa que possibilitasse a estabilização do *shaker*.

No *software* do controlador utilizado, foram definidos limites aceitáveis nos quais o deslocamento pico-a-pico no Ponto 89 poderia variar do valor prescrito para cada amostra de verificação. A tolerância de deslocamento imposta em cada amostra foi inferior aos intervalos das classes de amplitude de flexão registradas pelos vibrógrafos, esta medida foi tomada com o intuito de manter a vibração do *shaker* em um nível estável de deslocamento que servisse como parâmetro de comparação dos registros dos vibrógrafos. Caso a leitura de deslocamento medida pelo acelerômetro e monitorada pelo controlador do *shaker* ultrapassasse os limites definidos, a excitação do cabo parava e o teste era abortado.

Os vibrógrafos foram programados para iniciar e terminar a gravação de dados em horários pré-definidos (*automatic start-stop*), estes horários foram escolhidos para obter amostras com aproximadamente 1000 ciclos. Esta medida foi tomada para proporcionar um padrão de comparação mais adequado na análise das amostras com diferentes amplitudes e frequências, no entanto, houve certa variação no número total de ciclos obtido em cada amostra devido à quantidade de medições ativas realizadas pelos vibrógrafos durante os horários estabelecidos para a coleta de dados.

Na seção de resultados deste capítulo, as classes de amplitude (Y_b) e frequência nas quais os ciclos foram registrados pela matriz de dados em cada amostra serão apresentadas e comparadas com os valores esperados. Os valores esperados de amplitude de flexão referem-se aos deslocamentos definidos no controlador do *shaker* que monitora constantemente a leitura do acelerômetro piezoelétrico instalado no Ponto 89 e o número de ciclos esperado refere-se ao valor calculado (Eq. 2.2) com o uso da frequência de excitação do *shaker* e o tempo ativo total de medição registrado pelos vibrógrafos. Devido à natureza intermitente de gravação dos dados pelos vibrógrafos, esta forma indireta de obtenção do número de ciclos apresentou-se mais viável que a utilização de sensores *laser* durante o período total de gravação dos dados, que é caracterizado por períodos de atividade (registro de dados) e inatividade.

Além da comparação com os valores esperados, os resultados foram analisados de forma geral buscando identificar a influência da frequência e do nível de deslocamento na precisão e na exatidão das medições dos equipamentos. Histogramas, gráficos e algumas estatísticas foram calculados para proporcionar a análise quantitativa dos dados obtidos referentes ao número de ciclos registrados em cada classe de medição dos vibrógrafos. As estatísticas calculadas foram: A média, desvio padrão, tendência e erro relativo. Estes parâmetros são discutidos brevemente a seguir para que fique evidente o método empregado no tratamento de dados deste trabalho.

- **Média (\bar{x})**

A média é uma medida de posição que indica o valor em torno do qual os dados se concentram. A média de um conjunto de dados agrupados em classes é calculada realizando uma ponderação entre o ponto médio da classe (P_i) e o número de ocorrências na classe analisada (n_i), ou seja, soma-se o produto de S_i com n_i de todas as classes e em seguida divide-se o resultado pelo número total de ocorrências em todas as classes (n), conforme indica a Equação (5.2).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^q (P_i) n_i \quad (5.2)$$

Onde \bar{x} é o valor médio de uma grandeza arbitrária e q é o número total de classes. No trabalho, foi calculado um valor médio de amplitude de flexão em cada amostra para considerar as ocorrências de ciclos obtidas em mais de uma classe de deslocamento pico-a-pico.

- **Desvio padrão de um conjunto amostral (s)**

O desvio padrão é uma medida de dispersão que mostra a variação das indicações em torno da média amostral, o cálculo foi efetuado conforme mostra a Equação (5.3).

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^q n_i (P_i - \bar{x})^2} \quad (5.3)$$

O desvio padrão pode ser utilizado como um parâmetro indicativo da incerteza de um conjunto de medições, incerteza que em parte decorre dos efeitos aleatórios que interferem no sistema de medição.

- **Tendência (Td)**

Calculada pela diferença entre o valor médio das medições e o Valor Verdadeiro Convencional (VVC) atribuído à grandeza medida, que no caso dos ensaios, são os valores de amplitude de flexão e frequência definidos no controlador do *shaker*. A tendência fornece uma estimativa do erro sistemático do sistema de medição, componente de erro que está sempre presente em medições repetidas nas mesmas condições.

$$Td = \bar{x} - VVC \quad (5.4)$$

- **Erro relativo (Er)**

O erro relativo calculado neste trabalho (Eq. 5.5) é apenas um valor adimensional representativo do quanto a média das medições se afastou dos valores convencionais assumidos como verdadeiros. Uma discussão sobre a forma que estes valores devem ser interpretados é dada na Seção (5.8.5).

$$Er = \left| \frac{\bar{x} - VVC}{VVC} \right| \quad (5.5)$$

Os resultados serão discutidos e analisados após a apresentação dos parâmetros e materiais utilizados, dos detalhes envolvidos na montagem dos ensaios e dos procedimentos adotados.

5.5 PARÂMETROS E MATERIAIS

Segundo Henriques (2006), para realizar ensaios na bancada é necessário que se estabeleça inicialmente os seguintes parâmetros:

- 1) Carga de tração no cabo condutor;
- 2) Torque de aperto nos parafusos do grampo de suspensão;
- 3) Ângulo de mergulho do cabo condutor;
- 4) Amplitude de flexão (Y_b) do ensaio.

Cada um destes parâmetros será explicado a seguir em conjunto com os valores empregados e os materiais utilizados:

5.5.1 Carga de tração aplicada no cabo condutor

As linhas de transmissão são projetadas para manter o cabo tracionado a um nível médio específico de tensão mecânica diária (*Everyday Stress - EDS*), esta tensão é um importante parâmetro de projeto das linhas de transmissão, pois influencia no comportamento dinâmico e estático do cabo: Influencia nas frequências de ressonância estabelecidas, no autoamortecimento, nas tensões alternada e média desenvolvidas no condutor e determina a distância de segurança entre o solo e o cabo (FADEL *et al.*, 2011).

Conforme foi descrito em capítulos anteriores, a EDS é expressa em termos de uma porcentagem da resistência à ruptura do cabo. Tipicamente, as linhas de transmissão utilizam valores de EDS entre 15 a 20% da resistência à ruptura do condutor (FADEL *et al.*, 2011), portanto, optou-se por usar cargas de tração equivalentes a 20% da carga de ruptura dos condutores utilizados nos ensaios.

O ensaio com o Pavica foi executado com o cabo ACAR 750 cuja carga de ruptura é de 8635 kgf (84,680 kN) e o ensaio com o Vibrec 500 foi executado com o cabo CAL 900 que tem 13421 kgf (131,615 kN) de carga de ruptura, logo, a carga de tração utilizada no ensaio com o Pavica foi de 16,936 kN e a carga de tração usada no ensaio com o Vibrec foi de 26,323 kN. As tabelas (5.1) e (5.2) indicam em maiores detalhes as especificações técnicas dos cabos utilizados e as Figuras (5.12) e (5.13) ilustram a seção transversal de cada condutor para a identificação da constituição de cada camada do cabo:

Tabela 5.1 – Especificações técnicas do cabo ACAR 750 usado no ensaio com o vibrógrafo Pavica. (NEXANS, 2013).

Cabo condutor	Bitola (kcmil)	Encordoamento (nº de fios x diâmetro do fio)		Diâmetro nominal (mm)	Massa linear (kg/km)	Carga de Ruptura (kgf)
		Alumínio 1350 – H19	Liga de Alumínio 6201 – T81			
ACAR	750	18 x 3,617	19 x 3,617	25,32	1045,6	8635

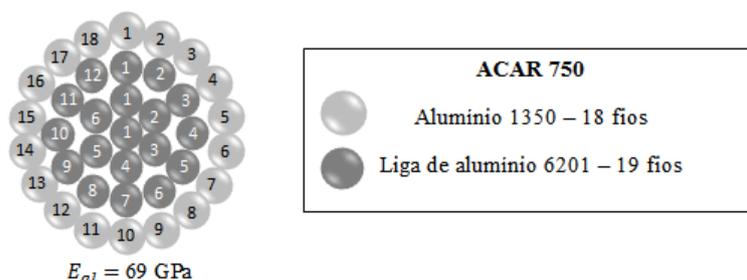


Figura 5.12 – Ilustração esquemática da seção transversal do cabo ACAR 750.

Tabela 5.2 – Especificações técnicas do cabo CAL 900 usado no ensaio com o vibrógrafo Vibrec. (NEXANS, 2013).

Cabo condutor	Bitola (kcmil)	Encordoamento (nº de fios x diâmetro do fio)	Diâmetro nominal (mm)	Massa linear (kg/km)	Carga de Ruptura (kgf)
		Liga de Alumínio 6201 – T81			
CAL	900	37 x 3,962	27,74	1251,90	13421

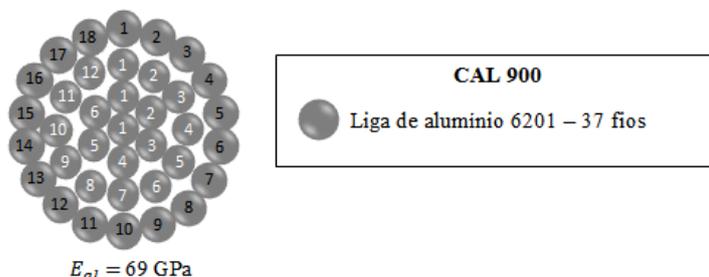


Figura 5.13 – Ilustração esquemática da seção transversal do cabo CAL 900.

5.5.2 Torque de aperto nos parafusos do grampo de suspensão

O torque de aperto dos parafusos do grampo de suspensão é especificado conforme o fabricante do grampo. O torque deve ter magnitude suficiente para evitar que haja deslizamento entre o cabo e o grampo, contudo, não deve ter magnitude alta ao ponto de gerar deformação plástica excessiva nos fios do cabo.

Nos ensaios, foram utilizados grampos de suspensão monoarticulados cedidos pela Forjasul, estes grampos são constituídos de liga de alumínio de elevada resistência mecânica que possuem torque de aperto especificado em 60 N.m. Entretanto, foi utilizado um torque de aperto de 50 N.m, pois observações relatadas por Hortêncio (2009) e Fadel (2010) indicam que um torque desta magnitude é mais apropriado por causar menor amassamento dos fios do condutor.

Nos ensaios com o vibrógrafo Pavica e Vibrec, foram utilizados grampos de suspensão de modelo 55101/003 que acomodam cabos de diâmetro entre 17 e 29 mm. As dimensões e especificações do tipo de grampo utilizado encontram-se indicadas na Figura (5.14) e na Tabela (5.2).

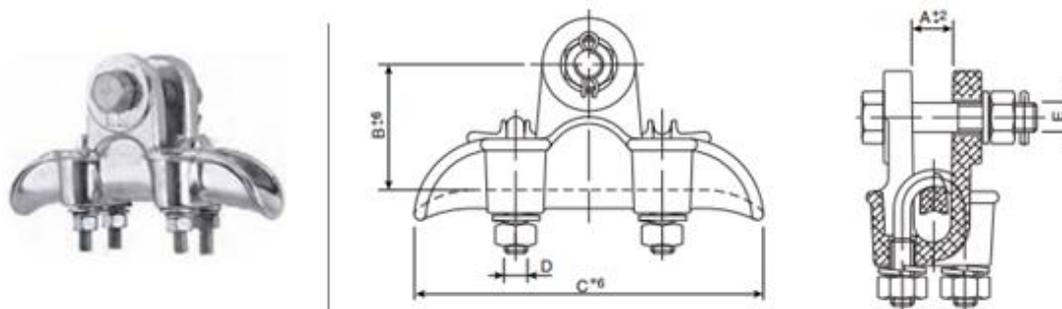


Figura 5.14 – Desenho esquemático do modelo de grampo de suspensão utilizado (FORJASUL, 2013).

Tabela 5.3 – Especificações dos grampos de suspensão utilizados (FORJASUL, 2013).

Designação	Faixa de acomodação (mm)	Carga de Ruptura (kgf)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)	Massa (kg)
55101/003	17-29	7,000	34	67	200	½”	5/8”	1,280

5.5.3 Ângulo de mergulho do cabo condutor

O ângulo de inclinação do grampo de suspensão, que pode ser verificado na Figura (5.5), simula o efeito da flecha ou do “mergulho” feito pelo condutor quando é conectado entre duas torres de transmissão. Os grampos de suspensão utilizados possuem extremidades arredondadas (boca do grampo) que permitem a saída do cabo em um ângulo de até 20° sem danificá-lo. Nos ensaios, foi utilizado um ângulo de mergulho de 10°, valor tipicamente empregado no laboratório e inferior ao valor máximo admissível pelo grampo.

5.5.4 Amplitudes de flexão utilizadas nos ensaios

As amplitudes de flexão (Y_b) escolhidas para os ensaios foram de 143 μm , 250 μm e 350 μm . Conforme foi mencionado anteriormente, os deslocamentos pico-a-pico testados representam baixos níveis de vibração, condição que geralmente é encontrada em campo devido à vibração eólica. Para tornar mais claro o impacto que os deslocamentos testados representam na fadiga de cabos condutores, as tensões e deformações geradas pelos três níveis de amplitude de flexão testados nos ensaios foram calculadas e são apresentadas nas Tabelas (5.4) e (5.5). Os valores dispostos nestas tabelas foram calculados por meio da aplicação da equação de Poffenberger-Swart (Eq. 3.5) em conjunto com as cargas de tração utilizadas e com as especificações dos cabos condutores (Tab. 5.1 e Tab. 5.2), dessa forma, o resultado encontrado para a constante da equação P-S (Eq. 3.6) foi de 31,12 N/mm^3 para o cabo ACAR 750 e 34,83 N/mm^3 para o cabo CAL 900.

Tabela 5.4 – Deformações e tensões gerados pelas amplitudes de flexão pico-a-pico testadas no cabo ACAR 750 utilizado no ensaio com o vibrógrafo Pavica.

Amplitude de flexão - Y_b (μm)	Deformação 0-pico (<i>microstrain</i>)	Tensão 0-pico (MPa)
143	64,50	4,45
250	112,77	7,78
350	157,87	10,89

Tabela 5.5 – Deformações e tensões gerados pelas amplitudes de flexão pico-a-pico testadas no cabo CAL 900 utilizado no ensaio com o vibrógrafo Vibrec.

Amplitude de flexão - Y_b (μm)	Deformação 0-pico (<i>microstrain</i>)	Tensão 0-pico (MPa)
143	72,18	4,98
250	126,18	8,71
350	176,65	12,19

Tendo em vista que o EPRI recomenda um limite de resistência de 5,7 MPa para cabos constituídos com liga de alumínio 6201 e um limite de 8,5 MPa para cabos multicamadas de alumínio 1350, pode-se inferir que foram testados deslocamentos representativos de um nível baixo, intermediário e alto de amplitude, considerando-se uma faixa em que seria desejável controlar as vibrações eólicas para evitar possíveis efeitos severos de fadiga.

Em relação às classes de deslocamento estipuladas na matriz de dados, o vibrógrafo Pavica possibilita a escolha entre quatro padrões de escala, no caso, foi escolhido o padrão com maior fundo de escala caracterizado por classes com intervalos⁶ de 26 μm . O Vibrec, por sua vez, vem de fábrica com classes de deslocamento de 62 μm , no entanto, há possibilidade de alterar livremente os limites de cada classe. Visando produzir um padrão de comparação entre os resultados obtidos nos dois ensaios, as classes de deslocamento do Vibrec foram alteradas para se assemelhar à matriz de dados do Pavica, não foi possível coincidir os limites superiores e inferiores de todas as classes devido a uma questão de conversão digital em que é aceita apenas uma quantidade discreta de valores dentro de um intervalo definido, então o vibrógrafo manipula os valores para números próximos ao especificado.

A utilização de matrizes semelhantes nos ensaios possibilitou a repetição das mesmas amplitudes de flexão testadas. Outra característica envolvida na escolha destes deslocamentos é a posição relativa situada aproximadamente na metade das classes da matriz de dados, o que teoricamente aumenta a probabilidade de ocorrerem ciclos em uma única classe de amplitude de flexão da matriz.

5.5.5 Frequências de teste utilizadas nos ensaios (discussão)

A partir do processo de varredura realizado nos cabos ACAR 750 e CAL 900, foram escolhidas as quatro frequências de teste usadas em cada ensaio. As frequências selecionadas apresentam uma diferença de aproximadamente 10 Hz, o que corresponde a quase 4 frequências naturais de afastamento entre os valores testados, este comportamento ocorreu com os dois cabos e é exemplificado pelo gráfico de varredura (deslocamento em função da frequência) do cabo CAL 900 indicado na Figura (5.15).

⁶ Por uma questão de conversão digital interna inerente aos equipamentos, nem todas as classes da matriz de dados são uniformes, porém a variação no intervalo de cada classe é bastante reduzida (cerca de 1 a 2 μm).

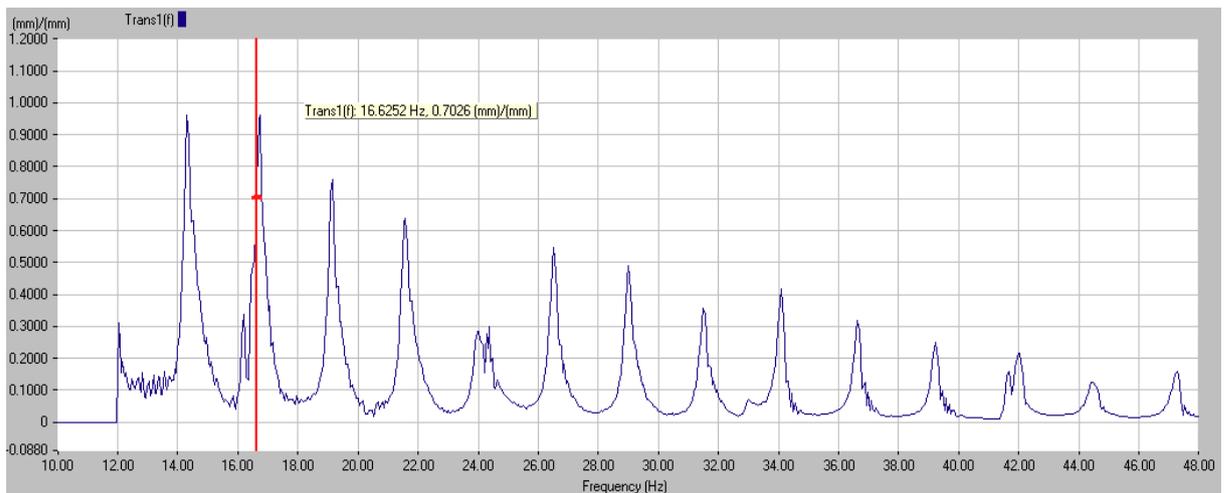


Figura 5.15 – Gráfico de varredura do cabo CAL 900 (utilizado no ensaio com o Vibrec): Gráfico fornecido pelo *software* de controle do *shaker* na varredura de frequências de 12 a 48 Hz.

Os valores das frequências utilizadas em cada amostra são discriminados na seção seguinte. Cabe a discussão que os valores testados compreendem a uma faixa em que torna factível a estabilização do *shaker* e também correspondem a valores nos quais se espera a ocorrência das vibrações eólicas para os cabos testados, os quais possuem uma bitola representativa de um conjunto de condutores amplamente empregados nas linhas de transmissão brasileiras. Segundo o IEEE *std.* 1368 - *Guide for Aeolian Vibration Field Measurements of Overhead Conductors* (2006), as frequências esperadas para vibração eólica ocorrem normalmente devido à ação de ventos com velocidade de 1 a 7 m/s. Utilizando a Equação (3.3) com o diâmetro de 25,32 mm do cabo ACAR 750 (conductor de menor bitola) e a velocidade do vento de 7 m/s, encontra-se que seriam esperadas frequências de até 51,15 Hz, faixa que é bem compreendida pelos valores testados.

5.5.6 Conjunto de amostras

Resumidamente, o conjunto das 12 amostras de verificação utilizadas nos ensaios, as quais se referem à combinação entre as três amplitudes de flexão e as quatro frequências testadas, encontram-se especificadas na Tabela (5.6) para o ensaio com o Pavica e na Tabela (5.7) para o ensaio com o Vibrec:

Tabela 5.6 – Combinações de amplitude e frequência utilizadas em cada amostra de verificação no ensaio com o vibrógrafo Pavica.

Número da amostra de verificação	Amplitude de flexão - Y_b (pico-a-pico) (μm)	Frequência (Hz)
1	143	14,15
2		24,57
3		33,23
4		44,59
5	250	14,15
6		24,57
7		33,23
8		44,59
9	350	14,15
10		24,57
11		33,23
12		43,28

Tabela 5.7 – Combinações de amplitude e frequência utilizadas em cada amostra de verificação no ensaio com o vibrógrafo Vibrec 500 WT.

Número da amostra de verificação	Amplitude de flexão - Y_b (pico-a-pico) (μm)	Frequência ⁷ (Hz)
1	143	16,72
2		26,48
3		36,52
4		46,97
5	250	16,72
6		26,32
7		36,52
8		46,97
9	350	16,72
10		26,32
11		36,52
12		46,97

⁷ Em algumas amostras não foi possível estabilizar exatamente o mesmo nível de frequência em virtude das ligeiras modificações que ocorrem nas frequências naturais durante a realização do ensaio, estas modificações acontecem principalmente devido às alterações na carga de tração causadas por variações na temperatura (efeito da dilatação).

No ensaio com o Pavica, o tempo ativo de gravação de dados foi de 10 segundos e o período entre duas gravações consecutivas foi de 1 minuto, exceto para as amostras de maior frequência (amostras 4, 8 e 12), nas quais foram realizadas gravações de 12 segundos a cada 1 minuto.

No ensaio com o Vibrec, utilizou-se 5 segundos de tempo ativo e 30 s de período entre duas gravações consecutivas, resultando em uma taxa de registros de dados de 10 s/ min. A escolha por utilizar 5 segundos de tempo ativo ocorreu em virtude do interesse de realizar gravações temporais da amplitude durante todo tempo ativo, estas gravações apresentam um limite de duração de 5 segundos. Um exemplo deste tipo de gravação (tirado da amostra 9) é fornecido no Anexo II.

5.6 DETALHES ESPECÍFICOS DA MONTAGEM DOS ENSAIOS

Nesta seção, são descritos separadamente os detalhes específicos da montagem dos ensaios com os vibrógrafos Pavica e Vibrec.

5.6.1 Adaptação e montagem do ensaio com o vibrógrafo Pavica

Foi necessário utilizar uma braçadeira adaptada para fixar o Pavica no cabo, pois as braçadeiras que vieram de fábrica com o equipamento possuíam diâmetros inferiores às bitolas dos cabos testados no momento pelo laboratório e como se trata de um equipamento que saiu de linha, não foi possível obter do fabricante uma nova braçadeira de dimensões apropriadas.

A braçadeira utilizada no ensaio foi fabricada de alumínio em um modelo construtivo mais simples que a original, no entanto, as principais dimensões da braçadeira de fábrica foram preservadas (Fig. 5.16) para que a adaptação influenciasse o mínimo possível nas medições, ou seja, para que o sensor não perdesse contato com o cabo e para que a localização do Ponto 89, que é referenciada a partir da face da braçadeira até o UPC (Fig. 4.3), não fosse prejudicada.



Figura 5.16 – Dimensões da braçadeira original preservadas para garantir: a) O permanente contato do sensor com o cabo; b) Referência na localização do Ponto 89.

Outro detalhe de montagem do vibrógrafo foi o posicionamento ligeiramente afastado do Ponto 89, medida adotada para possibilitar a colagem de extensômetros e para evitar que a roldana do sensor entrasse em contato com a telha (tampa) do grampo. A instalação do Pavica afastado do Ponto 89 (instalação com *offset*) é prevista no manual do fabricante, conforme foi apresentado na Seção (4.2) deste trabalho. A instalação com *offset* não compromete a conversão (Eq. 4.1) da amplitude de flexão inversa registrada pelo equipamento em amplitude de flexão padrão medida no Ponto 89 desde que seja informada a distância de *offset* no *software* do vibrógrafo, que no caso do ensaio realizado, foi de 11 mm, conforme mostra a Figura (5.17). Por meio desta mesma figura, nota-se que o acelerômetro permaneceu no Ponto 89 para possibilitar a comparação das medidas de amplitude de flexão convertidas pelo Pavica.

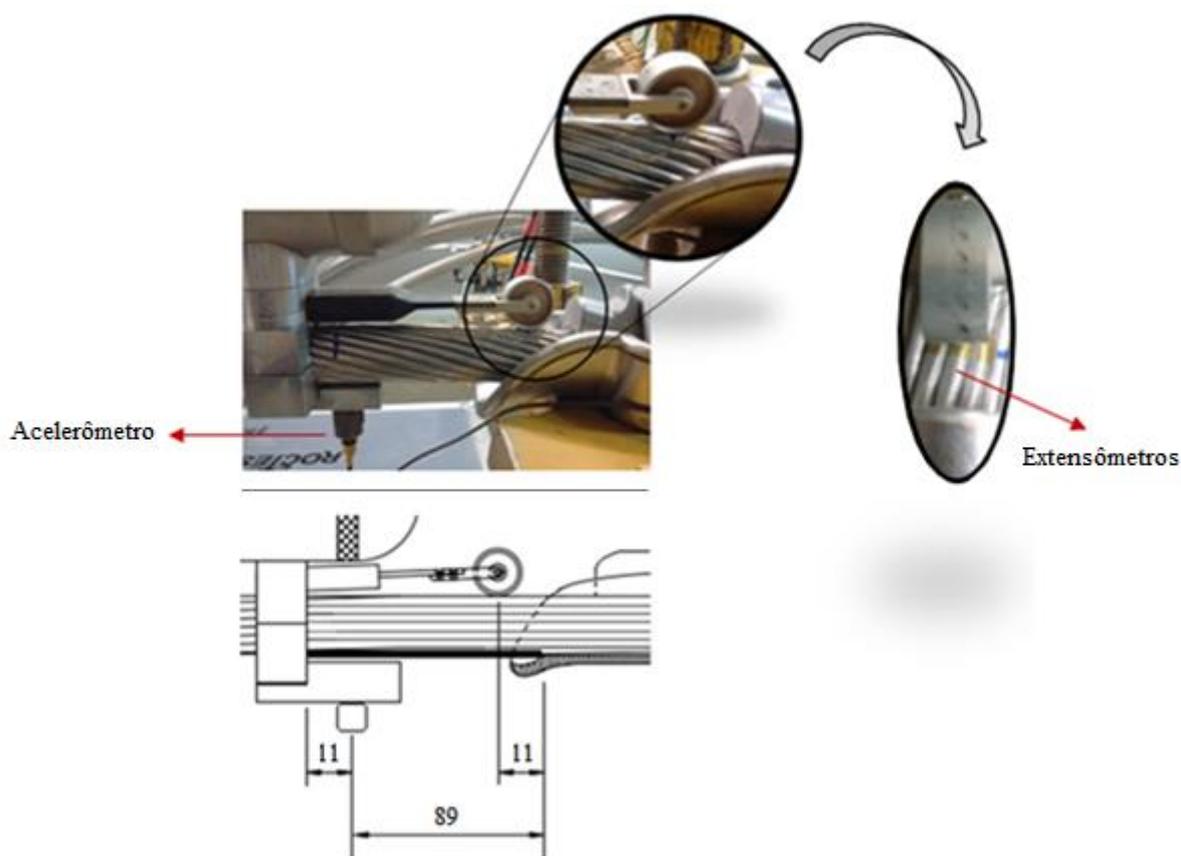


Figura 5.17 – Instalação com *offset* utilizada no ensaio com o vibrógrafo Pavica.

A Figura (5.18) mostra mais detalhadamente os três extensômetros colados nos fios superiores do cabo condutor e a Figura (5.19) mostra o vibrógrafo sem uma das tampa de cobertura, evidenciando os circuitos e o local no qual é inserido o cabo RS232 para a comunicação do equipamento com o computador.



Figura 5.18 – Extensômetros colados nos fios de topo do cabo condutor no ensaio com o Pavica.



Figura 5.19 – Detalhes construtivos internos do equipamento sem uma das tampas de cobertura.

5.6.2 Adaptação e montagem do ensaio com o vibrógrafo Vibrec 500 WT

O Vibrec 500 é instalado abaixo do grampo de suspensão, local em que há uma grande limitação de espaço nas bancadas, conforme pode ser verificado na Figura (5.2). Portanto, foi necessário projetar um suporte para a fixação do equipamento. A dificuldade técnica envolvida na construção de tal suporte consiste no correto posicionamento do sensor que apresenta uma faixa de leitura de apenas 2 mm. A faixa de leitura fica localizada na metade do curso total do sensor que é de 10 mm, então é necessário estabelecer um contato inicial do sensor com o cabo e pressionar mais 5 mm para garantir o posicionamento e o permanente contato do sensor com o cabo durante o movimento de vibração.

O ensaio com o Vibrec somente prosseguiu quando se obteve um posicionamento válido do sensor, esta posição foi conferida no *software* de utilização do equipamento (Fig. 5.20) e foi monitorada durante todos os dias do ensaio. Como a posição do sensor LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) não apresentou alterações no decorrer do ensaio, então pode-se considerar que o suporte estabeleceu uma fixação estável do equipamento.

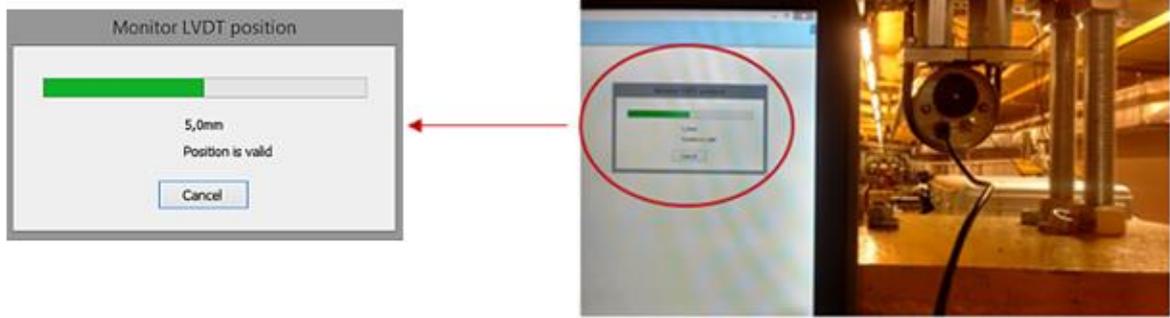


Figura 5.20 – Verificação da posição do sensor no *software* (LIFE 500) do equipamento.

A Figura (5.21) ilustra o estudo realizado para encontrar as dimensões do suporte necessárias para a instalação adequada do equipamento na bancada e a Figura (5.22) mostra o Vibrec montado e operando após a fabricação do suporte.

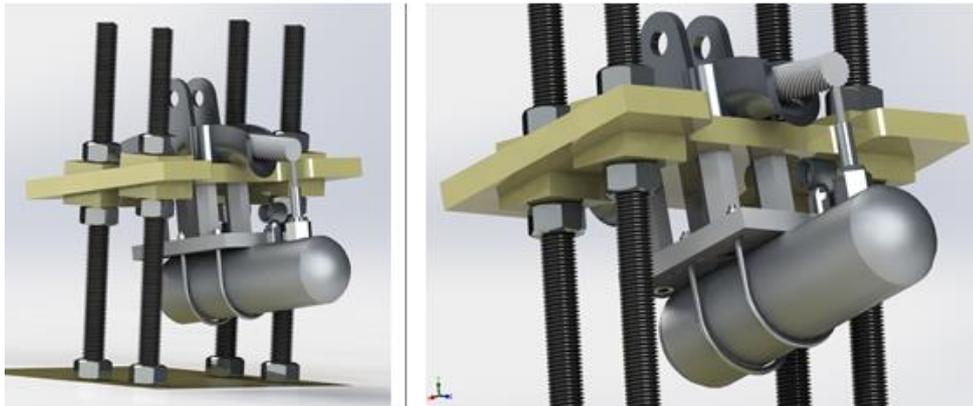


Figura 5.21 – Desenho ilustrativo do suporte projetado para o Vibrec.



Figura 5.22 – Resultado final da adaptação e montagem do Vibrec.

A Figura (5.23) mostra a localização do Ponto 89 (linha marcada em preto) feita com a lâmina de posicionamento fornecida junto com o equipamento.



Figura 5.23 – Localização do Ponto 89: a) Posição do Ponto 89 marcada de caneta com uma linha; b) Ilustração do dispositivo de posicionamento do equipamento.

A Figura (5.24) mostra o alinhamento entre o acelerômetro e o sensor do Vibrec e a Figura (5.25) mostra o alinhamento de ambos os sensores com a direção vertical. Por fim, a Figura (5.26) mostra os três extensômetros colados nos fios superiores do cabo.



Figura 5.24 – Alinhamento dos sensores com o Ponto 89.

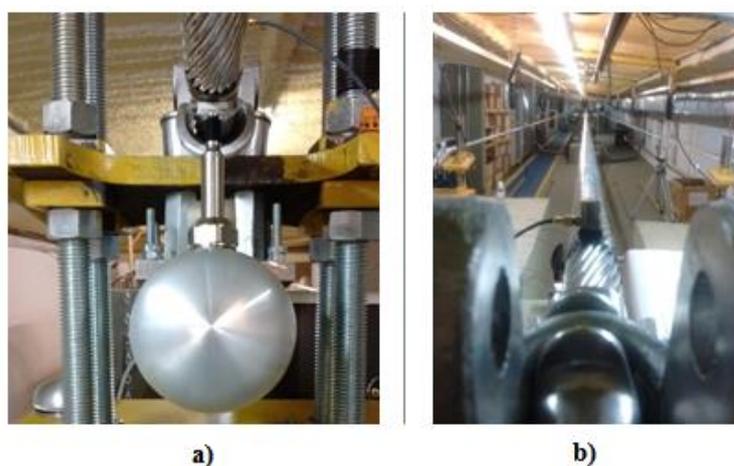


Figura 5.25 – Alinhamento vertical dos sensores: a) Sensor do Vibrec; b) Acelerômetro.

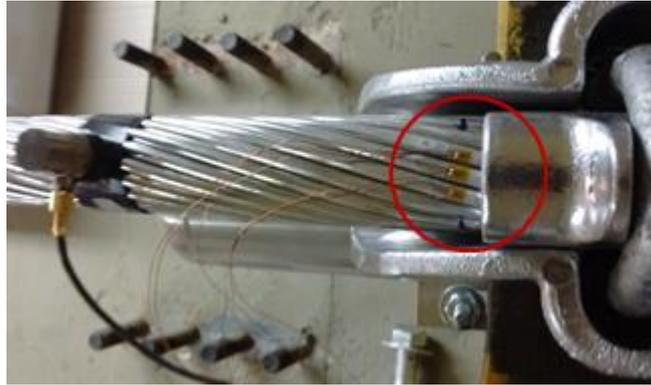


Figura 5.26 – Extensômetros colados no ensaio com o Vibrec.

5.7 PROCEDIMENTOS REALIZADOS NA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

Os procedimentos realizados na execução dos ensaios experimentais envolveram as etapas de montagem do cabo/grampo, extensometria, excitação do cabo e registro das medições com os vibrógrafos. A seguir, são listados os passos básicos executados na realização dos ensaios:

- **Procedimentos envolvidos na montagem do cabo/grampo:**

- 1) Fixar polias de suporte do cabo não tracionado ao longo do vão;
- 2) Desenrolar o cabo da bobina o posicionando sobre as polias de suporte presas no teto do vão;
- 3) Prender a extremidade do cabo no grampo de ancoragem que fica próximo ao bloco fixo 3. Este grampo também deve ser ligado à célula de carga e ao braço de alavanca;
- 4) Posicionar o cabo no grampo de suspensão localizado sobre o bloco móvel. Neste momento, os parafusos do grampo devem ser colocados, mas não devem ser apertadas as porcas dos parafusos;
- 5) Prender a extremidade do cabo no grampo de ancoragem próximo ao bloco fixo 1. Neste momento, o grampo de ancoragem também deve ser fixado na talha de alavanca, que por sua vez, se prende ao bloco fixo 1;
- 6) Esticar inicialmente o cabo usando a talha de alavanca até atingir aproximadamente o valor da EDS especificada para o ensaio, o monitoramento é feito por um visor digital que informa a medição da célula de carga;
- 7) Carregar o braço de alavanca na outra extremidade com os pesos até ultrapassar ligeiramente a EDS, este valor é usado para acomodar a tensão de tração de forma mais rápida com o intuito de evitar grandes variações na EDS ao longo do comprimento do cabo e durante o ensaio;
- 8) Após o cabo ser tracionado, as polias de suporte devem ser retiradas;
- 9) Esperar até o outro dia para dar tempo de acomodação da carga de tração;
- 10) Após o período de acomodação, retira-se a carga excedente no braço de alavanca, monitorando por um visor digital o momento no qual a leitura da célula de carga atinge a EDS;

- 11) Fechar a montagem cabo/grampo de suspensão usando o torque de aperto indicado para o grampo (50 N.m);
- 12) Fixar o *shaker* no cabo usando o dispositivo de alinhamento que evita a transmissão de cargas tangenciais ao *shaker*. Na montagem, deve-se conectar também o acelerômetro que mede o deslocamento no ponto de excitação do *shaker*.

- **Procedimentos de extensometria:**

- 1) Marcar com caneta a linha de posicionamento do UPC, mas a caneta não deve ser passada nos fios em que os extensômetros serão colados. A linha de posicionamento do UPC é localizada por meio de um gabarito flexível que envolve o cabo e é enfiado no espaço existente entre o condutor e o grampo até atingir o UPC;
- 2) Lixar as superfícies dos três fios de topo com uma lixa fina e depois com uma lixa grossa;
- 3) Limpar as superfícies dos fios com álcool isopropílico removendo qualquer impureza;
- 4) Conferir a resistência dos extensômetros com multímetro para verificar se eles não estão danificados ou se estão funcionando conforme as especificações do fabricante;
- 5) Colar os extensômetros em uma fita adesiva especial, observando que os contatos do extensômetro (local onde os fios são soldados) devem estar voltados para a fita e a superfície oposta (parte lisa) do extensômetro deve estar livre para ser colada no fio do cabo;
- 6) Passar cola especial nos pontos dos fios do cabo onde os extensômetros serão colados, observando o alinhamento com a marca de localização do UPC;
- 7) Pressionar os extensômetros nos pontos com cola. Deve ser tomado cuidado para não danificar os extensômetros, recomenda-se utilizar um pedaço de silicone para pressionar os extensômetros;
- 8) Esperar a cola secar para que a fita adesiva possa ser removida;
- 9) Conferir novamente a resistência dos extensômetros para garantir que eles não foram danificados no processo;
- 10) Ligar os fios dos extensômetros aos conectores que levam as informações ao ADS 2000;
- 11) Realizar os procedimentos de balanceamento e calibração dos extensômetros com o programa AqDados no momento que o cabo está em repouso;
- 12) Realizar as medições quando o cabo estiver vibrando de forma estável no deslocamento (amplitude de flexão) estabelecido para a amostra do ensaio;
- 13) Resgatar os dados gravados pelo AqDados por meio do programa AqDAnalysis.

- **Procedimentos realizados para obtenção das medições com os vibrógrafos:**

- 1) Montar o vibrógrafo na bancada e conectar o acelerômetro do Ponto 89;
- 2) Fazer a varredura das frequências naturais do cabo utilizando o *software* do controlador do *shaker*;
- 3) Escolher uma das frequências verificadas na varredura e uma amplitude de flexão para excitar o *shaker* por meio do controlador;
- 4) Esperar a estabilização da vibração do cabo pelo *shaker*;
- 5) Fazer a comunicação entre o vibrógrafo e o computador (via cabo RS232, no caso do Pavica e via cabo USB, no caso do Vibrec);
- 6) Programar o equipamento: Escolher os horários de início e término das gravações, assim como os tempos ativo e de espera das medições. O tempo programado para o vibrógrafo permanecer realizando as medições foi definido com base na frequência de excitação do cabo e na taxa de gravação estabelecida para que se obtivesse aproximadamente 1000 ciclos em cada amostra;
- 7) Esperar o término do horário programado para o fim das medições do vibrógrafo e interromper a excitação do *shaker*;
- 8) Resgatar os valores registrados na matriz Amplitude – Frequência (conexão do vibrógrafo o com computador) e limpar a memória do equipamento;
- 9) Repetir os passos de 3 a 8 até serem obtidos os registros de todas as 12 amostras utilizadas na análise de cada vibrógrafo.

5.8 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES COM OS VIBRÓGRAFOS

Nesta seção, os resultados obtidos nas medições com os dois vibrógrafos serão expostos em quatro subseções. Na primeira subseção, será analisada a quantidade total de ciclos obtida em cada amostra e a classe de frequência na qual os ciclos foram categorizados. Nas outras três subseções, serão analisadas as classes de amplitude de flexão em que os ciclos foram contabilizados.

A análise da amplitude de flexão registrada será feita de forma separada para os deslocamentos testados (143 μm , 250 μm e 350 μm), apresentando-se primeiro os resultados obtidos com o Pavica, em seguida os resultados obtidos com o Vibrec e depois é feita uma breve discussão do conjunto de dados encontrado ao mesmo nível de deslocamento. Uma discussão mais completa é dada no final da seção para apontar as principais conclusões relativas à precisão e exatidão das medições realizadas com os vibrógrafos e a influência da frequência e do nível de amplitude de flexão nestas propriedades.

5.8.1 Resultados obtidos em relação ao número de ciclos contabilizados

As tabelas a seguir fornecem uma comparação entre o número de ciclos esperados e o número total de ciclos contabilizado em cada amostra. O número de ciclos esperados pode ser calculado (Eq. 2.2) com o uso da frequência de teste estabelecida no controlador do *shaker* e com o tempo ativo total das medições, que depende da taxa de gravação programada no vibrógrafo e do tempo total em que o equipamento permaneceu realizando as medições. A Tabela (5.8) refere-se aos dados obtidos no ensaio com o vibrógrafo Pavica e a Tabela (5.9) refere-se aos dados obtidos com o Vibrec.

Tabela 5.8 – Comparação da faixa de frequência e do número total de ciclos obtido em cada amostra do ensaio com o Pavica.

Amostra	Frequência de teste (Hz)	Tempo ativo total das medições (s)	Número total de ciclos contabilizados	Número de ciclos esperados	Erro relativo (%)	Faixa de frequência em que os ciclos foram contabilizados (Hz)
1	14,15	70	994	991	≈ 0,00	14 f 15
2	24,57	40	984	983	0,10	24 f 25
3	33,23	30	999	997	0,20	32 f 33
4	44,59	24	1070	1070	0,00	44 f 45
5	14,15	70	994	991	0,30	14 f 15
6	24,57	40	984	983	0,10	24 f 25
7	33,23	30	999	997	0,20	32 f 33
8	44,59	24	1070	1070	0,00	44 f 45
9	14,15	70	994	991	0,30	14 f 15
10	24,57	40	984	983	0,10	24 f 25
11	33,23	30	999	997	0,20	32 f 33
12	43,28	24	1038	1039	0,10	42 f 43

Tabela 5.9 – Comparação da faixa de frequência e do número total de ciclos obtido em cada amostra do ensaio com o Vibrec.

Amostra	Frequência de teste (Hz)	Tempo ativo total das medições (s)	Número total de ciclos contabilizados	Número de ciclos esperados	Erro relativo (%)	Faixa de frequência em que a maioria dos ciclos foi contabilizada (Hz)
1	16,72	60	993	1003	1,00	15 f 20
2	26,48	35	921	927	0,65	24 f 29
3	36,52	35	1272	1278	0,47	35 f 39
4	46,97	15	702	705	0,43	44 f 50
5	16,72	60	993	1003	1,00	15 f 20
6	26,32	40	1049	1053	0,38	24 f 29
7	36,52	35	1273	1278	0,39	35 f 39
8	46,97	20	937	939	0,21	39 f 44
9	16,72	65	1078	1087	0,83	15 f 20
10	26,32	45	1178	1184	0,51	24 f 29
11	36,52	30	1092	1096	0,36	35 f 39
12	46,97	25	1170	1174	0,34	39 f 44

Pode ser observado nas Tabelas (5.8) e (5.9) que houve um erro praticamente desprezível em relação ao número de ciclos contato e ao número esperado, entretanto, o erro obtido com o vibrógrafo Vibrec foi um pouco superior ao do Pavica e atingiu valores maiores (até 1%) nas frequências de menor nível (16,72 Hz) e no conjunto de amostras com menor deslocamento (143 µm).

A última coluna da Tabela (5.9) mostra apenas a classe de frequência em que houve a maior ocorrência de ciclos, pois em algumas amostras do Vibrec foi verificado que alguns ciclos eram categorizados em classes adjacentes à classe teoricamente correta, contudo, a quantidade de ciclos contabilizada nestas classes dispersas representa apenas uma pequena parcela das ocorrências. Esta situação de dispersão em relação às classes de frequência não foi observada nas amostras do vibrógrafo Pavica que ainda tinha classes de frequência com intervalos inferiores às classes⁸ do Vibrec.

Ainda deve ser advertido que o manual do Vibrec 500 WT informa que o vibrógrafo armazena na matriz de dados o número de meios ciclos (isto é, o número de reversões), mas converte os dados em número de ciclos completos no *software* do equipamento. No laboratório, foi verificado que a conversão não foi feita de forma automática pelo *software* e na matriz eram expostos os números de reversões (meios ciclos). Esta situação pode gerar interpretações incorretas dos dados caso o usuário do equipamento utilize diretamente os valores da matriz para analisar os dados, no entanto, foi verificado que o tempo de vida calculado pelo *software* do equipamento é realizado de forma correta

⁸ Os limites das classes de frequência que vieram de fábrica com o Vibrec não foram alterados porque a análise da quantidade de ciclos contada já proporciona um parâmetro de comparação.

(com o uso do número de ciclos completos) e não há prejuízo na análise dos dados. Como o problema limita-se apenas a uma descrição incorreta no manual, os valores apresentados neste trabalho foram convertidos em número de ciclos completos e foram arredondados para expressar o valor apenas em número inteiros.

Como o erro obtido nos dois ensaios foi muito baixo, pode-se concluir que os vibrógrafos contam e classificam os ciclos em faixas de frequências corretas, porém, o Pavica apresentou-se um pouco mais exato e mais preciso que o Vibrec neste aspecto. Entretanto, é importante ressaltar que os testes foram conduzidos utilizando um sinal senoidal simples de amplitude constante, situação distinta da vibração encontrada em campo que segue o formato de batimento.

5.8.2 Resultados obtidos sobre a amplitude de flexão – Amostras de 143 μm

Embora a maioria das amostras tenha sido categorizada em classes de frequência corretas, o mesmo não ocorreu para as classes de amplitude de flexão (Y_b) e ainda houve algumas amostras que apresentaram uma dispersão nas classes de deslocamento. Para apresentar tais informações, as linhas das Tabelas (5.10) e (5.12) mostram a quantidade de ciclos observada em cada classe de deslocamento da matriz dos vibrógrafos e as colunas destas tabelas indicam a frequência de teste utilizada, que por sua vez, caracteriza uma amostra diferente dentro do conjunto de amostras efetuadas com o mesmo deslocamento, no caso, 143 μm . As Tabelas (5.11) e (5.13) apresentam algumas estatísticas calculadas para o conjunto de dados obtido nos ensaios com os vibrógrafos Pavica e Vibrec.

- **Resultados - Ensaio Pavica:**

Tabela 5.10 – Dados referentes ao ensaio com o Pavica no nível de amplitude de 143 μm : Indicação da quantidade de ciclos obtida em cada amostra e em cada classe de amplitude de flexão.

Classes de amplitude - Y_b (μm)	Frequência de teste (Hz)				
	14,15 (amostra 1)	24,57 (amostra 2)	33,23 (amostra 3)	44,59 (amostra 4)	Total
78 f 104	39 (3,92%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	39 (0,96%)
104 f 131	952 (95,77%)	925 (94,00%)	954 (95,50%)	1070 (100%)	3901 (96,39%)
131 f 157	3 (0,30%)	59 (6,00%)	45 (4,50%)	0 (0%)	107 (2,64%)
Total	994	984	999	1070	4047

Tabela 5.11 – Estatísticas calculadas a partir dos dados referentes ao ensaio com o Pavica no nível de amplitude de 143 μm .

Estatísticas	Amostras			
	1	2	3	4
Amplitude média (μm)	116,54	119,09	118,69	117,50
Desvio padrão (μm)	5,36	6,29	5,50	0,00
Tendência (μm)	-26,46	-23,91	-24,31	-25,50
Erro relativo (%)	18,50	16,72	17,00	17,83

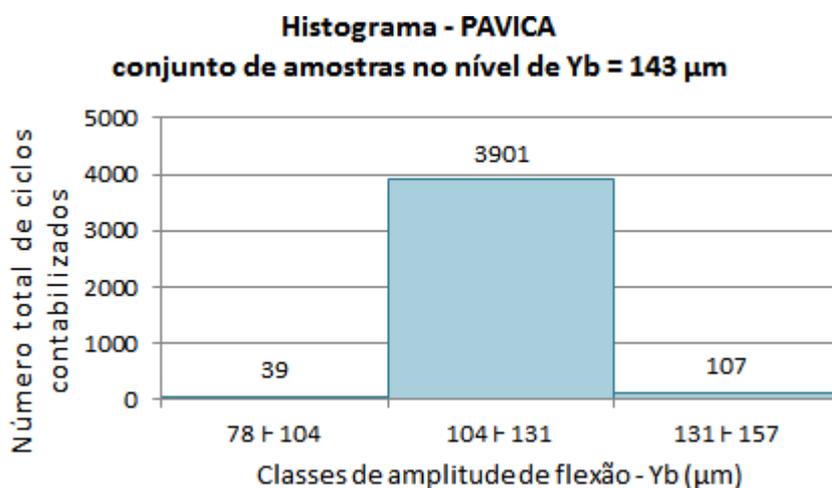


Figura 5.27 – Histograma referente ao ensaio com o Pavica no nível de amplitude de 143 μm : Número total de ciclos obtido em cada classe de amplitude de flexão.

- **Resultados - Ensaio Vibrec:**

Tabela 5.12 – Dados referentes ao ensaio com o Vibrec no nível de amplitude de 143 μm : Indicação da quantidade de ciclos obtida em cada amostra e em cada classe de amplitude de flexão.

Classes de amplitude - Y_b (μm)	Frequência de teste (Hz)				
	16,72 (amostra 1)	26,48 (amostra 2)	36,52 (amostra 3)	46,97 (amostra 4)	Total
77 f 103	610 (61,43%)	0 (0,00%)	3 (0,24%)	679 (96,72%)	1292 (33,23%)
103 f 130	383 (38,57%)	921 (100,00%)	1269 (99,76%)	23 (3,28%)	2596 (66,77%)
Total	993	921	1272	702	3888

Tabela 5.13 – Estatísticas calculadas a partir dos dados referentes ao ensaio com o Vibrec no nível de amplitude de 143 μm .

Estatísticas	Amostras			
	1	2	3	4
Amplitude média (μm)	100,22	116,50	116,44	90,87
Desvio padrão (μm)	12,91	0,00	1,29	4,72
Tendência (μm)	-42,78	-26,50	-26,56	-52,13
Erro relativo (%)	29,92	18,53	18,58	36,46

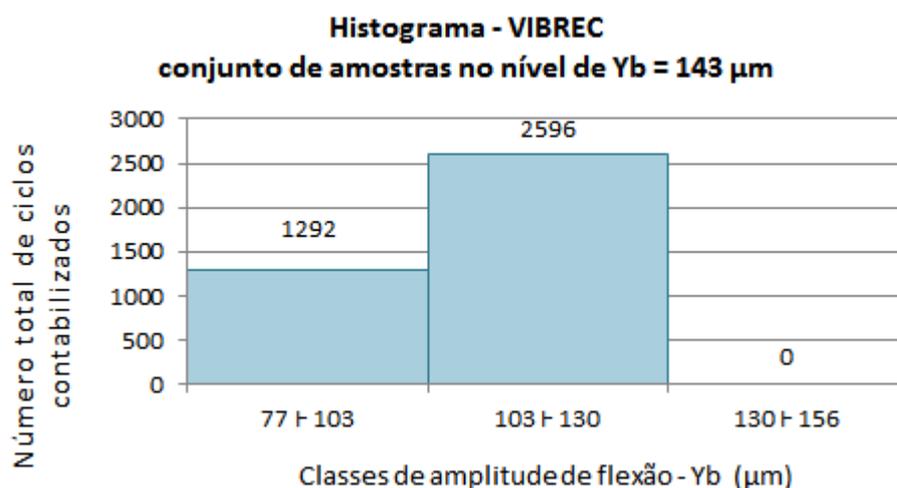


Figura 5.28 – Histograma referente ao ensaio com o Vibrec no nível de amplitude de 143 μm : Número total de ciclos obtido em cada classe de amplitude de flexão.

- **Discussão dos resultados obtidos para o conjunto de amostras de 143 μm :**

Em relação aos resultados obtidos com o Pavica, a última coluna da Tabela (5.10) e o histograma⁹ da Figura (5.27) mostram que apenas 107 ciclos (2,64% dos ciclos do conjunto de amostras do nível de 143 μm) foram categorizados na classe correta de deslocamento pico-a-pico, a maior parte dos ciclos (96,39%) foi associada à classe inferior adjacente. Os resultados do Vibrec mostram uma tendência semelhante, no entanto, nenhum ciclo foi contabilizado na classe teoricamente correta e a maior parte (66,77%) foi associada à classe imediatamente inferior.

⁹ Os histogramas foram construídos utilizando o número de ocorrências absoluto ao invés da densidade de ocupação em cada classe (número de ocorrências dividido pelo intervalo da classe), pois as classes de amplitude de flexão da matriz dos vibrógrafos possuem um intervalo de magnitude aproximadamente igual.

Para analisar a tendência dos dados obtidos em cada amostra dos dois vibrógrafos, o gráfico abaixo (Fig. 5.29) relaciona o valor médio da amplitude de flexão (eixo das ordenadas) com a frequência de teste de cada amostra (eixo das abscissas). As barras verticais em cada ponto do conjunto de dados representam a incerteza da medição que foi estimada neste trabalho pelo desvio padrão do conjunto de dados.

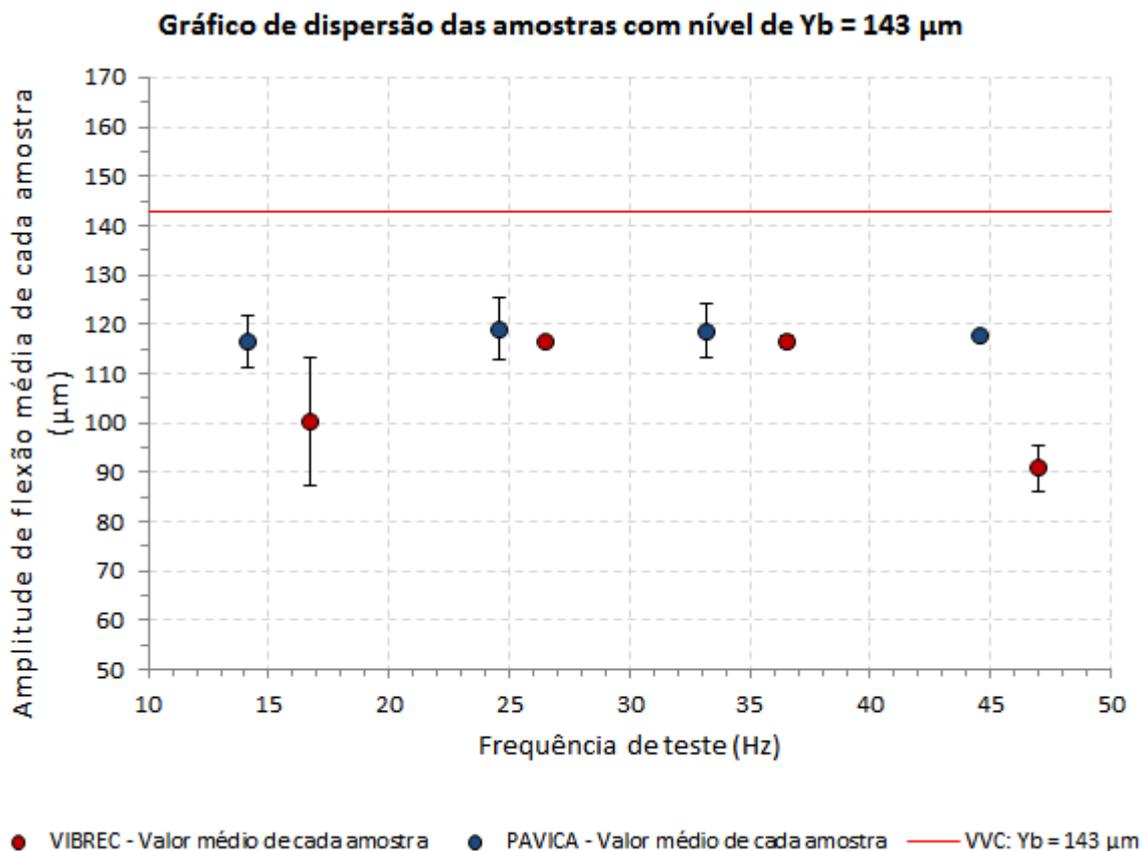


Figura 5.29 – Dispersão observada nos dois ensaios com as amostras de deslocamento no nível de 143 μm .

O gráfico da Figura (5.29) evidencia que houve uma tendência em todas as amostras de registrar ciclos em classes abaixo do valor convencional como verdadeiro. O valor médio das amostras do Pavica apresentou-se quase constante e mais próximo do deslocamento esperado de 143 μm , que é indicado pela linha horizontal vermelha, enquanto os valores médios das amostras do Vibrec ficaram mais distantes do valor esperado em comparação com o Pavica, principalmente para as amostras de maior e menor frequência.

5.8.3 Resultados obtidos sobre a amplitude de flexão – Amostras de 250 μm

De forma semelhante à subseção anterior, o número de ciclos obtido em cada classe de amplitude de flexão e para cada amostra é mostrado nas Tabelas (5.14) e (5.16) que se referem ao ensaio com o Pavica e com o Vibrec respectivamente. Histogramas, tabelas que contêm estatísticas calculadas e o gráfico de dispersão das amostras permitem a discussão dos resultados que é realizada somente após a apresentação dos resultados.

- **Resultados - Ensaio Pavica:**

Tabela 5.14 – Dados referentes ao ensaio com o Pavica no nível de amplitude de 250 μm : Indicação da quantidade de ciclos obtida em cada amostra e em cada classe de amplitude de flexão.

Classes de amplitude - Y_b (μm)	Frequência de teste (Hz)				
	14,15 (amostra 5)	24,57 (amostra 6)	33,23 (amostra 7)	44,59 (amostra 8)	Total
183 f 209	742 (74,65%)	0 (0%)	286 (28,63%)	0 (0%)	1028 (25,40%)
209 f 235	252 (25,35%)	984 (100%)	713 (71,37%)	1070 (100%)	3019 (74,60%)
Total	994	984	999	1070	4047

Tabela 5.15 – Estatísticas calculadas a partir dos dados referentes ao ensaio com o Pavica no nível de amplitude de 250 μm .

Estatísticas	Amostras			
	5	6	7	8
Amplitude média (μm)	202,59	222,00	214,56	222,00
Desvio padrão (μm)	11,32	0,00	11,76	0,00
Tendência (μm)	-47,41	-28,00	-35,44	-28,00
Erro relativo (%)	18,96	11,20	14,18	11,20

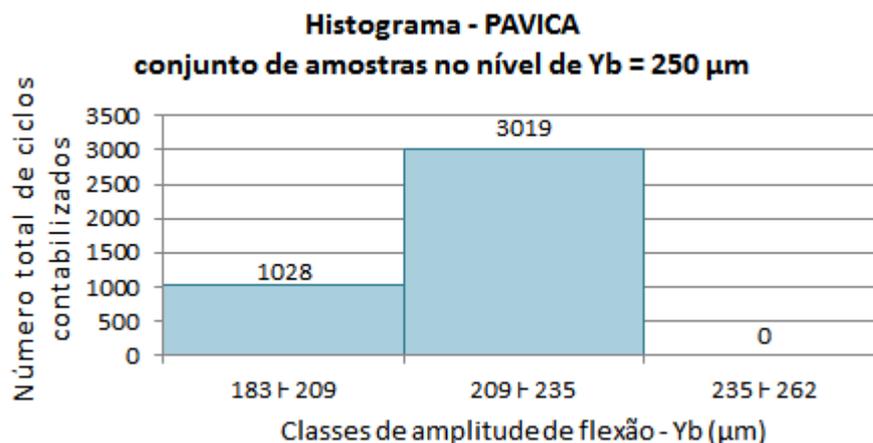


Figura 5.30 – Histograma referente ao ensaio com o Pavica no nível de amplitude de 250 μm : Número total de ciclos obtido em cada classe de amplitude de flexão.

- **Resultados - Ensaio Vibrec:**

Tabela 5.16 – Dados referentes ao ensaio com o Vibrec no nível de amplitude de 250 μm : Indicação da quantidade de ciclos obtida em cada amostra e em cada classe de amplitude de flexão.

Classes de amplitude - Y_b (μm)	Frequência de teste (Hz)				Total
	16,72 (amostra 5)	26,32 (amostra 6)	36,52 (amostra 7)	46,97 (amostra 8)	
156 f 183	0 (0%)	0 (0%)	1 (0,08%)	934 (99,68%)	935 (21,99%)
183 f 209	993 (100%)	859 (81,89%)	1272 (99,92%)	3 (0,32%)	3127 (73,54%)
209 f 233	0 (0%)	190 (18,11%)	0 (0%)	0 (0%)	190 (4,47%)
Total	993	1049	1273	937	4252

Tabela 5.17 – Estatísticas calculadas a partir dos dados referentes ao ensaio com o Vibrec no nível de amplitude de 250 μm .

Estatísticas	Amostras			
	5	6	7	8
Amplitude média (μm)	196,00	200,53	195,98	169,58
Desvio padrão (μm)	0,00	9,63	0,74	1,50
Tendência (μm)	-54,00	-49,47	-54,02	-80,42
Erro relativo (%)	21,60	19,79	21,61	32,17

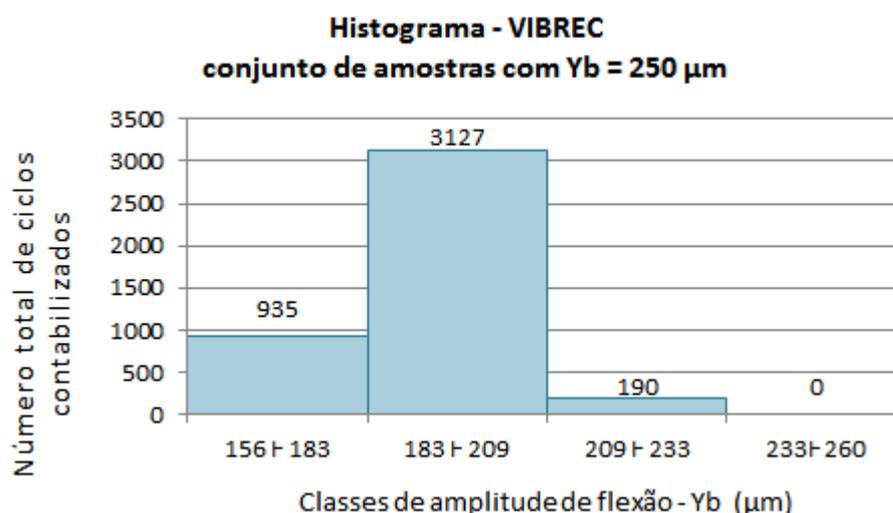


Figura 5.31 – Histograma referente ao ensaio com o Vibrec no nível de amplitude de 250 μm : Número total de ciclos obtidos em cada classe de amplitude de flexão.

- **Discussão dos resultados obtidos para o conjunto de amostras de 250 μm :**

Os histogramas dos dois ensaios mostram que nenhum ciclo foi contabilizado na classe esperada. A maior parte dos ciclos do ensaio com o Pavica (74,60%) foi categorizada na classe adjacente à correta, enquanto no ensaio com Vibrec, a maior parte dos ciclos (73,54%) foi classificada em uma faixa mais afastada de 183 a 209 micrômetros.

O gráfico da Figura (5.32) condensa as informações dos ensaios com os vibrógrafos Pavica e Vibrec no nível de deslocamento pico-a-pico de 250 μm , permitindo a análise da dispersão dos dados de amplitude de flexão referentes a cada amostra.

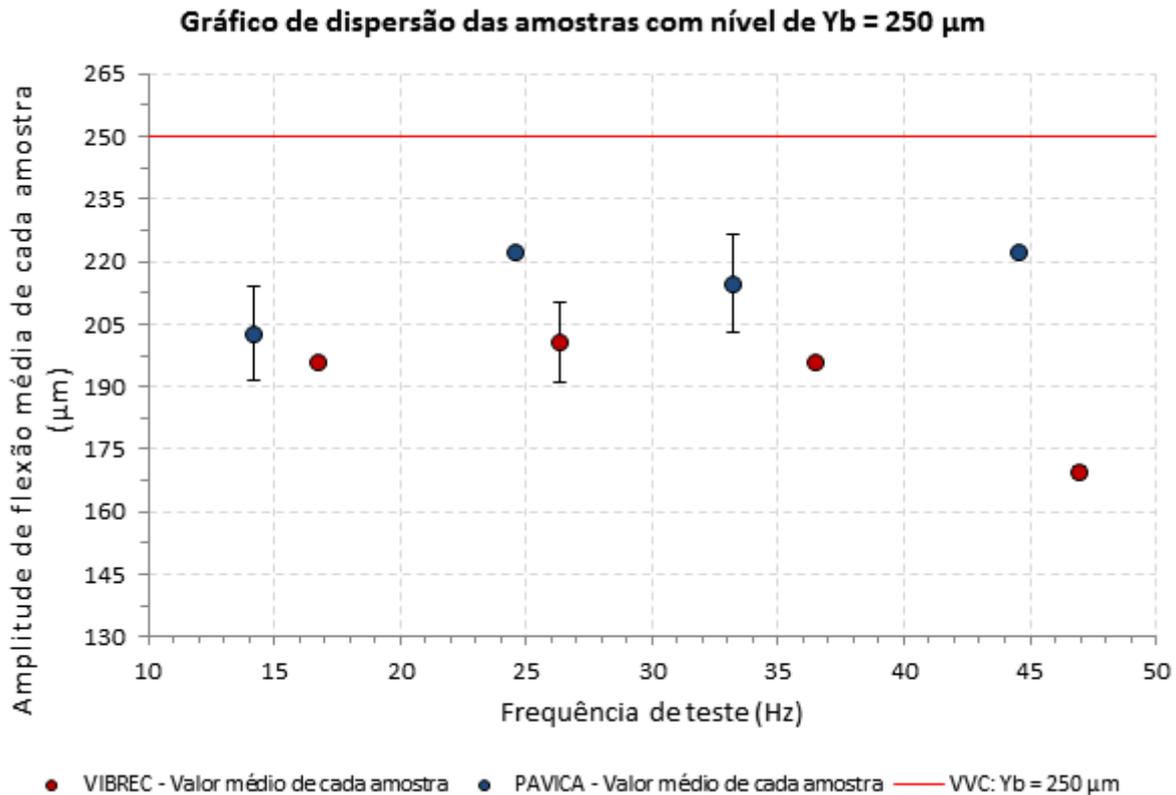


Figura 5.32 – Dispersão observada nos dois ensaios com as amostras de deslocamento no nível de 250 μm .

Novamente, os valores médios calculados para cada amostra ficaram abaixo do valor esperado e o Pavica apresentou-se mais acurado que o Vibrec. Observa-se que o resultado do Vibrec referente à amostra de maior frequência ficou mais afastado do valor esperado, enquanto o oposto ocorreu com o Pavica.

5.8.4 Resultados obtidos sobre a amplitude de flexão – Amostras de 350 μm

Os resultados obtidos para o conjunto de amostras com maior deslocamento (amostras 9, 10, 11 e 12) e a discussão dos mesmos são apresentados a seguir para os ensaios com os vibrógrafos Pavica e Vibrec:

- **Resultados – Ensaio Pavica**

Tabela 5.18 – Dados referentes ao ensaio com o Pavica no nível de amplitude de 350 μm : Indicação da quantidade de ciclos obtida em cada amostra e em cada classe de amplitude de flexão.

Classes de amplitude - Y_b (μm)	Frequência de teste (Hz)				
	14,15 (amostra 9)	24,57 (amostra 10)	33,23 (amostra 11)	43,28 (amostra 12)	Total
183 f 209	460 (46,28%)	21 (2,13%)	6 (0,60%)	0 (0%)	487 (12,13%)
209 f 235	534 (53,72%)	963 (97,87%)	993 (99,40%)	0 (0%)	2490 (62,02%)
235 f 262	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	634 (61,08%)	634 (15,79%)
262 f 288	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	404 (38,92%)	404 (10,06%)
Total	994	984	999	1038	4015

Tabela 5.19 – Estatísticas calculadas a partir dos dados referentes ao ensaio com o Pavica no nível de amplitude de 350 μm .

Estatísticas	Amostras			
	9	10	11	12
Amplitude média (μm)	209,97	221,45	221,84	258,81
Desvio padrão (μm)	12,97	3,76	2,01	12,93
Tendência (μm)	-140,03	-128,55	-128,16	-91,19
Erro relativo (%)	40,01	36,73	36,62	26,05

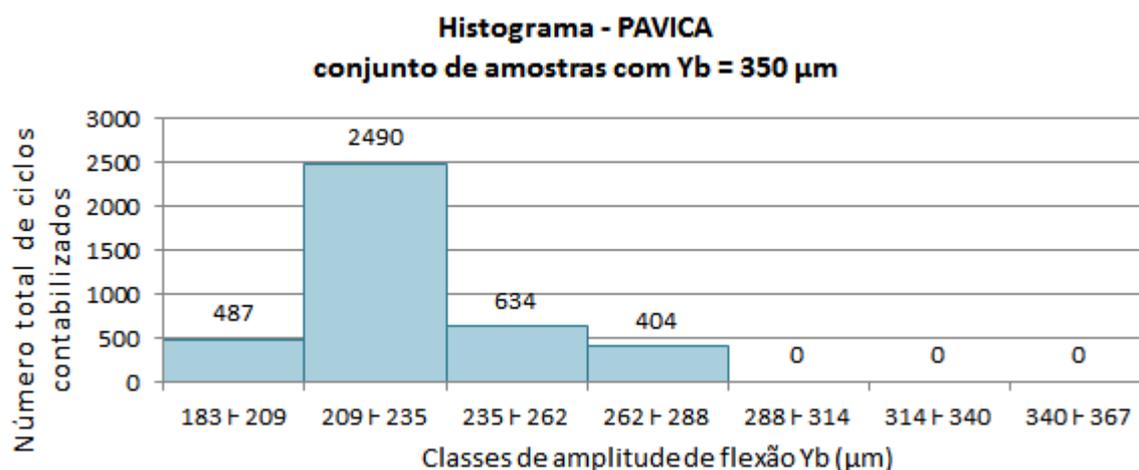


Figura 5.33 – Histograma referente ao ensaio com o Pavica no nível de amplitude de 350 μm : Número total de ciclos obtidos em cada classe de amplitude de flexão.

- **Resultados – Ensaio Vibrec**

Tabela 5.20 – Dados referentes ao ensaio com o Vibrec no nível de amplitude de 350 μm : Indicação da quantidade de ciclos obtida em cada amostra e em cada classe de amplitude de flexão.

Classes de amplitude - Y_b (μm)	Frequência de teste (Hz)				
	16,72 (amostra 9)	26,32 (amostra 10)	36,52 (amostra 11)	46,97 (amostra 12)	Total
233 f 260	922 (85,53%)	0 (0%)	23 (2,11%)	1170 (100%)	2115 (46,81%)
260 f 286	156 (14,47%)	833 (70,71%)	1069 (97,89%)	0 (0%)	2058 (45,55%)
286 f 312	0 (0%)	345 (29,29%)	0 (0%)	0 (0%)	345 (7,64%)
Total	1078	1178	1092	1170	4518

Tabela 5.21 – Estatísticas calculadas a partir dos dados referentes ao ensaio com o Vibrec no nível de amplitude de 350 μm .

Estatísticas	Amostras			
	9	10	11	12
Amplitude média (μm)	250,33	280,61	272,44	246,50
Desvio padrão (μm)	9,33	11,84	3,81	0,00
Tendência (μm)	-99,67	-69,39	-77,56	-103,50
Erro relativo (%)	28,48	19,82	22,16	29,57

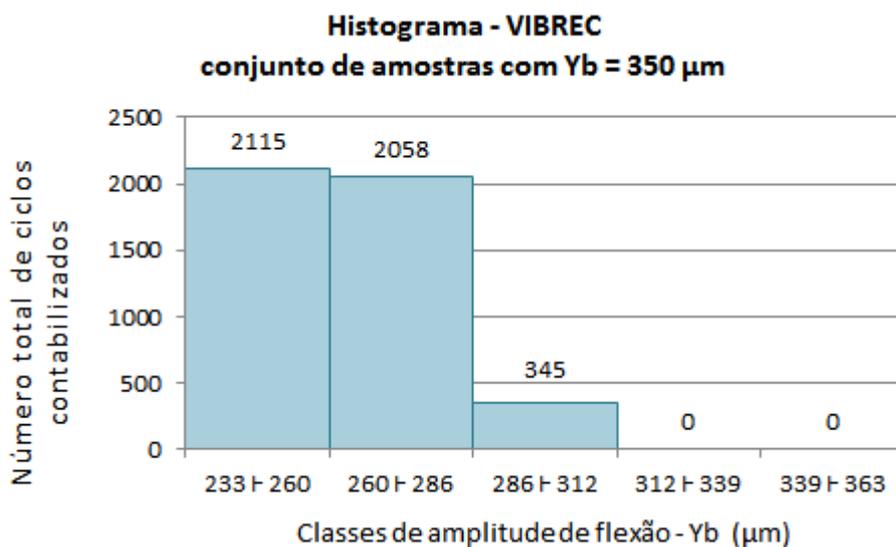


Figura 5.34 – Histograma referente ao ensaio com o Vibrec no nível de amplitude de 350 μm : Número total de ciclos obtidos em cada classe de amplitude de flexão.

- **Discussão dos resultados obtidos para o conjunto de amostras de 350 μm :**

A análise dos histogramas e das Tabelas (5.18) e (5.20) permitem concluir que houve uma maior distribuição do número de ciclos contabilizados entre as classes de medição. No caso do Pavica, a classe com maior ocorrência de ciclos (62,02%), que é limitada pelos valores de 209 e 235 μm , está posicionada 5 classes afastada do esperado. Os resultados do Vibrec para este conjunto de amostras com maior deslocamento (350 μm) apresentaram mais condizentes com os valores esperados, no entanto, a maioria dos ciclos (46,81%) ficou 4 classes distante do intervalo esperado.

O gráfico de dispersão dos valores médios das amostras (Fig. 5.35) permite visualizar a inversão no comportamento dos resultados ocorrida para este conjunto de amostras de maior deslocamento: Os registros feitos pelo Vibrec foram mais exatos (acurados) do que os dados obtidos com o Pavica, situação distinta da observada para o conjunto de amostras com os menores deslocamentos pico-a-pico.

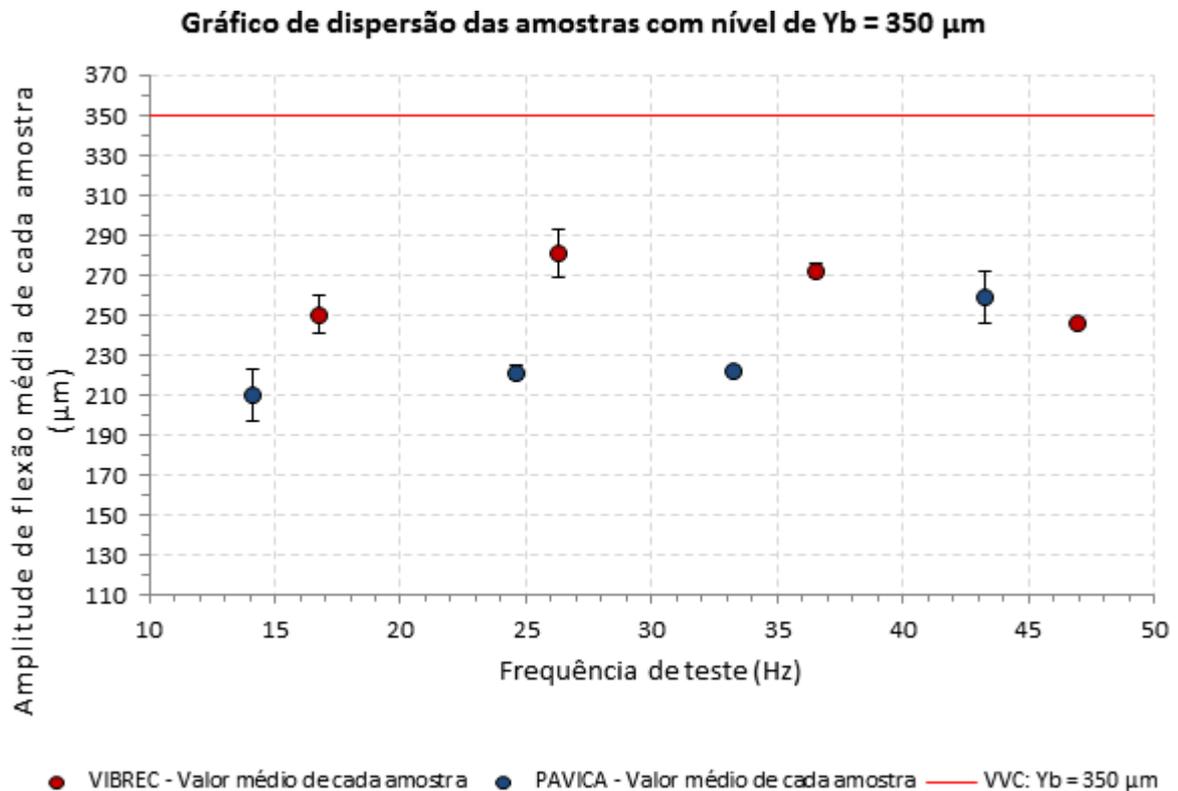


Figura 5.35 – Dispersão observada nos dois ensaios com as amostras de deslocamento no nível de 350 μm .

5.8.5 Discussão geral sobre os resultados obtidos com os vibrógrafos

Após a apresentação dos resultados, torna-se possível analisar comparativamente o conjunto de dados obtido, tendo em vista os objetivos desta parte do trabalho: Validar as medições dos vibrógrafos comparando os resultados obtidos com os valores esperados nas diferentes condições testadas e analisar a influência da frequência e do nível de deslocamento nas medições.

Em relação à validação das medições, foi constatado que os vibrógrafos contam e classificam os ciclos em classes de frequência corretas, no entanto, há uma tendência dos equipamentos em registrar ciclos em classes de amplitudes de flexão situadas abaixo dos intervalos esperados.

Para analisar a influência da frequência e do nível de deslocamento nas medições, será feita a seguir uma discussão sobre a influência dessas grandezas na precisão e na exatidão dos registros efetuados pelos vibrógrafos.

A precisão está relacionada com a dispersão das medições e a exatidão está relacionada com a proximidade das medições do valor verdadeiro convencional considerado (valor de referência). A análise da precisão das medições pode ser feita por meio do desvio padrão calculado para cada amostra ou por meio da análise da distribuição dos ciclos nos histogramas apresentados. A análise da exatidão das medições pode ser feita por meio dos valores calculados de tendência e erro relativo ou por meio da análise dos gráficos de dispersão mostrados. A seguir são utilizados alguns destes recursos na tentativa de identificar a influência da frequência e do nível de deslocamento nas medições:

- **Precisão:** Influência da frequência.

Não foi notada uma influência clara entre a precisão das medições e a frequência. Na maior parte das amostras, os ciclos foram categorizados em 1 ou 2 classes de deslocamento pico-a-pico (Y_b). Esta dispersão dos ciclos entre as classes pode ser analisada de forma mais quantitativa pelo desvio padrão obtido em cada amostra de mesmo nível de deslocamento (Tabelas 5.17, 5.19 e 5.21). Neste tipo de análise, observa-se que o desvio padrão varia sem demonstrar uma dependência evidente com a frequência.

Uma forma mais intuitiva de analisar os dados pode ser feita pela observação das barras de incerteza contidas nos gráficos de dispersão plotados para os três níveis de deslocamento testados (Figuras 5.29, 5.32 e 5.35), onde verifica-se a aleatoriedade da influência da frequência: Ora é obtido um nível elevado de desvio padrão para certa frequência, ora não.

- **Precisão:** Influência do nível de deslocamento.

Para cada conjunto de amostras obtido no mesmo nível de deslocamento, foram construídos histogramas que indicam o número total de ciclos obtido em cada classe de amplitude de flexão. Estes histogramas facilitam a análise da influência do nível de deslocamento pico-a-pico, pois o formato assumido pelos histogramas possibilita a rápida identificação da dispersão dos dados e da classe na qual os ciclos se concentraram.

Embora os histogramas sofram a influência da variação da frequência de teste existente em cada amostra, eles poupam o exaustivo trabalho de comparação entre cada uma das quatro amostras testadas no mesmo nível de frequência para os três níveis de amplitude de flexão e conforme foi mencionado anteriormente, foi verificado que a frequência influencia aleatoriamente na dispersão dos dados. Por conseguinte, estes histogramas podem servir como ferramenta para analisar a influência do nível de deslocamento mesmo havendo alguma interferência do parâmetro frequência.

Observando os histogramas obtidos no ensaio com o vibrógrafo Pavica, nota-se que: Nas amostras de 143 μm , os ciclos ficaram bastante concentrados em uma única classe (96,39% dos ciclos ficaram na classe de 104 a 131 μm), enquanto nas amostras de 350 μm , a concentração de ciclos na classe prevalecente caiu para 62,02%. Nos histogramas obtidos no ensaio com o vibrógrafo Vibrec, foi observado um comportamento semelhante: As amostras com menor deslocamento (143 μm) concentraram maior parcela de ciclos (66,77%) quando comparadas com as amostras de maior deslocamento (350 μm), que no caso, contabilizaram os ciclos de forma bastante distribuída (a classe prevalecente ficou com apenas 46,81% dos ciclos).

Embora não seja possível generalizar nem quantificar ao certo a influência do nível de deslocamento precisão das medições, os resultados indicam que a precisão das medições se reduziu com o aumento do nível de deslocamento, o que é claramente identificado pelo formato mais “distribuído” dos histogramas de 350 μm (Figuras 5.33 e 5.34) quando comparados com os histogramas de 143 μm (Figuras 5.27 e 5.28), comparação feita entre os histogramas do mesmo ensaio em específico.

- **Exatidão:** Influência da frequência.

Os gráficos de dispersão (Figuras 5.29, 5.32 e 5.35) permitem analisar a influência do parâmetro frequência enquanto se mantém o deslocamento de teste (amplitude de flexão) em um nível constante. Nos gráficos de dispersão do ensaio com o vibrógrafo Vibrec, pode ser observado que as amostras de maior e menor frequência (16,72 e 46,97 Hz) ficaram mais distantes do valor de referência e as amostras com frequência intermediárias (26,32 e 36,52 Hz) ficaram afastadas da referência com um erro semelhante. Portanto, pode-se dizer que, para o Vibrec, a frequência reduziu a exatidão das medições nas frequências testadas de maior e menor nível.

Para as amostras do ensaio com o Pavica, os dados (representados pelos valores de médios de amplitude de flexão) se distribuíram de uma forma que não permite estabelecer uma relação clara com

a frequência, porém foi notada uma relação de quase independência para o conjunto de amostras no nível de deslocamento de 143 μm (Fig. 5.29) e também pode ser observado que as amostras de menor frequência apresentaram uma tendência ligeiramente maior de se afastar dos valores de referência.

- **Exatidão:** Influência do nível de deslocamento.

Comparando-se o erro calculado para as amostras de frequências intermediárias (faixa de 24 a 37 Hz), as quais parecem ter a acurácia menos suscetível à influência da frequência de teste, pode ser verificado que o Vibrec apresentou um erro mínimo de 18,53% (amostra 2 – deslocamento de 143 μm) e um erro máximo de 22,16% (amostra 11 – deslocamento de 350 μm), enquanto o Pavica, apresentou um erro mínimo de 11,20% (amostra 6 – deslocamento de 250 μm) e um erro máximo de 36,73% (amostra 10 – deslocamento de 350 μm). Logo, pode ser verificado que o erro obtido nas medições com os dois vibrógrafos se acentuou (a acurácia reduziu) com o aumento do nível de deslocamento e este erro foi aumentado em uma proporção bem maior para o caso do vibrógrafo Pavica.

Porém, deve ser observado que os valores de erro relativo apresentados neste trabalho (calculados em relação ao valor da amplitude média) devem ser interpretados apenas como uma ferramenta utilizada para viabilizar a análise dos dados. Deve ser advertido que a medição do vibrógrafo pode, na realidade, assumir qualquer valor dentro da classe de medição, então o intervalo estabelecido nessas classes influencia no erro da medição (erro de escala): Alterando-se o padrão de escala que é reportado na matriz de dados do vibrógrafo, erros maiores ou menores podem ser obtidos. Também cabe observar que um intervalo de classe de 26 μm representa 18,18%, 10,4% e 7,43% dos valores absolutos dos deslocamentos testados (143 μm , 250 μm e 350 μm), então erros destas magnitudes são esperados a cada classe registrada de forma incorreta.

Para investigar de forma exploratória o que ocorre com as medições em níveis elevados de deslocamento pico-a-pico (níveis incomuns para vibração eólica), o Pavica foi testado impondo no *shaker* um deslocamento de 910 μm (na frequência de 23,86 Hz) e o Vibrec foi testado com um deslocamento de 900 μm (na frequência de 21,46 Hz). Os resultados apresentaram uma drástica redução na acurácia das medições: O Pavica contabilizou ciclos nas classes de 419 a 446 μm e 446 a 472 μm , e o Vibrec contabilizou os ciclos na classe de 675 a 702 μm .

Portanto, é possível concluir que o aumento do nível de deslocamento acentua a tendência dos vibrógrafos em classificar os ciclos em classes de menores níveis de amplitude de flexão e este comportamento é mais evidente no vibrógrafo Pavica do que no Vibrec. Embora não seja possível quantificar ao certo a magnitude do erro, os resultados mostram que há um indício que podem ser obtidas medidas pouco acuradas em grandes níveis de deslocamento pico-a-pico (superiores a 350 μm), o que possivelmente pode vir a comprometer a avaliação da integridade do cabo condutor. Estudos mais detalhados precisam ser conduzidos para investigar a limitação dos vibrógrafos no registro de grandes níveis de deslocamento para confirmar a hipótese levantada.

5.9 RESULTADOS DA EXTENSÔMETRIA E DISCUSSÃO

Foram utilizados extensômetros de 350 Ω de resistência (modelo unidirecional simples) na coleta de dados sobre as deformações e tensões geradas nos três níveis de deslocamento pico-a-pico testados. Os resultados foram obtidos por meio do aqisitor ADS 2000 e do programa AqDados durante a coleta de informações por 30 segundos (taxa de gravação de 100 Hz) em cada nível de deslocamento, os sinais gravados foram analisados e pós-processados por meio do programa AqDAnalysis.

Os resultados obtidos são indicados na Tabela (5.22) que relaciona os três níveis de amplitude de flexão testados com a média da leitura dos extensômetros colados nos fios de topo, a deformação registrada por estes sensores foi convertida em tensão por meio da Lei de Hooke. A tabela também indica o valor de tensão que seria previsto pela equação de Poffenberger-Swart (Eq. 3.5) para o deslocamento e o tipo de cabo ensaiado. Conforme foi mencionado na Seção (5.5.4), as constantes da Equação P-S são: 31,12 N/mm³ para o cabo ACAR 750 (utilizado no ensaio com o Pavica) e 34,83 N/mm³ para o cabo CAL 900 (utilizado no ensaio com o Vibrec).

Tabela 5.22 – Resultados obtidos na extensometria dos dois ensaios.

Amplitude de flexão - Y_b (μm)	Ensaio - Pavica cabo ACAR 750		Ensaio - Vibrec cabo CAL 900	
	Tensão Média dos ext. (MPa)	Tensão P-S (MPa)	Tensão Média dos ext. (MPa)	Tensão P-S (MPa)
143	3,25	4,45	4,99	4,98
250	6,12	7,78	8,55	8,71
350	8,26	10,89	12,55	12,19

Os resultados também podem ser analisados por meio de gráficos que relacionam a tensão alternada 0-pico no eixo das ordenadas com a amplitude de flexão pico-a-pico no eixo das abscissas. Estes gráficos são apresentados nas Figuras (5.36) e (5.37), os pontos em verde representam a tensão média entre a leitura dos extensômetros, as linhas pontilhadas representam o ajuste linear dos dados cuja equação também é apresentada e as linhas cheias representam a equação de Poffenberger-Swart. Os pontos em azul indicam a tensão calculada pela equação P-S com o uso do valor médio da amplitude de flexão tomado a partir do conjunto de amostras obtidas no mesmo nível de amplitude de flexão de teste.

Os gráficos das Figuras (5.36) e (5.37) indicam que a tensão alternada aumenta linearmente conforme o nível de deslocamento pico-a-pico fica maior (comportamento previsto pela equação P-S), entretanto, os resultados obtidos na extensometria do Ensaio-Pavica (cabo ACAR 750) se afastaram mais dos valores teóricos. Os erros podem ter ocorrido em virtude de algum procedimento executado na colagem dos extensômetros ou devido à proximidade dos extensômetros com o sensor do Pavica (Fig. 5.17).

O efeito causado pela tendência dos vibrógrafos em registrar amplitudes de flexão em classes inferiores às esperadas também pode ser analisado nas Figuras (5.36) e (5.37), onde pode-se observar o quanto as tensões medidas nos fios do cabo se afastaram das tensões que seriam previstas pela teoria para os registros efetuados pelos vibrógrafos nos níveis de deslocamento pico-a-pico testados. De forma geral, os registros dos vibrógrafos implicaram na subestimação dos níveis de tensão nos quais o componente está sujeito.

6 ESTUDO DE CASO: AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DO CABO CONDUTOR

6.1 DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO

Neste capítulo, as metodologias descritas na Seção (3.4) serão utilizadas na avaliação da integridade de um cabo condutor CAL 900. A análise será conduzida a partir de um conjunto de dados coletado por um vibrógrafo do tipo Pavica instalado em uma linha de transmissão de 230 kV localizada na região Centro-Oeste do Brasil.

A linha de transmissão em estudo foi construída em local de terreno plano e livre de obstáculos, o que propicia a existência de ventos estáveis (em regime laminar) indutores da vibração eólica. Após dois anos de serviço, foram detectadas ocorrências de falhas prematuras causadas por fadiga nos cabos CAL 900 que constituíam a linha analisada. A carga de tração utilizada nos cabos condutores correspondia a uma EDS de 20% e a linha apresentava amortecedores do tipo *Stockbridge* e espaçadores verticais utilizados para separar condutores de mesma fase.

Um estudo completo direcionado à identificação das causas que originaram as falhas prematuras, visando orientar ações para evitar novas ocorrências de falhas, pode ser encontrado no trabalho de Kalombo *et al.* (2015), *Assessment of the fatigue failure of an All Aluminium Alloy Cable (AAAC) for a 230 kV transmission line in the Center-West of Brazil*. O estudo de caso realizado neste capítulo objetiva apenas demonstrar o processo de aplicação das metodologias existentes a partir de dados reais obtidos por um vibrógrafo instalado em uma linha de transmissão.

A matriz Amplitude – Frequência, na qual o vibrógrafo armazenou os dados de vibração, encontra-se disponível no Anexo I. As medições iniciaram no dia 30/08/12 e terminaram dia 09/09/12, durante este período, o vibrógrafo foi programado para registrar 10 segundos de dados (tempo ativo) a cada 15 minutos. Por fim, deve ser observado que a matriz apresentada em anexo dispõe as classes de deslocamento em termos da amplitude de flexão inversa.

O diagrama mostrado na Figura (6.1) ilustra os passos básicos que devem ser conduzidos a partir de um conjunto dados extraído por um vibrógrafo (matriz Amplitude – Frequência) objetivando a avaliação da integridade do condutor segundo as metodologias recomendadas pelas instituições de referência no setor elétrico (IEEE, EPRI e CIGRÉ). Nas seções seguintes, passos mais detalhados envolvidos na aplicação de cada metodologia serão descritos.

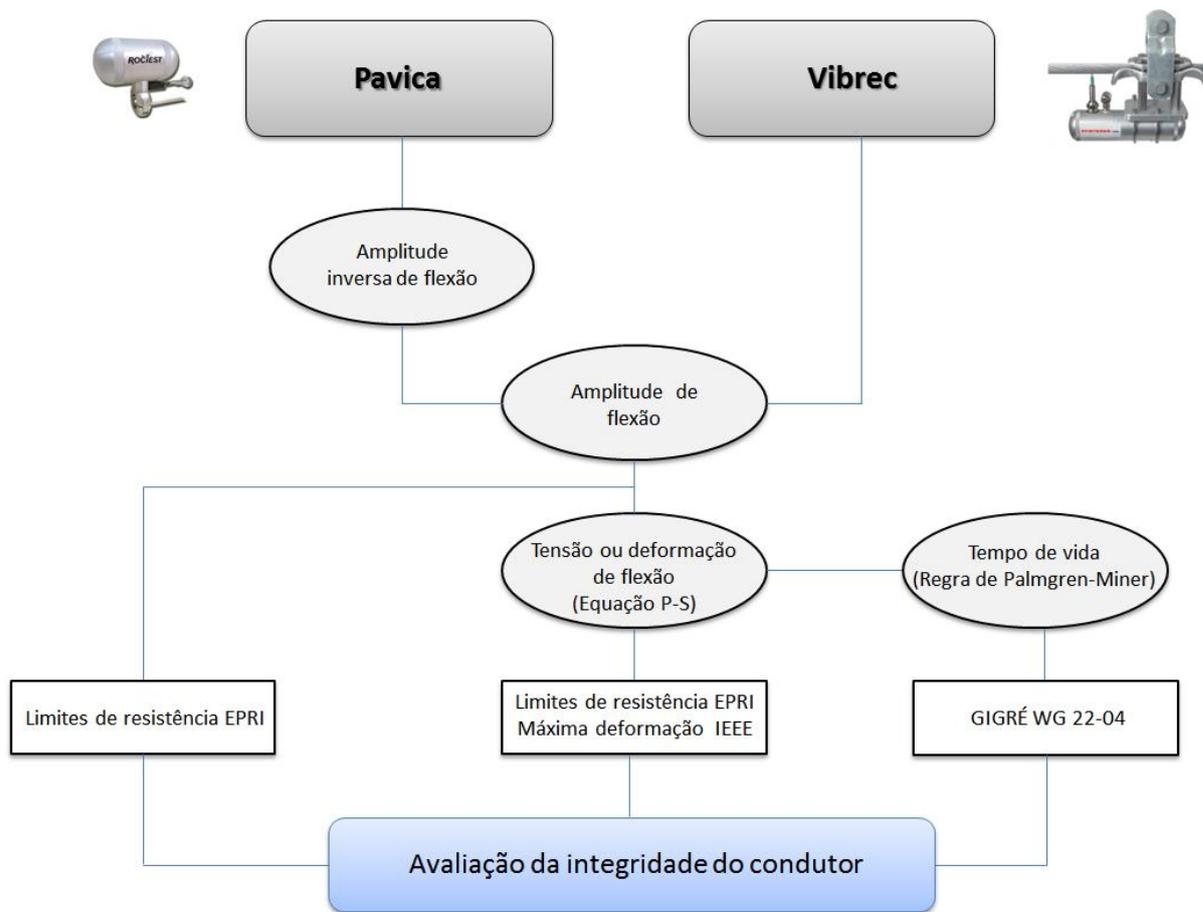


Figura 6.1 – Diagrama geral de aplicação dos métodos de avaliação da integridade do cabo condutor.

6.2 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA CIGRÉ WG-22-04

Conforme foi descrito na Seção (3.4.3), a metodologia CIGRÉ WG-22-04 é fundamentada na teoria do dano acumulativo de Palmgren-Miner e sua aplicação é pautada no conhecimento do histórico de carregamentos e na curva S-N do material estudado. O histórico de carregamentos é provido pelos dados registrados na matriz Amplitude – Frequência do vibrógrafo e a curva S – N pode ser obtida por meio de ensaios de laboratório com corpos-de-prova (montagens cabo/grampo) ensaiados em condições similares às encontradas em campo ou por meio da curva de segurança da CIGRÉ, a CSBL.

Devido à existência de falhas prematuras (2 anos de carregamentos) no vão estudado, a análise neste trabalho será efetuada por meio da abordagem mais conservadora que considera a curva de segurança da CIGRÉ (CSBL). Os passos necessários à aplicação da metodologia CIGRÉ WG-22-04 são enumerados e ilustrados (Fig. 6.2) a seguir:

- 0) Conversão da amplitude de flexão inversa (Y_a) em amplitude de flexão padrão (Y_b);
- 1) Cálculo da tensão alternada 0-pico (σ_i) gerada em cada nível de amplitude de flexão pico-a-pico;
- 2) Cálculo do número de ciclos até a falha (N_i) que é gerado por cada nível de tensão calculado;
- 3) Extrapolação do número de ciclos registrado em cada classe de amplitude de flexão para o período de 1 ano (n_i);
- 4) Cálculo do dano anual gerado pelas ocorrências de ciclos (extrapoladas) em cada classe de amplitude de flexão (D_i);
- 5) Cálculo do dano acumulado em 1 ano (D): Somatório do dano parcial obtido em cada classe de deslocamento;
- 6) Cálculo do tempo de vida do cabo condutor (V);
- 7) Cálculo da vida remanescente do cabo condutor (V_R).

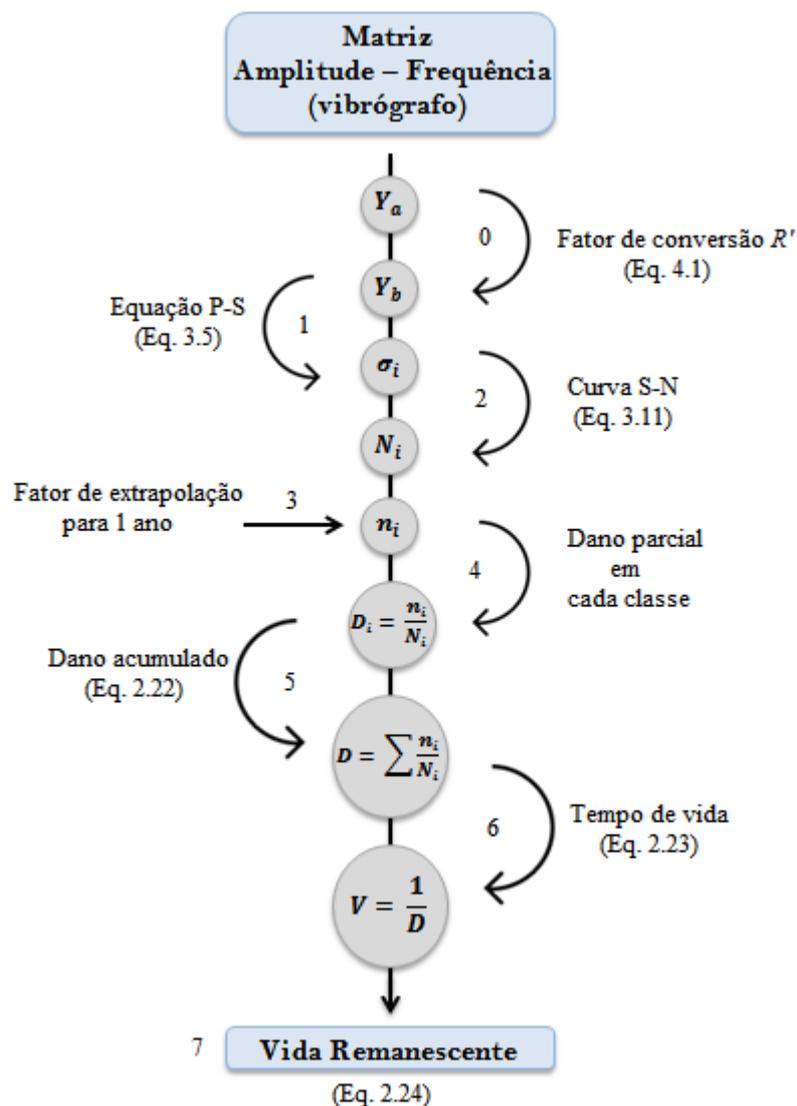


Figura 6.2 – Ilustração do passo-a-passo necessário para o cálculo da vida remanescente do cabo condutor de acordo com a metodologia CIGRÉ WG-22-04.

6.2.1 Conversão de amplitude inversa em amplitude padrão

Para que os critérios de avaliação da integridade do condutor possam ser aplicados, a amplitude de flexão inversa deve ser convertida em amplitude de flexão medida a partir das convenções padronizadas. O processo de conversão entre os dois tipos de medidas existentes somente precisa ser realizado caso o vibrógrafo utilizado nas gravações seja do tipo Pavica e caso este equipamento tenha sido programado para reportar os dados em termos da amplitude inversa, pois ainda é possível programá-lo para apresentar a matriz com as classes de amplitude já convertidas automaticamente pelo equipamento.

Como a matriz em estudo foi obtida em termos da amplitude inversa, o fator de conversão descrito pela Eq. (4.1) precisou ser calculado. Como resultado, foi obtido um fator de $R' = 1,17597$, este fator foi utilizado na conversão das classes de amplitude inversa (Y_a) em amplitude padrão (Y_b) simplesmente multiplicando o fator R' pelos valores inversos (Y_a) de deslocamento da matriz, conforme mostra a Equação (6.1):

$$Y_b = R'(Y_a) \quad (6.1)$$

6.2.2 Cálculo da tensão gerada em cada nível de amplitude de flexão

Por meio da equação de Poffenberger-Swart (Eq. 3.5), que é repetida abaixo por conveniência, calcula-se a tensão gerada em cada nível de amplitude de flexão (Y_b).

$$\sigma_a = K Y_b \quad (3.5)$$

Os cálculos da tensão em cada classe (σ_a) são efetuados assumindo que cada nível de amplitude de flexão é representado pelo limite superior da classe de deslocamento indicada na matriz de dados, por exemplo: Se a última classe de amplitude de flexão da matriz corresponde aos valores contidos no intervalo de 508 a 516 μm , a tensão obtida para este nível (classe) de deslocamento deve ser calculada usando $Y_b = 516 \mu\text{m}$ na Equação (3.5).

Aplicando a Equação (3.6), o resultado obtido para a constante K da equação P-S foi de 34,83 N/mm^3 para a utilização de cabo CAL 900 tracionado com uma EDS de 20%. Multiplicando a constante K da equação P-S pelo nível de deslocamento representativo de cada classe, foram obtidas as tensões geradas por cada nível de deslocamento pico-a-pico da matriz de dados.

6.2.3 Cálculo do número de ciclos até a falha em cada nível de amplitude de flexão

As curvas S-N, que são obtidas por meio de ensaios acelerados de laboratório, estabelecem a relação entre a tensão e a vida que seria atingida por um componente submetido por um tipo de

carregamento específico que se repete ciclicamente. Portanto, o cálculo do número de ciclos até a falha (N) é efetuado por meio da curva S-N, conforme mostra a equação (6.2):

$$N = \left(\frac{\sigma_a}{C}\right)^{1/Z} \quad (6.2)$$

A equação mostrada acima é obtida por uma simples manipulação algébrica da equação da curva S-N (Eq. 3.11) que representa da CSBL. As constantes C e Z são indicadas na Tabela (3.4) para o caso estudado.

O cálculo do número de ciclos até a falha foi calculado (Eq. 6.2) para cada nível de tensão ($\sigma_a i$) que é representado por uma das classes de amplitude de flexão ($Y_b i$) contida na matriz 64x64 registrada pelo Pavica. Portanto, foi obtido um vetor de dimensão 64x1 contendo os números de ciclos até a falha (N_i) em cada tensão representativa de um nível de deslocamento. Os valores de N_i foram utilizados em conjunto com o número total de ciclos registrado em cada classe de deslocamento (número de ciclos extrapolado para 1 ano) para calcular o dano acumulado.

6.2.4 Extrapolação do número de ciclos contados em cada classe de amplitude

Para que se preserve uma consistência entre unidades e se expresse o tempo de vida (V) calculado em anos, torna-se necessário extrapolar o número total de ciclos contabilizado em cada classe de deslocamento para o período de 1 ano. Segundo o *Guide to Vibration Measurements on Overhead Lines* (1995), o fator de extrapolação (F_e) é calculado como sendo uma proporção entre o tempo transcorrido em 1 ano e tempo ativo total das medições efetuadas durante o período de teste, conforme indica a Equação (6.3):

$$F_e = \frac{\text{Tempo transcorrido em 1 ano}}{\text{Tempo ativo total em que ocorreram as medições}} \quad (6.3)$$

As medições do caso estudado se iniciaram no dia 30/08/12 e terminaram em 09/09/12, resultando em um período total de gravações de 10 dias. Entretanto, o tempo em que houve a coleta de dados é inferior aos 10 dias em virtude do tipo de gravação realizado por amostras retiradas em intervalos regulares de tempo, método de gravação característico de vibrógrafos.

Considerando que o vibrógrafo Pavica foi programado para registrar os dados durante 10 segundos a cada 15 minutos (o que equivale a uma gravação de 40 segundos/hora), obtém-se que o tempo total gravado (ativo) foi de 9600 segundos.

$$\text{Tempo gravado} = (\text{taxa de gravação}) \cdot (\text{duração do teste}) \quad (6.4)$$

$$\text{Tempo gravado} = \left(40 \frac{\text{segundos}}{\text{hora}}\right) \cdot \left[(10 \text{ dias}) \left(24 \frac{\text{horas}}{\text{dia}}\right)\right] = 9600 \text{ segundos}$$

Um ano tem 31536000 segundos, portanto o fator de extrapolação resultou em $F_e = 3285$ pela aplicação da Equação (6.3). Multiplicando o fator de extrapolação calculado pelo número total de ciclos contabilizado em cada classe de amplitude de flexão, foram obtidos os últimos valores (n_i) necessários para calcular o dano acumulado.

6.2.5 Cálculo do dano acumulado e do tempo de vida do condutor

Segundo a Regra de Palmgren-Miner, o dano (D_i) parcial causado pela aplicação da tensão alternada correspondente a cada nível (classe) de deslocamento é dado pela razão entre as ocorrências de ciclos extrapoladas em 1 ano (n_i) e o número de ciclos em que ocorreria a falha (N_i) no nível de tensão considerado. O dano acumulado foi calculado somando-se o dano parcial causado pelas 64 classes de deslocamento da matriz de dados, conforme mostra a Equação (2.22) que foi apresentada anteriormente neste trabalho e se encontra repetida abaixo:

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

O dano acumulado encontrado pela aplicação da Equação (2.22) foi de $D = 0,02985$. As Figuras (6.3) e (6.4) indicam a contribuição (em porcentagem) de cada classe na composição do dano acumulado, onde cada classe é representada por uma barra vermelha. A Figura (6.3) refere-se à contribuição das classes de amplitude (Y_b) e a Figura (6.4) refere-se à contribuição das classes de frequência.

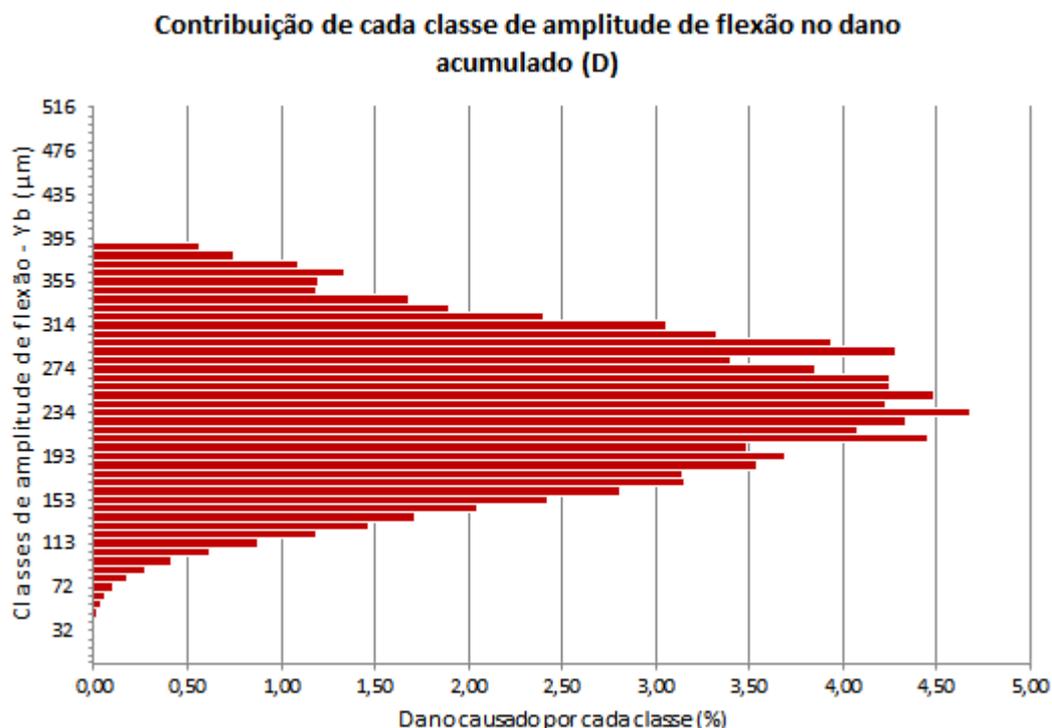


Figura 6.3 – Contribuição de cada classe de deslocamento no dano acumulado.

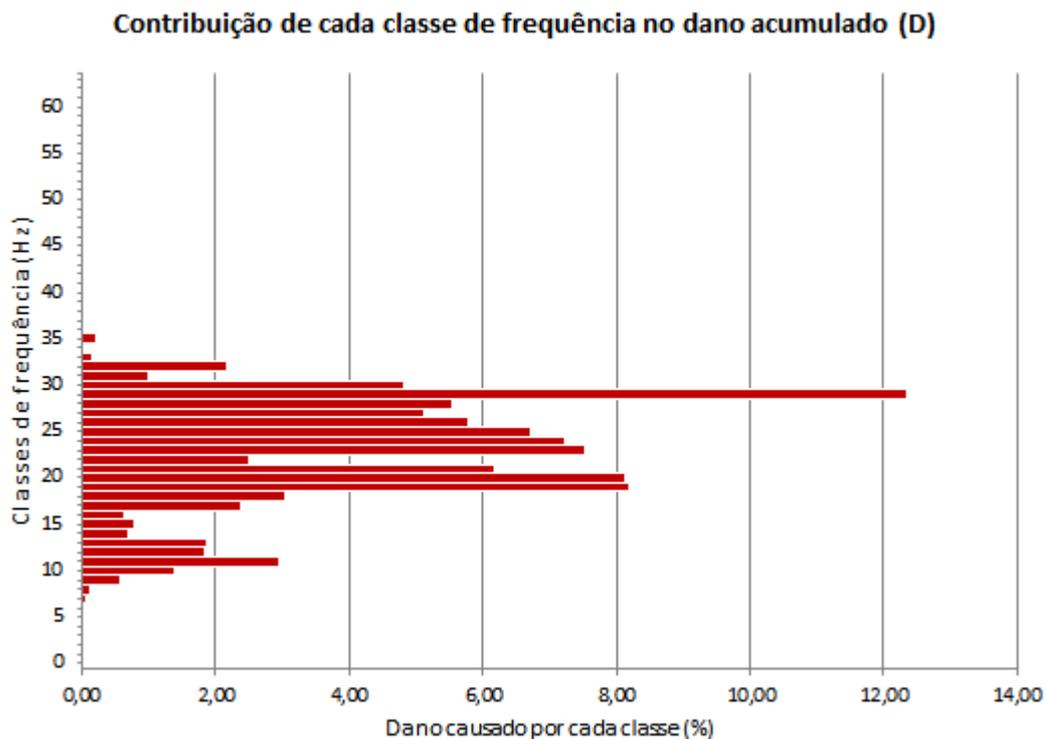


Figura 6.4 – Contribuição de cada classe de frequência no dano acumulado.

Os gráficos mostrados acima revelam que a classe de frequência de 29 Hz foi responsável pela maior parte dos danos (12,37%) e os deslocamentos pico-a-pico de 185 a 314 μm contribuíram com 67,35 % dos danos. Embora não haja muitas ocorrências de ciclos no intervalo de amplitude citado, o nível de vibração que ocorreu nestas classes induziu elevadas tensões que aumentaram a contribuição no dano.

O tempo de vida (V) do cabo condutor é calculado conforme mostra a Equação (2.23) que é repetida abaixo:

$$V = \frac{1}{D} \tag{2.23}$$

Efetando o cálculo com $D = 0,02985$, encontrou-se uma vida $V = 33,5$ anos. O tempo de vida calculado indica que o condutor seria apto a atingir a vida mínima considerada economicamente útil de 30 anos, no entanto, foi constatado que ocorreram falhas após 2 anos de instalação da linha. Caso as falhas não tivessem ocorrido, a vida remanescente do condutor seria calculada subtraindo o tempo de vida estimado pela aplicação da Regra de Palmgren-Miner com o tempo de serviço da linha até o momento das medições (Eq. 2.24), o que resultaria em uma vida remanescente (V_R) de 31,5 anos.

6.3 APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS IEEE (1966) E EPRI (1979)

Com o objetivo de avaliar a integridade do cabo condutor em relação às metodologias do IEEE (1966) e EPRI (1979), foi produzido um gráfico (Fig. 6.5) que dispõe as informações da amplitude de flexão (Y_b) máxima alcançada em cada classe de frequência representada na matriz, um eixo secundário foi traçado estabelecer a relação entre o nível de amplitude de flexão (pico-a-pico) e a tensão (0-pico) gerada em cada um destes níveis de deslocamento.

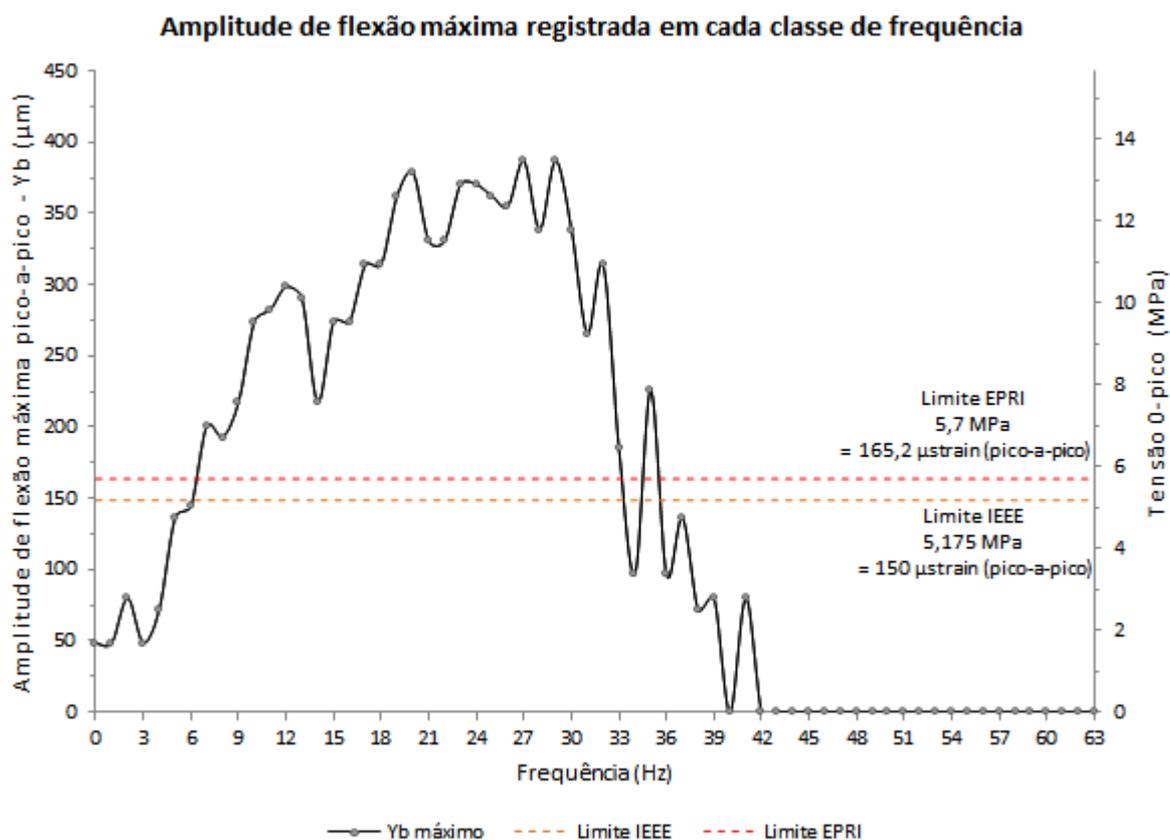


Figura 6.5 – Gráfico da amplitude de flexão máxima registrada em cada classe de frequência.

Segundo o gráfico acima, pode ser verificado que limite de resistência de 5,7 MPa 0-pico (Tab. 3.3) recomendado pela EPRI para cabos CAL 900 (cabo multicamadas constituído de fios de alumínio liga 6201) foi ultrapassado e algumas ocorrências ultrapassaram até o dobro deste limite (11,4 MPa). Verifica-se também que o limite de deformação mais conservador dado pelo IEEE (150 *microstrains* pico-a-pico) foi ultrapassado. Portanto, as metodologias do IEEE (1966) e EPRI (1979) sugerem que os níveis de vibração registrados poderiam provocar danos que a partir de algum momento culminariam na falha do condutor, caso nenhuma medida fosse tomada para atenuar a vibração.

6.4 DISCUSSÃO

Foi verificado que o cabo condutor em estudo estaria sujeito a níveis de vibração acima dos recomendados pelas metodologias do EPRI e do IEEE, no entanto, estas metodologias são reconhecidamente conservadoras e a violação desses limites não esclarecem os motivos pelos quais levaram o cabo a falhar prematuramente com dois anos de serviço. A aplicação da metodologia do CIGRÉ poderia contribuir para um maior esclarecimento do problema, contudo, o tempo estimado apresentou-se inconsistente com a vida dos condutores instalados na linha de transmissão em estudo.

Kalombo *et al.* (2015) atribuem uma conjunção de 3 fatores às causas das falhas prematuras:

- 1) **Utilização de um cabo com baixa resistência mecânica à fadiga:** Ensaio de laboratório comprovam o desempenho inferior em fadiga de cabos alumínio liga 6201 em relação aos cabos ACSR ou de alumínio 1350;
- 2) **Presença de muitos espaçadores no vão:** O excesso de espaçadores reduziu a eficiência dos amortecedores e introduziram tensões adicionais no ponto de conexão com o condutor, o que contribuiu para ocorrência de mais falhas.
- 3) **Presença de ventos estáveis induzindo vibrações de alta frequência.**

Considerando casos mais genéricos, a metodologia CIGRÉ WG-22-04 é útil por permitir uma abordagem preventiva mais ampla, no entanto, o tempo de vida calculado por este critério deve ser considerado apenas como uma estimativa dada para orientação de ações.

Conforme foi discutido na Seção (2.5), algumas imprecisões permeiam a teoria de dano acumulativo: A regra considera apenas o efeito linear dos danos, não há consideração da sequência e da interação entre carregamentos na propagação das trincas (GARCIA *et al.*, 2012). O trabalho de Murça (2011) confirma que há certa dispersão entre o tempo de vida calculado pela teoria e os valores obtidos por laboratório em cabos condutores ensaiados com blocos de carregamento crescentes e decrescentes. Outras questões que podem levar à imprecisão dos resultados são: A dispersão inerente dos dados representados pela curva S-N, a acurácia dos equipamentos nas medições e o tempo em que os dados são gravados, onde se assume que os registros são representativos do período de um ano e que haverá repetição dos mesmos carregamentos ao longo de toda vida do condutor.

O tempo de vida do condutor do estudo de caso foi recalculado considerando um acréscimo de 26 μm em cada nível de amplitude de flexão pico-a-pico (Y_b) registrado na matriz. O acréscimo utilizado tem como objetivo considerar a situação verificada no laboratório, na qual a maior parte das amostras do Ensaio-Pavica apresentou ciclos registrados na classe (de intervalo de 26 μm) inferior e adjacente à classe esperada. O resultado obtido foi um tempo de vida de aproximadamente 17 anos, valor quase 50% inferior ao calculado inicialmente pela suposição que o vibrógrafo registra efetivamente os níveis reais de vibração. A situação apresentada neste exemplo deve servir como alerta para a consideração que a linha pode estar sujeita a níveis de vibração ligeiramente maiores que os registrados pelos vibrógrafos e isto pode implicar em um tempo de vida consideravelmente menor que o estimado.

7 CONCLUSÃO

7.1 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES DO TRABALHO

Tendo em vista os objetivos iniciais contidos no escopo do trabalho, apresentou-se uma revisão teórica sobre fadiga em cabos condutores de eletricidade visando criar o arcabouço necessário à aplicação dos critérios avaliativos da integridade do condutor e também foi realizado um estudo sobre vibrógrafos, no qual foi feito um comparativo entre as características técnicas dos principais vibrógrafos comerciais desenvolvidos, em seguida, o método de medição empregado por estes equipamentos foi identificado e submetido à análise crítica com intuito de se compreender as limitações dos aparelhos medidores de vibração em cabos condutores.

O estudo qualitativo realizado mostrou que os vibrógrafos são ferramentas importantes que possibilitam os setores de manutenção e inspeção a agirem de forma preventiva evitando que os danos causados pela fadiga nas linhas de transmissão resultem na interrupção do fornecimento da energia elétrica e em prejuízos econômicos, entretanto, foi verificado que estes equipamentos apresentam algumas limitações que podem comprometer a análise dos níveis reais de vibração nos cabos condutores. As limitações decorrem de simplificações realizadas no registro de dados, tais como: A própria gravação de dados feita em intervalos de valores (classes), a autonomia insuficiente da bateria destes equipamentos, que implica no funcionamento intermitente dos vibrógrafos pela coleta de amostras durante curtos períodos de tempo e simplificações decorrentes dos próprios algoritmos utilizados pelos vibrógrafos no registro das amplitudes e frequências.

Até certo ponto, as simplificações realizadas pelos vibrógrafos no registro de dados são necessárias para possibilitar a análise das vibrações em cabos condutores instalados em campo. Deve ser reconhecido que a vibração em cabos condutores é um fenômeno complexo que envolve a excitação por meio de um mecanismo natural (ação dos ventos), o qual é sujeito às mudanças climáticas que ocorrem no decorrer do ano (temperatura e velocidade do vento), portanto existe grande dificuldade técnica envolvida na fabricação de um equipamento que consiga registrar todas as nuances da vibração eólica principalmente considerando que estes equipamentos são instalados no alto de uma torre de transmissão, local onde são sujeitos às condições adversas (exposição ao sol, chuva e interferência eletromagnética) e local onde não há suprimento de energia nem acesso à memória física adicional para armazenamento de dados.

Portanto, as simplificações, como a amostragem para coleta de dados, são válidas para tornar possível o estudo e a identificação da intensidade da vibração nos condutores. Os usuários dos vibrógrafos devem ter conhecimento de tais limitações para escolher de forma consciente o período, a duração e o local mais adequado para as gravações com a finalidade de se detectar os níveis de vibração mais críticos da linha de transmissão.

Em relação aos resultados obtidos na análise quantitativa das medições com os vibrógrafos, que foram realizadas na bancada de testes do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB, podem ser destacadas as seguintes constatações:

- Os vibrógrafos classificaram os ciclos em classes de frequência corretas quando se comparou os registros obtidos com a frequência de excitação estabelecida no *shaker*. O número de ciclos registrado pelos vibrógrafos também foi coerente com o valor calculado por meio do tempo ativo das medições e a referida frequência de excitação do cabo;
- Houve uma tendência geral dos vibrógrafos em registrar ciclos em classes de amplitude de flexão inferiores às classes corretas, as quais foram indicadas pela medição de um acelerômetro piezoelétrico calibrado e de alta precisão que foi monitorado constantemente durante a realização dos ensaios pelo controlador do *shaker*;
- As amostras do vibrógrafo Pavica ficaram mais próximas dos valores de referência controlados pelo *shaker*, exceto para as amostras de maior nível de deslocamento (350 μm), nas quais foram registradas medidas mais acuradas para o vibrógrafo Vibrec;
- A frequência de teste estabelecida em cada amostra influenciou de forma aleatória na dispersão (precisão) das medições, no entanto, a frequência alterou a acurácia (exatidão) das amostras de maior e menor frequência do Vibrec. Para o Pavica, não foi observada uma relação clara entre a frequência e a exatidão das medições;
- Foi verificado que o aumento do nível de deslocamento testado aumentou a dispersão das amostras (os ciclos foram registrados em mais classes) e foi verificado que o aumento do nível de deslocamento reduziu a acurácia das medições, principalmente para o vibrógrafo Pavica.

De forma geral, é possível concluir que os dois equipamentos testados apresentaram a tendência de categorizar os ciclos em classes de menor amplitude de flexão, o erro gerado por esta característica pode ser significativo ou não dependendo do intervalo de classe estabelecido na matriz de dados do vibrógrafo. Porém, foi verificado que o erro de medição se acentuou conforme o nível de amplitude de flexão foi aumentado, este efeito foi mais significativo na utilização do Pavica, o que fornece um indício que a detecção de níveis elevados de vibração (amplitudes de flexão maiores que 350 μm) por meio deste equipamento pode ser limitada. Esta hipótese levantada deve ser estudada de forma mais completa em ensaios específicos com níveis de deslocamento altos e utilizando mais de um exemplar do mesmo modelo de vibrógrafo para ser confirmada.

Por fim, foi demonstrado o procedimento executado na aplicação das metodologias CIGRÉ (1985), IEEE (1966) e EPRI (1979) a partir de dados extraídos em campo por meio de um vibrógrafo, o que encerrou o escopo deste trabalho que buscou contribuir com conhecimento informativo sobre vibrógrafos no que concerne às limitações, à forma de utilização e à aplicação destes aparelhos.

7.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- Conduzir ensaios adicionais em laboratório para validar as medições de vibrógrafos no registro de níveis de deslocamento superiores aos testados neste trabalho. Utilizando os suportes originais de fábrica e mais de um exemplar do mesmo modelo de vibrógrafo nas medições;
- Realização de ensaios conduzidos até a falha do cabo com a excitação em diferentes tipos de sinais (amplitude constante, em blocos ou sinal semelhante ao batimento) para permitir a comparação do dano acumulado previsto pelo vibrógrafo e o dano acumulado real, que teoricamente deveria ser igual à unidade ($D = 1$) para cabos que já falharam;
- Comparação de dados fornecidos pelos vibrógrafos Pavica e Vibrec instalados em campo no mesmo vão para a avaliação da integridade de um cabo condutor. Os registros temporais de amplitude, temperatura e velocidade do vento realizados em campo pelo vibrógrafo Vibrec também podem ser úteis ao agregar mais conhecimento no estudo de fadiga em cabos condutores de energia elétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRADEE. **Sistema Interligado**. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/sistema-interligado>>. Acesso em: 29 março 2015.
- ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: TDA comunicação, 2008. 236 p.
- ANEEL. **Relatório ANEEL 2013**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/Relatorio_Aneel_2013.pdf>. Acesso em: 28 julho 2015.
- ASTM E1049-85(2005). **Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005.
- AZEVEDO, C. R. F. *et al.* **Fretting Fatigue in Overhead Conductors: Rig Design and Failure Analysis of a Grosbeak Aluminium Cable Steel Reinforced Conductor**. ELSEVIER: Engineering Failure Analysis. pp 136 – 151, 2008.
- BELLORIO, M. B. **Revisão sobre critérios de fadiga para cabos condutores de energia e uso de metodologia para estimativa de sua vida remanescente**. 2009. 86 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília DF.
- BLEVINS, R. D. **Flow-Induced Vibration**. 2nd. ed. Malabar, Florida: Krieger, 2001. 477 p.
- BRAGA, A. M. B., *et al.* **Sensoriamento de Vibração de Cabos em Linhas de Transmissão Usando Fibra Óptica e Redes de Bragg**. Relatórios de atividades no. 1-10. Projeto de P&D Expansion – PUC-Rio. Brasil. 2003-2005.
- BRANCO, C. M.; FERNANDES, A. A.; CASTRO, M. S. T. **Fadiga de Estruturas Soldadas**. Lisboa, Portugal: Gulbenkian, 1986. 902 p.
- CALLISTER, Jr., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 705 p.
- CEPEL. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. 2001. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf> Acesso em: 26 agosto 2015.
- CIGRÉ. **Guide to Vibration Measurements on Overhead Lines**. WG 22.11 ELECTRA no. 163; Dec. 1995.
- CIGRÉ. **Recommendations for the Evaluation of the Lifetime of Transmission Line Conductors**. WG 22.04 ELECTRA no. 63, pp. 105-110.
- CLOUTIER, L.; LEBLOND, A. **Fatigue Endurance Capability of Conductor/Clamp Systems: Update of Present Knowledge**. Helsinki. July, 2007. 18 slides. Disponível em: <<http://www.aeolus.bz/meeting41/app15.pdf>>. Acesso em: 14 março 2015.

- CLOUTIER, L.; LEBLOND, A. **Tutorial: Conductor Fatigue**. Bangkok. Feb. 28, 2011. 37 slides.
Disponível em: < <http://www.aeolus.bz/Seminar%202011/Seminar%202011.pdf> >. Acesso em: 15 março 2015.
- COSMAI, U. **Assessment of Aeolian Vibration Severity**. Bangkok. Feb. 28, 2009. 83 slides.
Disponível em: < [http://www.aeolus.bz/Seminar%202011/ Umberto%20-%20Assessment%202011CIGRE%20rid.pdf](http://www.aeolus.bz/Seminar%202011/Umberto%20-%20Assessment%202011CIGRE%20rid.pdf) >. Acesso em: 14 março 2015.
- DOWLING N. E. **Mechanical Behavior of Materials**. 3rd. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2007. 936 pp.
- EPRI. **EPRI Transmission Line Reference Book: Wind-Induced Conductor Motion**. Palo Alto, CA: 2006. 1012317.
- FADEL, A. A. **Avaliação do Efeito de Tracionamento em Elevados Níveis de EDS Sobre a Resistência em Fadiga do Condutor IBIS (CAA 397,5 MCM)**. 2010. 185 p. Tese de Doutorado em Ciências Mecânicas – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- FADEL, A. A.; ROSA, D.; MURÇA, L. B.; FERREIRA, J.L.A.; ARAÚJO, J.A. **Effect of high mean tensile stress on the fretting fatigue life of an ibis steel reinforced aluminium conductor**. ELSEVIER: International Journal of Fatigue. v. 42, pp. 24-34, march. 2011.
- FIGUEIREDO, I. M. P. **Tempo Efectivo de um Sistema: Ciclos Rainflow e Ciclos Min-max**. 2004. 79 p. Dissertação de mestrado – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- FORJASUL. **Materiais elétricos: Programa 2012|2013**. RS-Brasil: 2013. 74 p.
- FRONTIN, S. O. *et al.* **Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas Aplicadas a Linhas de Transmissão**. 1. ed. Brasília: Goya, 2010. 368 p.
- GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 365 p.
- HARDY. C; BRUNELLE. J. **Principles of Measurement and Analysis with the New Pavica Conductor Vibration Recorder**. Toronto, May, 1991.
- HENRIQUES, A. M. D. **Bancada de Ensaios Mecânicos à Fadiga de Cabos Condutores de Energia**. 2006. 162 p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- HORTÊNCIO, T. M. O. S. **Ensaios de Fadiga sob Condições de Fretting com o Cabo CAA 397,5 MCM – IBIS**. 2009. 101 p. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- IEEE. **Guide for Aeolian Vibration Field Measurements of Overhead Conductors**. IEEE Std 1368. 2006.
- IEEE. **Standardization of Conductor Vibration Measurements**. IEEE Transactions, Vol. PAS-85, no. 1, 1966, pp. 10-22.

- JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Fundamentals of Machine Component Design**. 5th. ed. Wiley, 2011. 899 p.
- KALOMBO, R.B.; ARAÚJO, J.A.; FERREIRA, J.L.A.; da SILVA, C.R.M.; ALENCAR, R.; CAPRA, A. R. **Assessment of the fatigue failure of an All Aluminium Alloy Cable (AAAC) for a 230 kV transmission line in the Center-West of Brazil**. ELSEVIER: Engineering Failure Analysis. 11 p, September 2015.
- LIENHARD, J. H. **Synopsis of Lift, Drag and Vortex Frequency Data for Rigid Circular Cylinders**. Washington State University, College of Engineering, Research Division Bulletin 300. 1966.
- MURÇA, L. B. **Estudo Experimental do Efeito da Sequência de Carregamento Sobre a Resistência à Fadiga de Cabos Condutores**. 2011. 100 p. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- NEXANS. **Alumínio: Condutores Nus**. Brasil: 2013. 60 p.
- NOGUEIRA, M. M. **Avaliação Metrológica de Acelerômetro Óptico Utilizando Rede de Bragg: Aplicação em Linhas de Transmissão de Energia Elétrica**. 2005. 190 p. Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ.
- OLIVEIRA, M. C. **Desenvolvimento de um vibrógrafo para medir e armazenar dados de vibração de cabos de transmissão de energia elétrica**. 2013. 204 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- PFISTERER SEAFAG AG. **Vibrec500 Software: User Manual V 1.0**. Switzerland: 2010. 53 p.
- PFISTERER SEAFAG AG. **Vibrec500 WT: User Manual V 1.0**. Switzerland: 2010. 12 p.
- POFFENBERGER, J. C.; SWART, R. L. **Differential Displacement and Dynamic Conductor Strain**. IEEE Transactions Paper, Vol. PAS-84, 1965, pp. 281-289.
- ROCTEST. **Instruction Manual: Transmission Line Vibration Recorder and Analyser Model Pavica**. 2003. 44 p.
- SCHIMITH, S. B. **Vibrógrafo Autônomo para Aquisição Remota de Dados de Vibrações Eólicas de Linhas de Transmissão Elétricas Suspensas**. 2012. 58 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR.
- SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 960 p.
- STEPHENS, R. I. *et al.* **Metal Fatigue in Engineering**. 2nd ed. Wiley, 2001. 496 p.
- TECHET. A. H. **13.42 Lecture: Vortex Induced Vibrations**. 21 april 2005. 32 slides. Disponível em: < http://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-22-design-principles-for-ocean-vehicles-13-42-spring-2005/readings/lec20_viv1.pdf> Acesso em: 10 abril 2015.

ANEXOS

		Pág.
Anexo I	Matriz Amplitude – Frequência utilizada no estudo de caso	112
Anexo II	Exemplo de gravação temporal efetuado pelo vibrógrafo Vibrec 500 WT	118

ANEXO I : Matriz Amplitude – Frequência utilizada no estudo de caso

μm	mils	f = 0Hz	f = 1Hz	f = 2Hz	f = 3Hz	f = 4Hz	f = 5Hz	f = 6Hz	f = 7Hz	f = 8Hz	f = 9Hz	f = 10Hz	f = 11Hz
432. - 439.	17.0 - 17.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
425. - 432.	16.8 - 17.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
418. - 425.	16.5 - 16.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
411. - 418.	16.2 - 16.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
405. - 411.	15.9 - 16.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
398. - 405.	15.7 - 15.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
391. - 398.	15.4 - 15.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
384. - 391.	15.1 - 15.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
377. - 384.	14.9 - 15.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
370. - 377.	14.6 - 14.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
363. - 370.	14.3 - 14.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
357. - 363.	14.1 - 14.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
350. - 357.	13.8 - 14.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
343. - 350.	13.5 - 13.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
336. - 343.	13.2 - 13.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
329. - 336.	13.0 - 13.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
322. - 329.	12.7 - 13.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
315. - 322.	12.4 - 12.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
308. - 315.	12.2 - 12.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
302. - 308.	11.9 - 12.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
295. - 302.	11.6 - 11.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
288. - 295.	11.4 - 11.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
281. - 288.	11.1 - 11.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
274. - 281.	10.8 - 11.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
267. - 274.	10.5 - 10.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
260. - 267.	10.3 - 10.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
254. - 260.	10.0 - 10.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
247. - 254.	9.7 - 10.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
240. - 247.	9.5 - 9.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
233. - 240.	9.2 - 9.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
226. - 233.	8.9 - 9.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
219. - 226.	8.6 - 8.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
212. - 219.	8.4 - 8.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3
205. - 212.	8.1 - 8.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3
199. - 205.	7.8 - 8.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6
192. - 199.	7.6 - 7.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	11
185. - 192.	7.3 - 7.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	11
178. - 185.	7.0 - 7.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	7	14
171. - 178.	6.8 - 7.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	16	15
164. - 171.	6.5 - 6.8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	21	21
157. - 164.	6.2 - 6.5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	5	21	36
151. - 157.	5.9 - 6.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	27	66
144. - 151.	5.7 - 5.9	0	0	0	0	0	0	0	1	2	18	28	79
137. - 144.	5.4 - 5.7	0	0	0	0	0	0	0	1	2	29	32	105
130. - 137.	5.1 - 5.4	0	0	0	0	0	0	0	2	4	37	32	136
123. - 130.	4.9 - 5.1	0	0	0	0	0	0	0	4	11	39	64	164
116. - 123.	4.6 - 4.9	0	0	0	0	0	0	1	3	18	45	85	182
109. - 116.	4.3 - 4.6	0	0	0	0	0	2	4	10	20	61	83	231
103. - 109.	4.1 - 4.3	0	0	0	0	0	1	4	12	25	82	113	241
96. - 103.	3.8 - 4.1	0	0	0	0	0	1	7	15	45	108	122	258
89. - 96.	3.5 - 3.8	0	0	0	0	0	5	9	26	45	127	124	317
82. - 89.	3.2 - 3.5	0	0	0	0	0	17	6	29	73	156	156	291
75. - 82.	3.0 - 3.2	0	0	0	0	0	12	19	42	77	161	158	293
68. - 75.	2.7 - 3.0	0	0	0	0	0	20	29	61	92	196	169	304
61. - 68.	2.4 - 2.7	0	0	4	0	0	26	24	49	144	214	202	337
54. - 61.	2.2 - 2.4	0	0	2	0	4	55	40	80	145	266	205	299
48. - 54.	1.9 - 2.2	0	0	2	0	3	56	59	86	183	277	245	344
41. - 48.	1.6 - 1.9	0	0	6	0	7	99	80	93	227	339	243	330
34. - 41.	1.4 - 1.6	10	7	18	18	24	196	149	157	312	366	261	313
27. - 34.	1.1 - 1.4	48	39	58	67	110	341	416	280	679	700	399	338
20. - 27.	0.8 - 1.1	86	65	56	42	100	154	228	277	488	681	439	267
13. - 20.	0.5 - 0.8	53	42	19	23	25	45	41	117	134	236	208	68
6. - 13.	0.3 - 0.5	2	0	0	0	0	1	0	0	2	3	3	2
0. - 6.	0.0 - 0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ANEXO II : Exemplo de gravação temporal realizada pelo Vibrec (referente à amostra 9)

