

## PROJETO DE GRADUAÇÃO

# AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE TENSÃO MÉDIA E ALTERNADA EM FIOS DE AI 6201 E AI 1350: TESTES X RELAÇÃO H/W

Por, RENATO EWERTON RODRIGUES VIEIRA

Brasília, 01 de Dezembro de 2016

## **UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Mecânica

### PROJETO DE GRADUAÇÃO

## AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE TENSÃO MÉDIA E ALTERNADA EM FIOS DE AL 6201 E AL 1350: TESTES X RELAÇÃO H/W

Por,

**Renato Ewerton Rodrigues Vieira** 

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. Thiago de Carvalho Rodrigues Doca, UnB/ ENM

Brasília, 01 de Dezembro de 2016

#### AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Vicente e Rosângela e à minha irmã Evelyn pelo carinho e apoio nas mais diversas situações.

À minha companheira Keyla que sempre esteve ao meu lado em todas as etapas da minha vida acompanhando diariamente minha jornada com muito amor e compreensão.

Aos meus amigos Calixto, Guilherme e Arthur pelas palavras de incentivo.

Aos colegas de trabalho Remy, Mielle, Thiago e Pedro que compõem a equipe do laboratório de cabos da UnB transformando o trabalho em um ambiente de amigos.

Aos professores Alex, Jorge e Thiago pelas críticas construtivas que permitiram a execução deste trabalho.

Aos colegas do curso de engenharia mecânica que transformaram o longo trajeto da graduação em um ambiente de amigos.

#### RESUMO

A falha por fadiga de cabos condutores ocorre devido aos esforços cíclicos gerados nas restrições de movimento do cabo durante as vibrações decorrentes da ação do vento. O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento da tensão média e alternada em fios de diferentes tipos de cabos condutores de energia em função do parâmetro H/w, onde H representa a carga de esticamento do cabo e w seu peso por unidade de comprimento. Os níveis de H/w estudados são: 1820, 2144 e 2725 m. A tensão média é avaliada por meio de ensaios estáticos nos fios da camada externa dos condutores TERN, CAL 900, CAL 1055 e ORCHID. A componente alternada é analisada através de ensaios dinâmicos apenas para os condutores ORCHID e CAL 1055 para diferentes amplitudes de deslocamento do condutor. Os dados experimentais são obtidos por meio de extensômetros. Os ensaios foram realizados no laboratório de fadiga e integridade estrutural de cabos condutores de energia da Universidade de Brasília. É apresentado um estudo sobre o emprego da formulação de Poffenberger-Swart para determinação da tensão nominal atuante na região de falha dos condutores. A formulação que relaciona o parâmetro H/w com o nível de tensão média atuante nos fios do cabo também é analisada. O ensaio estático apresentou resultados bastante satisfatórios para os quatro condutores analisados. O erro médio para o condutor ORCHID permaneceu na faixa de 1%. Os ensaios dinâmicos com os cabos CAL 1055 e ORCHID apresentaram boa correlação entre a formulação de P-S e a tensão atuante na zona de falha do condutor. O cabo CAL 1055 apresentou melhor resultado em maiores cargas de esticamento. Ambos os cabos apresentaram melhores resultados em pequenas amplitudes de deslocamento.

Palavras chave: Fadiga, Cabo condutor, Parâmetro H/w.

#### ABSTRACT

The fatigue failure of overhead conductors cables occurs due to cyclic stresses caused by restrictions on cable's movement during the vibrations caused by the wind. The aim of this work is to analyze the behavior of mean stress and stress amplitude in wires of different types of cables as a function of the H/w parameter, H represents the cable tensile load and w the weight per unit length. The H/w levels studied are: 1820, 2144 and 2725 m. The mean stress is evaluated by static tests on the outer layer of the conductor TERN, CAL 900, CAL 1055 and ORCHID. The stress amplitude is analyzed by dynamic tests only for ORCHID and CAL 1055 at different displacement amplitudes. The experimental data are obtained by straingages. The tests were performed in the laboratory of fatigue and structural integrity of conductor cables of the University of Brasilia. A study about the Poffenberger-Swart formulation to determine the nominal stress amplitude acting in the failure region of conductor is presented. The use of the formulation that correlate the parameter H/w to the mean stress in the conductor wires is analyzed. The static test presented quite satisfactory results for the four cables analyzed. The error for the ORCHID prevailed between 1%. The dynamic tests on CAL 1055 and ORCHID cables presented good correlation between the P-S formulation and the stress amplitude on the conductor failure zone. The CAL 1055 cable presented better results in higher tensile loads. Both cables presented better results at small displacement amplitudes.

## SUMÁRIO

1	INT	TRODUÇÃO	1
	1.1	Contextualização e Apresentação do Problema	1
	1.2	Objetivo	4
	1.3	Estrutura do Trabalho	5
2	REV	EVISÃO TEÓRICA - FADIGA	6
	2.1	Conceito de Fadiga	6
	2.2	Caracterização do Processo de Fadiga	6
	2.3	Definições Fundamentais	9
	2.4	Metodologias de Projeto	12
	2.5	Método da Tensão-Vida	
	2.6	Efeito da tensão média na resistência à fadiga	16
	2.7	Conceito de Dano em Fadiga	18
	2.7.	7.1 Método RainFlow	18
	2.7.2	7.2 Modelo de Palmgren-Miner	19
3	FAI	DIGA EM CABOS	21
	3.1	Fadiga em Cabos Condutores de Energia	21
	3.2	Tipos de Cabos Condutores	22
	3.3	Tipos de Vibração de Cabos Condutores	24
	3.3.	3.1 Vibração eólica	25
	3.3.	3.2 Oscilações de subvão	27
	3.3.	3.3 Galope	27
	3.4	Mecanismo de Falha por Fadiga em Cabos Condutores de Energia	28
3.5		Esforços Dinâmicos em Cabos Condutores	29
	3.5.	5.1 Equação de Poffenberger-Swart (P-S)	30
	3.6	Metodologias de Análise da Vida Residual do Cabo Condutor	33
	3.6.	5.1 Máxima deformação do IEEE	33
	3.6.2	5.2 Limite de resistência do EPRI	33
	3.6.	5.3 Método de estimativa de tempo de vida do condutor da CIGRE	
	3.7	Esforços Estáticos em Cabos Condutores	35
	3.7.	7.1 Every Day Stress (EDS)	
	3.7.2	7.2 Parâmetro H/w	

4	PRC	OGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS	. 39
	4.1	Descrição da Bancada de Ensaios de Cabos Condutores	. 39
	4.2	Cabos Condutores Analisados	. 42
	4.3	Posicionamento e Tracionamento do Cabo Condutor	. 43
	4.4	Instrumentação do Cabo Condutor	. 46
	4.4.	1 Extensometria	. 46
	4.4.2	2 Posicionamento dos sensores utilizados no ensaio dinâmico	. 52
	4.5	Execução dos Ensaios Estáticos e Dinâmicos	. 53
	4.5.	1 Ensaio estático	. 54
	4.5.2	2 Ensaio dinâmico	. 57
5	RES	SULTADOS E DISCUSSÕES	. 60
	5.1	Resultados dos Ensaios Estáticos	. 60
	5.1.	1 Cabo condutor: TERN	. 61
	5.1.2	2 Cabo condutor: CAL 1055	. 64
	5.1.	3 Cabo condutor: CAL 900	. 67
	5.1.4	4 Cabo condutor: ORCHID	. 71
	5.2	Resultados dos Ensaios Dinâmicos	. 74
	5.2.	1 Cabo condutor: ORCHID	. 75
	5.2.2	2 Cabo condutor: CAL 1055	. 79
6	COl	NCLUSÃO	. 84
	6.1	Conclusão dos Ensaios Estáticos e Dinâmicos	. 84
	6.2	Propostas para Trabalhos Futuros	. 85
R	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		
APÊNDICE			. 90
A. CALIBRAÇÃO E BALANCEAMENTO DOS EXTENSÔMETROS 91			
B. MANUSEIO DO SOFTWARE DE CONTROLE			. 99

### LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Principais elementos das linhas de transmissão (modificado: FUCHS, 1992)	1
Figura 1.2 - Falha provocada por <i>fretting</i> em um cabo ACSR (FADEL, 2010)	2
Figura 1.3 - Montagem cabo-grampo: localização da tensão calculada pela formulação de	
Poffenberger-Swart (FADEL, 2010).	3
Figura 1.4 - Efeito da tensão média na vida em fadiga (modificado: CALLISTER, 2011)	4
Figura 2.1 - Elementos de nucleação de trincas em componentes sujeitos à esforços cíclicos	
(modificado: GARCIA, 2012)	7
Figura 2.2 - Mecanismo de propagação da trinca (FADEL, 2010)	8
Figura 2.3 - Esboço da formação de estrias na propagação de trinca em fadiga (GARCIA, 2012)	8
Figura 2.4 - Etapas do processo de fratura por fadiga (GARCIA, 2012).	9
Figura 2.5 - Tensões cíclicas em fadiga: (a) tensão alternada reversa; (b) tensão flutuante	10
Figura 2.6 - Ciclos de tensão de fadiga: a) Blocos; b) Aleatório (BRANCO, 1986)	10
Figura 2.7 - Parâmetros básicos para descrição de ciclo de fadiga de amplitude constante (modif	ficado:
SHIGLEY, 2011).	11
Figura 2.8 - Métodos para o levantamento da curva S-N: a) Padrão; e b) Tensão constante (GAF	RCIA,
2012)	14
Figura 2.9 - Curvas S-N esquemáticas para um aço maciço e uma liga de alumínio (BRANCO,	1986).
	15
Figura 2.10 - Curvas S-N para a liga de alumínio 7075-T6 em ensaios de carregamento axial par	ra
diferentes valores de tensão média (modificado: DOWLING, 2007)	16
Figura 2.11 - Diagrama de vida constante generalizado. (modificado: SHIGLEY, 2011)	17
Figura 2.12 - Ilustração do método de RainFlow (WIRSCHING, 1997)	19
Figura 2.13 - Modelo de Palmgren-Miner: Acúmulo de dano linear (LEE, 2005)	20
Figura 3.1 - Acessórios utilizados em cabos condutores de energia: a) Armor Rod; b) Amortece	dor; c)
Armor Grip; d) Cushion Grip. (PREFORMED LINE PRODUCTS, 2013)	21
Figura 3.2 - Encordoamento de um cabo condutor de energia	23
Figura 3.3 - Tipos de vibração de cabos condutores. (modificado: EPRI, 2006)	25
Figura 3.4 - Número de Strouhal em função do número de Reynolds. Curva obtida experimental	lmente
para escoamento sobre cilindros circulares. (FUCHS, 1992)	26
Figura 3.5 - Regimes de fluxo em torno de um cilindro liso. (LIENHARD, 1966)	27
Figura 3.6 - Pontos de origem de trincas devido ao <i>fretting</i>	28
Figura 3.7 - Configuração esquemática do problema de contato entre dois cilindros (equivalente	a dois
fios de camadas distintas do cabo) (FADEL, 2010)	29
Figura 3.8 - Construção típica de cabos condutores de energia (CIGRE, 2008)	30
Figura 3.9 - Montagem esquemática cabo/grampo mostrando a posição padrão para medida da	
amplitude de deslocamento Y <sub>b</sub>	31
Figura 3.10 - Vibrógrafos: a) Pavica; b) Vibrec (EPRI, 2010).	32
Figura 3.11 - a) Matriz obtida por meio de um vibrógrafo extrapolada pelo período de um ano	
(BELLORIO, 2009); b) Vibrógrafo modelo Pavica; c) Instalação do vibrógrafo na linha de	
transmissão (FADEL, 2010)	35
Figura 4.1 - Desenho esquemático da montagem da bancada de ensaios (MURÇA, 2011)	39
Figura 4.2 - Talha de alavanca (tifor)	40

Figura 4.3 - Célula de carga CSR-5000 kgf	. 40
Figura 4.4 - Blocos móveis das bancadas A, B e C	. 41
Figura 4.5 - Blocos fixos com trilhos para deslocamento do excitador eletromecânico	. 41
Figura 4.6 - Sistema de ar condicionado e isolamento térmico	. 42
Figura 4.7 - Composição dos cabos condutores: a) TERN; b) CAL 900; c) CAL 1055; d) ORCHID	
(modificado: ALUBAR, 2010).	. 43
Figura 4.8 - a) Polias de sustentação utilizadas para movimentação do cabo durante o esticamento; b	5)
Elementos de proteção	. 44
Figura 4.9 - a) Bobina; b) Grampo de suspensão monoarticulado modelo Forjasul 55101/003	. 44
Figura 4.10 - Grampos de ancoragem a) Bloco fixo 3; b) Bloco fixo 1	. 45
Figura 4.11 - Braço de alavanca e tifor	. 46
Figura 4.12 - Composição de um extensômetro (modificado: HOFFMANN, 1989)	. 47
Figura 4.13 - Extensômetro PA-13-120BA-350-L (Excel Sensores)	. 47
Figura 4.14 - Preparo da camada externa do cabo para colagem dos extensômetros	. 48
Figura 4.15 - Limpeza da camada externa do cabo para colagem dos extensômetros	. 48
Figura 4.16 - Colagem dos extensômetros	. 49
Figura 4.17 - a) Extensômetros colados em todos os fios de alumínio da camada externa do conduto	or
para realização dos ensaios estáticos; b) Extensômetros colados nos três fios mais altos e opostos ac	)
UPC para realização dos ensaios dinâmicos.	. 50
Figura 4.18 - Soldagem dos fios dos extensômetros	. 51
Figura 4.19 - Adição de uma camada de silicone para proteção dos extensômetros	. 51
Figura 4.20 - a) Dispositivo de alinhamento; b) Conexão entre o Shaker e a amostra	. 52
Figura 4.21 - Acelerômetro piezoelétrico tipo PZ 23;	. 53
Figura 4.22 - Instrumentação do ponto 89 mm.	. 53
Figura 4.23 - Varredura em seno	. 58
Figura 5.1 - Deformação média em função do valor H/w para o condutor TERN	. 61
Figura 5.2 - Tensão média e deformação dos fios da camada externa do cabo TERN	. 62
Figura 5.3 - Tensão média em função do parâmetro H/w para o cabo TERN	. 63
Figura 5.4 - Erro médio entre os valores teóricos e experimentais da tensão estática atuante na cama	ıda
externa do cabo TERN em função do parâmetro H/w e do sentido de carregamento	. 64
Figura 5.5 - Deformação média em função do valor H/w para o condutor CAL 1055	. 64
Figura 5.6 - Tensão média e deformação dos fios da camada externa do cabo CAL 1055	. 65
Figura 5.7 - Tensão média em função do parâmetro H/w para o cabo CAL 1055	. 66
Figura 5.8 - Erro médio entre os valores teóricos e experimentais da tensão estática atuante na cama	ıda
externa do cabo CAL 1055 em função do parâmetro H/w e do sentido de carregamento	. 67
Figura 5.9 - Tensão média e deformação dos fios da camada externa do cabo CAL 900	. 68
Figura 5.10 - Deformação média em função do valor H/w para o condutor CAL 900	. 69
Figura 5.11 - Tensão média em função do parâmetro H/w para o cabo CAL 900	. 70
Figura 5.12 - Erro médio entre os valores teóricos e experimentais da tensão estática atuante na	
camada externa do cabo CAL 900 em função do parâmetro H/w e do sentido de carregamento	. 70
Figura 5.13 - Deformação média em função do valor H/w para o condutor ORCHID	. 71
Figura 5.14 - Tensão média e deformação dos fios da camada externa do cabo ORCHID	. 72
Figura 5.15 - Tensão média em função do parâmetro H/w para o cabo ORCHID	. 73
Figura 5.16 - Erro médio entre os valores teóricos e experimentais da tensão estática atuante na	
camada externa do cabo ORCHID em função do parâmetro H/w e do sentido de carregamento	. 74

Figura 5.17 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo ORCHID em função da amplitude de	
deslocamento (H/w=1820 m).	75
Figura 5.18 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada o	le
tensão atuante no cabo ORCHID (H/w=1820 m).	76
Figura 5.19 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo ORCHID em função da amplitude de	
deslocamento (H/w=2144 m)	76
Figura 5.20 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada o	le
tensão atuante no cabo ORCHID (H/w=2144 m).	77
Figura 5.21 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo ORCHID em função da amplitude de	
deslocamento (H/w=2725 m)	78
Figura 5.22 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada o	le
tensão atuante no cabo ORCHID (H/w=2725 m).	78
Figura 5.23 - Erro médio percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alte	rnada
de tensão atuante no cabo ORCHID em função do parâmetro H/w	79
Figura 5.24 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo CAL 1055 em função da amplitude de	
deslocamento (H/w=1820 m).	79
Figura 5.25 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada o	le
tensão atuante no cabo CAL 1055 (H/w=1820 m)	80
Figura 5.26 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo CAL 1055 em função da amplitude de	
deslocamento (H/w=2144 m).	81
Figura 5.27 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada o	le
tensão atuante no cabo CAL 1055 (H/w=2144 m)	81
Figura 5.28 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo CAL 1055 em função da amplitude de	
deslocamento (H/w=2725 m).	82
Figura 5.29 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada o	le
tensão atuante no cabo CAL 1055 (H/w=2725 m)	83
Figura 5.30 - Erro médio percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alte	rnada
de tensão atuante no cabo CAL 1055 em função do parâmetro H/w	83
Figura A.1 - Link de configuração do driver de aquisição	92
Figura A.2 - Configuração do Driver de Aquisição.	92
Figura A.3 Comunicação entre Hardware e Software: a) Endereço de IP; b) Confirmação	93
Figura A.4 - Caracterização do modelo do Aquisitor de dados utilizado	93
Figura A.5 - Erro frequente na caracterização do modelo do ADS	94
Figura A.6 - Link de acesso ao menu de informações.	95
Figura A.7 - Configuração do dispositivo utilizado.	95
Figura A.8 - Configuração manual para leitura dos extensômetros	96
Figura A.9 - Seleção dos canais utilizados	96
Figura A.10 - Dados de entrada para leitura dos extensômetros	97
Figura A.11 - a) Balanceamento da ponte de Wheatstone; b) Calibração dos extensômetros	98
Figura A.12 - Relatório de leitura dos extensômetros.	98
Figura B.1 - Janela inicial do software de controle.	100
Figura B.2 - Definição das unidades de medida	100
Figura B.3 - a) Tabela de parâmetros do Shaker; b) Janela "Global Shaker Parameters"	101
Figura B.4 - Parâmetros dos Shaker	101
Figura B.5 - Janela de canais "Channel"	102
Figura B.6 - Serial Number de um acelerômetro.	102

Figura B.7 - Janela de controle do Shaker	103
Figura B.8 - Definição do ensaio: "Profile"	103
Figura B.9 - Seleção do tipo de ensaio: a) Varredura; b) Ensaio dinâmico	104
Figura B.10 - Janela "Transmissibility".	104
Figura B.11 - Definição dos sinais que serão visualizados durante o ensaio	105

### LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades dos fios de alumínio liga 1350 e 6201 (KALOMBO, 2015)	. 23
Tabela 2 - Movimentos induzidos pelo vento (EPRI, 2006)	. 24
Tabela 3 - Linhas danificadas em função do nível de EDS (CIGRE, 1999)	. 36
Tabela 4 - Valores recomendados do parâmetro H/w em função das características do terreno (CIGF	RE,
1999)	. 37
Tabela 5 - Características dos cabos condutores utilizados durante a pesquisa. (NEXANS, 2013)	. 42
Tabela 6 - Carga de esticamento das amostras durante o ensaio	. 55
Tabela 7 - Constante "K" utilizada na formulação de P-S em função do parâmetro H/w e do tipo de	
cabo condutor	. 57
Tabela 8 - Valores teóricos de tensão média e deformação em função do tipo de fio que compõe a	
camada externa do condutor	. 60

## LISTA DE ABREVIAÇÕES

ACAR	Condutores de Alumínio Reforçados com Alumínio Liga (Aluminum Conductor Aluminum Alloy Reinforced)
ASTM	American Society for Testing and Materials
CA (AAC)	Condutores de Alumínio (All Aluminum Conductor)
CAA (ACSR)	Condutores de Alumínio com Alma de Aço (Aluminum Conductor Steel Reinforced)
CAL (AAAC)	Condutores de Alumínio Liga (All Aluminum Alloy Conductor)
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CIGRE	Conseil International des Grands Réseaux Electriques (International Council on Large Electric Systems)
EDS	Every Day Stress
EPRI	Electric Power Research Institute
ERE	Extensômetro de Resistência Elétrica
IACS	International Annealed Copper Standard
IEEE	Institute of Electrical and Electronis Engineers
LT	Linha de Transmissão
P-S	Poffenberger-Swart
UnB	Universidade de Brasília
UPC	Último Ponto de Contato entre o cabo e o grampo de suspensão

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Latinos

А	Razão de amplitude.
Aa	Área ocupada pelos fios de aço do condutor, m <sup>2</sup> .
A <sub>al</sub>	Área ocupada pelos fios de alumínio do condutor, m <sup>2</sup> .
D	Dano linear acumulado.
d	Diâmetro de um fio da camada mais externa do condutor, mm.
da	Diâmetro de um fio de aço, mm.
d <sub>al</sub>	Diâmetro de um fio de alumínio, mm.
d <sub>c</sub>	Diâmetro do condutor, m.
E	Módulo de elasticidade, MPa.
Ea	Módulo de elasticidade do fio de aço, MPa.
E <sub>al</sub>	Módulo de elasticidade do fio de alumínio, MPa.
EI <sub>máx</sub>	Máxima rigidez do cabo à flexão, kgf.
EI <sub>mín</sub>	Mínima rigidez do cabo à flexão, kgf.
f	Frequência de carregamento, Hz.
$f_n$	Frequência natural, Hz.
$f_s$	Frequência de desprendimento de vórtices, Hz.
g	Constante gravitacional, m/s <sup>2</sup> .
Н	Carga de esticamento, kgf.
Κ	Fator de conversão da formulação de P-S, MPa/mm.
L	Comprimento do vão, m.
Ν	Número de ciclos.
n	Fator de projeto.
n	Modo natural de vibração.
n <sub>a</sub>	Número de fios de aço.
n <sub>al</sub>	Número de fios de alumínio.
n <sub>i</sub>	Número de ciclos aplicado a um componente.
$N_{i,f}$	Número de ciclos até a falha sob um mesmo nível de tensão.
R	Razão de tensões.
Re	Número de Reynolds.
Se	Limite de resistência à fadiga, MPa.
Sm	Tensão média atuante no condutor, MPa.
S <sub>m,a</sub>	Tensão média atuante nos fios de aço do condutor, MPa.
S <sub>m,al</sub>	Tensão média atuante nos fios de alumínio do condutor, MPa.
St	Número de Strouhal.
Sut	Limite de resistência à tração, MPa.
$\mathbf{S}_{\mathbf{y}}$	Limite de resistência ao escoamento, MPa.
t	Tempo, s.

U	Velocidade do vento, m/s.
V	Vida.
Vr	Vida residual.
W	Peso específico do condutor, kgf/km
Х	Distância entre o ponto de medida da amplitude de deslocamento do cabo e o último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão, mm.
Y <sub>b</sub>	Amplitude de deslocamento pico a pico, mm.

## Gregos

3	Deformação, strain.
ν	Viscosidade cinemática do fluido, m <sup>2</sup> /s.
π	Constante
$\rho_s$	Massa específica dos fios de aço do condutor, kg/m <sup>3</sup> .
$\rho_a$	Massa específica dos fios de alumínio do condutor, kg/m <sup>3</sup> .
σ	Tensão, MPa.
$\sigma_a$	Tensão alternada ou amplitude de tensão, MPa.
σ' <sub>f</sub>	Coeficiente de resistência à fadiga, MPa
$\sigma_{\rm m}$	Tensão média, MPa.
σ <sub>máx</sub>	Tensão máxima, MPa.
$\sigma_{mín}$	Tensão mínima, MPa.
σ <sub>r</sub>	Variação de tensão, MPa.

### 1 INTRODUÇÃO

#### 1.1 Contextualização e Apresentação do Problema

As linha de transmissão de alta tensão são compostas basicamente pelos seguintes elementos: cabos condutores de energia, acessórios e estruturas isolantes, estruturas de suportes e suas fundações, cabos de guarda ou para-raios, aterramentos e acessórios diversos. Os principais componentes da linha estão ilustrados na Figura 1.1.

Tendo em vista que o cabo condutor é o componente mais importante da linha, podendo contribuir com até 40% do custo em investimento de capital da rede, fica evidente a importância de estudos para prevenção de falhas inesperadas e conhecimento da vida remanescente do condutor (FRONTIN, 2010).



Figura 1.1 - Principais elementos das linhas de transmissão (modificado: FUCHS, 1992).

A falha inesperada de um cabo condutor em uma linha de transmissão implica num impacto financeiro gigantesco devido ao corte de energia elétrica nos diversos segmentos de consumidores, além de prejuízos incomensuráveis como a perda de vidas e danos à imagem do país no cenário mundial. Em 2001 por exemplo, aproximadamente 67 milhões de habitantes das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil ficaram sem energia elétrica devido a um *blackout* provocado pela ruptura por fadiga de uma linha de transmissão de 460 *kV* que atravessava o Rio Paraná, no estado de São Paulo, provocando a paralisação das atividades de todo o setor produtivo dessas regiões devido ao desligamento de 13 das 18 turbinas da usina de Itaipu, a qual é responsável por 30% do fornecimento de energia de todo o país, o que resultou num prejuízo estimado em 100 milhões de reais (FRONTIN, 2010).

A maioria das falhas em cabos condutores está relacionada ao efeito de forças eólicas que provocam vibrações de alta frequência e baixa amplitude que levam à fadiga do material

(CIGRE, 2008). Esse fato destaca a necessidade de uma base de conhecimento sobre o fenômeno de fadiga em cabos condutores, seja por meio de teses de doutorado, dissertações de mestrado, projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) promovidos por empresas concessionárias, ou até mesmo via projetos de graduação, cenário no qual se desenvolve este relatório.

O estudo da vida de cabos aéreos de transmissão se torna um problema complexo ao englobar fenômenos não lineares atuando em conjunto com a fadiga devido à flexão alternada, como o *fretting*, o qual ocorre sempre que uma junção entre componentes é submetida a uma força oscilatória, dando origem a deslocamentos tangenciais ao longo da interface de contato (HILLS, 1994). O movimento relativo entre fios do próprio condutor, ou ainda, restrições de movimento impostas por ferragens, insere o *fretting* no contexto de análise da vida remanescente do cabo ao propiciar a nucleação de trincas devido ao desgaste superficial e à concentração de tensões provocadas por cargas de contato, o que pode acelerar o processo de fadiga e resultar na ruptura completa do condutor, conforme ilustrado pela Figura 1.2.



Figura 1.2 - Falha provocada por *fretting* em um cabo ACSR (FADEL, 2010).

Além do esforço dinâmico provocado pela ação do vento, o cabo condutor está submetido a tensões oriundas do carregamento estático imposto pela carga de esticamento necessária à montagem nas torres de transmissão. Em 1953 o conselho internacional de grandes sistemas elétricos (CIGRE) estabeleceu um conceito para análise do efeito da carga de esticamento na vida de cabos condutores, conhecido no meio científico como *Every Day Stress* (EDS), o qual define a maior carga de esticamento a que o cabo pode ser submetido, considerando a temperatura de maior incidência na região de montagem, sem que nenhum risco de falha devido à vibrações eólicas ocorra durante sua vida (CIGRE, 1999). O EDS é expresso como um percentual da carga de ruptura do condutor, com valores frequentes na faixa de 15 a 20%.

A fim de padronizar os dados, a escolha de um parâmetro que não fosse sensível à variação de composição ou diâmetro do cabo por exemplo se torna mais conveniente. Sendo assim, logo após o surgimento do conceito EDS, pesquisadores sugeriram o conceito relacionado à catenária produzida pelo cabo entre as torres de transmissão utilizando a razão H/w, onde H representa a carga de esticamento do cabo e w seu peso por unidade de comprimento, como parâmetro de análise de sua vida remanescente. A vantagem proposta por

esse conceito é apresentar para um mesmo valor de H/w a mesma vida em campo independente do cabo condutor analisado pois, espera-se que para uma mesma flecha do cabo no vão, todos os condutores apresentem a mesma resistência à fadiga (BARRETT, 2001).

Apesar de se tratar de uma metodologia relativamente nova, o parâmetro H/w vem sendo bastante utilizado para projeto de cabos condutores contra fadiga pelas empresas concessionárias, destacando a importância do levantamento de dados acerca do assunto. Uma vez que a tensão média atuante nos fios do condutor pode ser determinada em termos do parâmetro H/w, o desenvolvimento de uma metodologia capaz de verificar a relação existente entre essas variáveis é fundamental para melhor compreensão do mecanismo de falha dos condutores, tornando-se uma das motivações deste trabalho.

Além do projeto do condutor contra fadiga, o plano de manutenção da LT é essencial para prevenção de falhas. Nesse sentido, o desenvolvimento de uma metodologia experimental capaz de se aproximar das reais condições de trabalho e apresentar resultados satisfatórios em relação ao comportamento do condutor se vê necessário. A formulação de Poffenberger-Swart, apresentada em 1965, relaciona a tensão nominal na zona de falha à amplitude de deslocamento por flexão do cabo, em um ponto distante de 3,5" (89 *mm*) do último ponto de contato (UPC) entre o cabo e o grampo de suspensão usado em sua fixação na torre de transmissão (POFFENBERGER, 1965). A Figura 1.3 ilustra a montagem do cabo condutor no grampo de suspensão destacando a amplitude de deslocamento (Y<sub>b</sub>) utilizada pela formulação de P-S. Tal metodologia é utilizada até os dias atuais e sua efetividade será verificada no decorrer deste trabalho.



Figura 1.3 - Montagem cabo-grampo: localização da tensão calculada pela formulação de Poffenberger-Swart (FADEL, 2010).

A ferramenta mais utilizada para predizer o processo de desgaste durante o projeto e manutenção de linhas de transmissão, a fim de evitar a ocorrência de falhas, baseia-se na utilização da formulação de P-S em conjunto com as curvas de resistência à fadiga, também conhecidas como curvas de Wöhler ou simplesmente curvas S-N, as quais relacionam o valor nominal, S, da tensão aplicada no condutor à respectiva vida, N. (FADEL, 2010)

A literatura mostra que carregamentos variáveis com tensão média diferente de zero provocam alterações significativas nas curvas de resistência a fadiga. A Figura 1.4 ilustra o comportamento típico de um gráfico de vida constante, também conhecido como diagrama de

Haigh, no qual os níveis de tensão média e alternada atuantes em um componente mecânico são relacionados em função do número de ciclos até a ocorrência de falha. Nota-se que a presença de uma tensão média não nula positiva ( $\sigma_m > 0$ ) desloca a curva para a esquerda, provocando uma redução no número de ciclos, o que pode ser explicado pela contribuição do carregamento para propagação de trincas. Já uma tensão média não nula negativa ( $\sigma_m < 0$ ) contribui com o fechamento de trincas, resultando num deslocamento da curva no sentido de maiores vidas.



Número de ciclos até a falha, N

Figura 1.4 - Efeito da tensão média na vida em fadiga (modificado: CALLISTER, 2011).

A vida residual do cabo condutor é comumente obtida com base no nível de tensão dinâmica calculada pela formulação de P-S junto às curvas de resistência a fadiga. Entretanto, nota-se que a tensão média provoca alterações significativas na vida de materiais submetidos a carregamentos variáveis evidenciando a importância da análise de seu efeito durante os estudos. Neste contexto, este trabalho propõe metodologias de ensaio para avaliação da formulação que correlaciona o nível de tensão média atuante no cabo condutor em termos do parâmetro H/w e para avaliação da formulação de P-S utilizada para determinar a tensão dinâmica atuante na zona de falha do condutor.

#### 1.2 Objetivo

O presente trabalho é de natureza experimental e tem como objetivo geral analisar, via extensometria, o comportamento das tensões média e alternada em termos do tipo de cabo utilizado e do parâmetro H/w, onde H representa a carga de esticamento do cabo e w seu peso por unidade de comprimento. Em particular serão analisados quatro condutores durante a pesquisa: TERN, CAL 900, CAL 1055 e ORCHID.

A partir dos dados colhidos experimentalmente, será avaliado o uso da formulação que relaciona o parâmetro H/w com o nível de tensão média,  $S_m$ , nos fios de alumínio da camada externa do cabo condutor. Pretende-se ainda verificar a efetividade da formulação de P-S para determinação da tensão dinâmica atuante na zona de falha do condutor.

Este trabalho visa cooperar com a contínua pesquisa desenvolvida acerca do fenômeno de fadiga em cabos condutores de energia, trazendo novos dados principalmente ao laboratório de fadiga e integridade estrutural de cabos condutores de energia da Universidade de Brasília, local de desenvolvimento da presente pesquisa, contribuindo com novas informações para melhor esclarecimento do fenômeno de falha em cabos condutores.

#### 1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, a começar por este primeiro, no qual foi apresentado o objetivo do trabalho junto a uma contextualização do tema, informando ao leitor a motivação em que se baseia o estudo de fadiga em cabos condutores e o impacto que falhas inesperadas podem provocar, ressaltando ainda os principais mecanismos responsáveis por eventuais falhas desses elementos além de trazer as principais metodologias empregadas para análise do problema.

O segundo capítulo será destinado a uma rápida revisão teórica acerca do fenômeno de fadiga, abordando conceitos fundamentais que servirão como base para o permitir ao leitor o pleno entendimento dos fatores que influenciam a vida de componentes estruturais sujeitos a esse tipo de falha.

A apresentação do tema fadiga em cabos condutores propriamente dita, será abordada no terceiro capítulo deste trabalho, onde serão abordadas as principais causas de falha desses componentes.

O procedimento experimental é descrito no quarto capítulo, apresentando o passo a passo adotado durante a execução dos ensaios estáticos e dinâmicos. É neste capítulo que se encontra ainda a descrição do procedimento de extensometria necessária à análise de dados pretendida por este trabalho.

O quinto capítulo apresenta os resultados obtidos por meio do programa experimental, fazendo uma discussão acerca dos dados coletados.

O sexto capítulo apresenta as conclusões e as considerações finais.

Por fim, encontram-se as referências pertinentes ao assunto e os apêndices elaborados para descrever a forma em que foram desenvolvidos determinados procedimentos.

### 2 REVISÃO TEÓRICA - FADIGA

#### 2.1 Conceito de Fadiga

A maioria dos componentes estruturais utilizados nas diversas aplicações de engenharia estão submetidos a carregamentos cíclicos; como por exemplo, uma fibra particular de um eixo em movimento que experimenta tensões de tração e compressão a cada rotação. Uma vez que o mecanismo de falha se desenvolve devido a carregamentos que se repetem provocando flutuações de tensões entre diferentes níveis ao longo do tempo, o termo "fadiga" é utilizado para caracterizar este fenômeno responsável por aproximadamente 90% das falhas de todos os componentes metálicos (CALLISTER, 2001).

De acordo com a ASTM (*American Society for Testing and Materials*), "Fadiga é um processo de alteração estrutural permanente, progressivo e localizado, que ocorre num material sujeito a condições que produzem, num ponto ou em vários pontos, tensões ou deformações dinâmicas, capazes de culminar em trincas ou numa fratura completa após um número suficiente de variações de carga".

Garcia *et al* (2012), ressalta a importância dos primeiros estudos sobre o comportamento de materiais metálicos a esforços alternados, feitos por August Wöhler, na década de 1850. Uma informação muito importante levantada por Wöhler foi a apresentação de resultados de ensaios de fadiga num gráfico, que posteriormente levou o nome do autor, ao relacionar a tensão *versus* o número de ciclos até a fratura, conhecidas por curvas S-N. Sendo assim, pode-se dizer que os principais fatores necessários para provocar a falha por fadiga nos materiais são: a existência de tensões cíclicas ou flutuantes e um número de ciclos suficientemente alto para que ocorram a nucleação e a propagação de trincas.

#### 2.2 Caracterização do Processo de Fadiga

Em geral, uma falha provocada por fadiga é catastrófica, pois mesmo se tratando de materiais dúcteis, a ruptura resultante deste fenômeno é similar à fratura frágil, uma vez que não provoca deformações plásticas consideráveis associadas à falha. Em outras palavras, diferentemente da falha devido ao escoamento do material, o rompimento devido à fadiga ocorre repentinamente e sem qualquer aviso prévio. Deve-se ressaltar porém, que as características de fratura entre estes mecanismos de falha são bastante distintos, uma vez que o desenvolvimento de uma falha por fadiga possui três estágios bem definidos: *i*) nucleação de trincas, *ii*) propagação ou crescimento macroscópico da trinca e por fim, *iii*) ruptura do componente estrutural.

Segundo Shigley *et al* (2011), o primeiro estágio do mecanismo de falha por fadiga compreende a iniciação de uma ou mais microtrincas que surgem devido à deformação plástica cíclica, seguida de propagação cristalográfica que se estende de dois a cinco grãos. O

surgimento de trincas pode ser acelerado devido às descontinuidades presentes no material (Figura 2.1), provocadas principalmente pelos seguintes eventos:

- Elementos sob altas pressões de contato, que podem causar formação de cavidades superficiais ou crateramento devido à abrasão depois de vários ciclos de carga, podendo resultar em uma falha devido ao *fretting*;
- Alterações geométricas provocadas por furos, rasgos de chaveta, reduções na seção transversal do elemento, entalhes, entre outros. Tais modificações resultam em concentradores de tensão, responsáveis por elevar o nível de tensão ao qual o material está submetido nas proximidades imediatas da descontinuidade. A proporcionalidade do efeito do concentrador é determinado de forma empírica para cada situação particular, em função de parâmetros geométricos;
- Composição do próprio material, podendo conter: inclusões de outros materiais na estrutura cristalina (impurezas), porosidade acentuada, defeitos de solidificação, bandas de deslizamento entre outros.



Figura 2.1 - Elementos de nucleação de trincas em componentes sujeitos à esforços cíclicos (modificado: GARCIA, 2012).

O surgimento de uma trinca microscópica geralmente implica no surgimento de um concentrador de tensões que, devido ao seu formato pontiagudo, em conjunto com as imperfeições internas do material e ao carregamento repetido, resultam em deformações plásticas em suas proximidades. Tais deformações promovem a propagação da trinca, em uma direção predominantemente perpendicular à tensão de tração aplicada, caracterizando o segundo estágio do mecanismo de falha por fadiga: Propagação ou crescimento macroscópico da trinca, conforme ilustrado pela Figura 2.2 (NORTON, 2013). Deve-se ressaltar que tensões compressivas tendem a fechar a trinca, dificultando sua propagação.

As trincas embrionárias em estágio I crescem na direção do cisalhamento máximo, responsável por dar início ao processo de fadiga em materiais dúcteis, atingindo 45° na direção da aplicação da carga. Ao atingir o tamanho de aproximadamente três grãos, a trinca atinge o estágio II e altera seu comportamento ao tornar-se grande o suficiente para formar

uma concentração geométrica de tensão, uma zona de tração plástica é gerada em sua extremidade e, além desse ponto, o crescimento da trinca se dá na direção perpendicular ao da carga aplicada (FADEL, 2010).



Figura 2.2 - Mecanismo de propagação da trinca (FADEL, 2010).

A propagação da trinca durante os ciclos de carregamento até a ruptura do componente mecânico caracteriza a falha por fadiga. Durante o ciclo de tensão ocorrem mudanças abruptas no carregamento deixando marcas características na superfície de fratura que se forma durante a propagação da trinca conhecidas por marcas de praia (beach lines) e estrias. Essas marcas apresentam-se em padrão circular curvadas em relação à origem da falha, o que permite estudos de análise de falha a fim de investigar o motivo da fratura (Figura 2.3). Devese ressaltar que apenas as marcas de praia podem ser observadas a olho nu, sendo a análise de estrias restrita ao uso de microscópicos eletrônicos (CALLISTER, 2011).



Figura 2.3 - Esboço da formação de estrias na propagação de trinca em fadiga (GARCIA, 2012).

De maneira geral, a presença de uma trinca em um componente mecânico gera um concentrador de tensões devido a sua geometria, o qual torna-se cada vez mais severo devido à propagação da trinca no material. Dessa forma, a medida em que a trinca fica mais profunda em relação a superfície, a taxa de propagação aumenta até que a seção remanescente não seja capaz de suportar a carga aplicada, ocorrendo uma propagação instável da trinca e consequentemente a fratura do material. A Figura 2.4 ilustra a seção transversal de um eixo resultante do processo de fadiga (JUVINALL, 2012).



Figura 2.4 - Etapas do processo de fratura por fadiga (GARCIA, 2012).

#### 2.3 Definições Fundamentais

Diversas aplicações de engenharia submetem materiais a carregamentos cíclicos que podem apresentar os mais variados comportamentos, sendo alguns destes completamente aleatórios e com ciclos bastante complexos. Contudo, ocasiões em que o material é submetido continuamente aos os mesmos esforços ocorrem com frequência, ou seja, apesar de variar com o tempo, os níveis de tensão ao qual o material é submetido possuem um comportamento repetitivo que permanece dentro de uma amplitude bem definida. Sendo assim, nota-se que a tipificação do comportamento da tensão com o tempo é fundamental para definição da metodologia mais adequada para abordagem do problema.

Garcia, 2012, classifica os casos de amplitude constante em: *i*) tensão alternada completamente reversa, onde se observa simetria em relação ao eixo das abscissas, caracterizando uma situação ideal com as tensões máximas e mínimas iguais em magnitude (Figura 2.5a); *ii*) tensão flutuante, em que a onda se apresenta deslocada de um valor médio não nulo e translada o ciclo ao longo do eixo das ordenadas, podendo situá-lo totalmente no campo de tração ou compressão, ou em situações onde as tensões máximas e mínimas possuem sinais opostos (Figura 2.5b). Vale ressaltar que, caso um vale do ciclo flutuante apresente valor nulo, adota-se a nomenclatura tensão repetida. Por fim, *iii*) ciclo de tensão aleatória, onde estão classificados os ciclos complexos e sem simetria.



Figura 2.5 - Tensões cíclicas em fadiga: (a) tensão alternada reversa; (b) tensão flutuante.

A Figura 2.6 mostra dois exemplos em que se observa variações na amplitude do carregamento: (a) o ciclo de tensão por blocos, que é caracterizado pelo número de ocorrências de um mesmo par de tensão média e alternada ( $\sigma_m, \sigma_a$ ) que se apresenta em uma sucessão de ocorrências e, (b) o ciclo aleatório ou irregular, no qual não se observa nenhum padrão na sequência de carregamentos.

Vale ressaltar que o ciclo aleatório pode ser representado por ciclos equivalentes que permitem a caracterização das componentes de tensão média e alternada. O método RainFlow, descrito na seção 2.7.1, é uma das metodologias capazes de descrever um ciclo aleatório em uma sequencia de carregamentos com amplitudes de tensão bem definidas.



Figura 2.6 - Ciclos de tensão de fadiga: a) Blocos; b) Aleatório (BRANCO, 1986).

Em geral, a caracterização da curva de resistência à fadiga de materiais é realizada por meio de ensaios experimentais com carregamentos cíclicos harmônicos, representados pela curva senoidal, cuja equação governante é expressa por:

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a sen(2\pi f t) \tag{1}$$

Onde:

$\sigma_m$ : Tensão média	f: Frequência de carregamento
σ <sub>a</sub> : Tensão alternada	t: Tempo

A frequência, f, do carregamento é dada pela Equação (2) onde N representa o número de ciclos e t o tempo.

$$f = \frac{N}{t} \tag{2}$$

Nota-se que uma vez que as componentes de tensão média e alternada de um carregamento cíclico estejam definidas, a resistência de um material à fadiga depende apenas do número de ciclos ao qual este será submetido durante sua vida em serviço.

Segundo Dowling (2007), são necessários apenas dois parâmetros independentes para descrever o ciclo de carregamento. Tais parâmetros são definidos a partir de formulações matemáticas que podem ser facilmente deduzidas a partir da Figura 2.7.



Figura 2.7 - Parâmetros básicos para descrição de ciclo de fadiga de amplitude constante (modificado: SHIGLEY, 2011).

As componentes de tensão média,  $\sigma_m$ , e alternada,  $\sigma_a$ , podem ser combinadas para definir outras variáveis capazes de descrever o ciclo de tensão. A variação de tensão ou intervalo de tensões por exemplo, é definida como a diferença entre a máxima e a mínima tensão gerada pelo carregamento, caracterizando a faixa do ciclo.

• Tensão média

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \tag{3}$$

• Tensão alternada

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \tag{4}$$

• Variação de tensão ou intervalo de tensão

$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min} \tag{3}$$

Outras duas variáveis comumente empregadas em fadiga são a razão de tensão e a razão de amplitude, sendo a primeira definida como a relação entre os valores mínimo e máximo de tensão no ciclo de carregamento e a segunda pela razão entre as componentes alternada e média definidas pelo ciclo:

Razão de tensões

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \tag{6}$$

• Razão de amplitude

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \tag{7}$$

Alguns casos especiais podem ser citados, quando o ciclo é composto apenas pela componente alternada por exemplo (Figura 2.5a), nota-se que a razão de tensões será -1, enquanto a razão de amplitude tenderá ao infinito. Já o caso de tensão repetida, caso particular de tensão flutuante com vale nulo, é caracterizado por uma razão de tensões nula e uma razão de amplitude unitária.

#### 2.4 Metodologias de Projeto

Existem basicamente três metodologias de projeto quando se trata do fenômeno de fadiga a fim de predizer a vida do componente mecânico em número de ciclos até a ocorrência de falha para certo nível de carregamento.

O projeto sob o método tensão-vida é o mais tradicional, sendo apropriado para uma larga gama de aplicações, principalmente para fadiga de alto ciclo (N > 10<sup>3</sup> ciclos). Já a metodologia sob o ponto de vista de deformação-vida envolve uma análise mais detalhada da deformação plástica em regiões cujas tensões e deformações são consideradas críticas para a estimativa da vida, sendo mais utilizada quando se observa fadiga de baixo ciclo, ou seja, vida entre um e mil ciclos ( $1 \le N \le 10^3$ ). As duas metodologias apresentadas admitem que o componente estrutural iniciará sua vida em serviço livre de defeitos pré-existentes em sua estrutura. Quando a presença de trincas na estrutura do componente é considerada desde o início do projeto, a mecânica da fratura é utilizada para predizer o crescimento da trinca em relação à intensidade de tensão mantendo o componente em serviço apenas durante a fase estável de propagação da trinca, caracterizando o projeto sob o ponto de vista de falha segura (SHIGLEY, 2011).

(5)

#### • Método da tensão x vida

A determinação das tensões atuantes em um elemento geralmente envolve a análise detalhada de diversos fenômenos que atuam em conjunto de maneira aleatória tornando fundamental a utilização de métodos sofisticados para compreensão do problema, o que muitas vezes inviabiliza economicamente a execução de projetos. Sendo assim, uma prática comum de engenharia é a caracterização da resistência de um componente mecânico a partir das circunstâncias em que se inserem os carregamentos, a fim de observar comportamentos semelhantes entre elementos que estejam sujeitos aos mesmos tipos de esforços e sob as mesmas condições de trabalho. Para tal, utiliza-se o valor de uma tensão nominal, S, que pode ou não ser igual ao valor da tensão real,  $\sigma$ , para realização dos cálculos de engenharia (DOWLING, 2007).

O projeto para vida infinita segundo a metodologia tensão-vida, é a filosofia de projeto mais tradicional e de maior facilidade de implementação, uma vez que apenas as tensões nominais atuantes na região mais crítica do componente são utilizadas para análise a fim de se determinar a resistência a fadiga do material. Apesar dessa abordagem ser a menos acurada dentre as demais, especialmente para os casos de fadiga de baixo ciclo, onde se observa níveis significativos de plasticidade, seu uso é justificado devido à grande quantidade de dados disponíveis publicados e por representar adequadamente as situações em que se observa fadiga de alto ciclo (N >  $10^3$ ).

Essa abordagem se atenta a sempre manter os níveis de tensão abaixo de um limite de resistência, evitando a nucleação de trincas nos componentes analisados a partir do controle da deformação elástica sofrida pelo material; ou seja, supõe-se no projeto que as tensões e deformações permanecerão apenas no regime elástico, não ocorrendo escoamento localizado para nucleação e propagação de trincas (NORTON, 2013).

Método da deformação x vida

Uma vez que a nucleação de trincas envolve um escoamento localizado, a abordagem pela tensão, mencionada anteriormente, é incapaz de modelar adequadamente o processo de fadiga na presença desses defeitos. Consequentemente, foi necessário o desenvolvimento de uma metodologia sensível às deformações plásticas observadas nas proximidades das trincas devido à concentração de tensão gerada por fatores geométricos.

Em geral, o modelo baseado na deformação plástica sofrida pelo componente mecânico segue a filosofia de projeto para vida segura, sob o ponto de vista de fadiga, para uma quantidade finita de ciclos. Essa metodologia fornece uma visão razoavelmente precisa do estágio de iniciação da trinca ao incluir em sua formulação matemática efeitos como plasticidade e fluência, o que pode esclarecer os danos cumulativos resultantes de variações na carga cíclica capazes de gerar tensões residuais na região de falha.

Essa metodologia é particularmente indicada aos casos de fadiga de baixo-ciclo (N<10<sup>3</sup> ciclos), nos quais as tensões cíclicas são suficientemente elevadas para causar escoamento localizado. (NORTON, 2013)

#### 2.5 Método da Tensão-Vida

No contexto deste trabalho, apenas o método da tensão-vida será abordado, uma vez que a fadiga em cabos condutores de energia é um fenômeno de alto ciclo que se desenvolve ao longo de muitos anos. Além disso, a forma em que se desenvolvem as outras metodologias de projeto inviabiliza a implementação de tais análises nas linhas de transmissão, uma vez que existem restrições práticas para o colhimento de dados; ou seja, a análise detalhada da deformação plástica dos fios ou o acompanhamento do crescimento de trincas nos condutores não é viável, uma vez que as linhas aéreas de transmissão são continuamente energizadas, construídas a uma altura considerável em relação ao solo e, muitas vezes, em locais de difícil acesso.

A caracterização da resistência à fadiga ou limite de fadiga de um material com base nas Curvas S-N, deve ser feita a partir de ensaios realizados em laboratório sob as mesmas condições, a fim de minimizar a influência de fatores externos ao procedimento. Dessa forma, nota-se a importância da utilização de corpos-de-prova padronizados, que serão submetidos a uma amplitude de tensão constante durante todo o ensaio, possibilitando a correlação dos resultados experimentais obtidos por diferentes pesquisadores.

Existem basicamente duas possibilidades para a execução do experimento: o *método padrão* (Figura 2.8a), utilizado quando poucos corpos de prova estão disponíveis para o ensaio, no qual utiliza-se um ou dois corpos de prova para determinada tensão abaixo de uma tensão mínima e, se para o primeiro corpo de prova a vida preestabelecida for atingida, o próximo é ensaiado com uma tensão mais alta e assim por diante. Já no *método da tensão constante* (Figura 2.8b), as tensões são selecionadas em valores espaçados e vários corpos de prova são ensaiados para cada nível de tensão, obtendo-se uma nuvem de pontos para cada condição (GARCIA, 2012). O ensaio de fadiga em cabos condutores em particular faz uso do método da tensão constante, levantando a Curva S-N geralmente a partir de nove pontos, sendo cada conjunto de três ensaiados em um nível de tensão preestabelecido.



Figura 2.8 - Métodos para o levantamento da curva S-N: a) Padrão; e b) Tensão constante (GARCIA, 2012).

As curvas S-N podem ser representadas em escalas lineares, logarítmicas ou composição (monolog). Entretanto, a fim de evitar equívocos na leitura dos gráficos, a escala linear costuma descrever apenas o nível de tensão ao qual o componente mecânico foi submetido, utilizando-se a escala logarítmica para o número de ciclos até a ruptura do material. Sendo assim, o comportamento da Curva S-N pode ser descrito matematicamente por meio da equação de Basquim:

$$\sigma_a = A N_f^B \tag{8}$$

Em que  $\sigma_a$  é a amplitude de tensão,  $N_f$  representa o número de ciclos até a ocorrência de falha e as constantes A e B são determinadas a partir de ensaios experimentais.

As curvas S-N permitem a caracterização da resistência à fadiga de diversos materiais, uma vez que todas as curvas apresentam um comportamento decrescente do número de ciclos até a ruptura a medida em que o nível de tensão é elevado. Quando a amostra utilizada no ensaio é feita de titânio, aço ou materiais ferrosos em geral, a curva apresenta um "joelho" ao atingir determinado valor de tensão, caracterizando a resistência à fadiga do material. Já as curvas S-N para o alumínio, cobre ou materiais não ferrosos em geral, não possuem um limite de resistência à fadiga definido, ou seja, a curva decresce continuamente em função do número de ciclos mesmo para pequenos níveis de tensão como pode ser visto na Figura 2.9.

Para o alumínio em particular, a vida infinita é dada pela tensão que resultará em um número consideravelmente grande de ciclos até a ocorrência de falha: aproximadamente 10<sup>8</sup> ciclos.



Figura 2.9 - Curvas S-N esquemáticas para um aço maciço e uma liga de alumínio (BRANCO, 1986).

#### 2.6 Efeito da tensão média na resistência à fadiga

A maioria dos resultados de fadiga encontrados na literatura foram determinados para condições de ciclo alternado de tensões, em que a tensão média é igual a zero (GARCIA, 2012). Nota-se porém que a presença de uma componente de tensão média possui efeito significativo no número de ciclos até a ocorrência de falha acelerando ou retardando a propagação de trincas em função do tipo de carregamento, como ilustrado pela Figura 2.10.



Nf, Número de ciclos até a falha

Figura 2.10 - Curvas S-N para a liga de alumínio 7075-T6 em ensaios de carregamento axial para diferentes valores de tensão média (modificado: DOWLING, 2007).

Para uma dada amplitude de tensão, a vida de um componente mecânico é modificada em função do nível de tensão média,  $\sigma_m$ , resultando em menores vidas quando sujeito à tração enquanto tensões compressivas aumentam o número de ciclos necessário à ocorrência de falha. Analogamente, para um número de ciclos fixo, o valor da componente alternada se torna uma função da componente média do ciclo de tensão (DOWLING, 2007).

Conforme ilustrado pela Figura 2.10, o efeito da tensão média pode ser representado em termos de diagramas de fadiga para vida constante; entretanto, quando resultados experimentais não estão disponíveis, diagramas generalizados (Figura 2.11) podem ser utilizados para definir regiões nas quais componentes mecânicos podem operar sem a ocorrência de falha por fadiga após certo número de ciclos.

Nota-se em um diagrama  $\sigma_a \propto \sigma_m$  a existência de um lugar geométrico que divide as combinações seguras das combinações inseguras das componentes alternada e média de tensão (SHIGLEY, 2011).



Figura 2.11 - Diagrama de vida constante generalizado. (modificado: SHIGLEY, 2011)

As equações de projeto propostas pelas curvas da Figura 2.11 são descritas em termos do fator de projeto, n, das resistências à tração,  $S_{ut}$ , e ao escoamento,  $S_y$ , do material além do limite de resistência à fadiga,  $S_e$ , e das componentes média,  $\sigma_m$ , e alternada,  $\sigma_a$ , da tensão atuante no ponto mais crítico do elemento sob análise.

• Critério de Soderberg

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{1}{n} \tag{9}$$

Critério de Goodman modificado

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n} \tag{10}$$

• Critério de Gerber

$$\frac{n\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{n\sigma_m}{S_{ut}}\right)^2 = 1 \tag{11}$$

• Critério ASME-elíptico

$$\left(\frac{n\,\sigma_a}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{n\,\sigma_m}{S_y}\right)^2 = 1\tag{12}$$

• Linha de Langer

$$\sigma_a + \sigma_m = \frac{S_y}{n} \tag{13}$$

Apesar da linha de Langer, descrita pela equação (13), não ser um critério de falha por fadiga, sua presença no diagrama é justificada para considerar a possibilidade de ocorrência de escoamento de primeiro ciclo. Por ser um critério muito conservador, em geral a linha de Soderberg não é utilizada; já os critérios de Gerber e ASME-elíptico, são bastante empregados quando segurança e conservadorismo devem estar aliados à redução de custos. Por se tratar da primeira abordagem quanto ao estudo do efeito da tensão média nas propriedade de fadiga, a linha proposta por Goodman sempre é descrita nos diagramas de vida constante devido ao seu valor histórico, sendo até hoje utilizado pelos projetistas mais conservadores.

#### 2.7 Conceito de Dano em Fadiga

O ciclo de tensões aleatório torna a predição da vida sob fadiga do componente bem mais complexa, uma vez que este tipo de ciclo não apresenta uma amplitude de tensão bem definida. Nesse sentido, viu-se necessário o desenvolvimento de metodologias para a análise do histórico de carregamentos complexos, como o modelo proposto por RainFlow, no qual um ciclo aleatório pode ser transformado em uma soma de ciclos de tensão bem definidos permitindo a caracterização das componentes média e alternada de cada ciclo.

A partir do histórico de carregamento e da resistência à fadiga obtida por meio de dados laboratoriais, é possível fazer uma análise de durabilidade por meio do conceito de dano em fadiga (D). Esse conceito consiste na perda parcial da funcionalidade do componente a cada ciclo, ou seja, todo ciclo de tensão experimentado por um componente irá consumir uma parcela de sua vida remanescente sob fadiga, reduzindo sua durabilidade.

Deve-se observar que o conceito de dano resulta em duas considerações: *i*) O dano é acumulativo e irreversível. Logo, por menor que seja o nível de tensão, uma parcela da vida do componente será consumida independente do local de aplicação do carregamento. *ii*) O dano varia entre D = 0 (peça virgem) e D = 1 (falha). Portanto, se D = 0,50, isto significa que a metade da vida do componente foi consumida.

#### 2.7.1 Método RainFlow

Em geral, o limite de resistência à fadiga de um material é determinado por meio de ensaios com carregamentos harmônicos, os quais permitem a fácil obtenção dos parâmetros de fadiga capazes de descrever o ciclo de tensão. Entretanto, percebe-se que nas diversas aplicações de engenharia, os ciclos são frequentemente caracterizados por carregamentos complexos, dificultando a determinação de variáveis como o par tensão média e amplitude de tensão ( $\sigma_m$ , $\sigma_a$ ) de cada ciclo devido ao comportamento completamente aleatório. Para contornar essa dificuldade, foram desenvolvidas metodologias capazes de descrever os ciclos

aleatórios em sequências bem comportadas, como o método de contagem de ciclos de tensões de RainFlow.

A metodologia proposta por esta abordagem pode ser entendida pela analogia entre o histórico de carregamento e o fluxo de chuva escorrendo sobre o telhado de construções típicas do Japão (Figura 2.12), onde as gotas d'água podem se deslocar tanto para a direita quanto para a esquerda, representando os carregamentos de tração e compressão respectivamente. O eixo das abscissas está direcionado para baixo para ilustrar a analogia com o fluxo de chuva e as letras representam os picos e os vales do ciclo de tensão. O algoritmo é baseado na identificação dos picos e vales que se sobressaem durante a contagem do ciclo de tensão.

A vantagem dessa metodologia é a capacidade de considerar todas as variações de tensão que ocorrem ao longo do tempo (BELLORIO, 2009).



Figura 2.12 - Ilustração do método de RainFlow (WIRSCHING, 1997).

#### 2.7.2 Modelo de Palmgren-Miner

O primeiro modelo linear de dano por fadiga surgiu em 1924, quando Palmgren apresentou o conceito conhecido como "regra de dano linear" para uso na indústria sueca de rolamentos de esferas. Desde então, diversas metodologias foram sendo desenvolvidas, até que em 1945, Miner aplicou a regra de dano linear a uma liga de alumínio utilizada em revestimentos de aeronaves. Os experimentos de Miner demonstraram uma excelente correlação entre o modelo teórico e os dados experimentais e, por meio desta pesquisa, o conceito de Palmgren foi matematicamente descrito pela equação (LEE, 2005):

$$D = \sum \frac{n_i}{N_{i,f}} \tag{14}$$

Em que *D* é o dano linear acumulado,  $n_i$  é o número de ciclos aplicados ao componente sob o nível de tensão S<sub>i</sub> e  $N_{i,f}$  é o número total de ciclos até a falha (curva S-N)

sob este mesmo valor de tensão. Assim, no caso de carregamento com apenas um único nível de tensão, a falha ocorrerá quando  $n_i = N_{i,f}$ , conforme pode ser observado na Figura 2.13.



Figura 2.13 - Modelo de Palmgren-Miner: Acúmulo de dano linear (LEE, 2005).

O modelo proposto por Palmgren-Miner admite que o dano provocado por cada solicitação é acumulativo e irreversível, variando entre D=0 (peça virgem) e D=1 (falha), podendo ser quantificado em termos da razão entre o número de ciclos aplicados  $(n_i)$  e o número de ciclos necessários à ocorrência de falha por fadiga  $(N_{i,f})$ . Nota-se que a soma linear da razão de ciclos independe do nível de tensão ou do local de aplicação do carregamento, logo, qualquer solicitação contribuirá com o acúmulo do dano.

A equação de acúmulo de dano linear de Palmgren-Miner é amplamente utilizada na estimativa de vida à fadiga devido a sua alta confiabilidade e simplicidade matemática. Porém, muitas vezes o valor de dano acumulado até a ocorrência de falha difere da unidade, demonstrando certa imprecisão no modelo proposto. Essa discrepância pode ser explicada devido a não considerações de aspectos importantes como a sequência e o nível dos carregamentos, ou ainda, a interação das cargas, de modo que o fenômeno de aceleração ou atraso da velocidade de propagação da trinca seja desprezado (GARCIA, 2012).

Por outro lado, uma vantagem desse modelo matemático é a possibilidade de estimar a vida de um componente mecânico por meio do inverso da equação de dano:

$$V = \frac{1}{D} \tag{15}$$

Sendo assim, para V > 1, a vida remanescente, V<sub>r</sub>, do elemento será dada por V menos a parcela consumida pelo dano já sofrido, Equação (16). Nota-se que no caso de V menor ou igual à unidade, a falha do material já teria ocorrido, pois o dano acumulado seria equivalente ao consumo de 100% da vida do componente.

 $V_{\rm r} = V - 1 \tag{16}$ 

#### **3 FADIGA EM CABOS**

#### 3.1 Fadiga em Cabos Condutores de Energia

A resistência à fadiga do cabo condutor representa um parâmetro de extrema importância na fase de concepção de projeto, bem como para programas de manutenção preditiva e preventiva, uma vez que a falha desse componente é um dos maiores problemas mecânicos das linhas aéreas de transmissão de energia elétrica (CIGRE, 2008).

A falha inesperada de um cabo condutor em uma linha de transmissão implica num impacto financeiro gigantesco devido ao corte de energia elétrica dos diversos seguimentos de clientes, além de prejuízos incomensuráveis como a perda de vidas e danos à imagem do país no cenário mundial. A prática comum trata a causa mais frequente de fadiga de condutores, a amplitude de vibração devido à ação do vento, com a finalidade de determinar apropriadamente os parâmetros de projeto para avaliação da vida do cabo nas linhas de transmissão, ou ainda, quanto à necessidade de utilização de acessórios de segurança, como dispositivos de proteção entre o cabo e o grampo de suspensão (CIGRE, 2008).



Figura 3.1 - Acessórios utilizados em cabos condutores de energia: a) Armor Rod; b) Amortecedor; c) Armor Grip; d) Cushion Grip. (PREFORMED LINE PRODUCTS, 2013)

Os acessórios utilizados nas linhas de transmissão (Figura 3.1) tem como função proteger o cabo contra a ação de diversos fenômenos, aumentando seu tempo de vida em
serviço. O uso de amortecedores por exemplo, visa reduzir a amplitude de vibração do condutor devido às vibrações eólicas. Já os dispositivos utilizados entre o cabo e o grampo de suspensão, são projetados para reduzir a influência de efeitos como: flexão alternada e abrasão no local de restrição de movimento do condutor.

Sabe-se que independente do uso de amortecedores o condutor fica mais vulnerável às vibrações eólicas a medida em que se aumenta o nível de tensão média nos fios de alumínio. Sendo assim, nota-se a necessidade de pesquisas acerca do assunto a fim de definir um limite superior quanto à carga de esticamento capaz de garantir uma vida em serviço por significativos períodos de tempo (CIGRE, 1999).

#### **3.2** Tipos de Cabos Condutores

O cabo condutor é o componente mais importante em uma linha de transmissão, podendo contribuir com até 40% do custo em investimento de capital da rede, o que evidencia o impacto financeiro associado à correta seleção deste componente dentre os diversos tipos de cabos existentes no mercado tendo em vista o tipo de aplicação (FRONTIN, 2010).

De acordo com a Nexans, 2013, os cabos condutores fazem uso do alumínio como material condutor de corrente elétrica devido as suas características mecânicas e elétricas e, principalmente, por proporcionar economia de capital para a LT em relação ao uso de outros materiais, sendo divididos basicamente em três grandes grupos:

i) Condutores de alumínio (CA) e condutores de alumínio com alma de aço (CAA)

Os condutores formados exclusivamente de fios de alumínio 1350 (CA) - cuja composição é superior à 99% de alumínio - são largamente utilizados nas linhas de transmissão desde o início do século XX devido à alta condutividade apresentada por este tipo de cabo: acima de 60% IACS (*International Annealed Copper Standard*). Entretanto, algumas aplicações exigem alta resistência mecânica do condutor, fato que favorece a utilização de condutores de alumínio 1350 com alma de aço (CAA), nos quais um conjunto de fios de alumínio é entrelaçado de forma helicoidal e equidistante de uma alma de aço responsável por elevar a resistência mecânica do cabo.

*ii*) Condutores de alumínio liga (CAL) e condutores reforçados com alumínio liga (CALA):

A resistência mecânica apresentada pelos CA propiciou o desenvolvimento de ligas com maior carga na tensão de ruptura para composição dos condutores, as quais, em determinadas situações, podem eliminar a necessidade da alma de aço como reforço mecânico acarretando num menor custo para as linhas de transmissão.

Os condutores tipo CAL são aqueles que apresentam um encordoamento concêntrico homogêneo, formado apenas por fios de alumínio liga 6201. Já os condutores reforçados com alumínio liga (CALA) são formados por fios de alumínio 1350 encordoados sobre uma alma de fios de alumínio liga 6201, conforme ilustrado pela Figura 3.2.



Figura 3.2 - Encordoamento de um cabo condutor de energia.

A Tabela 1 fornece dados comparativos entre as ligas de alumínio 1350 e 6201. Como pode ser visto, os fios de alumínio liga 6201 - constituídos principalmente por alumínio, magnésio e silício - apresentam aproximadamente o dobro da resistência mecânica proporcionada por fios de alumínio 1350, além de um resultar num grande aumento da dureza superficial do fio, conferindo aos condutores maior resistência à abrasão.

Outra vantagem da liga 6201 é proporcionar um aumento significativo na resistência à corrosão do condutor, favorecendo a utilização de cabos tipo CAL em regiões com atmosfera agressiva, de alta poluição ou salinidade marítima.

Deve-se ressaltar porém que os fios de alumínio liga 6201 apresentam condutividade inferior à liga 1350, com cerca de 52,5% IACS.

Fios de alumínio liga	Tensão de escoamento σ <sub>y</sub> [MPa]	Tensão de ruptura σ <sub>rt</sub> [MPa]	Dureza [HBn]	Massa específica [g/cm³]
1350	165	186	50	2,705
6201	310	330	88	2,690

Tabela 1 - Propriedades dos fios de alumínio liga 1350 e 6201 (KALOMBO, 2015).

iii) Condutores termorresistentes.

Os condutores de alumínio convencionais podem operar em regime contínuo de trabalho a uma temperatura máxima de 90°C. Acima desta temperatura, inicia-se o processo de recozimento do material e consequentemente a deterioração das suas características mecânicas.

Tendo em vista que o limite de temperatura do condutor pode ser extrapolado por diversas razões - como por exemplo o aumento da densidade populacional de uma cidade junto ao acréscimo da demanda energética - uma classe especial de cabos foi desenvolvida: os chamados condutores de alumínio termorresistentes (TAI), os quais podem ser utilizados em regime contínuo de trabalho em temperaturas de até 150°C sem que haja deterioração das características mecânicas do condutor, permitindo uma corrente elétrica no cabo até 50% maior em relação aos condutores de mesma bitola que utilizam fios de alumínio 1350.

### **3.3** Tipos de Vibração de Cabos Condutores

O fenômeno de fadiga em cabos condutores de energia é provocado pela ação do vento, que induz forças aerodinâmicas sobre o cabo induzindo tensões oriundas de três tipos de vibração: eólica (*aeolian vibrations*), galope (*galloping*) e subvão (*subspan oscillations*).

A Tabela 2 apresenta uma comparação entre os fatores que levam aos três tipos de vibração mencionados, expondo as condições favoráveis à ocorrência de cada tipo de vibração junto ao respectivo dano provocado na linha de transmissão.

Características	Vibração eólica Galope		Oscilação de subvão
Tipo de LT afetada	Todas	Todas	Feixe de condutores
Faixa de frequência (Hz)	3 - 150	0,08 - 3	0,15 - 10
Intervalo de amplitude pk-pk (em relação ao diâmetro do cabo)	0,01 - 1	5 - 300	Modo corpo rígido: 0,5 a 80 Modo de subvão: 0,5 a 20
Cond	ições favoráveis à ocorré	ência de cada tipo de vib	pração
Tipo de vento	Laminar	Laminar	Laminar
Velocidade do vento (m/s)	1 a 7	7 a 18	4 a 18
Superfície do cabo	Nua ou com gelo uniforme	Gelo assimétrico	Nua, seca
Condições de projeto que influenciam o movimento do condutor	Tensão de esticamento, autoamortecimento dos cabos, uso de amortecedores, armaduras	Razão de frequência natural vertical para a de torção, catenária e condições de suporte	Separação dos subcondutores, torção do feixe, arranjo dos subcondutores, distância entre espaçadores
	Da	no	
Tempo aproximado para ocorrência	2 meses a mais de 20 anos	1 a 48 horas	1 mês a mais de 8 anos
Causas diretas	Falha devido à fadiga	Altas cargas dinâmicas	Impacto de condutores. Abrasão, desgaste acelerado de ferragens
Componentes mais afetados	Cabos condutores e para-raios	Condutores, ferragens, isoladores, estruturas	Ferragens de suspensão, espaçadores, amortecedores, cabos

Tabela 2 - Movimentos induzidos pelo vento (EPRI, 2006).

A Figura 3.3 ilustra didaticamente o comportamento do condutor em função do tipo de vibração.



Figura 3.3 - Tipos de vibração de cabos condutores. (modificado: EPRI, 2006)

Segundo Fadel (2010), o comportamento do condutor é uma função do tipo de vibração, que por sua vez depende de fatores como: velocidade do vento, ângulo de incidência do vento no cabo, tipo e massa do cabo, tamanho do vão livre e carga de esticamento, tornando a caracterização do tipo de vibração uma parte fundamental da análise do fenômeno de fadiga em cabos condutores.

### 3.3.1 Vibração eólica

A ocorrência de vibrações eólicas, também conhecida como vibrações de von Karmán, representa a principal causa de falha por fadiga em linhas de transmissão. Esse tipo de vibração é caracterizada por oscilações de alta frequência (3 - 150 Hz) e baixa amplitude (menores ou iguais ao diâmetro do condutor), que dependem de fatores como: tipo de cabo, carga de esticamento e local de construção da linha de transmissão (EPRI,2006).

O uso de dois parâmetros de mecânica dos fluidos se destacam na análise das vibrações eólicas: os números adimensionais de Reynolds e de Strouhal. A forma em que se dará a perturbação do vento (formação de vórtices) ao incidir no cabo condutor é uma função do regime de escoamento, laminar ou turbulento, determinado pelo número de Reynolds, definido pela equação (17). Já a relação de Strouhal, fornece a frequência aproximada de vibração do cabo devido ao vento transversal conforme a equação (18).

$$Re = \frac{Ud_c}{v} \approx \frac{efeitos inerciais}{efeitos viscosos}$$

(17)

$$f_s = \frac{St \ U}{d_c} \tag{18}$$

Onde: Re: Número de Reynolds St: Número de Strouhal *f<sub>s</sub>*: frequência de desprendimento de vórtices, Hz

*U*: Velocidade do vento, m/s v: Viscosidade cinemática do vento, m<sup>2</sup>/s  $d_c$ : Diâmetro do cabo, m

Os números adimensionais apresentados pelas equações (17) e (18) podem ser relacionados experimentalmente, conforme ilustrado pela Figura 3.4, o que evidencia a relação entre a frequência de vibração do cabo e a frequência de desprendimento de vórtices devido à velocidade de incidência do vento.



Figura 3.4 - Número de Strouhal em função do número de Reynolds. Curva obtida experimentalmente para escoamento sobre cilindros circulares. (FUCHS, 1992)

A Figura 3.5 ilustra a formação de vórtices em função do regime de escoamento. Em geral, a vibração eólica do cabo condutor origina-se por um processo iterativo entre o fluido (ar) e a estrutura (cabo) na ocorrência de vento sob regime laminar (500 < Re < 20000), com velocidade entre 1 e 7 m/s.

Por se tratar de uma estrutura esbelta apoiada sobre torres de transmissão construídas com um espaçamento significativamente grande, nota-se que o cabo é um elemento dotado de um espectro bastante denso de frequências naturais, o que favorece o sincronismo entre a frequência de desprendimento de vórtices,  $f_s$ , e os modos naturais de vibração. Sendo assim, pode-se inferir que o regime laminar é o mais perigoso ao propiciar a ocorrência de vibrações eólicas que, devido à alta frequência e baixa amplitude (Tabela 2), consomem a vida útil do condutor de maneira quase imperceptível.



Figura 3.5 - Regimes de fluxo em torno de um cilindro liso. (LIENHARD, 1966)

Os cabos condutores brasileiros em particular estão mais propensos a desenvolver o tipo de vibração eólica, uma vez que a velocidade média do vento que predomina em praticamente todo o território nacional se encontra dentro da faixa de risco, entre 1 e 7 m/s (CEPEL, 2001).

### 3.3.2 Oscilações de subvão

As oscilações de subvão, também chamadas de oscilações induzidas por esteira, ocorrem em linhas de transmissão que utilizam feixes de condutores dispostos paralelamente e em direção perpendicular ao fluxo de vento. A frequência de vibração das oscilações de subvão varia entre 1 e 5 Hz e são causadas por ventos de moderados a fortes, que variam entre 4 e 18 m/s. Esse tipo de vibração pode apresentar grandes amplitudes de vibração, podendo ocasionar choques mecânicos entre os condutores (KIESSLING, 2002).

Ao incidir sobre o primeiro cabo, a corrente de ar é perturbada de forma a propiciar a ocorrência de movimentos aerodinâmicos do condutor seguinte, gerando componentes de forças que induzem o cabo a apresentar movimentos elípticos irregulares, capazes de resultar na falha por fadiga do condutor em um pequeno número de ciclos.

#### 3.3.3 Galope

Esse tipo de vibração, caracterizado por baixas frequências (0,1 a 3 Hz) e grandes amplitudes - entre 5 e 300 vezes o diâmetro do condutor - pode ocorrer tanto em condutores

singelos quanto em feixes de condutores, principalmente devido ao perfil aerodinâmico formado pelo acúmulo de gelo na linha de transmissão e na incidência de ventos de 7 a 18 m/s (EPRI, 2006).

O grande deslocamento do cabo devido ao galope, introduz elevadas cargas dinâmicas nos componentes da linha de transmissão, expondo-os à ocorrência de falhas em curtos períodos de tempo. Nota-se ainda que esse tipo de vibração pode provocar choques mecânicos entre os condutores, além de comprometer a segurança pública devido à violação da distância mínima entre a catenária formada pelo cabo e o solo.

## 3.4 Mecanismo de Falha por Fadiga em Cabos Condutores de Energia

O fenômeno de fadiga em cabos condutores ocorre devido aos esforços cíclicos gerados nas restrições de movimento do cabo durante as vibrações decorrentes da ação do vento. Esses pontos de restrição surgem devido ao uso de dispositivos como amortecedores, espaçadores e, principalmente, grampos de suspensão; pois, como o nível de restrição e, consequentemente, o nível de tensão é maior nessas estruturas de suporte, danos devido à abrasão e falhas por fadiga frequentemente ocorrerem em suas proximidades após algum período de tempo, representando a principal causa de falha em linhas de transmissão (EPRI, 2006).

As restrições de movimento do condutor fazem com que os fios que constituem o cabo escorreguem entre si ou em relação às estruturas de fixação, gerando microdeslizamentos que junto às forças de fricção causam o *fretting*, conforme ilustrado pela Figura 3.6. Esse fenômeno resulta no desgaste por atrito entre as superfícies, gerando um pó de cor marrom constituído por partículas duras de óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), acelerando o processo de nucleação e propagação de trincas devido ao movimento relativo entre os elementos em contato (AZEVEDO, 2009).



A trinca de *fretting* pode ter origem em um dos diferentes pontos de contato

Figura 3.6 - Pontos de origem de trincas devido ao *fretting*.

As trincas devido ao *fretting* podem surgir tanto nos fios da camada externa do condutor, devido ao contato entre o cabo e o grampo, quanto internamente em consequência

do deslizamento relativo entre fios. Caso a ruptura ocorra no interior do grampo de suspensão, dificilmente ela será vista durante as inspeções de manutenção, uma vez que o mesmo vento que produz a vibração eólica resfria de forma acentuada o cabo condutor, mascarando o efeito térmico do ponto de fadiga. Essa vulnerabilidade pode provocar a ruptura completa do cabo devido ao aumento do carregamento da linha (MOURÃO, 2004).

A fadiga por *fretting* é influenciada por diversos fatores, tais como a carga de contato e a amplitude do escorregamento entre os fios, o coeficiente de fricção, condições da superfície do material, tipo de material em contato e as condições do ambiente externo (FRONTIN, 2011). A Figura 3.7 representa o problema que ocorre nos cabos de transmissão aérea por meio de um modelo de contato entre dois cilindros, os quais estão sujeitos a uma carga radial compressiva P e atritam pelo efeito da carga axial cíclica Q, gerando na zona de contato uma marca da interação dos cilindros devido ao escorregamento, que aparece no detalhe como uma elipse negra (FADEL, 2010).



Figura 3.7 - Configuração esquemática do problema de contato entre dois cilindros (equivalente a dois fios de camadas distintas do cabo) (FADEL, 2010).

Por se tratar de uma superposição de fenômenos, o mecanismo de fadiga em cabos condutores de energia se torna bastante complexo, tornando-se fundamental o desenvolvimento de critérios que garantam a segurança desses elementos por um considerável período de tempo.

Nesse sentido, o IEEE (1966) apresentou uma metodologia padrão para avaliação de sobrecargas em cabos condutores de energia: o método da amplitude de flexão, onde se verificou uma relação linear entre a amplitude de flexão e a tensão no condutor, independente da frequência de vibração. Esse padrão é baseado na formulação de Poffenberger-Swart (1965), a qual correlaciona a tensão nominal na zona de falha ao deslocamento sofrido pelo cabo a uma distância de 3,5" (89 mm) do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão. Essa metodologia, associada ao uso das curvas S-N é a mais empregada até os dias de hoje para o projeto de linhas de transmissão.

### 3.5 Esforços Dinâmicos em Cabos Condutores

As oscilações decorrentes da ação do vento nos cabos condutores - em particular as vibrações eólicas - representam a principal causa de falha das estruturas presentes em uma

linha de transmissão. Uma vez que o cabo condutor é o componente mais afetado pelas vibrações, a análise das tensões atuantes neste elemento é fundamental para garantir a integridade da LT.

Entretanto, o difícil acesso aos cabos condutores de energia após a instalação destes na linha de transmissão implica numa limitação prática quanto à avaliação das tensões atuantes na região crítica do condutor. Dessa forma, foi desenvolvida uma metodologia para determinação de uma tensão nominal, S, calculada em um ponto específico do cabo, a partir de medições da amplitude de deslocamento do cabo devido à flexão.

A formulação proposta por Poffenberger-Swart (1965) é capaz de avaliar o nível dos esforços exercidos sobre os condutores de energia ao correlacionar linearmente o deslocamento do condutor ao respectivo nível de tensão nas proximidades do grampo de suspensão - região crítica do cabo condutor - permitindo estabelecer limites de segurança e garantir a integridade da LT por consideráveis períodos de tempo.

Conforme mencionado anteriormente, o mecanismo de falha por fadiga de cabos condutores é bastante complexo uma vez que diversos fenômenos atuam em conjunto. Sendo assim, qualquer análise das tensões devido as vibrações do condutor estão sujeitas a discrepâncias. Porém, segundo Fadel (2010), a formulação de P-S possui um alto nível de concordância com resultados experimentais, fornecendo boas aproximações para as tensões nominais verificadas na zona de falha dos condutores e mostrando-se adequada para construção de curvas S-N.

## 3.5.1 Equação de Poffenberger-Swart (P-S)

Os cabos condutores de energia são formados por diferentes camadas de fios entrelaçados helicoidalmente em sentidos opostos conforme ilustrado pela Figura 3.8. A complexa disposição dos fios, junto aos diversos fenômenos que atuam em conjunto durante o movimento do cabo, tornam a determinação dos esforços atuantes no condutor uma tarefa bastante complicada. Nesse sentido, uma metodologia específica para análise das tensões atuantes nos fios de cabos condutores de energia foi apresentada por Poffenberger-Swart (1965), a qual correlaciona a amplitude de deslocamento em um ponto específico do condutor à respectiva amplitude de tensão. Boas correlações entre o cálculo teórico proposto por P-S e resultados obtidos por meio de ensaios em laboratório foram encontradas para uma amostragem significativa de condutores (IEEE, 2007).



Figura 3.8 - Construção típica de cabos condutores de energia (CIGRE, 2008).

A fadiga dos fios dos condutores ocorre em locais onde há dispositivos de retenção de movimento do cabo em relação à vibração transversal, sendo notada uma maior incidência de falha nos pontos onde a restrição ocorre de forma mais acentuada (EPRI, 2010). Sendo assim, o grampo de suspensão se torna um dispositivo crítico para o condutor ao impor uma severa restrição ao cabo na direção vertical devido a sua rigidez (FADEL, 2011).

Nesse cenário, a fórmula de P-S tem sido amplamente utilizada ao relacionar o deslocamento vertical,  $Y_b$ , de um ponto 3,5" (89 *mm*) distante do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão, conforme ilustrado pela Figura 3.9, com a amplitude de tensão experimentada por um fio de alumínio da camada mais externa do cabo na boca do grampo.



Figura 3.9 - Montagem esquemática cabo/grampo mostrando a posição padrão para medida da amplitude de deslocamento  $Y_b$ .

A relação entre os esforços dinâmicos e a amplitude de vibração, que em campo é medida por vibrógrafos posicionados nas proximidades do grampo, é dada segundo P-S por:

$$\sigma_a = KY_b \tag{19}$$

Em que  $\sigma_a$  é amplitude de tensão zero a pico na camada mais externa do condutor e no último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão (UPC), Y<sub>b</sub> é o deslocamento pico a pico medido em um ponto 89 *mm* distante do UPC e K é um fator de conversão, o qual é pode ser determinado por:

$$K = \frac{E_a dp^2}{4(e^{-px} - 1 + px)}$$
(20)

Onde  $E_a$  (*MPa*) e *d* (*mm*) são respectivamente, o módulo de elasticidade e o diâmetro de um fio da camada mais externa do condutor e *x* (*mm*) é a distância entre o ponto de medida da amplitude de deslocamento do cabo ( $Y_b$ ) e o último ponto de contato entre o cabo e o

grampo de suspensão, ou seja, pelo padrão adotado pelo IEEE (1966), x = 89 mm. Já o parâmetro *p* é determinado por:

$$p = \sqrt{\frac{H}{EI}}$$
(21)

Em que H (*N*) é a carga de esticamento do cabo e EI (*N.mm*<sup>2</sup>) é a rigidez do cabo à flexão, cujo valor mínimo é dado por:

$$EI_{min} = n_{al}E_{al}\frac{\pi d_{al}^4}{64} + n_aE_a\frac{\pi d_a^4}{64}$$
(22)

Onde os sobrescritos "al" e "a" caracterizam respectivamente as características dos fios de alumínio e de aço, sendo n o número de fios, E o módulo de elasticidade do material e d o diâmetro individual dos fios.

Deve-se ressaltar que a Equação (22) é utilizada na equação de P-S para favorecer o projeto da linha de transmissão sob o ponto de vista de segurança, uma vez que a variação da rigidez a flexão do cabo em função do comportamento dinâmico não é levada em consideração. Para pequenos níveis de amplitude de deslocamento, espera-se que os fios individuais do condutor não deslizem entre si, aproximando-se do comportamento de uma barra rígida, o que corresponde à máxima rigidez à flexão. Por outro lado, a medida em que a amplitude de vibração aumenta, os fios tendem a deslizar entre si e a rigidez a flexão se aproxima de  $EI_{mín}$ , situação de maior vulnerabilidade do cabo a falhas por fadiga.

A leitura da amplitude de deslocamento sofrida pelo cabo condutor na linha de transmissão é obtida em campo por meio de vibrógrafos, conforme ilustrado pela Figura 3.10. Estes aparelhos permitem a coleta de dados em pontos críticos da linha, possibilitando a adoção de medidas preventivas como o uso de acessórios de segurança ou ainda para predizer a durabilidade da LT em anos de serviço.



Figura 3.10 - Vibrógrafos: a) Pavica; b) Vibrec (EPRI, 2010).

### 3.6 Metodologias de Análise da Vida Residual do Cabo Condutor

Devido à complexidade do mecanismo de falha de cabos condutores não há critério analítico capaz de representar adequadamente os diversos fenômenos que atuam em conjunto, como a superposição do problema de fadiga devido às tensões cíclicas com o *fretting* decorrente de microdeslizamentos entre superfícies em contato. Entretanto, o desenvolvimento de metodologias para análise da durabilidade de cabos condutores de energia é fundamental para o projeto de uma linha de transmissão, sendo necessário a caracterização de parâmetros que garantam a integridade da linha por um período de tempo significativo.

Nesse contexto, algumas metodologias foram propostas a partir da padronização do método da amplitude de flexão pelo IEEE (1966) e da formulação proposta por P-S, nas quais a deformação ou a tensão no cabo, medida com base no ponto 89 mm a partir do UPC, é comparada com limites obtidos por meio de ensaios em laboratório para avaliar a severidade dos danos resultantes das vibrações eólicas. Em geral, três metodologias são utilizadas:

- 1. IEEE: Máxima deformação devido à flexão;
- 2. EPRI: Limite de resistência à fadiga;
- 3. CIGRE: Estimativa do tempo de vida do condutor.

### 3.6.1 Máxima deformação do IEEE

O Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônica (IEEE) apresentou um critério baseado na formulação de P-S, junto ao método padrão de amplitude de flexão, para avaliar a durabilidade do condutor em função da máxima deformação sofrida pelo cabo durante a vibração. Foi estabelecido que, apesar da máxima deformação tolerada por um condutor de alumínio com alma de aço (ACSR) sem eventuais falhas por fadiga não poder ser precisamente especificada, valores entre 150 e 200  $\mu$ m/m (*microstrains*) pico a pico podem ser tomados como um guia de valores seguros (IEEE, 1966).

Apesar de se tratar de um critério bastante conservativo, muitos países ainda utilizam essa referência para avaliar o sistema de amortecimento de linhas de transmissão (EPRI, 2010).

### 3.6.2 Limite de resistência do EPRI

Em 1979, o *Orange Book* do Instituto de Pesquisa em Energia Elétrica (EPRI) usado como padrão por muitas empresas do setor elétrico, apresentou os valores limites de amplitude de tensão e máxima amplitude de vibração que poderia ocorrer durante a vida em serviço de diversos tipos de cabos, abaixo dos quais não haveria falhas por fadiga. Assim como a máxima deformação estabelecida pelo IEEE, o limite de durabilidade da EPRI é baseada na formulação de Poffenberger-Swart.

A partir de uma quantidade significativa de dados - obtidos mediante testes laboratoriais para diferentes tipos e tamanhos de cabos de alumínio com alma de aço assumindo que a vida infinita do condutor seja atingida em  $5 \times 10^8$  ciclos - essa metodologia estabelece que cabos ACSR (*Aluminium Conductor Steel Reinforced*) com mais de uma camada de fios tem um limite de resistência à fadiga de 8,5 *MPa* ou um deslocamento máximo de Y<sub>b</sub> = 0,23 *mm*. Esses valores podem ainda ser aplicados à condutores de alumínio homogêneos (AAAC - *All Aluminium Alloy Conductor*) que utilizam fios de alumínio liga 1350 ou 5005, enquanto os condutores com fios liga 6201 ou similar possuem um limite de 5,7 *MPa*. (EPRI, 2010)

Se a máxima amplitude de flexão for usada como critério para o limite de durabilidade, algumas concessões são permitidas: (IEEE, 2007)

- 1. A amplitude de flexão pode exceder o valor limite em até 5% do número total de ciclos;
- 2. Não mais do que 1% dos ciclos pode exceder 1,5 vezes a amplitude limite;
- 3. Nenhum ciclo pode exceder 2 vezes o valor limite.

## 3.6.3 Método de estimativa de tempo de vida do condutor da CIGRE

O método de estimativa de vida de cabos condutores proposto pela CIGRE, leva em consideração o efeito de todos os ciclos de vibração por meio da teoria de acúmulo de dano. A vantagem dessa metodologia é a determinação da vida residual do condutor em quantidade de anos através de modelos como o de Palmgren-Miner a partir de medições de campo durante certo período de tempo.

Os vibrógrafos instalados nas linhas de transmissão são utilizados para verificar a amplitude de flexão do condutor durante sua vida em serviço. Para tal, esse dispositivo é posicionado nas proximidades do grampo de grampo de suspensão e realiza medições de 1 a 10 segundos, com um mínimo de 4 vezes por hora durante 24 horas por dia e por pelo menos 3 meses a partir da instalação. Os dados coletados são armazenados em matrizes e extrapolados para o período de um ano relacionando o número de ocorrências (número de ciclos) em função do deslocamento sofrido pelo cabo e da frequência de vibração, conforme ilustrado pela Figura 3.11.

Os dados de amplitude de vibração coletados pelo vibrógrafo são convertidos em amplitude de tensão via formulação de P-S e, por meio da regra de Palmgren-Miner, pode-se então quantificar a fração de dano provocada por unidade de bloco de amplitude de tensão devidamente armazenado pelo vibrógrafo. O cálculo da fração de dano por nível de amplitude de tensão necessita do número de ciclos de carregamento que o material resiste para um determinado nível de tensão (curva S-N). Para tal, é possível obter curvas S-N em laboratório ou utilizar uma curva teórica obtida a partir de um banco de dados experimentais para cabos condutores denominada de *Safe Border Line* (CIGRE WG 22-04). O resultado obtido por essa metodologia fornece a vida remanescente do condutor, apresentada em anos de serviço. (FRONTIN, 2010)

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



Figura 3.11 - a) Matriz obtida por meio de um vibrógrafo extrapolada pelo período de um ano (BELLORIO, 2009); b) Vibrógrafo modelo Pavica; c) Instalação do vibrógrafo na linha de transmissão (FADEL, 2010).

### 3.7 Esforços Estáticos em Cabos Condutores

A ruptura de fios de um cabo condutor de energia pode ocorrer devido à combinação de diversos fenômenos não previstos na fase de projeto de uma linha de transmissão, como por exemplo a mudança da velocidade ou do regime do vento incidente na região de montagem da linha, variações de temperatura fora da faixa esperada em uma série histórica ou ainda o acúmulo de neve no cabo condutor.

É de conhecimento geral que o uso de altas cargas de esticamento do cabo condutor diminui a quantidade de cabo necessária a LT reduzindo o investimento de capital da rede. Entretanto, deve-se destacar que os fios do condutor se tornam mais sensíveis às vibrações eólicas a medida em que o nível de tensão é elevado, evidenciando a necessidade de definir um limite superior para a carga de esticamento capaz de garantir a integridade do condutor por um período de tempo significativo.

Neste contexto, a definição de uma carga de esticamento conservativa sob o ponto de vista de vibrações eólicas, capaz de manter o projeto da LT economicamente viável e dar margem a variações decorrentes de fenômenos não esperados durante a vida de serviço do cabo condutor torna-se uma tarefa bastante complicada.

Dessa forma, o CIGRE (*Conseil International des Grands Réseaux Electriques*) estabeleceu dois parâmetros de projeto para a determinação do limite seguro para a carga de esticamento do condutor: o *Every Day Stress* (EDS), que determina o carregamento em termos do percentual da carga de ruptura do condutor e o parâmetro H/w.

# 3.7.1 Every Day Stress (EDS)

Em 1953 o comitê 6 da CIGRE exibiu o relatório conhecido como "EDS Panel" com o propósito de expor dados de pesquisas realizadas pelo mundo sobre cabos condutores de energia. Esse estudo foi realizado com condutores de diversos materiais sob condições de vibração e acreditava-se ser a melhor forma de se evitar falhas por fadiga em linhas de transmissão. O painel definia a EDS como a tensão atuante no cabo - definida em termos da carga de ruptura à tração do condutor - na maior parte de sua vida em serviço sob condições próximas da temperatura do dia mais frio do ano em uma série histórica e sem sobrecargas (BARRET, 2001).

Entretanto, o conceito de EDS aparentou ser insuficiente para explicar as ocorrências de falha por fadiga em linhas de transmissão, uma vez que o valor proposto como seguro não era capaz de garantir a integridade dos condutores por um período de tempo significativo. Conforme mostra a Tabela 3, dentre as linhas que estiveram em serviço entre 10 e 20 anos, 45% com EDS < 18% e 78% com EDS  $\ge 18\%$  foram danificadas devido às vibrações.

Vide om convice (enec)	% de linhas danificadas			
viua em serviço (anos)	EDS < 18%	$EDS \ge 18\%$		
≤5	5,26	25,00		
> 5 ≤ 10	20,93	35,29		
> 10 ≤ 20	45,00	78,00		
> 20	58,93	91,67		

Tabela 3 - Linhas danificadas em função do nível de EDS (CIGRE, 1999).

Devido às ocorrências de falha mesmo dentro dos limites de segurança propostos, novos critérios foram desenvolvidos a fim de fornecer um melhor guia para as empresas concessionárias.

Pesquisas e testes realizados desde a apresentação do "EDS Panel" revelaram informações que não foram avaliadas na época, como a influência da carga de esticamento sobre o autoamortecimento do condutor (CIGRE, 1999). Para representar esse efeito, é mais conveniente a utilização de um critério capaz de considerar a influência do diâmetro e do tipo de cabo analisado permitindo a generalização dos resultados, como o parâmetro H/w, o qual será abordado a seguir.

### 3.7.2 Parâmetro H/w

Além do Every Day Stress, outro parâmetro de projeto que pode ser utilizado para fornecer um limite seguro para a carga de esticamento é a catenária gerada pelo condutor entre duas torres de transmissão, a qual pode ser definida pelo parâmetro H/w, onde H representa a carga de esticamento do cabo e *w* seu peso por unidade de comprimento.

Estudos revelaram que as características do terreno em que a linha de transmissão será construída exerce grande influência na vida em fadiga do condutor, uma vez que a ocorrência de vibrações eólicas está relacionada à intensidade da turbulência do vento, que por sua vez é função do tipo de vegetação local.

Neste contexto, a partir do conhecimento de campo, obtido através de dados históricos relacionados às linhas de transmissão existentes em relação à tensão de projeto e a ocorrência ou não de falha por fadiga, uma tabela de referência dos limites de segurança do parâmetro H/w foi construída em função das características do terreno em que a LT se encontra (Tabela 4). É importante destacar que esses valores são válidos para condutores nus não amortecidos do tipo AAC, AAAC, ACAR e ACSR. Já a carga de esticamento H se refere ao carregamento inicial, antes da influência do vento, gelo ou fluência, na temperatura média do mês mais frio do ano.

Categoria do terreno	Características do terreno	H/w (m)
Α	Aberto, plano, sem árvores, sem obstruções, com cobertura de neve, próximo a grandes lagos, rios largos ou mares, desertos planos.	1000
В	Aberto, plano, sem árvores, sem obstruções, sem neve, como em áreas rurais sem obstruções.	1125
С	Aberto, plano, sem ondulações com pouquíssimos obstáculos, vegetação rasteira ou fazendas com poucas árvores, sebes e outras barreiras, além de prados e tundra.	1225
D	Área construída com algumas árvores e prédios, por exemplo, subúrbios residenciais, pequenas cidades, bosques e arbustos, campos com pequenos arbustos, árvores e sebes.	1425

Tabela 4 - Valores recomendados do parâmetro H/w em função das características do terreno (CIGRE, 1999).

Os terrenos da Tabela 4 foram divididos em quatro categorias de acordo com suas características gerais. Nota-se que terrenos com grandes obstruções, como árvores e prédios, possibilitam o uso de maiores cargas de esticamento uma vez que esta categoria resulta em grandes perturbações no escoamento do vento, provocando a mudança de regime de laminar para turbulento e, assim, reduzindo a probabilidade de ocorrência de vibrações eólicas dos cabos condutores. Analogamente, a redução dos obstáculos presentes no terreno favorecem o regime de escoamento laminar e, consequentemente, a ocorrência de vibrações eólicas, provocando uma redução nos níveis seguros do parâmetro H/w. Deve-se destacar que caso exista alguma duvida sobre a categoria do terreno, a classe mais conservativa deve ser selecionada.

O parâmetro H/w pode ser expresso como uma relação das áreas ( $A_s$ ,  $A_a$ ), tensões ( $S_{m,s}$ ,  $S_{m,a}$ ) e as massas específicas ( $\rho_s$ ,  $\rho_a$ ) dos fios de aço e alumínio, respectivamente, do condutor conforme a Equação (36), onde g é a aceleração da gravidade.

$$\frac{H}{w} = \frac{A_a S_{m,a} + A_s S_{m,s}}{g(A_a \rho_a + A_s \rho_s)}$$
(23)

Para demonstrar que existe uma relação linear entre a tensão média atuante nos fios de alumínio do cabo condutor e o parâmetro H/w é necessário admitir as seguintes aproximações para os módulos de elasticidade e as massas específicas dos materiais:

$$E_s \cong 3E_a \tag{24}$$

$$3\rho_a \cong \rho_s$$
 (25)

Sabe-se pela Lei de Hooke que a tensão,  $\sigma$ , atuante em um componente mecânico é diretamente proporcional à deformação,  $\epsilon$ , sofrida pelo material, de forma que:

$$\sigma = E\epsilon \tag{26}$$

Dessa forma, admitindo-se que ambos os fios de aço e alumínio apresentam uma mesma deformação, a equação (23) pode ser escrita por:

$$S_{m,a} = g\rho_a \frac{H}{w}$$
(27)

Uma vez que o parâmetro H/w é determinado durante a fase de projeto da linha de transmissão, a Equação (27) se destaca ao permitir a determinação do nível de tensão média atuante nos fios do cabo condutor a partir da constante gravitacional e da massa específica da liga de alumínio utilizada. Entretanto, nota-se que durante a dedução dessa equação algumas aproximações tiveram que ser efetuadas com respeito ao módulo de elasticidade e massa específica dos materiais, além de considerar implicitamente uma deformação uniforme da seção transversal do condutor durante a aplicação do carregamento.

## 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo contém uma descrição do laboratório de fadiga e integridade estrutural de cabos condutores de energia da Universidade de Brasília abordando os equipamentos que serão utilizados durante a pesquisa e os procedimentos experimentais adotados.

O programa experimental foi desenvolvido com o objetivo de analisar o comportamento das tensões média e alternada em fios de alumínio liga 6201 e 1350 que compõem os cabos condutores da presente pesquisa. A partir de ensaios estáticos e dinâmicos realizados nas amostras junto à técnica de extensometria, será feita uma avaliação da formulação que relaciona o parâmetro H/w com o nível de tensão média,  $S_m$ , nos fios de alumínio da camada externa do cabo condutor e uma verificação do uso da formulação de P-S quanto ao cálculo da tensão dinâmica atuante na zona de falha do cabo.

### 4.1 Descrição da Bancada de Ensaios de Cabos Condutores

O desenho esquemático da montagem da bancada de ensaios de cabos condutores, tanto para os ensaios dinâmicos quanto para os estáticos está descrita na Figura 4.1. O comprimento total do vão é de 46,8 m divididos em dois vãos: ativo e passivo. O vão ativo define o comprimento do cabo ensaiado, no qual se encontra o excitador eletromecânico (Shaker) no caso dos ensaios dinâmicos, sendo delimitado pelo centro da roldana do bloco fixo 3 e o centro do grampo de suspensão posicionado no bloco móvel. Já o vão passivo é utilizado apenas para fixação do cabo.



Figura 4.1 - Desenho esquemático da montagem da bancada de ensaios (MURÇA, 2011).

A amostra do cabo condutor é posicionada sob dois pontos de apoio que funcionam como pontos de articulação: o grampo de suspensão e a roldana do bloco fixo 3. Nas extremidades do cabo são utilizados grampos de ancoragem responsáveis pela conexão do cabo condutor à talha de alavanca no vão passivo e à célula de carga na extremidade oposta permitindo a aplicação da carga de esticamento.

O grampo de ancoragem do vão passivo faz a conexão do cabo condutor ao bloco fixo 1 por meio de uma talha de alavanca ou tifor (Figura 4.2). Esse equipamento é utilizado para controlar a altura do braço de alavanca utilizado na outra extremidade, permitindo um intervalo relativamente grande com relação à carga de esticamento.



Figura 4.2 - Talha de alavanca (tifor).

O carregamento da outra extremidade do cabo é controlado por meio de uma célula de carga posicionada entre o grampo de ancoragem e o braço de alavanca - cuja montagem está ilustrada pela Figura 4.3 - permitindo o monitoramento da carga de esticamento do condutor.



Figura 4.3 - Célula de carga CSR-5000 kgf.

Os três blocos fixos e o bloco móvel foram construídos em concreto armado para garantir uma boa rigidez à bancada. Os blocos móveis, ilustrados pela Figura 4.4, estão posicionados sobre uma espessa chapa de aço com rolamentos nas extremidades que proporcionam a movimentação sobre trilhos de aço perfil I, permitindo a variação do comprimento do vão ativo no intervalo de 31 a 41 m.

Atualmente o laboratório possui três bancadas similares capazes de realizar ensaios estáticos e dinâmicos e uma dentre elas (bancada C) capaz de realizar ensaios de auto amortecimento de cabos condutores.

O desenho esquemático da Figura 4.1 representa a configuração utilizada nos ensaios dinâmicos, onde o Shaker sobre o bloco fixo 2 é posicionado sobre uma chapa de aço,

possibilitando sua movimentação em um trilho de aço perfil em C para melhor posicionamento do excitador em relação ao nó ou anti-nó, em cada frequência de excitação, melhorando a estabilidade do ensaio e evitando possíveis pausas, conforme ilustrado pela Figura 4.5. Já os ensaios de auto amortecimento utilizam o Shaker posicionado no meio do vão ativo, e os ensaios estáticos, por não avaliarem o efeito da componente dinâmica da tensão, não utilizam o excitador eletromecânico.



Figura 4.4 - Blocos móveis das bancadas A, B e C.



Figura 4.5 - Blocos fixos com trilhos para deslocamento do excitador eletromecânico.

Como a variação de temperatura possui um efeito bastante significativo na resposta do cabo condutor, existe no laboratório um sistema de condicionamento de ar para garantir a estabilidade da temperatura durante a execução dos ensaios. Além disso, um revestimento isolante é utilizado no teto para reduzir a transferência de calor, como pode ser observado na Figura 4.6.



Figura 4.6 - Sistema de ar condicionado e isolamento térmico.

## 4.2 Cabos Condutores Analisados

A análise de tensões da presente pesquisa será realizada em quatro tipos de condutores: *i*) TERN, condutor de alumínio com alma de aço *ii*) CAL 900 e CAL 1055, ambos constituídos de alumínio liga 6201 e, *iii*) ORCHID, condutor de alumínio 1350. A Figura 4.7 ilustra a seção transversal dos condutores utilizados na presente pesquisa, os quais foram obtidos pela fornecedora Nexans e cujas características estão descritas na Tabela 5:

Condutor	Bitola (mcm)	Área Nominal Alumínio (mm²)	Área Nominal Aço (mm²)	Fios Alumínio (mm)	Fios Aço (mm)	Diâmetro Nominal Cabo (mm)	Massa Linear (kg/km)	Carga Ruptura (kgf)
TERN	795,0	402,82	27,83	45x3,376	7x2,250	27,01	1333,4	9998
CAL 900	900,0	456,26	-	37x3,962	-	27,74	1251,9	13421
CAL 1055	1055,0	534,46	-	61x3,340	-	30,06	1461	15549
ORCHID	636,0	322,24	-	37x3,330	-	23,31	888,4	5143

Tabela 5 - Características dos cabos condutores utilizados durante a pesquisa. (NEXANS, 2013)

*i)* Condutor de alumínio com alma de aço (TERN): Os condutores de alumínio com alma de aço (CAA) ou Aluminum Conductors Steel Reinforced (ACSR), são do tipo concêntrico, reunidos em uma ou mais camadas de fios de alumínio liga 1350/H19 ao redor de uma alma de aço galvanizado. A combinação de fios de diferentes materiais visa a obtenção da melhor relação entre capacidade de transporte de corrente e resistência mecânica em função de cada aplicação (ALUBAR, 2010).

O condutor TERN particularmente, é constituído de sete fios de aço, com 2,250 mm de diâmetro cada, que compõem a alma do cabo e 45 fios de alumínio liga de 3,376 mm, resultando numa área nominal de 430,65 mm<sup>2</sup>. O diâmetro nominal do condutor é de 27,01 mm e sua massa linear é de 1333,4 kg/km. Já a carga de ruptura é de 9998 kgf.

*ii)* Condutor de alumínio liga (CAL 900 e CAL 1055): Os condutores de alumínio liga (CAL) ou All-Aluminum Alloy Conductors (AAAC), são encordoados de forma concêntrica e compostos de fios de alumínio liga 6201-T81. Esses condutores foram desenvolvidos com o intuito de reduzir os custos, em relação aos condutores com alma de aço, nas aplicações em que a resistência mecânica obtida pelos condutores de alumínio 1350/H19, as ligas de alumínio 6201-T81 possuem maior resistência a corrosão e, por serem mais duros, apresentam maior resistência à abrasão (ALUBAR, 2010).

O condutor CAL 900 possui 37 fios de alumínio de 3,962 mm de diâmetro, o que resulta numa área nominal de 456,26 mm<sup>2</sup> e um diâmetro de 27,74 mm para o condutor. A massa linear é de 1251,9 kg/km e a carga de ruptura do condutor é de 13421 kgf.

Já o condutor CAL 1055 possui 30,06 mm de diâmetro nominal, resultante de sua construção com 61 fios de alumínio de 3,340 mm de diâmetro e uma área nominal de 534,46 mm<sup>2</sup>. Sua massa linear é de 1461 kg/km e a carga de ruptura do condutor é de 15549 kgf.

*iii) Condutor de alumínio (ORCHID):* Os condutores de alumínio (CA) ou All-Aluminum Conductors (AAC) são encordoados de forma concêntrica com uma ou mais camadas de fios de alumínio 1350. O condutor ORCHID possui 23,31 mm de diâmetro, sendo constituído por 37 fios de 3,330 mm de diâmetro cada, com uma área nominal de 322,24 mm<sup>2</sup>. A massa linear do condutor é de 888,4 kg/km e sua carga de ruptura é de 5143 kfg.



Figura 4.7 - Composição dos cabos condutores: a) TERN; b) CAL 900; c) CAL 1055; d) ORCHID (modificado: ALUBAR, 2010).

## 4.3 Posicionamento e Tracionamento do Cabo Condutor

Como qualquer procedimento experimental, os ensaios serão realizados por meio de uma série de etapas pré definidas, as quais devem ser respeitadas rigorosamente para permitir a verificação e a validade dos dados coletados.

A primeira etapa de ambos os ensaios será o posicionamento da amostra na bancada, conforme ilustrado pela Figura 4.1, seguido do esticamento do cabo condutor. Um intervalo será dado para permitir a acomodação do cabo e garantir que as deformações coletadas pelos

extensômetros sejam apenas devido à variação da carga de esticamento, no caso do ensaio estático, e devido à flexão durante o ensaio dinâmico.

O posicionamento do cabo condutor na bancada de ensaios e o esticamento da amostra deve seguir rigorosamente as seguintes etapas:

I. Posicionamento das polias, para movimentação do cabo condutor, e dos elementos de proteção para evitar o atrito entre o cabo e estruturas que possam danifica-lo, como os blocos fixos e o excitador eletromecânico, conforme ilustrado pela Figura 4.8;



Figura 4.8 - a) Polias de sustentação utilizadas para movimentação do cabo durante o esticamento; b) Elementos de proteção.

- II. Movimentar a bobina na qual o cabo sob análise é fornecido (Figura 4.9a), puxando-o até atingir a bancada fixa 3;
- III. A Figura 4.9b ilustra o grampo de suspensão do condutor, o qual deve ser posicionado no bloco móvel. Ressalta-se que os parafusos não devem ser apertados, apenas posicionados para impedir a movimentação da telha (parte superior);





b)

Figura 4.9 - a) Bobina; b) Grampo de suspensão monoarticulado modelo Forjasul 55101/003.

IV. Em seguida, o cabo deve ser fixo nos grampos de ancoragem, conforme a Figura 4.10, apertando os parafusos deste componente de forma gradual e cruzada para evitar o possível empenamento dos mesmos. O grampo de ancoragem do bloco fixo 3 deve ser conectado à célula de carga, já o grampo do bloco fixo 1 faz a conexão entre o cabo e a talha de alavanca.







b)

Figura 4.10 - Grampos de ancoragem a) Bloco fixo 3; b) Bloco fixo 1.

Uma vez que as extremidades do cabo estão fixas aos grampos de ancoragem, o tracionamento do condutor é realizado. Primeiramente deve-se imprimir uma pré-carga ao cabo utilizando apenas o tifor; em seguida, a carga de esticamento equivalente ao H/w de ensaio é obtida por meio do braço de alavanca na outra extremidade do condutor. Ambos os componentes utilizados no tracionamento do cabo condutor estão ilustrados pela Figura 4.11. O valor do carregamento, H, pode ser conferido por meio da célula de carga ilustrada pela Figura 4.3.

- V. As roldanas devem ser retiradas e o leitor da célula de carga deve ser verificado garantindo a carga de esticamento pré determinada.
- VI. O cabo deve repousar por 8 h no caso dos ensaios dinâmicos e por 24 h nos ensaios estáticos para minimizar as deformações nos fios devido à acomodação por fluência.



Figura 4.11 - Braço de alavanca e tifor.

- VII. No caso dos ensaios dinâmicos, a carga deve ser reduzida até o valor definido pelo ensaio e o grampo de suspensão deve ser fixado. Deve-se ressaltar que as porcas desse elemento devem ser fixas de forma gradual e cruzada para garantir a uniformidade e apresentar 50 Nm de torque cada ao final deste procedimento.
- VIII. Uma vez preparada a amostra, realiza-se os procedimentos de instrumentação para inicio dos ensaios estáticos ou dinâmicos.

## 4.4 Instrumentação do Cabo Condutor

No ensaio estático os extensômetros serão colados em todos os fios do cabo a uma distância de 2 *m* a partir do último ponto de contato entre o cabo e o grampo. Já no ensaio dinâmico serão utilizados sensores de deslocamento para controle e monitoração da vibração do condutor e apenas três extensômetros serão colados nos fios mais altos da camada superior oposta ao UPC.

## 4.4.1 Extensometria

O ERE (Extensômetro de Resistência Elétrica), apresentado pela Figura 4.12, é um dispositivo utilizado para medição de deformações. No contexto de análise da tensão média

atuante em componentes mecânicos, esse dispositivo se torna um elemento de grande importância pois, o conhecimento da deformação do material devido à algum tipo de carregamento, junto ao módulo de elasticidade do mesmo, permite a determinação da tensão atuante na estrutura do componente a partir da Lei de Hooke (Equação 26).



Figura 4.12 - Composição de um extensômetro (modificado: HOFFMANN, 1989).

A técnica utilizada para colagem dos extensômetros é dividida basicamente em 6 etapas: *i*) preparo da superfície; *ii*) limpeza da superfície; *iii*) verificação e posicionamento do ERE; *iv*) colagem do ERE; *v*) soldagem dos fios do ERE; *vi*) verificação do funcionamento do ERE.

A Figura 4.13 ilustra o extensômetro utilizado no laboratório de fadiga e integridade estrutural de cabos condutores de energia da Universidade de Brasília durante a execução dos procedimentos experimentis, cujas características são: extensômetro de forma tradicional, unidirecional e próprio para alumínio.



Figura 4.13 - Extensômetro PA-13-120BA-350-L (Excel Sensores).

*i) Preparo da superfície:* O primeiro passo do procedimento de colagem dos extensômetros é a remoção de impurezas da superfície do cabo a fim de garantir o pleno funcionamento do ERE. Assim, a superfície deve ser lixada ou jateada para aumentar a rugosidade superficial e permitir que a colagem seja a melhor possível. Deve-se ressaltar que o preparo das amostras utilizadas durante a pesquisa será realizado por meio do lixamento da superfície dos fios de interesse dos cabos condutores, conforme ilustrado pela Figura 4.14.



Figura 4.14 - Preparo da camada externa do cabo para colagem dos extensômetros.

*ii) Limpeza da superfície:* A Figura 4.15 ilustra o procedimento de limpeza da superfície do cabo condutor onde o extensômetro será colado, na qual utiliza-se álcool isopropílico e cotonete. Deve-se passar o cotonete nos fios do cabo em um movimento unidirecional para remoção dos resíduos deixados pela etapa de preparo da superfície.



Figura 4.15 - Limpeza da camada externa do cabo para colagem dos extensômetros.

*iii) Verificação e posicionamento do ERE:* A resistência dos extensômetros deve ser verificada, sendo tolerado um intervalo de  $\pm$  5% em relação ao valor descrito em sua

embalagem. O ERE é colado a uma fita adesiva no lado oposto ao da leitura para facilitar a aplicação da cola e o posicionamento na amostra. Deve-se atentar ao alinhamento do extensômetro com relação ao fio do cabo condutor, uma vez que a leitura de deformação é unidirecional.

*iv) colagem do ERE:* Um pequeno ponto de cola instantânea deve ser aplicado sob a fita adesiva e, com a ajuda de um cotonete ou de uma almofada de silicone, o ERE é mantido pressionado contra o fio de alumínio por cerca de 1 minuto para garantir a aderência entre o sensor e o fio do cabo condutor. A colagem do ERE está ilustrada pela Figura 4.16.



Figura 4.16 - Colagem dos extensômetros.

Em seguida, a fita adesiva é retirada e verifica-se se o extensômetro está bem colado ao fio de alumínio. A resistência do dispositivo deve ser novamente medida para garantir que o valor permanece dentro do limite tolerável. Os procedimentos descritos até este item serão repetidos para todos os fios de alumínio da camada externa da amostra no caso do ensaio estático, e apenas para os três fios mais altos da seção transversal que contém o UPC nos ensaios dinâmicos conforme a Figura 4.17.

*v) Soldagem dos fios do ERE:* Por fim, os fios dos extensômetros são separados um a um e soldados a um cabo responsável pela conexão entre os ERE e o aquisitor de dados (ADS) conforme ilustrado pela Figura 4.18.

Após a soldagem e conexão de todos os fios, a relação entre o fio de alumínio, o extensômetro e a respectiva entrada utilizada no aquisitor de dados deve ser realizada. Por exemplo: o fio 1 está conectado ao canal 1 do aquisitor de dados por meio do extensômetro 1.



a)



b)

Figura 4.17 - a) Extensômetros colados em todos os fios de alumínio da camada externa do condutor para realização dos ensaios estáticos; b) Extensômetros colados nos três fios mais altos e opostos ao UPC para realização dos ensaios dinâmicos.



Figura 4.18 - Soldagem dos fios dos extensômetros.

*vi)* Verificação do funcionamento do ERE: Esta etapa se insere nos procedimentos experimentais para garantir a correta execução da técnica de extensometria, evitando leituras incoerentes de deformação. A resistência dos ERE deve ser verificada no local onde foi realizada a soldagem e comparada com a leitura obtida na entrada do aquisitor de dados, sendo considerado aceitável uma mudança na resistência dentro do intervalo de  $\pm$  5%.

A extensometria é finalizada com a adição de uma camada de silicone sobre os extensômetros para protegê-los de impactos mecânicos, corrosão ou umidade, conforme ilustrado pela Figura 4.19.



Figura 4.19 - Adição de uma camada de silicone para proteção dos extensômetros.

• Calibração e balanceamento dos extensômetros

Após a colagem dos extensômetros, conexão com o aquisitor de dados e verificação das resistências, os extensômetros devem ser calibrados para garantir a confiabilidade das medidas e a ponte de Wheatstone deve ser balanceada para determinar a referência de leitura dos dispositivos. Os procedimentos para transferência de dados entre o aquisitor de dados (ADS 2000) e o *software* (AqDados) utilizados para leitura, bem como a respectiva calibração dos extensômetro e o balanceamento da ponte são descritas pelo Apêndice A.

## 4.4.2 Posicionamento dos sensores utilizados no ensaio dinâmico

Para realização dos testes dinâmicos, o excitador eletromecânico deve iniciar uma vibração controlada na amostra de forma a manter a amplitude de deslocamento pico a pico constante durante todo o ensaio. Sendo assim, a etapa de instrumentação dos ensaios dinâmicos possui uma quantidade adicional de sensores em relação aos ensaios estáticos, devendo-se ainda seguir os seguintes passos:

I. Realizar a conexão entre o excitador eletromecânico (*Shaker*) e a amostra de cabo condutor por meio de uma braçadeira e um dispositivo de alinhamento conforme a Figura 4.20. Deve-se utilizar fita isolante entre o cabo e a braçadeira para evitar o contato direto entre estes componentes;



Figura 4.20 - a) Dispositivo de alinhamento; b) Conexão entre o Shaker e a amostra.

II. Posicionar um acelerômetro na posição do Shaker (Figura 4.21).



Figura 4.21 - Acelerômetro piezoelétrico tipo PZ 23;

III. Fixar uma braçadeira na seção transversal 89 mm distante do ultimo ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão. Um acelerômetro deve ser posicionado na braçadeira para medir o deslocamento Y<sub>b</sub> conforme a Figura 4.22. O laboratório possui uma régua de tamanho apropriado que se encaixa no UPC a fim de garantir o correto posicionamento;



Figura 4.22 - Instrumentação do ponto 89 mm.

IV. Verificar o procedimento de extensometria descrito no item 4.4.1 nos três fios mais altos da camada externa do condutor na seção transversal que contém o UPC.

# 4.5 Execução dos Ensaios Estáticos e Dinâmicos

O objetivo dos estudos relacionados ao comportamento de cabos condutores de energia com relação à fadiga é a determinação de sua vida remanescente após a construção

das linhas de transmissão a fim de evitar danos devido a falhas inesperadas. Como se sabe, a vida remanescente do cabo condutor pode ser determinada pela amplitude de tensão ao qual este é submetido, via formulação de Poffenberger-Swart, junto à teoria de acúmulo de dano, como o modelo proposto por Palgren-Miner.

Uma variável que exerce forte influência na vida do condutor é a tensão média atuante nos fios de alumínio devido a carga de esticamento, uma vez que a vida de um condutor quando submetido a uma carga de tração referente a 30% de EDS apresenta redução de cerca de 50% quando comparada aquela referente a uma EDS de 20% (FADEL, 2010).

Neste contexto, a finalidade deste estudo é analisar a formulação que relaciona a tensão média atuante nos fios de alumínio da camada mais externa do condutor em função de parâmetros de projeto e avaliar a efetividade da formulação de P-S para determinação da tensão atuante no condutor na zona de falha. O procedimento experimental se baseia na execução de ensaios estáticos e dinâmicos realizados em valores preestabelecidos para o parâmetro H/w, junto ao monitoramento da deformação do condutor via análise de extensometria.

A escolha dos condutores analisados neste trabalho foi motivada no tipo de liga que compõe cada cabo, uma vez que os condutores TERN e ORCHID utilizam alumínio 1350 e os condutores tipo CAL 900 e CAL 1055 são constituídos pela liga de alumínio 6201. Deve-se ressaltar que em ambos os ensaios, estáticos e dinâmicos, os níveis de H/w de interesse são iguais a 1820, 2144 e 2725 m.

### 4.5.1 Ensaio estático

Para avaliação da tensão média dos cabos condutores em função dos três valores H/w, a amostra será primeiramente esticada no maior valor de carregamento (H/w=2725 m) para facilitar a instrumentação com extensômetros, os quais serão colados em todos os fios da camada mais externa do condutor.

O posicionamento dos extensômetros no cabo será feita a uma distância de dois metros do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão, a fim de evitar a influência de tensões localizadas como a carga de aperto no grampo ou o regime de escorregamento nessa região (VILELA, 2013).

O início do ensaio estático terá como referência o esticamento do condutor a um carregamento de 5% de EDS para os condutores TERN, CAL 1055 e CAL 900; já o cabo ORCHID, terá a referência de 10% de EDS. O valor do carregamento foi definido a fim de garantir que o intervalo de carga necessário ao experimento fosse atingido apenas pela variação de altura do braço de alavanca, reduzindo a probabilidade de falha dos extensômetros, uma vez que a utilização da talha de alavanca (tifor) produz movimentos bruscos no cabo.

A variação da carga de esticamento será realizada de maneira crescente, elevando a carga de forma gradativa e em passos definidos (Tabela 6). Ao atingir o maior valor H/w, o carregamento será reduzido com o mesmo passo de variação até atingir o valor inicial do ensaio. Em ambas as etapas um intervalo de 30 minutos será dado entre os passos de variação para garantir a acomodação do condutor e a estabilidade da leitura dos extensômetros.

Condutor	EDS [%]	H/w [m]	H [kgf]	Tensão teórica, S <sub>m,a</sub> [MPa]	Deformação teórica, ε [μstrain]
	5	374	501	9,91	143,67
	15	1502	1502	29,74	431,01
TERN	24	1820	2437	48,26	699,41
	29	2144	2871	56,84	823,76
	36	2725	3648	72,25	1047,04
	5	536	671	14,14	204,99
	10	1072	1342	28,29	409,97
CAL 900	17	1820	2279	48,03	696,08
	20	2144	2684	56,57	819,80
	25	2725	3412	71,90	1042,09
	5	534	778	14,06	202,82
	10	1061	1555	28,12	405,64
CAL 1055	17	1820	2668	48,03	696,08
	20	2144	3143	56,57	819,80
	25	2725	3995	71,90	1042,09
	10	579	514	15,35	222,40
	20	1157	1029	30,69	444,79
ORCHID	31	1820	1617	48,26	699,41
	37	2144	1905	56,84	823,76
	47	2725	2422	72,25	1047,04

Tabela 6 - Carga de esticamento das amostras durante o ensaio.

O uso dos extensômetros visa determinar a tensão real atuante no cabo durante a realização do ensaio e possibilitar a comparação com os valores calculados analiticamente. Os valores teóricos esperados para cada carga de esticamento foram obtidos aplicando-se a Lei de Hooke à formulação que relaciona o parâmetro H/w com o nível de tensão média atuante nos fios do condutor (Equação 27), resultando em:

$$\varepsilon = \frac{g\rho_a}{E_a} \frac{H}{w}$$
(28)

Onde  $\varepsilon$  é a deformação teórica que deve ser lida pelos extensômetros, H/w é o parâmetro de projeto dado pela razão entre a carga de esticamento e a massa específica do condutor,  $\rho_a$  e  $E_a$  são respectivamente a massa específica e o módulo de elasticidade da liga de alumínio dos fios que compõem a camada externa do cabo e g é a constante gravitacional.

É importante destacar que, como os extensômetros serão zerados em um nível específico de EDS devido às limitações práticas da metodologia experimental, a deformação teórica obtida nessa referência deverá ser acrescida ao valor lido pelo ERE para coerência

entre os resultados. Essa decisão não deverá afetar a análise, uma vez que a proposta da formulação é uma relação linear entre a deformação e a carga de esticamento.

Apesar de o laboratório de fadiga e integridade estrutural de cabos condutores de energia da Universidade de Brasília possuir sistemas de climatização, pequenas variações de temperatura são inerentes ao experimento, o que pode dilatar a amostra e influenciar a leitura dos extensômetros. Além da influência da temperatura, oscilações na resistência do ERE são inevitáveis durante o uso desse dispositivo, sendo tolerado uma variação de  $\pm 5\%$  durante o procedimento de extensometria. Logo, nota-se que por se tratar de um procedimento experimental, erros associados às leituras de deformação podem ocorrer devido à influência de fatores externos ao ensaio.

Os procedimentos experimentais para realização do ensaio estático podem ser descritos, em ordem cronológica, pelas seguintes etapas:

- 1. Esticamento do cabo no maior valor H/w que será analisado pela pesquisa conforme o item 4.3 apresentado anteriormente;
- 2. Intervalo de 24 horas para acomodação da amostra na bancada de testes;
- 3. Marcação da seção transversal do condutor no local de colagem dos extensômetros: 2 metros a partir do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão;
- Execução dos procedimentos de extensometria, conforme o item 4.4.1 apresentado anteriormente, junto à calibração dos extensômetros e do balanceamento da ponte de Wheatstone (Apêndice A);
- 5. Verificação da leitura dos extensômetros: Inicia-se uma gravação teste dos dados dos extensômetros para analisar os valores coletados de deformação;
- 6. Redução da carga de esticamento para a referência da pesquisa;
- 7. Os extensômetros são novamente balanceados e a ponte de Wheatstone é calibrada para início da coleta de dados;
- 8. A gravação de dados dos extensômetros é iniciada. Deve-se realizar uma gravação contínua, que se prolongará sem intervalos durante todo o ensaio;
- Aplicar a nova carga de esticamento, referente ao valor H/w seguinte (Tabela 6). Vale lembrar que apenas a altura do braço de alavanca deve ser alterado, uma vez que a utilização do tifor pode provocar perdas de extensômetros devido à movimentos bruscos da amostra;
- 10. Aguardar 30 minutos para acomodação da amostra. A leitura estável dos extensômetros deve ser checada ao final deste intervalo para garantir que a estabilidade da leitura foi alcançada;
- 11. Repetir os procedimentos 9 e 10 até que o maior valor de carregamento seja atingido (H/w=2725 *m*);
- 12. Reiniciar a variação do carregamento de forma decrescente, segundo os procedimentos9 e 10, por meio dos mesmos passos descritos na Tabela 6 até retornar ao valor de referência;
- 13. Finalizar o teste;
- 14. Reproduzir os valores registrados em gráficos, relacionando a tensão média e a deformação de cada fio ao respectivo valor H/w.

### 4.5.2 Ensaio dinâmico

Os ensaios dinâmicos serão realizados com o intuito de avaliar o uso da formulação de Poffenberger-Swart para determinação da tensão nominal atuante na zona de falha do condutor durante as vibrações eólicas. Para execução dos testes, o cabo deve ser devidamente esticado e instrumentado conforme os procedimentos apresentados anteriormente. Com relação a análise dos resultados, será construída uma curva comparativa entre a tensão teórica, calculada por P-S, e a tensão experimental obtida via extensometria:  $\sigma_{P-S} \propto \sigma_{exp}$ .

Os valores da constante K, necessários ao cálculo teórico da componente alternada de tensão via formulação de P-S, foram obtidos por meio da Equação (20) e estão apresentados na Tabela 7 em função do parâmetro H/w e do tipo de cabo condutor.

Cabo condutor	H/w [m]	K [MPa/mm]	
	1820	30,80	
CAL 1055	2144	32,36	
	2725	34,92	
	1820	30,91	
ORCHID	2144	32,49	
	2725	35,07	

Tabela 7 - Constante "K" utilizada na formulação de P-S em função do parâmetro H/w e do tipo de cabo condutor.

O procedimento experimental se inicia por meio de uma varredura em seno da amostra para obtenção das frequências de ressonância do cabo. Para realizar a varredura, a vibração do condutor foi iniciada a partir da frequência de 18 Hz, conforme ilustrado pela Figura 4.23, e com o deslocamento do Shaker fixo em 0,5 mm pico a pico. Deve-se ressaltar que os picos de interesse deste trabalho serão aqueles que ocorrerem no intervalo entre 18 e 25 Hz, sendo escolhido o que apresentar melhor comportamento.

Uma vez definida a frequência de trabalho, os extensômetros devem ser calibrados e balanceados para garantir a coerência do ensaio com relação às leituras de deformação (Apêndice A). Em seguida, o teste dinâmico pode ser iniciado: o excitador eletromecânico introduz uma vibração com amplitude de deslocamento pico a pico constante em uma frequência próxima a uma das frequências de ressonância encontradas, impondo ao cabo condutor o carregamento dinâmico responsável pela deformação dos fios devido ao movimento de flexão. O manuseio do software de controle utilizado para executar os ensaios dinâmicos se encontra no Apêndice B. Uma vez estabilizado o ensaio, a gravação da leitura dos extensômetros é efetuada por 30 segundos e os dados são transferidos para uma tabela Excel para possibilitar a análise comparativa entre as tensões teórica e experimental.

Ao final da gravação, o ensaio deve ser pausado e os extensômetros são novamente calibrados junto ao balanceamento da ponte de Wheatstone. Em seguida, o ensaio é repetido seguindo os mesmos procedimentos. Um total de três gravações devem ser realizadas a partir do mesmo passo a passo estabelecido pela metodologia de ensaio.


Figura 4.23 - Varredura em seno.

Uma vez que ambos os condutores TERN e ORCHID são compostos por fios de alumínio 1350 e os cabos CAL 900 e CAL 1055 por fios de alumínio 6201, optou-se pela realização dos ensaios dinâmicos apenas nas amostras expostas pela Tabela 7.

Com o intuito de analisar a formulação de P-S, os testes dinâmicos serão realizados para uma sequência crescente de amplitudes de deslocamento a partir de 0,1 *mm* pico a pico até atingir o deslocamento de 1 *mm* pico a pico, em passos de 0,1 *mm*, para os três níveis do parâmetro H/w de interesse da pesquisa.

A partir da deformação lida pelos extensômetros a tensão experimental será calculada pela Lei de Hooke, uma vez que o modulo de elasticidade da liga de alumínio que compõe os condutores pode ser obtido da literatura. Em seguida, uma curva comparativa será construída para verificação dos valores teóricos obtidos via formulação de P-S.

Os procedimentos experimentais para realização do ensaio dinâmico podem ser descritos, em ordem cronológica, pelas seguintes etapas:

- 1. Tracionamento do cabo em um carregamento 10% maior que o definido para o ensaio conforme o item 4.3 apresentado anteriormente. Para o ensaio dinâmico será dado um intervalo de 8 horas para acomodação da amostra na bancada de testes;
- 2. Na carga de ensaio, o torque de 50 *Nm* nas porcas do grampo de suspensão deve ser verificado por meio de um torquímetro;
- 3. Execução dos procedimentos de instrumentação, conforme o item 4.4 apresentado anteriormente;
- 4. Varredura em seno para definição da frequência de ensaio;
- 5. Novamente deve-se realizar o balanceamento e a calibração dos extensômetros;
- 6. Início do teste dinâmico na frequência encontrada e com a amplitude de deslocamento definida para o ensaio. Uma sequência de amplitudes pico a pico será seguida em passos de 0,1 *mm*, de forma que o intervalo entre  $0,1 \le Y_b \le 1,0$  *mm* pico a pico seja varrido;
- 7. Aguardar a estabilização do ensaio;
- Proceder com a leitura de deformação dos extensômetros durante 30 segundos de gravação;
- 9. Copiar a gravação de dados para uma tabela Excel;

- 10. Parar o ensaio e repetir os procedimentos de 5 a 9 até obter um total de três gravações para cada amplitude de deslocamento;
- 11. Finalizar o teste;
- 12. Reproduzir os valores registrados em gráficos, relacionando a tensão experimental encontrada por meio das leituras de deformação com a tensão teórica calculada pela formulação de P-S.

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Este capítulo destina-se à apresentação dos resultados obtidos por meio dos ensaios estáticos para avaliação da formulação que relaciona o parâmetro H/w ao nível de tensão média atuante no cabo condutor, e ainda os resultados obtidos nos ensaios dinâmicos a fim de verificar a formulação de P-S quanto à determinação da componente de tensão dinâmica atuante na zona de falha do condutor.

Primeiramente os dados dos ensaios estáticos realizados nos condutores TERN, CAL 900, CAL 1055 e ORCHID serão expostos, seguido de uma discussão acerca dos resultados observados quanto ao uso da Equação (27) para determinação da tensão média atuante nos cabos condutores. Os resultados dos ensaios dinâmicos realizados nos cabos CAL 1055 e ORCHID serão analisados em seguida junto à discussão do uso da formulação de P-S, apresentada pela Equação (19), para determinação da componente de tensão dinâmica em função da amplitude de deslocamento  $Y_b$  sofrida pelo cabo condutor.

## 5.1 Resultados dos Ensaios Estáticos

Nesta seção são apresentados os resultados sob condições de carregamento estático para os cabos condutores TERN, CAL 1055, CAL 900 e ORCHID e para os níveis de carregamento referentes aos seguintes H/w: 1820, 2144 e 2725 m.

Deve-se destacar que os fios da camada externa dos condutores TERN e ORCHID são de alumínio 1350 enquanto ambos os condutores tipo CAL são compostos por fios de alumínio 6201, modificando a massa específica da liga que compõe o fio e consequentemente os valores teóricos do ensaio.

Sendo assim, de acordo com as equações (27) e (28), os valores teóricos de tensão média e de deformação deverão ser similares para os cabos compostos pelo mesmo tipo de fio em sua camada externa, conforme ilustrado pela Tabela 8.

Liga de Alumínio	H/w [m]	Tensão média, S <sub>m,a</sub> [MPa]	Deformação, ε [μstrain]
Alumínio 1350	1820	48,26	699,41
	2144	56,84	824,08
	2725	72,25	1047,06
Alumínio 6201	1820	48,03	696,08
	2144	56,57	819,80
	2725	71,90	1042,09

Tabela 8 - Valores teóricos de tensão média e deformação em função do tipo de fio que compõe a camada externa do condutor.

#### 5.1.1 Cabo condutor: TERN

Conforme mencionado na seção 4.5.1, inicialmente os ensaios estáticos foram executados de forma crescente com relação à carga de esticamento e posteriormente no sentido inverso até que a referência de 5% de EDS fosse atingida.

A influência do sentido de carregamento em função do parâmetro H/w para o condutor TERN é ilustrada pela Figura 5.1, onde pode-se notar um comportamento semelhante na leitura dos extensômetros em ambos os sentidos.



Figura 5.1 - Deformação média em função do valor H/w para o condutor TERN.

Deve-se ressaltar que os gráficos subsequentes (Figuras 5.2 e Figura 5.3) foram gerados a partir da leitura de deformação dos extensômetros apenas no sentido crescente de carregamento.

Os gráficos da Figura 5.2 apresentam os resultados dos ensaios estáticos com relação ao nível de tensão média e à deformação sofrida pelos fios da camada externa do condutor TERN em função do parâmetro H/w. A correlação entre tensão e deformação lida pelos extensômetros e o respectivo nível de tensão atuante em cada fio foi realizada por meio da Lei de Hooke apresenta pela Equação (26). Nota-se que os fios da camada externa do cabo condutor apresentaram um comportamento semelhante nas três cargas de esticamento sob análise, mantendo o formato do gráfico e evidenciando uma relação de dependência proporcional ao parâmetro H/w, como esperado pela formulação matemática apresentada anteriormente (Equação 27).



Figura 5.2 - Tensão média e deformação dos fios da camada externa do cabo TERN.

A Figura 5.3 mostra os valores médios da tensão estática atuante nos fios da camada externa do cabo TERN em função do parâmetro H/w. O aspecto linear dos dados expostos no gráfico evidencia uma aderência satisfatória dos resultados experimentais ao modelo matemático proposto; entretanto, uma discrepância entre a correlação perfeita (em azul) e os valores obtidos através do ensaio estático pode ser observada.



Figura 5.3 - Tensão média em função do parâmetro H/w para o cabo TERN.

A divergência entre os resultados experimentais e o modelo teórico pode estar associado à simplificação adotada na etapa de dedução da Equação (27) quanto à deformação dos fios do cabo condutor além das aproximações entre o módulo de elasticidade e a massa especifica dos materiais que compõem o cabo TERN (CAA), alterando o valor real da componente de tensão média atuante nos fios de alumínio do condutor.

A Figura 5.4 foi construída a fim de quantificar o erro percentual em cada nível de carregamento e em ambos os sentidos de variação do parâmetro H/w. Nota-se que existe uma aderência bastante satisfatória entre os resultados experimentais e o valor teórico, uma vez que a discrepância entre o modelo matemático e os dados obtidos experimentalmente se manteve reduzida - abaixo de 7% - em todos os pontos de interesse do ensaio.

Ao comparar um mesmo valor do parâmetro H/w na Figura 5.4, pode-se observar que ocorreu uma pequena flutuação do erro médio em ambos os sentidos de carregamento. Em H/w=2144 m por exemplo, o erro manteve-se entre 6 e 7% em ambos os sentidos; evidenciando que, neste ensaio, o sentido de variação não exerceu influência significativa.



Figura 5.4 - Erro médio entre os valores teóricos e experimentais da tensão estática atuante na camada externa do cabo TERN em função do parâmetro H/w e do sentido de carregamento.

## 5.1.2 Cabo condutor: CAL 1055

A Figura 5.5 mostra a média de deformação dos fios da camada externa do cabo CAL 1055 em função do sentido de carregamento. Nota-se que os dados coletados no sentido crescente do parâmetro H/w apresentaram melhor ajuste com os valores teóricos.



Figura 5.5 - Deformação média em função do valor H/w para o condutor CAL 1055.

Os gráficos da Figura 5.6 apresentam os níveis de tensão média e deformação sofrida pelos fios da camada externa do condutor CAL 1055, em função do parâmetro H/w, durante a realização dos ensaios estáticos.



Figura 5.6 - Tensão média e deformação dos fios da camada externa do cabo CAL 1055.

Os níveis de deformação expostos pela Figura 5.6 foram obtidos no sentido crescente de variação do parâmetro H/w. De forma análoga ao cabo TERN, pode-se perceber uma proporcionalidade entre a variação da carga de esticamento e os níveis de deformação dos fios da camada externa do condutor CAL 1055.

A linearidade existente entre a tensão média atuante nos fios de alumínio do cabo condutor e o parâmetro H/w pode ser visualizada pela Figura 5.7, onde estão dispostos os valores médios dos resultados experimentais apresentados na Figura 5.6 para cada nível de carregamento.



Figura 5.7 - Tensão média em função do parâmetro H/w para o cabo CAL 1055.

Ao comparar os cabos TERN e CAL 1055 é possível notar uma aproximação dos resultados experimentais com o modelo teórico para o condutor de alumínio liga. Essa diferença pode estar associada à simplificação realizada na etapa de determinação do valor teórico da tensão média atuante nos fios de alumínio do cabo condutor, uma vez que o CAL 1055 não possui alma de aço, sendo formado apenas por fios de alumínio 6201.

A Figura 5.8 apresenta o erro médio entre os valores teóricos e experimentais da tensão estática atuante na camada externa do cabo CAL 1055 em função do parâmetro H/w e do sentido de carregamento. Pode-se perceber claramente que os resultados obtidos durante a variação crescente no carregamento se ajustaram melhor aos valores teórico resultantes da Equação (27). Ao comparar o nível H/w=1820 m em ambos os sentidos por exemplo, percebe-se um aumento no erro médio de aproximadamente 4% para 7%.



Figura 5.8 - Erro médio entre os valores teóricos e experimentais da tensão estática atuante na camada externa do cabo CAL 1055 em função do parâmetro H/w e do sentido de carregamento.

## 5.1.3 Cabo condutor: CAL 900

Os procedimentos de instrumentação descritos pela seção 4.4 visam a manutenção da integridade dos sensores utilizados durante a execução dos ensaios estáticos e dinâmicos. Entretanto, durante a execução do ensaio estático com o cabo CAL 900, foi notado um comportamento incoerente - leituras de grandes deformações sem variações na carga de esticamento - em 6 dentre os 18 extensômetros colados na camada externa do condutor, causando uma redução do espaço amostral da análise de deformação dos fios durante o ensaio estático do cabo.

A decisão de dar continuidade ao ensaio estático com o cabo CAL 900, mesmo com os problemas apresentados por seis sensores de deformação, foi motivada pela quantidade considerável de extensômetros remanescentes o que provavelmente possibilitaria a construção dos gráficos e a análise dos dados sem o comprometimento do resultados. Além disso, outro fator considerado foi a agenda do laboratório de fadiga e integridade estrutural de cabos condutores de energia da Universidade de Brasília, uma vez que a repetição do procedimento experimental acarretaria em atrasos nos ensaios de fadiga realizados nas demais bancadas do laboratório já que os ensaios estáticos exigem uma quantidade considerável de horas para execução.

A Figura 5.9 mostra a deformação sofrida pelos fios da camada externa do cabo condutor CAL 900 durante a execução dos ensaios estáticos. Pode-se perceber que, conforme mencionado, durante a execução do ensaio houve perda de informações de alguns extensômetros. Os gráficos relativos ao H/w=2725 m por exemplo, foram construídos com a ausência dos dados dos extensômetros 2, 4, 5, 7, 11 e 14.

Entretanto, apesar de conter um espaço amostral reduzido, os gráficos presentes na Figura 5.9 se assemelham àqueles apresentados para os cabos TERN (Figura 5.2) e CAL 1055 (Figura 5.6) mantendo o formato do gráfico nas três cargas de esticamento. Logo, é possível observar que existe uma correlação entre a deformação sofrida pelos fios do condutor e a variação do parâmetro H/w.



Figura 5.9 - Tensão média e deformação dos fios da camada externa do cabo CAL 900.

Os gráficos apresentados pela Figuras 5.9 foram construídos a partir dos resultados obtidos para o sentido decrescente de variação do carregamento H/w, uma vez que neste sentido de carregamento a leitura dos extensômetros manteve-se mais estável.

A Figura 5.10 mostra a deformação média sofrida pelos fios da camada externa do cabo condutor CAL 900 durante a realização dos ensaios estáticos. Nota-se que a média dos valores experimentais coletados no sentido crescente de variação do parâmetro H/w apresentou um erro bastante acentuado apenas em H/w=2144 m.

Uma vez que a aderência entre os resultados experimentais e o valor teórico foi bastante significativa nos demais carregamentos sob análise, possivelmente o erro observado em H/w=2144 *m* ocorreu devido à fatores externos durante a execução do ensaio; como por exemplo, uma acentuada variação de temperatura.



Figura 5.10 - Deformação média em função do valor H/w para o condutor CAL 900.

Conforme apresentado pela Figura 5.11, assim como observado para os cabos TERN e CAL 1055, independente do sentido de carregamento, houve uma aproximação bastante satisfatória entre os resultados experimentais da tensão média atuante no cabo CAL 900 em função do parâmetro H/w e a correlação perfeita gerada pelo modelo teórico da Equação (27).

Sendo assim, a redução da quantidade de extensômetros em funcionamento durante o ensaio e a alta discrepância apresentada pela Figura 5.10 no nível de carregamento relativo ao parâmetro H/w=2144~m não exerceram influência significativa nos resultados esperados, evidenciando que a decisão de dar continuidade no ensaio estático com o cabo CAL 900 não gerou interferências nos resultados.



Figura 5.11 - Tensão média em função do parâmetro H/w para o cabo CAL 900.

O erro médio entre os valores teóricos e experimentais da tensão estática atuante na camada externa do cabo CAL 900 em função do parâmetro H/w e do sentido de carregamento está exposto pela Figura 5.12. Conforme mencionado, nota-se uma boa aproximação entre o resultado experimental e o modelo teórico, uma vez que o maior erro percentual obtido durante o ensaio manteve-se abaixo de 10%.



Figura 5.12 - Erro médio entre os valores teóricos e experimentais da tensão estática atuante na camada externa do cabo CAL 900 em função do parâmetro H/w e do sentido de carregamento.

#### 5.1.4 Cabo condutor: ORCHID

O ensaio estático realizado com o cabo condutor ORCHID encerrou a etapa de verificação da formulação que relaciona o parâmetro H/w ao nível de tensão média atuante em cabos condutores de energia.

A Figura 5.13 mostra a deformação média sofrida pelos fios da camada externa do cabo ORCHID em função do parâmetro H/w nos sentidos crescente e decrescente de variação da carga de esticamento. A dispersão dos resultados destacam uma aproximação quase ideal entre a deformação teórica - obtida por meio da Equação (28) - e a média da deformação individual dos fios que compõem a camada externa do cabo.

Uma vez que o cabo condutor ORCHID é composto apenas por fios de alumínio 1350, cuja composição supera 99% de Al, a alta acurácia apresenta pelos pontos do gráfico pode ser justificada pela dedução do modelo teórico ao eliminar o efeito das aproximações de 3:1 e de 1:3, respectivamente, entre os módulos de elasticidade e as massas específicas dos fios de alumínio e de aço que fazem parte da composição de cabos do tipo CAA.



Figura 5.13 - Deformação média em função do valor H/w para o condutor ORCHID.

A correlação entre a deformação sofrida por cada fio da camada externa do cabo condutor ORCHID e o respectivo nível de tensão, foi efetuada através da Lei de Hooke (Equação 26). A Figura 5.14 mostra os resultados individuais de cada fio, onde pode-se perceber que a maior parte dos valores experimentais permaneceu bastante próximo da correlação perfeita (em azul), evidenciando uma adequação bastante satisfatória entre experimento e modelo teórico.



Figura 5.14 - Tensão média e deformação dos fios da camada externa do cabo ORCHID.

A Figura 5.15 mostra o valor médio do nível de tensão estática atuante nos fios da camada externa do cabo condutor ORCHID em função do parâmetro H/w e em ambos os sentidos de variação da carga de esticamento.



Figura 5.15 - Tensão média em função do parâmetro H/w para o cabo ORCHID.

A Figura 5.16 foi construída para permitir uma melhor visualização do erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da tensão estática atuante na camada externa do cabo ORCHID em função do parâmetro H/w e do sentido de carregamento.

A superposição quase ideal entre a correlação perfeita e as curvas experimentais da Figura 5.15, junto ao erro percentual de cada nível de carregamento, ilustrado pela Figura 5.16, evidenciam que melhores resultados são esperados para condutores de alumínio (CA), uma vez que o maior erro no sentido crescente de carregamento manteve-se abaixo de 0,4% enquanto no sentido decrescente de variação a maior discrepância obtida manteve-se próxima de 1%.

Ao comparar os resultados obtidos para os quatro tipos de cabos condutores analisados na presente pesquisa (TERN, CAL 1055, CAL 900 e ORCHID), é possível notar que o erro entre os resultados experimentais e a formulação apresentada manteve-se reduzido em todos os ensaios, sugerindo que a utilização da Equação (26) mostra-se adequada para definir o nível de tensão média atuante no condutor em função do tipo de cabo e do parâmetro H/w.

Entretanto, ressalta-se que os ensaios realizados não consideram o efeito de variações de temperatura ou possíveis sobrecargas que podem ocorrer durante a vida em serviço do condutor, como o acúmulo de gelo na LT.



Figura 5.16 - Erro médio entre os valores teóricos e experimentais da tensão estática atuante na camada externa do cabo ORCHID em função do parâmetro H/w e do sentido de carregamento

## 5.2 Resultados dos Ensaios Dinâmicos

Os resultados dos ensaios realizados com os condutores ORCHID e CAL 1055 sob condições de carregamento dinâmico serão apresentados nesta seção. É importante ressaltar que o intuito dos ensaios é a verificação do uso da formulação de Poffenberger-Swart, definida pela Equação (19), quanto à determinação da componente alternada de tensão atuante da zona de falha do cabo condutor.

O ensaio dinâmico foi realizado para três níveis do parâmetro H/w (1820, 2144 e 2725 m) a partir do controle da amplitude de vibração, Y<sub>b</sub>, do condutor através do posicionamento de um acelerômetro em um ponto 89 mm distante do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão, conforme ilustrado pela Figura 4.22.

O nível da componente alternada de tensão foi obtido por meio da colagem de três extensômetros no ponto diametralmente oposto ao UPC, conforme ilustrado pela Figura 4.17b. Já a relação entre a deformação dos fios sob análise e a respectiva tensão atuante foi realizada por meio da Lei de Hooke, permitindo a comparação entre os valores experimentais e o nível de tensão teórico obtido pela formulação de P-S.

O valor da constante "K" de P-S em função do tipo de cabo sob análise e do parâmetro H/w foi calculado previamente e está exposto pela Tabela 7. Já as amplitudes de deslocamento pico a pico utilizadas durante os ensaios foram pré definidas na seção 4.5.2, permitindo a determinação dos valores teóricos da componente dinâmica da tensão atuante no cabo condutor durante a vibração.

O gráfico de maior interesse do ensaio foi construído a partir dos valores teóricos calculados pela formulação de P-S, dispostos no eixo das ordenadas, e os respectivos níveis de tensão obtidos experimentalmente compondo as abscissas. A correlação perfeita do gráfico  $\sigma_{P-S} \propto \sigma_{Exp}$  será ilustrada por uma reta, cujo coeficiente angular é 45°, com o intuito de destacar a adequação dos resultados em cada amplitude de deslocamento.

Tendo em vista a construção do cabo por diferentes camadas de fios entrelaçados helicoidalmente, conforme ilustrado pela Figura 3.10, o ponto diametralmente oposto ao UPC

pode estar localizado entre fios adjacentes no topo do cabo condutor. Sendo assim, a construção dos gráficos foi baseada no levantamento de duas curvas de tendência: *i*) através da média das deformações sofridas pelos três fios mais altos do cabo no ponto diametralmente oposto ao UPC e, *ii*) por meio da deformação sofrida pelo fio central dentre aqueles que estão sob análise.

#### 5.2.1 Cabo condutor: ORCHID

A Figura 5.17 mostra o valor da componente alternada de tensão atuante no cabo condutor ORCHID. Os dados foram obtidos para uma gama de amplitudes de deslocamento no nível de carregamento equivalente ao H/w=1820 m.

Os valores teóricos obtidos pela formulação de P-S estão ilustrados em azul, enquanto a tensão obtida pela média das deformações sofridas pelos três extensômetros utilizados no ensaio está descrita pela reta pontilhada em vermelho e a tensão atuante no fio central dentre os três fios em análise está representada pela reta tracejada em verde no gráfico da Figura 5.17.



Figura 5.17 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo ORCHID em função da amplitude de deslocamento (H/w=1820 m).

O gráfico da Figura 5.17 mostra uma adequação bastante satisfatória entre o modelo teórico e os resultados experimentais. Ao analisar a tensão obtida pela média da deformação dos extensômetros, nota-se um melhor ajuste para as pequenas amplitudes de deslocamento pico a pico, uma vez que uma maior dispersão dos dados pode ser observada a partir de  $Y_b=0,6$  mm. Já os dados obtidos pelo extensômetro central se aproximaram gradativamente da correlação perfeita a medida em que a amplitude  $Y_b$  atingiu maiores valores.

A fim de possibilitar uma melhor interpretação do gráfico, o erro relativo de cada ponto das linhas de tendência supracitadas está exposto na Figura 5.18. Pode-se perceber que a discrepância entre os valores teóricos e experimentais manteve-se abaixo de 15% em todos

os pontos sob análise, sugerindo uma ótima correlação entre a formulação de P-S e a tensão atuante na zona de falha do cabo condutor no intervalo de amplitudes de deslocamento pico a pico de interesse do ensaio.



Figura 5.18 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo ORCHID (H/w=1820 m).

A Figura 5.19 mostra os resultados do ensaio dinâmico realizado com o cabo ORCHID, expondo o valor da componente alternada de tensão atuante na zona de falha do condutor para o carregamento relativo ao H/w=2144 m.

Assim como o gráfico da Figura 5.17, as retas do gráfico abaixo mostram os valores teóricos obtidos pela Equação (18) em azul, o resultado experimental da tensão atuante no fio central e mais alto do condutor tracejada em verde, e a tensão resultante da média da deformação dos extensômetros utilizados no ensaio pela linha pontilhada vermelha.



Figura 5.19 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo ORCHID em função da amplitude de deslocamento (H/w=2144 m)

Para o nível de carregamento relativo ao H/w=2144 m, pode-se perceber claramente que a formulação de Poffenberger-Swart teve uma melhor adequação aos resultados em

pequenos deslocamentos, uma vez que a discrepância dos resultados experimentais em relação à linha de tendência ideal foi aumentando gradativamente.

O nível de tensão alternada obtido através do extensômetro do topo teve uma melhor aproximação da correlação perfeita neste ensaio, sugerindo uma maior proximidade do ponto diametralmente oposto ao UPC.

O erro percentual em cada amplitude de deslocamento pico a pico está ilustrado na Figura 5.20. Ao analisar apenas o fio central (Topo), pode-se observar que o erro manteve-se abaixo de 10% em todos os valores de  $Y_b$  e menor que 5% em 8 dentre os 13 ensaios realizados. Sendo assim, a utilização de P-S se mostra adequada para o cálculo da componente de tensão alternada atuante na zona de falha do cabo no intervalo de deslocamento analisado.



Figura 5.20 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo ORCHID (H/w=2144 m).

Os últimos ensaios dinâmicos com o cabo condutor ORCHID foram realizados no parâmetro H/w=2725 m. A Figura 5.21 mostra o comportamento da componente alternada de tensão nas amplitudes de deslocamento definidas na seção 4.5.2 para este nível de carregamento.

Assim como os gráficos  $\sigma_{P-S} \propto \sigma_{exp}$  expostos acima, as linhas de tendência da Figura 5.21 foram construídas tracejadas em verde para mostrar o nível de tensão atuante no fio central e mais alto do cabo condutor na seção transversal que contém o UPC e pontilhadas em vermelho para a tensão obtida através da média de deformação dos extensômetros.

A tensão sofrida pelo fio central apresentou resultados bastante satisfatórios em todas as amplitudes de deslocamento sob análise. Entretanto, pode-se perceber que neste ensaio a linha de tendência resultante da média de deformação dos extensômetros apresentou melhor aderência em relação aos valores teóricos. Logo, o ponto diametralmente oposto ao UPC provavelmente ficou localizado no vazio presente entre dois fios adjacentes no topo do cabo condutor.

Ao comparar os gráficos obtidos para os três valores do parâmetro H/w (1820, 2144 e 2725 m) é possível notar uma melhor adequação entre os resultados teóricos e experimentais a medida em que a carga de esticamento é elevada, sugerindo que a formulação de P-S



apresenta melhores resultados para maiores níveis do parâmetro H/w neste intervalo de amplitudes de deslocamento e para este tipo de cabo condutor.

Figura 5.21 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo ORCHID em função da amplitude de deslocamento (H/w=2725 m)

A Figura 5.22 mostra o erro percentual entre os valores obtidos para cada amplitude de deslocamento e a tensão teórica calculada pela formulação de P-S. Ao analisar a tensão obtida pela média da deformação dos extensômetros, nota-se que a discrepância entre os resultados manteve-se bastante reduzida em todos os pontos sob análise, especialmente no intervalo entre  $0,4 \leq Y_b \leq 1,00$  mm, onde o maior erro observado foi de 0,9% na amplitude de deslocamento igual a 0,60 mm. Sendo assim, o uso da formulação de P-S, apresentada pela Equação 18, se mostra adequado ao cálculo da tensão alternada atuante na zona de falha do cabo condutor.



Figura 5.22 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo ORCHID (H/w=2725 m).

Vale ressaltar que o erro percentual das três menores amplitudes de deslocamento foi acentuado durante a execução do procedimento experimental devido à dificuldades de

controle do ensaio, uma vez que o excitador eletromecânico apresentou dificuldades na manutenção da amplitude  $Y_b$  em um valor constante, o que acarretou em pequenas variações durante a vibração do cabo condutor.

A Figura 5.23 mostra a média entre o erro percentual obtido nas amplitudes de deslocamento de cada parâmetro H/w sob análise. Nota-se que, de fato, a formulação de P-S apresenta melhores resultados para o intervalo de amplitudes sob análise a medida em que a carga de esticamento é elevada.



Figura 5.23 - Erro médio percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo ORCHID em função do parâmetro H/w.

## 5.2.2 Cabo condutor: CAL 1055

A componente alternada de tensão atuante no cabo condutor CAL 1055 devido ao carregamento dinâmico está ilustrada na Figura 5.24 para o intervalo de amplitudes de deslocamento entre 0,1 e 1,0 mm pico a pico e com o parâmetro H/w igual a 1820 m.



Figura 5.24 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo CAL 1055 em função da amplitude de deslocamento (H/w=1820 m).

O gráfico da Figura 5.24 foi construído com os valores teóricos representados em azul e os resultados experimentais tracejados em verde e pontilhados em vermelho, respectivamente, para a tensão atuante no fio central dentre os três fios sob análise e para a tensão obtida através da média de deformação dos extensômetros.

Pode-se perceber uma melhor aderência dos resultados para pequenas amplitudes de deslocamento, com um aumento gradativo do erro a medida em que  $Y_b$  foi elevado. Nota-se ainda que a tensão sofrida pelo fio central apresentou melhores resultados do que os resultados obtidos por meio da média de deformação dos extensômetros, sugerindo que o ponto diametralmente oposto ao UPC esteve próximo do fio central no topo do cabo durante este ensaio.

A Figura 5.25 mostra o erro percentual obtido durante o ensaio dinâmico em cada amplitude de deslocamento. O gráfico de barras torna evidente a melhor adequação dos resultados obtidos para o fio central do cabo condutor, além de ilustrar o aumento gradativo do erro percentual.

Uma vez que o erro manteve-se abaixo de 20% em todo o intervalo de interesse do ensaio e para ambas as formas de obtenção do nível de tensão dinâmica atuante no cabo durante a vibração, pode-se dizer que o uso da formulação de Poffenberger-Swart (Equação 18) é adequada para o cálculo da componente alternada de tensão atuante na zona de falha deste tipo de condutor para o parâmetro H/w=1820 m e no intervalo de amplitude sob análise.



Figura 5.25 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo CAL 1055 (H/w=1820 m).

O segundo ensaio dinâmico realizado com o cabo condutor CAL 1055 foi para o parâmetro H/w igual a 2144 *m*. A Figura 5.26 mostra o valor da componente de tensão alternada obtida experimentalmente a partir da deformação do fio central, representada pela reta verde tracejada no gráfico, e por meio da média de deformação dos três extensômetros utilizados no ensaio, pontilhada em vermelho.

Assim como no ensaio anterior com o parâmetro H/w=1820 m, o ponto diametralmente oposto ao UPC provavelmente permaneceu próximo ao fio central selecionado durante a etapa de instrumentação, uma vez que a tensão sofrida pelo extensômetro do topo apresentou maior aproximação dos valores teóricos.



Figura 5.26 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo CAL 1055 em função da amplitude de deslocamento (H/w=2144 m).

Pode-se perceber no gráfico da Figura 5.26 que a formulação de P-S representou melhor o nível de tensão sofrido pelos fios da camada externa do condutor em pequenas amplitudes de deslocamento, apresentando maior divergência a medida em que  $Y_b$  foi elevado.

O erro percentual obtido em cada amplitude está representado na Figura 5.27, onde pode-se perceber uma relação bastante satisfatória entre o resultado experimental e o modelo teórico, uma vez que o maior erro obtido pelo extensômetro do topo manteve-se abaixo de 15% e a média entre os níveis de tensão atuante nos três fios analisados resultou numa discrepância abaixo de 20% durante todo o ensaio.



Figura 5.27 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo CAL 1055 (H/w=2144 m).

Um aumento gradativo da discrepância entre os resultados pode ser observado ao analisar apenas a tensão atuante no fio central do topo do cabo condutor, com exceção das amplitudes  $Y_b$  iguais a 0,10 e 0,20 mm. Este fato pode estar associado à dificuldade do controle do ensaio em amplitudes muito pequenas; ou seja, o excitador eletromecânico

encontrou dificuldades para manter  $Y_b$  constante durante todo o ensaio, apresentando uma pequena flutuação que, apesar de não exercer influência significativa sobre os resultados, aumentou o erro percentual nestes pontos do ensaio.

A última bateria de ensaios dinâmicos foi realizada para o cabo condutor CAL 1055 no nível de carregamento referente ao parâmetro H/w=2725 *m*. O gráfico da Figura 5.28 mostra o valor da componente de tensão alternada atuante na zona de falha do condutor em cada amplitude de deslocamento no intervalo entre  $0,10 \le Y_b \le 1,00 \text{ mm}$ .

Assim como nos ensaios realizados anteriormente, uma linha de tendência tracejada em verde, foi construída a partir dos valores de tensão obtidos para o fio mais alto da seção transversal que contém o último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão. Já a reta pontilhada em vermelho mostra a tensão obtida por meio da Lei de Hooke aplicada à média de deformação sofrida pelos três extensômetros utilizados durante o ensaio.



Figura 5.28 - Nível de tensão dinâmica atuante no cabo CAL 1055 em função da amplitude de deslocamento (H/w=2725 m).

O gráfico da Figura 5.28 mostra uma aproximação bastante satisfatória entre a tensão experimental obtida através dos extensômetros e os valores teóricos obtidos por meio da Equação 18. Deve-se destacar a alta aderência dos resultados ao analisar a tensão atuante no fio central no topo do cabo condutor, sugerindo uma grande aproximação entre o UPC e o ponto de colagem do extensômetro.

A partir dos gráficos  $\sigma_{P-S} \propto \sigma_{exp}$  obtidos para os três valores do parâmetro H/w analisados durante a pesquisa com o cabo CAL 1055 (Figura 5.24, Figura 5.26 e Figura 5.28), é possível perceber uma melhor adequação dos resultados a medida em que a carga de esticamento é elevada. Além disso, os gráficos mostram maior proximidade entre a tensão experimental e a correlação perfeita em menores amplitudes de deslocamento.

A Figura 5.29 foi construída para ilustrar o erro percentual obtido em cada amplitude analisada durante o ensaio, destacando a ótima proximidade obtida entre a tensão calculada pela formulação de Poffenberger-Swart e a tensão atuante no fio central do topo da zona de falha do condutor.



Figura 5.29 - Erro percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo CAL 1055 (H/w=2725 m).

Conforme mencionado anteriormente, a formulação de P-S apresenta melhor resultado a medida em que o parâmetro H/w é elevado. A fim de permitir uma melhor visualização, um gráfico contendo o erro percentual médio obtido durante os ensaios em função do parâmetro H/w é apresentado pela Figura 5.30.



Figura 5.30 - Erro médio percentual entre os valores teóricos e experimentais da componente alternada de tensão atuante no cabo CAL 1055 em função do parâmetro H/w.

## 6 CONCLUSÃO

#### 6.1 Conclusão dos Ensaios Estáticos e Dinâmicos

O presente trabalho foi realizado com o intuito de verificar o uso de duas formulações: a primeira quanto ao uso da Equação (27), utilizada para determinação do nível de tensão média atuante nos fios da camada externa do cabo condutor em termos do tipo de cabo analisado e do parâmetro H/w; e a segunda, quanto à utilização da formulação de Poffenberger-Swart como ferramenta para obtenção do nível de tensão alternada atuante na zona de falha de cabos condutores de energia.

Primeiramente foi realizada uma revisão teórica acerca dos conceitos fundamentais para o estudo de fadiga, seguido de uma apresentação dos conceitos básicos relacionados ao fenômeno de fadiga em cabos condutores de energia. Em seguida, foi apresentado o passo a passo da metodologia experimental utilizada para avaliação dos níveis de tensão média e alternada atuante nos cabos condutores em termos do tipo de cabo utilizado e do parâmetro H/w, permitindo a verificação dos modelos teóricos supracitados.

Para verificação da formulação que relaciona a tensão média ao parâmetro H/w foram realizados ensaios estáticos em quatro tipos de condutores: TERN, CAL 900, CAL 1055 e ORCHID. Já o uso da formulação de P-S para determinação do nível de tensão alternada atuante no condutor, foi analisada por meio de ensaios dinâmicos executados em dois tipos de condutores: ORCHID e CAL 1055. Deve-se ressaltar que ambos os ensaios foram realizados no laboratório de fadiga e integridade estrutural de cabos condutores de energia da Universidade de Brasília e os resultados foram obtidos para os valores do parâmetro H/w iguais a 1820, 2144 e 2725 m.

Com base nos resultados obtidos através da técnica de extensometria, utilizada tanto nos ensaios estáticos quanto nos ensaios dinâmicos, foi possível destacar as seguintes constatações:

- A utilização da formulação que relaciona o parâmetro H/w ao nível de tensão média atuante nos fios da camada externa do cabo condutor forneceu melhores resultados para o condutor ORCHID, cuja composição é apenas de fios de alumínio 1350, uma vez que o erro entre o modelo teórico e os dados experimentais permaneceu dentro da faixa de 1%;
- O cabo condutor TERN (CAA) apresentou boa concordância entre os resultados experimentais e o modelo teórico apresentado pela Equação (27), tendo em vista que mesmo com as simplificações adotadas para os módulos de elasticidade e entre as massas específicas do aço e do alumínio o erro observado manteve-se abaixo de 7%;
- Os dois cabos condutores tipo CAL também apresentaram bons resultados para os ensaios estáticos, mantendo o erro abaixo de 10% em todas as medições.
- Os ensaios dinâmicos com o cabo condutor ORCHID mostraram que a formulação de Poffenberger-Swart é adequada para o cálculo da componente de tensão alternada na

zona de falha do condutor. Foram obtidos ótimos resultados em todo o intervalo de amplitudes de deslocamento  $(Y_b)$  sob análise (entre 0,1 e 1,0 mm pico a pico). Além disso, nota-se uma melhora nos resultados a medida em que a carga de esticamento é elevada.

 Os ensaios dinâmicos realizados com o cabo CAL 1055 também mostraram uma adequação bastante satisfatória quanto ao uso da formulação de P-S, apresentando melhores resultados a medida em que o parâmetro H/w era elevado. Entretanto, para este cabo condutor foi notado uma melhor adequação dos resultados para pequenas amplitudes de deslocamento, com um aumento gradativo do erro percentual a medida em que Y<sub>b</sub> era elevado.

## 6.2 Propostas para Trabalhos Futuros

A contínua linha de pesquisa acerca do fenômeno de fadiga em cabos condutores de energia sugere a execução de novos ensaios, como por exemplo:

- Repetição dos ensaios dinâmicos no intervalo de 0,1 a 1,0 mm pico a pico para construção de gráficos  $\sigma_{P-S} x \sigma_{exp}$  que corroborem o resultado obtido neste relatório, ou ainda, a execução destes ensaios para outros tipos de cabos condutores.
- Execução de ensaios estáticos com controle da carga de esticamento em função da temperatura a fim de construir gráficos do tipo S<sub>m</sub> x T para os dois tipos de fios utilizados nesta pesquisa;

# **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ALUBAR. Condutores elétricos de alumínio. Brasil: 2010. 64 p.

ASTM STP E1823 (1996), **Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing Definitions of Terms Relating to Fatigue**, Annual Book of Standards, ASTM, Philadelphia, PA, 3.01: 740–49.

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 2009; 9: 136-151.

BARRETT, J. S.; MOTLIS, Y. Allowable tension levels for overhead-line conductors. IEE Proc. – Gener TransmDistrib, 2001; 148, 1: 54-59.

BELLORIO, M. B. **Fadiga para cabos condutores de energia e uso de metodologia para estimativa de sua vida remanescente.** 2009. 102p. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

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.

CIGRE TF 22.11.04, **Safe design tension with respect to aeolian vibrations:** single unprotected conductors, Electra No.186, Out. 1999.

CIGRE, WG B2.30, Engineering guidelines relating to fatigue endurance capability of conductor/clamp systems, October. 2008.

DOWLING N. E. **Mechanical Behavior of Materials**: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. 3 ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2007. 936 p.

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., et al. **Effect of high mean tensile stress on the fretting fatigue life of an Ibis steel reinforced aluminium conductor.** ELSEVIER: International Journal of Fatigue 2012; 42: 24–34.

FADEL, A. A., et al. Impact of high mean tensile stress on aluminum steel reinforced conductors fatigue life. In: COBEM, Natal, 2011. 1-10.

FRONTIN, S. O., et al. **Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas aplicadas a linhas de transmissão.** 1 ed. Brasília: Goya, 2010. 368 p.

FUCHS, R. D., et al. **Projetos mecânicos de linhas aéreas de transmissão.** 2 ed. Edgard Blucher Ltda, 1992.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 365 p.

HENRIQUES, A. M. D. **Bancada de ensaios mecânicos à fadiga de cabos condutores de energia.** 2006. 182p. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

HILLS, D. A.; Nowell, D. Mechanics of fretting fatigue: solid mechanis and its applications. Kluwer Academic Publishers, 1994.

HOFFMANN, K. An introduction to measurements using strain gages. Alsbach: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989. 273 p.

HORTÊNCIO, T. N. O. S. Ensaios de fadiga sob condições de FRETTING com o cabo CAA 397,5 MCM – IBIS. 2009. 118p. 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; New York: Jun, 2007.

IEEE. **Standardization of conductor vibration measurements.** IEEE PAS, 1966; vol. 85 No. 1, Trans. 31 TP65-156.

JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Fundamentos do projeto de componentes de máquinas**. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 500 p.

KALOMBO, R. B., et al. Comparative fatigue tests and analysis between an All Aluminium Alloy Conductor (AAAC) and an Aluminium Conductor Steel Reinforced (ACSR). ELSEVIER: Fatigue Design 2015; 1 - 10.

KALOMBO, R. B., et al. **Relação H/w: estudo crítico e planejamento de ensaios para avaliar a validade do parâmetro como critério de projeto contra fadiga eólica.** In: CITENEL, Bahia, 2015. 1-9.

KIESSLING, F., et al. Overhead power lines: planning, design, constrution. 2002.

KYOWA, STRAIN GAGES: A complete lineup of high performance strain gages and accessories, Catálogo 101E-U1, Kyowa Electronic Instruments Co., Ltda., Tokyo, Disponível em <a href="http://www.kyowa-ei.com">http://www.kyowa-ei.com</a>

LEE, Y., et al. Fatigue testing and analysis. Oxford: Elsevier, 2005. 417 p.

LIENHARD, J. H., **Synopsis of lift, drag and vortex frequency for rigid circular cylinders**. 1966. College of engineering research division bulletin 300, Techn extension service, Washington State University.

MARIN, J. Mechanical Behavior of engineering materials. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, 1962, p.224.

MOURÃO, M. Informe tecnológico. No. 24, CEMIG, 2004

NEXANS. Alumínio: Condutores Nus. Brasil: 2013. 60 p.

NORTON, R.L. **Projeto de máquinas**: uma abordagem integrada. 4 ed. Porto Alegre : Bookman, 2013. 1055 p.

PESTANA, M. S., et al. Análise do efeito da tensão média sobre a resistência à fadiga do cabo condutor CAL 1055 MCM. In: CONEM, Fortaleza, 2016. 1-10.

POFFENBERGER, J. C.; SWART, R. L. Differential displacement and dynamic conductor strain. IEEE Transactions Paper, 1965; PAS-84: 281-289.

PREFORMED LINE PRODUCTS. Aeolian vibration basics. Cleveland: Out, 2013.

SHIGLEY, J. E.; BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. Elementos de máquinas de Shigley. 8 ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. 1084 p.

VILELA, T. S. V. Avaliação comparativa das tensões flexurais de diversos condutores de energia. 2013. 133p. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

WIRSCHING, P. H.; SHEHATA, A. M., **Fatigue Under Wide Band Radom Stresses Using the Rain-Flow Method.** Journal of Engineering Materials and Technology, 1997, 205-211.

APÊNDICE

- APÊNDICE A -

A. CALIBRAÇÃO E BALANCEAMENTO DOS EXTENSÔMETROS

Os procedimentos descritos a seguir foram preparados no laboratório de fadiga e integridade estrutural de cabos condutores de energia da Universidade de Brasília, com o intuito de capacitar novos integrantes da equipe do laboratório quanto à calibração dos extensômetros e o balanceamento da ponte de Wheatstone.

*i)* Verificação de conexão entre hardware e software: Primeiramente a ligação via cabo Ethernet entre o aquisitor de dados (ADS 2000) e o computador é realizada. O software AqDados deve ser aberto e a opção de "configuração do driver de aquisição" deve ser selecionada.



Figura A.1 - Link de configuração do driver de aquisição.

Na janela de configuração, o barramento de expansão selecionado deve ser o ADS 2000. Já o driver de aquisição utilizado é o AC2122-VB: Controlador Ethernet para o ADS2000.

Configuração do Driver de Aquisição 🛛 🔀							
Driver Módulos de Expansão							
Driver de Aquisição:							
AC2122-VB: Controlador Ethernet para o ADS2000							
i) Informações 🛛 😨 Configurar D							
Barramento de Expansão:							
ADS2000							
Nome do Driver: AC2122							
Tipo de Driver: Driver embutido							
Versão do Driver: 2.03							
V DK X Cancelar ? Ajuda							

Figura A.2 - Configuração do Driver de Aquisição.

O endereço de IP deve ser modificado para comunicação entre os dispositivos. No laboratório o IP utilizado é 192.168.1.1 (o valor do último número do endereço IP pode variar em função do ADS utilizado). Um teste deve ser feito para garantir a conexão.

Configuração da AC2122				
Número de				
Unidade Master				
Força modo slave				
Endereço IP: Identilicação:	de Rede do Computador:	$\frown$		
0; 192.168.1.2 Unidade A	192.168.1.100	Teste		
Unidades Slaves			Informa	tion 🔀
1: 192.168.1.1 Unidade B	•	🖳 Teste		
2: 192.168.1.1 Unidade C	•	号 Teste	(i)	AC2122 respondeu.
3: 192.168.1.4 Unidade D	•	⊒_ Teste	Y	
🗸 OK 🛛 🗶 Cancelar				OK
a)				b)

Figura A.3 Comunicação entre Hardware e Software: a) Endereço de IP; b) Confirmação.

De volta a janela de configuração, o módulo de expansão deve ser verificado. As caixas correspondentes à "Módulo 0" e "Módulo 1" devem estar selecionadas e o modelo do ADS deve ser especificado junto ao seu número de entradas conforme ilustrado abaixo:

Configuração do Driver de Aquisição 🛛 🔀							
Driver Módulos de Expansão							
Módulo	Habilita	Modelo	Endereço	Nota			
0	Módulo 0	Al-2161	16				
»» 1	Módulo 1	Al-2164 💌	32				
2	🗌 Módulo 2		48				
3	🗌 Módulo 3		64				
Aluda de Médida de Duranção							
Ajuda do Modulo de Expansao							
🗸 OK 🗙 Cancelar 🍞 Ajuda							

Figura A.4 - Caracterização do modelo do Aquisitor de dados utilizado.
Vale destacar que a aba de endereço refere-se à quantidade de entradas que o aquisitor de dados possui. Caso as opções selecionadas não estejam de acordo com o ADS utilizado, uma janela de erro irá informar ao usuário a divergência entre essas informações no momento de calibração dos extensômetros conforme ilustrado a seguir:

Configu	ração das	Entradas Analógicas		×
∐ <u>A</u> ferir	<u>E</u> ditar Mo	ódulo 🛛 🖁 🖁 🕒 📭 🖦 🗊 🕮 🕮 🔛 🖾		
Canal	CN Mod	Nome do Sinal Unidade Tipo Faixa do A/D Lim. Inferior Li	m. Superiar	Descriçâ
<b>▼</b> 0	0	AI-2161 X	-6218982	
1	1		-3843,741	
🗆 2	2		-3835,384	
3	3		-3839,685	
<mark>□ 4</mark>	4		-3830,831	
<u> </u>	5		10490,72	
<u>□</u> 6	6	10)	2897,138	
7	7	🚗 Era esperado um módulo AI-2161 mas foi encontrado um AI-2164.	990,0151	
<u>□</u> 8	8	Verifique o modelo e o endereço do módulo na Configuração de Hardware.	-3824,83	
<u> </u>	9		3822,534	
10	10		-3818,69	
11	11		3814,348	
12	12		-3822,005	
✓ 13	13	~	-3836,868	
✓ 14	14	<	-3827,494	
<u> </u>	15		3855,909	
		Fechar		
				>
1) Inf	ormações	Realizado Vançado Vancelar	? A	juda
Módulo: O	AI-2161 -	- Unidade A Canal: 4		

Figura A.5 - Erro frequente na caracterização do modelo do ADS.

*ii)* Configuração manual do aquisitor de dados: De volta à página inicial do programa, na aba de ensaios deve-se selecionar a opção entradas analógicas. O primeiro passo é abrir o menu informações para verificar se a configuração manual do ADS está de acordo com o tipo de dispositivo utilizado.

Configu	ração das	Entradas Analógic	as					×
∐ <u>A</u> ferir	<u>E</u> ditar Mo	ódulo 📗 💆	8   🖡	<b>l</b>		ax +b 3.2		
Canal	CN Mod	Nome do Sinal	Unidade	Tipo	Faixa do A/D	Lim. Inferior	Lim. Superior	Descriçã
<b>▼</b> 0	0	Channel O	V	Linear	±10 V	6757146	-6218982	
<u>□</u> 1	1	Ext 1	Strain	Linear	±10 V	3839,52	-3843,741	
□ 2	2	Ext 2	Strain	Linear	±10 V	3835,15	-3835,384	
<u>Г</u> 3	3	Ext 3	Strain	Linear	±10 V	3827,752	-3839,685	
<b>□</b> 4	4	Ext 4	Strain	Linear	±10 V	3836,915	-3830,831	
5	5	Ext Topo	Strain	Linear	±10 V	10490,72	-10490,72	
<b>□</b> 6	6	Ext Topo Dir	Strain	Linear	±10 V	2887,605	-2897,138	
□ 7	7	Ext Engast Long	Strain	Linear	±10 V	0	990,0151	
<b>□</b> 8	8	Ext Topo Esq	Strain	Linear	±10 V	3826,231	-3824,83	
<b>□</b> 9	9	Ext Topo	Strain	Linear	±10 V	3821,134	-3822,534	
l 10	10	Ext Topo Dir	Strain	Linear	±10 V	3817,292	-3818,69	
11	11	Ext 11	Strain	Linear	±10 V	3838,872	-3814,348	
🗌 12	12	Ext 12	Strain	Linear	±10 V	3825,973	-3822,005	
🔽 🔝	13	Ext Giamp - Esq	Strain	Linear	±10 V	3833,357	-3836,868	
🔽 14	14	Ext Topo Dir	Strain	Linear	±10 V	3828,195	-3827,494	
🗆 15	15	Ext 150 Inf	Strain	Linear	±10 V	-3862,269	3855,909	
<								>
i) Inf	ormações	🖏 Avançado			🗸 ОК	X Cancel	ar 🦪 💈 🤌	.juda
Módulo: 0	AI-2161 -	- Unidade A 👘 Can	al: 13					

Figura A.6 - Link de acesso ao menu de informações.

Os extensômetros utilizados no laboratório de fadiga e integridade estrutural de cabos condutores da Universidade de Brasília possuem 350  $\Omega$  de resistência e utilizam a configuração 1/4 de ponte. A configuração manual deve ser efetuada no aquisitor de dados.



Figura A.7 - Configuração do dispositivo utilizado.



Figura A.8 - Configuração manual para leitura dos extensômetros.

Feitas as configurações necessárias à comunicação correta entre o aquisitor de dados e o computador, deve-se agora realizar a calibração dos extensômetros e o balanceamento da ponte de Wheatstone.

*iii) Calibração e balanceamento:* Ao garantir a comunicação correta para leitura dos extensômetros, conforme descritor pelos itens acima, a calibração dos extensômetros e o balanceamento da ponte de Wheatstone pode ser efetuada.

De volta à janela de configuração das entradas analógicas, os canais nos quais os extensômetros estão conectados devem ser selecionadas junto ao canal 0, utilizado para referência. É comum a nomeação do sinal para facilitar a visualização do dispositivo que está sendo monitorado, junto a unidade de medida e a faixa de leitura.

Configu	ração das	Entradas Analógic	as					
	<u>E</u> ditar Mo	ódulo 🛛 🛛	8   🖡	<b>L</b> 🕅		ax +b 3.2		
Canal	CN Mod	Nome do Sinal	Unidade	Tipo	Faixa do A/D	_im. Inferior	Lim. Superior	Descriçã
<b>V</b> 0	0	Channel 0	V	Linear	±10 V	6757146	-6218982	
□ 1	1	Ext 1	Strain	Linear	±10 V	3839,52	-3843,741	
<u> </u>	2	Ext 2	Strain	Linear	±10 V	3835,15	-3835,384	
<b>□</b> 3	3	Ext 3	Strain	Linear	±10 V	3827,752	-3839,685	
<u> </u>	4	Ext 4	Strain	Linear	±10 V	3836,915	-3830,831	
5	5	Ext Topo	Strain	Linear	±10 V	10490,72	-10490,72	
<b>□</b> 6	6	Ext Topo Dir	Strain	Linear	±10 V	2887,605	-2897,138	
<b>□</b> 7	7	Ext Engast Long	Strain	Linear	±10 V	0	990,0151	
<b>□</b> 8	8	Ext Topo Esq	Strain	Linear	±10 V	3826,231	-3824,83	
F 9	9	Ext Topo	Strain	Linear	±10 V	3821,134	-3822,534	
10	10	Ext Topo Dir	Strain	Linear	±10 V	3817,292	-3818,69	
11	11	Ext 11	Strain	Linear	±10 V	3838,872	-3814,348	
12	12	Ext 12	Strain	Linear	±10 V	3825,973	-3822,005	
✓ 13	13	Ext Gramp - Esq	Strain	Linear	±10 V	3833,357	-3836,868	
🔽 14	14	Ext Topo Dir	Strain	Linear	±10 V	3828,195	-3827,494	
l 15	15	Ext 150 Inf	Strain	Linear	±10 V	-3862,269	3855,909	
<								>
1) Inf	ormações	🖏 Avançado			🗸 ОК	X Cancel	ar 🦻 💈 🤌	juda
Módulo: 0	AI-2161 -	- Unidade A Can	al: 13					

Figura A.9 - Seleção dos canais utilizados.

Na janela de configurações avançadas:

- Deve-se marcar as caixas dos sinais que estão sendo utilizados e o canal 0;
- Escolher o tipo de entrada de leitura, no caso dos extensômetros utilizados: 1/4 de ponte;
- Selecionar o ganho do sinal de acordo com o valor sugerido no menu de informações para o dispositivo utilizado;
- Escolher um filtro de passas baixas. Nessa pesquisa foi utilizado 30 Hz;
- Selecionar a excitação do dispositivo, também de acordo com o valor fornecido pelo menu de informações;
- Selecionar o RCAL que será utilizado e o respectivo valor do Shunt. O RCAL utilizado depende da faixa de medição que o extensômetro irá ler. No laboratório de cabos existe uma tabela próximo ao aquisitor de dados com os valores adequados a estas variáveis. O ShuntEng pode ser calculado pela equação:

$$ShuntEng = \left[ -\frac{1}{k} \left( \frac{R_G}{R_{cal} + R_G} \right) \right] \cdot 10^6 \tag{41}$$

Onde:

R<sub>G</sub>: Resistência do extensômetro;

k: Fator do tipo de extensômetro;

R<sub>cal</sub>: Resistência da faixa de leitura.

🚟 Cont	figuração	das Entradas Ana	lógicas do	Módulo Al-	2164											1 ×
	🖡 🛱	1 1 1	), i 📑 i	👌 💵 Disp	blay 🕂 Scope											
Gant	io ×1000	779		× 100	Offset: 2047	,										
]	Balanç	o <mark>-282</mark>	ļ	🗌 🗐 Junta	Fria CAL: 0V		▼ 500 Hz ▼									
Canal	CN Mod	Nome do Sinal	Unidade	Faixa do A/D	Tipo de Entrada	Ganho	Filtro Passa Baixas	Excitação	Balanço	Repouso	Repouso Eng	RCal	Shunt Cal	Shunt Eng	Lim. Inferior	Lim. Supe
0	<b>□</b> 0	Channel 0	V	±10 V	Sinal CALIB	×1	3 Hz	E = 0 V	0,0000 V	0,0000 \	<mark>/</mark> (	RCExt na Exc	1,0000 V	330	6757146	-6218
1	□ 1	Ext 1	Strain	±10 V	1/4 ponte 350				0,0000 V	0,0000 \	/ (		1,0000 V	990	3839,52	-3843,
2	□ 2	Ext 2	Strain	±10 V	1/4 ponte 350				0,0000 V	0,0000 \	/ (		1,0000 V	990	3835,1499	-3835,
3	<b>□</b> 3	Ext 3	Strain	±10 V	1/4 ponte 350				0,0000 V	0,0000 \	<b>/</b> (		1,0000 V	990	3827,752	-3839,6
4	<b>□</b> 4	Ext 4	Strain	±10 V	1/4 ponte 350				0,0000 V	0,0000 \	/ (		1,0000 V	990	3836,915	-3830,8
5	5	Ext Topo	Strain	±10 V	174 ponte 350				0,0000 V	0,0000 \	/ 0		1,0000 V	990	10490,72	-10490
6	F 6	Ext Topo Dir	Strain	±10 V	1/4 ponte 350				0,0000 V	0,0000 \	/ (		1,0000 V	990	2887,605	-2897,1
7	□ 7	Ext Engast Long	Strain	±10 V	174 ponte 350				0,0000 V	0,0000 \	/ 0		1,0000 V	990	0	990,01
8	□ 8	Ext Topo Esq	Strain	±10 V	174 ponte 350				0,0000 V	0,0000 \	/ 0		1,0000 V	990	3826,231	-3824,8
9	F 9	Ext Topo	Strain	±10 V	174 ponte 350				0,0000 V	0,0000 \	<b>/</b> (		1,0000 V	990	3821,134	-3822,5
10	□ 10	Ext Topo Dir	Strain	±10 V	174 ponte 350				0,0000 V	0,0000 \	/ (		1,0000 V	990	3817,292	-3818,6
11	□ 11	Ext 11	Strain	±10 V	174 ponte 350				0,0000 V	0,0000 \	/ 0		1,0000 V	990	3838,8721	-3814,3
12	☐ 12	Ext 12	Strain	±10 V	174 ponte 350				0,0000 V	0,0000 \	<mark>/</mark> (		1,0000 V	990	3825,9729	-3822,0
13	✓ 13	Ext Gramp - Esq	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	x 1000	30 Hz	E = 5 V	0,0070 V	0,0073 \	<mark>/</mark> (	RCAL1 na Exc	7,5620 V	-2897,05	3837,6113	-3831,9
>> 14	✓ 14	Ext Topo Dir	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	x 1000	30 Hz	E = 5 V	-0,0073 V	-0,0089 \	/ C	RCAL1 na Exc	7,5626 V	-2897,05	3822,915	-3829,6
15	□ 15	Ext 150 Inf	Strain	±10 V	174 ponte 350				0,0000 V	0,0000 \	/ 0		1,0000 V	990	-3862,269	3855,9

Figura A.10 - Dados de entrada para leitura dos extensômetros.

Uma vez que os dados do software estão todos de acordo, faz-se então o balanceamento dos canais habilitados seguido da calibração dos extensômetros.

📟 Configuração das	Entradas Analógicas do Módulo Al-2164
888	👔 🔉 🧏 📲 🚥 Display 🗆 Scope
Ganho x 1000 💌	779 Executa o balanceamento dos canais habilitados
Balanço	-283 Junta Fria CAL: 0 V 💌 500 Hz 💌

a)

Configuração das Entradas Analógicas do Módulo Al-2164	
월 🗄 📴 🛱 👔 👔 👔 🏹 🚴 📑 🌌 № 🖬 🚥 Display 🛛 🗠 Scope	
Ganho x 1000 779 Executa calibração por shunt cal dos canais habilitados	
Balanço -282	-

b)

Figura A.11 - a) Balanceamento da ponte de Wheatstone; b) Calibração dos extensômetros.

Ao final da calibração dos extensômetros, uma janela de resposta informa ao usuário quanto à ocorrência de possíveis erros. Caso não exista nenhuma advertência destacada na parte direita da janela, a extensometria foi realizada com sucesso e o ensaio pode ser iniciado.

AI-2164		×
AI-2164: CALIBRAÇÃO COM SHUNT CAL		^
4/3/2015 14:07:15 Número de Série: 64094		
>> Canal 13 Leitura em repouso: 0,0073 V Repouso Eng.: 0 Strain Leitura com shunt cal: 7,5620 V Desbalanço devido ao shunt cal: 7,5546 V Shunt Eng.: -2897,1 Strain Limites: 3837,6 a -3832 Strain	OK !	
>> Canal 14 Leitura em repouso: -0,0089 V Repouso Eng.: 0 Strain Leitura com shunt cal: 7,5626 V Desbalanço devido ao shunt cal: 7,5714 V		~
<		>
🚽 Fechar		

Figura A.12 - Relatório de leitura dos extensômetros.

- APÊNDICE B -

**B. MANUSEIO DO SOFTWARE DE CONTROLE** 

Os procedimentos descritos a seguir foram preparados no laboratório de fadiga e integridade estrutural de cabos condutores de energia da Universidade de Brasília, com o intuito de capacitar novos integrantes da equipe do laboratório quanto ao manuseio do software de controle do excitador eletromecânico.

1. Abrir o software "Shaker control"

Shaker Control = [Start-up Page]		
Project View Help		-14
) 6 ?		
		Customine and start up and
		Customize my stan-up page
Lande Horjack Meas Encence in cut & rojack und behand Sating Franke	Child Perchanters 2-540/p Option Fanacitania Chinas Nata Franctica Giad Dalaci, Banna Calabia, Banna Manarak, Calabia Children, Calabia Chinas Mukama Mari Chana Mukama Mari Chana Mukama Mari Chana Du Jama Mari	Cache Cache Tres Stery Ward Cache Single Cart Here Pillow York Dison Stans Bar Pillow Cache Part Pillow Cache Part Pill
		📢 Maksarabytas Anto-Malicana
		Scan Complete - Malware Detected
	W.	Malwarebytes Anti-Malware has detected one or more threats. Old: here to view results.

Figura B.1 - Janela inicial do software de controle.

- 2. Na opção "Global Parameters Setup":
- > Definir as unidades de medida das variáveis na janela "Engineering Units".

Engineering Units	×
Displacement:	mm
Velocity:	mm/s 💌
Acceleration:	gn 💌
Force:	Newton
Mass:	kg 💌
Pressure:	Bar
Voltage:	V
Level:	%
Time	Seconds 💌
Log Sweep:	Oct/Min 💌
Sine Displacement:	pk-pk 💌
Sine Display Duration:	Time 💌
User defined 1:	
User defined2:	
User defined3:	
ОК	Cancel

Figura B.2 - Definição das unidades de medida.

Definir os parâmetros do Shaker utilizado no laboratório na janela "Global Shaker Parameters". Para a correta execução deste procedimento, deve-se consultar a tabela de parâmetros do modelo do Shaker. Caso essa tabela não esteja disponível no laboratório, é possível o acesso online no site do fabricante.

	Global Shaker Paramatery		-
	Stake name: Fandon / L7H Settings Fonce EMS (Sentor) Acceleration EMS (gr)	2500         Hex. Pusitive Diplacement (rm)           15.8         Hex. Hightve Diplacement (rm)	8.362
	Sine Settings Parce Peak (Venton) Acceleration Peak (gn)	4600         Max. Positive Deplacement (nm)           94         Max. Negative Deplacement (nm)	12.7
	Shock Settings Force Reak (Newton) Acceleration Peak (gr)	13000         Max. Positive Deplacement (nm)           125-4         Max. Negative Deplacement (nm)	8.763
	General Settings Max. Drive Vallage (peak) Max. Velocity (mm/k) Shaker Orientation	20         Min. Drive Prequency (Inc)           810.001         Min. Drive Prequency           Tentical         Tentical	3000
	Amature Develor(em) 174,501 Heer(bg) 5,2099		
	Assume Noisy Measurement? Import from parameter file	Import from shaker modelCK	Canor
a)		b)	

Figura B.3 - a) Tabela de parâmetros do Shaker; b) Janela "Global Shaker Parameters".

- 3. Abrir um novo projeto e configurar os parâmetros de acordo com a ordem dos ícones presentes na parte esquerda da tela:
- Verificar se os parâmetros definidos anteriormente estão de acordo com o Shaker utilizado para o ensaio clicando no primeiro ícone: "Shaker".

Shaker Parameters		x
Shaker Model: From Loaded F	Project 🔽	
Shaker Settings		
Force Peak (Newton)	4600	
Acceleration Peak (gn)	94	
Max. Velocity (m/s)	0.81	
Max. Positive Displacement (mm)	12.7	
Max. Negative Displacement (mm)	12.7	
Shaker Orientation	Vertical	
Max. Drive Voltage (Volts)	2.5	
Min. Drive Frequency (Hz)	5	
Max. Drive Frequency (Hz)	3000	
Assume Noisy Measurement?	Г	
Use global settings		
You can edit your shaker parameters	Shaker Library	
NOTE: The default values in the Shaker Li reference only. Actual values will depend	brary are meant a on your test set.	is a ip.
ОК	Cancel	

Figura B.4 - Parâmetros dos Shaker.

> Configurar as leituras de entradas analógicas na janela "Channel".

<b>S</b> Channel	≫ ooo Type		📰 Analysi	is	∛ MaxVo	olts	mv/EU	<u>a∏a</u> Weighting	Coupling		Quantity	y	.D.	G Location	Sensi Adjustm
▶ 1	CONTROL	•	FILTER	•	10.0	•	100.9000	1.0000	CCLD	•	Acce.	•	Acel. cable	Shaker	0.0000
<mark>⊳</mark> 2	RESPONS	•	FILTER	•	10.0	•	101.0999	1.0000	CCLD	•	Acce.	•	Acel Anti-nó	Grampo	0.0000
▶ 3	RESPONS	•	FILTER	•	1.0	•	0.2430	1.0000	CCLD	•	Acce.	•	Cél. Carga	Shaker	0.0000
▶ 4	RESPONS	•	FILTER	•	10.0	•	99.9000	1.0000	CCLD	•	Acce.	•	Acel. base	Shaker	0.0000
<mark>⊳</mark> 5	DISABLE	-	FILTER	•	10.0	•	100.0000	1.0000	AC	-	Acce.	•			0.0000
▶ 6	DISABLE	•	FILTER	•	10.0	•	100.0000	1.0000	AC	•	Acce.	•			0.0000
▶ 7	DISABLE	•	FILTER	•	10.0	•	100.0000	1.0000	AC	•	Acce.	•			0.0000
▶ 8	DISABLE	•	FILTER	•	10.0	•	100.0000	1.0000	AC	•	Acce.	•			0.0000
►, Inputs	/		•	(											•

Figura B.5 - Janela de canais "Channel".

A função dos ícones encontrados nessa janela será descrita a seguir:

Type Seleciona os sinais que controlam e monitoram o ensaio.

Os diferentes tipos de acelerômetros e células de carga possuem diferentes calibrações, sendo necessário informar ao software o valor de cada modelo.

- mv/EU Para tal, deve-se procurar a caixa do receptor utilizado por meio do Serial Number. Para os acelerômetros em particular, existe uma tabela na sala de controle com essa informação.
  - I.D. O nome escolhido para cada receptor será o título do gráfico gerado na janela principal durante a execução do ensaio.



Figura B.6 - Serial Number de um acelerômetro.

> Configurar os controles do ensaio na janela "Control".

Sine:Control Parameters	×
Test Initial Ramp-up	
Lines Control Strategy     1024   Single Channel	Drive Limit (Volts Peak): Abort Latency (Sec): 2.5 2
Sweep Type     Filter Type       Image: C Linear     Image: C Proportional       Image: C Logarithmic Rate (Hz/Sec):     Fixed       Image: D Linear     Image: C Proportional       Image: C Logarithmic Rate (Hz/Sec):     Fixed       Image: D Linear     Image: C Proportional       Image: D Linear     Image: C Proportional <td>Compression Rate       Image: Adaptive       Imag</td>	Compression Rate       Image: Adaptive       Imag
Average C Logarithmic Average C Linear Average Average Number	Advanced
	OK Cancelar

Figura B.7 - Janela de controle do Shaker.

Configurar o deslocamento do acelerômetro de controle e a frequência em que o ensaio será rodado na janela "Profile".



Figura B.8 - Definição do ensaio: "Profile".

No ícone "Schedule" o tipo de ensaio é selecionado. Para realizar uma varredura, seleciona-se a opção "Sweep", já o ensaio dinâmico é realizado por meio da opção "Dwell". Nesta janela são estabelecidos a duração dos ensaios e as frequências de vibração.



Figura B.9 - Seleção do tipo de ensaio: a) Varredura; b) Ensaio dinâmico.

"Transmiss": Neste ícone, escolhe-se os sinais que serão combinados para análise posterior ao ensaio. As opções "Response" e "Excitation" referem-se à uma função onde os sinais devem ser escolhidos de acordo com a saída proposta no ensaio.

Transmissibility signals							
Press the Add button to create a new transmissibility signal. For example, to compute the Transmissibility between channel 1 as response and channel 2 as excitation, select INPUT1 in the Response combo box and INPUT2 in the Excitation box.							
Then these signals are available to display in this project. To display them, create a new window, click on Pane-Contents, and select them from the signal candidates list.							
Signal List:	Transmissibility signals definition						
Trans1(f)	Transmissibility Amplitude Only						
	C Complex Transmissibility & Coherence						
	Transmissibility Signal Name: Trans1(f)						
	Response: INPUT 3						
Add Delete	Excitation: INPUT 4						
Resonance Freq. Search Criteria	OK Cancel						

Figura B.10 - Janela "Transmissibility".

Por fim, na janela inicial, ao clicar com o botão direito no gráfico, a opção "contents" permite a escolha dos sinais que serão visualizados durante o ensaio.

Contents				<b>—</b> 2	٢
Select Signals to Display General Signal Candidates	Coordinates   In	put Status   Selected Sig input2(f)	nals		,
Y Axis Format LogMag X axis type © Linear © Log	<b>•</b>	 Master signal  input2(f)	:	V	
Dimension: Acceleration	•				
		ок	Cancelar		

Figura B.11 - Definição dos sinais que serão visualizados durante o ensaio.