



PROJETO DE GRADUAÇÃO

**ESTUDO COMPARATIVO DE VIDA EM FADIGA DE
CABOS CONDUTORES UTILIZANDO
O CRITÉRIO H/w**

Por,
PEDRO HENRIQUE CORREA ROCHA

Brasília, 20 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

**ESTUDO COMPARATIVO DE VIDA EM FADIGA DE
CABOS CONDUTORES UTILIZANDO O CRITÉRIO
H/w**

POR,

PEDRO HENRIQUE CORREA ROCHA

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

Banca Examinadora

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

Prof. Edgar Nobuo Mamiya, UnB/ ENM

Prof. Éder Lima de Albuquerque, UnB/ ENM

Brasília, 20 de dezembro de 2016

Dedicatória

*Dedico este trabalho aos meus pais,
que com muito apoio e carinho, não mediram
esforços pra que eu chegasse até esta etapa da
vida.*

Pedro Henrique Correa Rocha

Agradecimentos

Começo agradecendo aos meus pais, Elaine, Baretta e Edilson por todo apoio e carinho que me deram durante a minha jornada de vida. Agradeço pelas palavras de motivação e orientação que ouvi, não fosse tamanho empenho de cada um de vocês, nada disso seria possível. Espero um dia me tornar um pai tão maravilhoso quanto vocês sempre foram para mim.

Quero expressar toda a minha admiração e carinho pelos meus irmãos Fernanda, Luis Guylherme e João Marcos. Apesar de mais novos, muito me ensinaram sobre a vida e muito me divertiram também com todos os bons momentos que passamos juntos. Agradeço à Vitória Régia por toda as boas palavras de incentivo, compreensão, apoio e carinho. Agradeço ao meu amigo Pedro Vinícius, nossas conversas de horas e horas nos perguntando sobre o sentido da vida nos guiam para um caminho de plenitude, obrigado por essas ocasiões tão enriquecedoras.

Quero agradecer a todo o incentivo que os meus queridos amigos do Lab/Cabos UnB me deram, Remy, Miélle, Renato, Thiago, Guilherme, Silmar, Gustavo, Cláudio, Arthur e demais. Sem vocês eu não poderia seguir o caminho de descobertas e entendimentos sobre o mundo que me foi revelado na ciência. Obrigado pela paciência e perseverança de vocês ao lidarem com todos os desafios que nos foram dados e também pelos momentos de alegrias e sorrisos que compartilhamos durante nossos dias no laboratório e fora dele. Apesar de separados fisicamente, ainda somos uma só equipe! A melhor que já conheci! Sentirei falta de vocês.

Agradeço ao Professor Alex e aos demais do GFFM UnB pelas oportunidades que me foram dadas ao longo do nosso tempo de convivência, foi muito enriquecedor iniciar minha carreira ao lado destes grandes profissionais.

RESUMO

No presente trabalho é feito um estudo experimental comparativo da vida em fadiga dos cabos condutores CAL 900 (alumínio liga, Al 6201-T81), Orchid (alumínio puro, Al 1350-H19) e Tern (alumínio puro, Al 1350-H19, com alma de aço). O critério de projeto H/w é empregado no intuito de analisar a sua validade como parâmetro de previsão da vida em fadiga para os diferentes condutores. A avaliação adota H/w igual a 2144 metros para os ensaios de fadiga. Em cada um dos cabos, três amplitudes de tensão são empregadas entre valores de 23,7 a 31,35 MPa. Afim de se avaliar qualitativamente a dispersão dos dados, o ensaio é repetido três vezes para cada composição de tipo de cabo e amplitude de tensão, totalizando 27 ensaios. A expressão empírica-analítica de Poffenberger-Swart (P-S) é empregada para ratificar a amplitude de tensão empregada em cada ensaio. A partir dos resultados é possível observar um comportamento de vida diferenciado entre os três tipos de condutores. O condutor Tern possui a maior durabilidade em termos de vida em fadiga, enquanto que o condutor Orchid apresenta durabilidade intermediária e o condutor CAL 900 apresenta a menor vida para as condições de ensaio empregadas.

ABSTRACT

This work presents an experimental study which compares the fatigue behavior of three different types of overhead conductors: CAL 900 (aluminum ally, Al 6201-T81), Orchid (aluminium, Al 1350-H19) and Tern (aluminium conductor steel reinforced). For this end, focus has been done on the H/w design parameter in order to evaluate its application. For the three conductors types the same value of H/w is employed: 2144 m for the fatigue test. On each overhead conductor type, three amplitude stresses will be employed, values varying between 23,7 and 31,35 MPa. To have an idea on fatigue data dispersion, three fatigue tests were run for each combination of cable type and stress amplitude, 27 fatigue tests on total. The experimental data from the bending stress is ratified using the Poffenberger-Swart (P-S) formula. From the obtained results it is possible to affirm a clear difference on fatigue life behavior between the different types of conductors. The Tern conductor arose the greater fatigue life behavior while the Orchid presented the intermediate fatigue life and CAL 900 results has the lowest fatigue life duration.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivo	2
2	FADIGA (UMA REVISÃO)	3
2.1	Conceitos Básicos da Fadiga	3
2.2	Aspectos Macro e Microscópicos da Fadiga	5
2.2.1	Fratura dútil	5
2.2.2	Fratura frágil	6
2.3	Principais Métodos da Vida em Fadiga	7
2.4	Método da Vida sob Tensão	7
2.5	Tensões Flutuantes	9
2.6	Critérios de Falha sob Tensões Flutuantes	10
2.7	Fadiga por Fretting	11
2.8	Análise de Falhas por Fadiga	12
2.8.1	Análise de falha microscópica	15
3	FADIGA EM CABOS CONDUTORES	16
3.1	Excitação Eólica	16
3.2	Mecanismo de Falha por Fadiga em Cabos Condutores	19
3.3	Cálculo da Tensão Dinâmica em Condutores	21
3.4	Equação de Poffenberger-Swart (P-S)	21
3.5	Metodologias de Estimativa de Vida de Fadiga para Linhas de Transmissão	23
3.6	Medida da Intensidade de Vibração	23
3.7	Limites de Resistência à Fadiga de Cabos Condutores	25
3.7.1	Abordagem do Dano Acumulativo (Cumulative Damage Approach)	25
3.7.2	Abordagem do Limite de Resistência (Endurance Limit Approach)	25
3.7.3	A Curva Limite de Segurança da Cigré	25
3.8	Critério de Projeto H/w	27
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1	Descrição da Bancada de Ensaios de Cabos Condutores	31
4.2	Materiais	33
4.2.1	Cabos Condutores	33
4.2.2	Grampo de Suspensão	36
4.2.3	Grampo de Ancoragem	37
4.2.4	Extensômetro	37
4.3	Programa Experimental para Levantamento das Curvas De Wöhler	38
4.3.1	Metodologia	38
4.3.2	Definição de Parâmetros Controlados no Ensaio	39
4.4	Procedimento Experimental	41
4.4.1	Montagem do Corpo de Prova	41
4.4.2	Instrumentação do Ensaio	44
4.5	Programa Experimental para Avaliação da Fórmula de Poffenberger-Swart	48
4.5.1	Metodologia	48

4.6	Armazenamento de Dados	49
4.7	Retirada do Cabo e Coleta de Amostra.....	50
5	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	53
5.1	Resultados das curvas S-N.....	53
5.1.1	Razão de durabilidade dos cabos	56
5.2	Evolução das rupturas.....	58
5.3	Distâncias das rupturas	59
5.3.1	Posição das Falhas	60
5.4	Tipos de superfícies de falha.....	61
5.5	Análise microscópica.....	62
6	CONCLUSÕES	66
6.1	Proposta para trabalhos futuros	67
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
	ANEXOS.....	71
	ANEXO I: Operação do software de controle	1
	ANEXO II: Balanceamento e Calibração dos Extensômetros.....	7

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Maiores países geradores de energia elétrica do mundo (EPE,2015).	1
Figura 2.1 - Nucleação de trincas em componentes sujeitos a esforços cíclicos. (Garcia et al., 2012).....	3
Figura 2.2 - Variadas geometrias de falha em fios de condutores (modificado: Fadel, 2010).	4
Figura 2.3 - Representação esquemática da fratura dútil: (a) crescimento de vazios, (b e c) coalescência dos vazios, formação de trinca e deformação e (d) fratura do tipo taça-cone.	6
Figura 2.4 - (a) Superfície de fratura frágil, (b) representação esquemática de propagação de trinca transgranular e (c) representação esquemática de propagação de trinca intergranular. (ASM Handbook Committee, 2002)	6
Figura 2.5 - Geometria do corpo de prova da máquina de viga rotativa de R.R Moore (Shigley et al., 2005).	8
Figura 2.6 - Máquina de flexão rotativa de R. R. Moore (modificado: Juvinall & Marshek, 2011).....	8
Figura 2.7 - Diagrama S-N de ensaios de fadiga axial completamente reversa (modificado: Shigley et al., 2005).	9
Figura 2.8 - Algumas relações de tensão-tempo: a - tensão flutuante com ondulação de alta frequência, b e c - tensão flutuante não-senoidal, d - tensão flutuante senoidal, e - tensão repetida, f - tensão senoidal completamente inversa (Shigley et al., 2005).	10
Figura 2.9 - Diagrama de fadiga mostrando diversos critérios de falha. Para cada critério, pontos acima da respectiva curva indicam falha do componente (modificado: Shigley et al., 2005).....	10
Figura 2.10- Esquema de configuração do problema de contato entre cilindros (Nowell, 1988).	12
Figura 2.11 - falha por fadiga de um componente mecânico, as setas indicam três características macroscópicas típicas deste tipo de falha: iniciação da trinca (seta azul), marcas de praia (seta vermelha) e fratura final (seta amarela). (Stephens et al., 2000)	12
Figura 2.12 - Superfícies típicas de falha para corpos de prova cilíndricos sujeitos a carregamentos cíclicos sob: flexão unidirecional ($R = 0$) (1), flexão reversa ($R = -1$) (2) e torção (3). (ASM Handbook Committee, 2002) ...	13
Figura 2.13 - Imagem de iniciação de trinca e propagação de trinca. (ASM Handbook Committee, 2002).....	14
Figura 2.14 – Representação de formação de estrias dúteis e frágeis. (a) Estrias dúteis (b) estrias frágeis. (ASM Handbook Committee, 2002).....	15
Figura 3.1 - Esteira de von Kármán.....	16
Figura 3.2 - Diferentes regimes de escoamento em torno de um corpo cilíndrico liso (adaptado de Lienhard, 1966).	17
Figura 3.3 - Mapa de distribuição de velocidade média anual dos ventos no Brasil (CEPEL, 2001).....	18
Figura 3.4 – (a) Vista isométrica do condutor. (b) Regiões de contato entre os fios do condutor e a tampa do grampo.	19
Figura 3.5 - Óxido de alumínio acumulado na superfície do grampo.	20
Figura 3.6 - Mecanismo de falha de fadiga por fretting (Boniardi, 2007).	20
Figura 3.7 - Limite de tensão admissível no condutor, considerando esforços estáticos e dinâmicos.	21
Figura 3.8 - Esquema de montagem cabo-grampo de suspensão.	21
Figura 3.9 - (a) Vibrógrafo modelo Pavica (b) Esquema de montagem do equipamento na linha (Gomes, 2015).	24
Figura 3.10 - Curva Safe Border Line e outras curvas compiladas pela CIGRÉ (CIGRÉ, 2003 - modificado).	26
Figura 3.11 - H/w em função da razão de área transversal dos materiais do condutor para variadas temperaturas (Barret & Motils, 2001).....	30
Figura 4.1 - Desenho esquemático da configuração das bancadas de ensaios.	31
Figura 4.2 - Talha de alavanca ancorada ao bloco fixo 1.	32
Figura 4.3 – (a) Grampo de ancoragem conectado à célula de carga e (b) braço de alavanca.	32
Figura 4.4 - Bloco móvel posicionado sobre eixos com rolamentos na extremidade.	33
Figura 4.5 - Blocos fixos para suporte do shaker eletromecânico.	33
Figura 4.6 - Deformação longitudinal do fio (cabo Orchid).	35

Figura 4.7 – Modelos dos cabos condutores CAL 900 (a, b); Orchid (c, d); e Tern (e, f)	36
Figura 4.8 - Grampo monoarticulado utilizado nos ensaios.....	37
Figura 4.9 - Montagem cabo/grampo de ancoragem/célula de carga.	37
Figura 4.10 - Codificação utilizada para os extensômetros da marca Excel.	38
Figura 4.11 - a) Pano sobre shaker, b) lona de borracha sobre suporte do bloco móvel.	41
Figura 4.12 - Conductor estendido apoiado nas polias ao longo do vão.....	42
Figura 4.13 - Bobina do Orchid.....	42
Figura 4.14 - Grampo de suspensão posicionado.	42
Figura 4.15 - Grampos de ancoragem conectados à: (a) célula de carga e (b) tifor.....	43
Figura 4.16 - Aplicação de pré-carga usando tifor.....	43
Figura 4.17 – Gaiola e Braço de alavanca.	44
Figura 4.18 - Polias ao longo do vão.	44
Figura 4.19 - Fixação do grampo de suspensão.	44
Figura 4.20 - Posição do último ponto de contato e fios de topo.	45
Figura 4.21 - Lixamento da superfície para colagem do extensômetro.	45
Figura 4.22 - Limpeza do local onde serão colados os extensômetros.	45
Figura 4.23 - Extensômetro sobre fita adesiva.	46
Figura 4.24 - Colocação da cola no extensômetro.	46
Figura 4.25 - Colagem do extensômetro.	46
Figura 4.26 - Fixação da braçadeira com acelerômetro no ponto 89.	47
Figura 4.27 - Linha de detecção de quebra externa.	47
Figura 4.28 - Dispositivo de alinhamento do shaker e braçadeira com acelerômetro.	47
Figura 4.29 - Posição do sistema de detecção de quebra.....	48
Figura 4.30 - Posição dos extensômetros.	49
Figura 4.31 - Esquema de funcionamento do sistema de controle e monitoramento de ensaios.....	50
Figura 4.32 - Corte para retirada de amostra.	51
Figura 4.33 – (a) Retirada da amostra do ensaio e (b) Amostra do ensaio.	51
Figura 5.1 - Curvas de fadiga para os condutores CAL 900, Orchid e Tern (H/w = 2144 metros).	55
Figura 5.2 - Razão de vidas dos cabos em termos da durabilidade do CAL 900.	57
Figura 5.3 - Evolução das quebras em relação a vida consumida.	58
Figura 5.4 - Distância das rupturas em relação ao UPC.	59
Figura 5.5 - Distância média das rupturas em relação ao UPC.....	59
Figura 5.6 - Posição das quebras.....	60
Figura 5.7 - Referências adotadas: superior/inferior, externo e interno.....	60
Figura 5.8 - Tipos de superfícies de falha.	61
Figura 5.9 - Análise microscópica do cabo CAL 900, falha QP. Detalhe 1: estrias (x15.000), detalhe 2: dimples (x800).	62
Figura 5.10 - Presença de orelha de lobo e amassamento na base, cabo Orchid. (x20).....	63
Figura 5.11 - Ruptura tipo 45° fio do cabo Orchid. No detalhe presença de dimples na direção cisalhante. (x550).	64
Figura 5.12 - Região de fretting entre fios do cabo Tern. (x27) Detalhe 1: zona de aderência. Detalhe 2: zona de escorregamento. Detalhe 3: provável região de iniciação da trinca.	64
Figura 5.13 - Fio do cabos condutor Tern. Detalhe 1: estrias (x10.000). Detalhe 2: dimples na direção de cisalhamento(x350).	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Extensão das linhas de transmissão do SIN (EPE,2015).....	1
Tabela 3.1 - Comparação entre os tipos de vibração em cabos condutores aéreos (adaptado de EPRI, 1979). .	18
Tabela 3.2 - Principais tipos de cabos condutores aéreos	19
Tabela 3.3 - Constantes da curva Limite de Segurança (CSBL). (CIGRÉ, 1985).....	27
Tabela 3.4 - Valores de H/w para diferentes categorias de terreno (CIGRÉ, 2005).	29
Tabela 4.1 - Composição química das ligas Al 1350-H19 e Al 6201-T81.....	34
Tabela 4.2 - propriedades mecânicas das ligas Al 1350-H19 e Al 6201-T81.....	34
Tabela 4.3 – Propriedades geométricas dos condutores.	35
Tabela 4.4 - Especificações técnicas do grampo de ancoragem.....	37
Tabela 4.5 - Parâmetros adotados para o ensaio.....	40
Tabela 5.1 - Resultados dos ensaios realizados para levantamento das curvas S-N.	54

Símbolos Latinos

A	Razão de amplitudes	
$A_{aço}$	Área da seção transversal da parcela de aço no condutor	$[mm^2]$
A_{al}	Área da seção transversal da parcela de alumínio no condutor	$[mm^2]$
A_t	Área transversal do fio	$[m^2]$
b	Expoente de resistência à fadiga	
C	Constante do material	
D	Constante do material	
d_a	Diâmetro da camada externa do condutor	$[mm]$
$d_{aço}$	Diâmetro do fio de aço	$[mm]$
d_{al}	Diâmetro do fio de alumínio	$[mm]$
e	Diferença de potencial elétrico	$[V]$
E_a	Módulo de elasticidade da camada externa do condutor	$[MPa]$
$E_{aço}$	Módulo de elasticidade do aço	$[MPa]$
E_{al}	Módulo de elasticidade do alumínio	$[MPa]$
EI	Rigidez à flexão do condutor	$[N \cdot mm^2]$
g	Aceleração gravitacional	$[m/s^2]$
H	Carga de tração do condutor	$[N]$
K	Coefficiente de Poffenberger-Swart	$[N/mm^3]$
K_s	Fator de sensibilidade do extensômetro	
l	Comprimento do fio condutor	$[m]$
n_a	Número de fios da camada externa do condutor	
$n_{aço}$	Número de fios de aço	
n_{al}	Número de fios de alumínio	
N_f	Vida em ciclos	$[ciclos]$
p	Rigidez de montagem	$[mm^{-4}]$
R_t	Razão de tensão	
$S_{aço}$	Tensão no fio de aço	$[MPa]$
S_{al}	Tensão no fio de alumínio	$[MPa]$
Y_b	Amplitude de deslocamento pico a pico	$[mm]$
ΔR	Variação da resistência elétrica	$[\Omega]$
S	Tensão nominal	$[MPa]$
w	Peso por unidade de comprimento	$[N/m]$
x	Distância de 89 mm	$[mm]$

Símbolos Gregos

ρ_{al}	Massa específica do alumínio	$[kg/m^3]$
$\rho_{aço}$	Massa específica do aço	$[kg/m^3]$
σ	Tensão	$[MPa]$
σ_a	Amplitude de tensão	$[MPa]$
σ_{ar}	Limite de fadiga	$[MPa]$
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima	$[MPa]$
$\sigma_{m\acute{e}d}$	Tensão média	$[MPa]$
σ_{min}	Tensão mínima	$[MPa]$
σ_{p-s}	Tensão de Poffenberger-Swart	$[MPa]$
σ_u	Limite de resistência	$[MPa]$
σ_y	Limite de escoamento	$[MPa]$
σ'_f	Coefficiente de resistência à fadiga	$[MPa]$
$\Delta\sigma$	Faixa de tensão	$[MPa]$
ν	Coefficiente de Poisson	
ε	Deformação do fio	

LISTA DE ABREVIações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACAR	Aluminium Conductor Alloy Reinforced
ACSR	Aluminium Conductor Steel Reinforced
ASTM	American Society for Testing and Materials
CA (AAC)	Cabos de Alumínio (All Aluminium Conductor)
CC	Corrente Contínua
CIGRÉ	Conseil International des Grands Réseaux Electriques
CRT	Carga de Ruptura à Tração
CSBL	CIGRÉ's Safe Border Line
EDS	Every Day Stress
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPRI	Electric Power Research Institute
IACS	International Annealed Copper Standard
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
LabCabos	Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de energia do Departamento de Engenharia Mecânica na Universidade de Brasília
P-S	Poffenberger-Swart
UPC	Último Ponto de Contato entre o Cabo e o Grampo de Suspensão
UTS	Ultimate Tension Stress

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

No ano de 2012, o mundo possuía uma capacidade de geração de energia elétrica instalada de 5549,6 GW, os respectivos países China, Estados Unidos e Japão lideram o ranking. O Brasil está entre os dez primeiros países na mesma categoria, com capacidade de 121,0 GW de geração, correspondendo a 2,2% da capacidade de geração de energia elétrica mundial.



Figura 1.1 – Maiores países geradores de energia elétrica do mundo (EPE,2015).

O sistema de transmissão de energia elétrica brasileiro é considerado um dos maiores do mundo. Tal classificação se deve a fatos como a extensão territorial do país, sua grande demanda por energia elétrica, crescente a cada ano, e a longa distância entre os centros produtores e centros consumidores de energia.

Devido ao fato da grande maioria das usinas hidrelétricas estarem localizadas distantes dos centros consumidores, em 2014, o Brasil possuía 125.640 km de extensão das linhas de transmissão, segundo a ONS (Tabela 1.1). Fazendo desta uma das maiores redes de energia elétrica do mundo.

Tabela 1.1 - Extensão das linhas de transmissão do SIN (EPE,2015).

Tensão (kV)	2010	2011	2012	2013	2014	$\Delta\%$ (2013/2014)	Part. % (2014)
Total	100.179	103.362	106.479	116.768	125.640	7,6	100
230	43.185	45.709	47.894	49.969	52.450	5,0	41,7
345	10.060	10.062	10.224	10.272	10.303	0,3	8,2
440	6.671	6.681	6.728	6.728	6.728	0,0	5,4
500	34.356	35.003	35.726	39.123	40.659	3,9	32,4
600 (CC)	3.224	3.224	3.224	7.992	12.816	60,4	10,2
750	2,683	2,683	2,683	2,683	2,683	0,0	2,1

Tendo em vista a importância da energia elétrica na sociedade contemporânea e a extensão do sistema de transmissão de energia brasileiro, destaca-se o cabo condutor de energia como o elemento de maior relevância da rede de transmissão, assim como um dos elementos de maior peso em custo do *Sistema Interligado Nacional* (SIN), correspondendo a cerca de 30 - 35% dos custos de investimento totais de uma rede (Kiessling *et al.*, 2003).

Basicamente, os cabos utilizados em linhas de transmissão estão sujeitos a dois tipos de carregamento, o carregamento estático, previsto em projeto pelo H/w , e carregamentos dinâmicos, devido a ação de ventos que causam a redução de vida útil dos condutores devido a processos de fadiga.

1.2 Objetivo

Este trabalho faz um estudo comparativo a respeito do comportamento da vida em fadiga dos cabos CAL 900 (alumínio liga), Orchid (alumínio puro) e Tern (alumínio com alma de aço) em termos do parâmetro de projeto H/w . H representa a carga de tração aplicada ao cabo (kgf) e w representa o peso específico linear do condutor (kgf/m). Vale ressaltar que além de quantificar as diferenças em termos de vida em fadiga, este trabalho também avalia tais diferenças do ponto de vista mecânico/material. Assim, análises microscópicas das fraturas dos fios também são apresentadas.

Para se mensurar a vida em fadiga de cada um dos condutores aéreos, são apresentados resultados de 27 ensaios, agrupados em três curvas diferentes com um total de 9 ensaios para cada tipo de cabo. Utiliza-se H/w igual a 2144 m em todos os ensaios para a comparação dos comportamentos de vida. Os ensaios foram realizados nas bancadas de testes do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB.

O levantamento das curvas de vida dos cabos, também conhecidas como curvas de Wöhler ou S-N, foi feito a partir da montagem dos condutores sobre o grampo de suspensão do tipo monoarticulado, o mesmo utilizado na sustentação de cabos em torres de transmissão. Para a ratificação das tensões nominais que atuam no condutor, na região diametralmente oposta ao último ponto de contato entre o cabo/grampo (UPC), a expressão empírica-analítica de Poffenberger-Swart foi utilizada.

Em virtude do objetivo principal deste trabalho, objetivos adjacentes destacados a seguir também se mostram importantes:

- Revisão teórica acerca dos conceitos de fadiga utilizados na quantificação do dano causado ao cabo.
- Revisão teórica das metodologias empregadas na avaliação da integridade do condutor.
- Discussão dos resultados obtidos, bem como sua relevância para o projeto e manutenção de tais linhas.

2 FADIGA (UMA REVISÃO)

Em peças que falham estaticamente é usual observar uma grande deformação antes da fratura do componente, assim é possível observar a possibilidade de falha do componente antes que a mesma ocorra. Em contrapartida, a falha por fadiga se dá de maneira súbita e total, tornando-se um problema complicado em termos de engenharia e ainda intensificado pelo fato de ser um fenômeno apenas parcialmente entendido, exigindo do engenheiro grande conhecimento de causa e muitas vezes uma vasta experiência no campo (Shigley *et al.*, 2005). Estima-se que a ruptura por fadiga é o principal tipo de falha individual em metais, correspondendo a 90% das falhas existentes em peças feitas com esse material (Callister, 2011).

2.1 Conceitos Básicos da Fadiga

As falhas por fadiga estão relacionadas às tensões de cisalhamento e deformações plásticas, a sua progressão é vigorosamente motivada pelas cargas trativas aplicadas sob o corpo, provocando uma tensão média positiva. A deformação plástica em materiais cristalinos ocorre devido ao movimento de discordâncias atômicas em virtude das tensões cisalhantes. Este movimento resulta num deslocamento relativo entre dois planos atômicos e é proporcional a tensão de cisalhamento atuante nesta região. Além disso, para carregamentos específicos, a deformação plástica é predominante na direção de máxima tensão de cisalhamento (Dowling, 2013).

Em materiais policristalinos os grãos se orientam de maneira aleatória em seus respectivos planos atômicos, neste caso a deformação plástica tende a se iniciar em grãos com orientação mais desfavorável, isto é, grãos cujo os planos de deslizamento estão alinhados com a direção de tensão de cisalhamento máxima. Sendo assim, é possível que ocorra deslizamento somente em alguns grãos, de maneira que o restante do material continue tendo comportamento perfeitamente elástico, tornando a detecção da deformação plástica bastante complicada de se avaliar. Logo, não é possível afirmar que mesmo sob tensões abaixo do limite elástico, ocorram somente deformações plásticas em materiais.

Em regiões livres de defeitos, trincas podem ser nucleadas devido à concentração local de tensão, motivadas por deformações locais em bandas de deslizamento particulares (Garcia et al., 2012). A Figura 2.1 mostra os elementos de nucleação de trincas com espécimes sujeitos a esforços cíclicos.

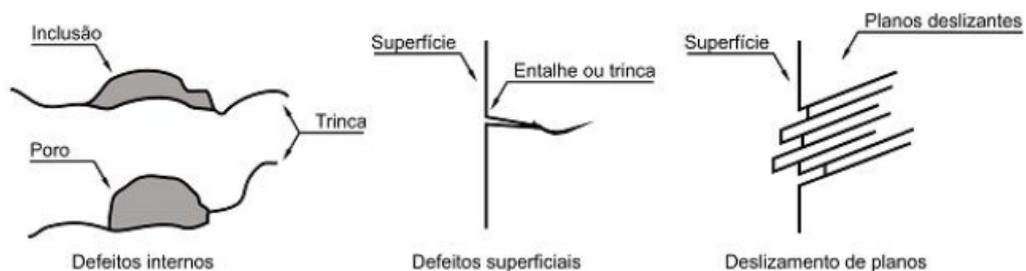


Figura 2.1 - Nucleação de trincas em componentes sujeitos a esforços cíclicos. (Garcia et al., 2012).

A falha por fadiga se dá em três estágios de progressão. O primeiro estágio caracteriza-se pelo início de uma ou várias microtrincas, devido a deformação plástica repetida acompanhada da propagação cristalográfica que se estende por dois a cinco grãos interligados à origem (Shigley *et al.*, 2005). Em geral a ocorrência do estágio I não pode ser observada a olho nu.

No estágio II ocorre a progressão de micro e macrotrincas, que geram superfícies de fratura com platôs paralelos, divididos por sulcos igualmente paralelos (Stephens *et al.*, 2001). Os platôs são tipicamente lisos e normais em direção à máxima tensão de tração na região em questão. Tais superfícies podem ser onduladas e escuras, bem como ter bandas leves, chamadas de marcas de praia. Durante a repetição do carregamento as fendas nas superfícies se abrem e fecham, resvalando uma sobre a outra, definindo o aspecto das marcas de praia. Estas marcas dependem de variações nos níveis e nas frequências dos carregamentos.

O estágio III acontece quando o material remanescente não é mais capaz de suportar as cargas, induzindo o componente a uma falha abrupta. A falha do estágio III pode ser do tipo frágil, dúctil ou ainda a combinação dessas duas. (Garcia *et al.*, 2012). A Figura 2.2 mostra diferentes representações de falhas típicas nos fios de cabos condutores.



Figura 2.2 - Variadas geometrias de falha em fios de condutores (modificado: Fadel, 2010).

De forma geral, a falha por fadiga ocorre em pontos de descontinuidade da peça, onde a tensão cíclica é máxima. (Shigley *et al.*, 2005). Tais descontinuidades podem ocorrer devido aos seguintes fatores:

- Mudanças bruscas de seção transversal do componente, onde tipicamente ocorrem concentrações de tensões;
- Marcas de ferramentas, riscos e rebarbas, montagem inadequada e falhas de fabricação do componente;
- Constituição do material para os diferentes tipos de fabricação (laminação, forjamento, fundição extrusão, tratamento térmico e etc.). Este fator é causado por inclusões de materiais estranhos, descontinuidades microscópicas superficiais e subsuperficiais e segregação de liga, vazios, partículas duras precipitadas e descontinuidades cristalinas;

- Rolamento ou deslizamento entre elementos sob altas pressões de contato, que ocasionam tensões de contato subsuperficiais concentradas, também chamado de fadiga por fretting.

2.2 Aspectos Macro e Microscópicos da Fadiga

Um dos conceitos para a caracterização de falha em materiais é a fratura, separação de um componente mecânico em uma ou mais partes devido a ocorrência de esforço internos (estáticos e/ou dinâmicos) superiores aos limites de resistência do material. Este tipo de falha pode ser classificado em duas categorias: fratura dútil ou fratura frágil. A fratura dútil é caracterizada por acentuada deformação plástica e alta absorção de energia antes da ocorrência da falha. Enquanto que a fratura frágil caracteriza-se pela incapacidade do material de suportar grandes deformações plásticas e absorção de energia.

Em decorrência das tensões que atuam nos corpos sólidos durante o processo de falha, dois fenômenos ocorrem, o processo de iniciação da trinca e em seguida a sua propagação. Muitas vezes o mecanismo de propagação da trinca caracteriza o modo de falha do componente. Em aplicações de engenharia é preferível a fratura dútil em relação a fratura frágil por duas razões: i) a rápida propagação de trinca induz a ocorrência de fratura frágil de maneira imprevisível e catastrófica, enquanto que a fratura dútil ocorre em regime de grandes deformações plásticas, de forma a anunciar a ocorrência da falha eminente; ii) a fratura dútil requer mais energia imposta ao material para que ocorra, neste caso, quanto maior for a tenacidade do material maior a sua capacidade de resistir à fratura.

2.2.1 Fratura dútil

Em componentes mecânicos, a fratura dútil pode ser identificada pela ocorrência prévia de grande deformação plástica do CP, neste caso, é visível a formação de um pescoço na peça (redução da área da seção transversal), seguido da ocorrência da fratura, conforme ilustra a Figura 2.3. Na mesma figura pode-se observar que nos estágios iniciais da fratura dútil surgem na peça lacunas isoladas em seu interior (Figura 2.3 (a)). Devido a continuação da deformação ocorre a coalescência destas lacunas, resultando na formação das trincas, formas elípticas que se dispersam ao longo da superfície do corpo de prova (Srivatsan *et al.*, 1990 e Garrison *et al.*, 1987) (Figura 2.3 (b e c)). Por fim, a fratura acontece por meio de uma rápida propagação das trincas e deformação cisalhante, em ângulo de aproximadamente 45° em relação a carga aplicada (Callister, 2011). Nos fios de cabos condutores, há dois padrões de falha que são caracterizados como fraturas duteis: (i) o formato “45°” onde há apenas uma região de iniciação de trinca e a propagação da falha se dá em ângulo de 45° com a direção de aplicação da carga sobre o corpo (ii) e o formato “v”, onde há ao menos duas regiões distintas de iniciação da trinca de tal forma que ambas se propagam em ângulo de 45° se encontrando em alguma região próxima ao centro do fio, deixando um aspecto de “v” para a fratura.

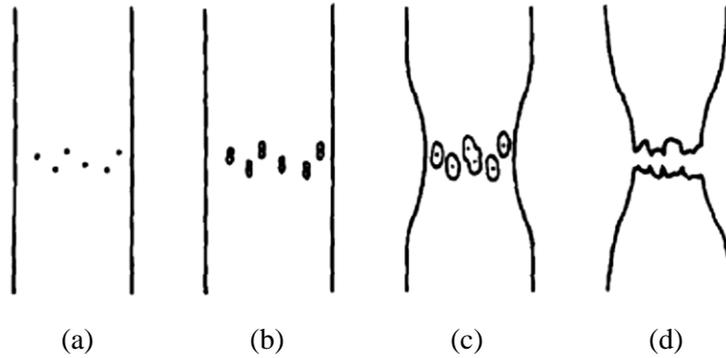


Figura 2.3 - Representação esquemática da fratura dútil: (a) crescimento de vazios, (b e c) coalescência dos vazios, formação de trinca e deformação e (d) fratura do tipo taça-cone.

2.2.2 Fratura frágil

A fratura frágil representa o tipo mais crítico de falha, esta acontece sem aviso prévio (deformações visíveis), de maneira rápida e, muitas vezes, catastrófica. A trinca se propaga na direção perpendicular ao plano de aplicação da tensão na região de falha, em consequência disso, a peça fraturada apresenta superfície de falha plana ou quase-plana, geralmente. Em âmbito microscópico, a propagação da trinca pode ocorrer no interior dos grãos, chamada de falha por clivagem transgranular (Figura 2.4, (b)). Diferentemente, a fratura pode ocorrer de forma intergranular, quando a propagação da trinca se dá ao longo das superfícies dos grãos (Figura 2.4, (c)). Ainda do ponto de vista microscópico este tipo de fratura apresenta superfície com padrões geométricos distintos, onde não se podem observar sinais de deformação plástica. Em fios de cabos condutores, a fratura frágil pode assumir dois formatos principais a fratura (i) quase-plana (QP), recorrente em fraturas de corpos cilíndricos em materiais frágeis onde a superfície de falha é normal a direção de aplicação da carga sobre o corpo e (ii) perfil “L” de ruptura, caracterizada pela iniciação de trinca com aspecto dútil, ou seja, propagação a 45°, seguido de ruptura abrupta da seção restante.

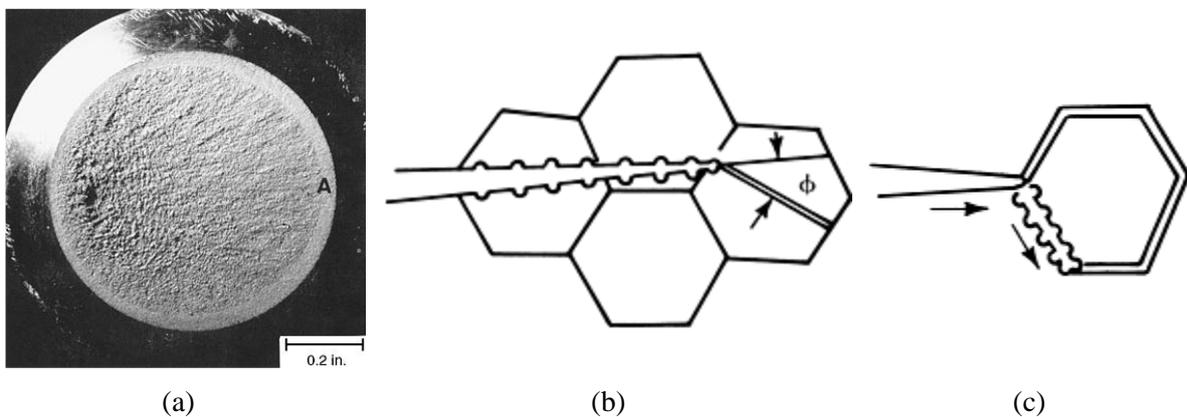


Figura 2.4 - (a) Superfície de fratura frágil, (b) representação esquemática de propagação de trinca transgranular e (c) representação esquemática de propagação de trinca intergranular. (ASM Handbook Committee, 2002)

2.3 Principais Métodos da Vida em Fadiga

Há três métodos principais para a previsão da vida em fadiga de uma peça, são eles: método da vida sob tensão, método da vida sob deformação e método da mecânica da fratura linear elástica. Estes métodos visam prever a quantidade de ciclos, N , suportada por um componente para um nível de carregamento especificado.

O método da vida sob tensão baseia-se apenas no nível de tensão, esse é o método menos preciso, entretanto é o mais utilizado nos dias atuais devido a sua simplicidade de implementação para diferentes aplicações em projeto. Em virtude da sua ampla utilização o método da vida sob tensão possui um vasto suporte de dados que manipulados de forma apropriada podem representar adequadamente aplicações de alta ciclagem.

O método da vida sob deformação considera de maneira precisa a deformação plástica na região em que as tensões e deformações são notáveis para a estimativa de vida. Tal método se mostra vantajoso para aplicações de baixo ciclo ($1 \leq N \leq 10^3$). Sua utilização requer várias idealizações impostas de maneira que consideráveis incertezas são obtidas no resultado.

O método da mecânica da fratura admite a existência de uma trinca no componente detectada. Sendo assim, ele é utilizado para estimar o crescimento de tal trinca com referência na intensidade de tensão. Tal método encontra sua efetividade em grandes estruturas e quando acompanhado de códigos computacionais e programas regulares de inspeção.

Devido a simplicidade de aplicação e o fato da ocorrência de fadiga em cabos condutores se dar em regimes de altos ciclos o método da vida sob tensão se mostra mais adequado para o cálculo da vida de condutores, por isso, será melhor explanado a seguir.

2.4 Método da Vida sob Tensão

Visando a determinação da resistência à fadiga de materiais submetidos a tensões variáveis, corpos de prova (CP) de determinado material são submetidos a forças repetidas de amplitudes especificadas, de maneira que cada ciclo de tensão seja contado até a falha do CP. A máquina criada por R. R. Moore, conhecida por máquina de viga rotativa de R. R. Moore é a mais empregada na determinação da vida em fadiga de materiais. Primeiramente, o CP (Figura 2.5) deve ser usinado e polido meticulosamente de modo a evitar riscos ao longo da região provável de falha. Em seguida o CP é posicionado na máquina e é aplicada uma carga de flexão, conforme a Figura 2.6, sujeitando o espécime à flexão pura invertida por meio da rotação do CP.

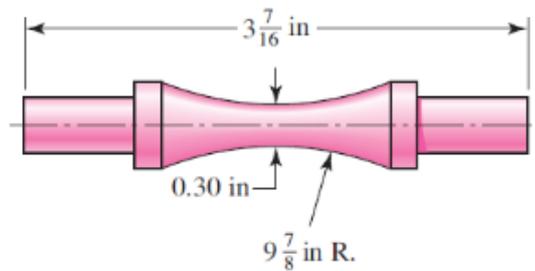


Figura 2.5 - Geometria do corpo de prova da máquina de viga rotativa de R.R Moore (Shigley et al., 2005).

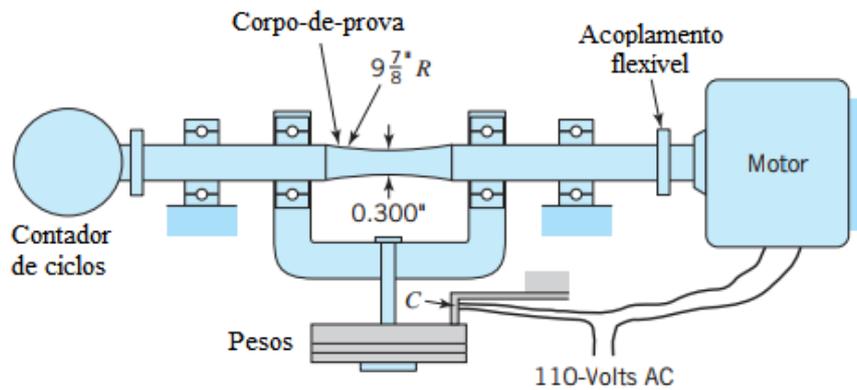


Figura 2.6 - Máquina de flexão rotativa de R. R. Moore (modificado: Juvinall & Marshek, 2011).

Na intenção de se estabelecer a resistência à fadiga de um material, um grande número de ensaios é necessário em virtude da natureza estatística da fadiga. Comumente, o primeiro ensaio é feito com tensão pouco inferior à resistência última do material. O segundo é feito em tensão menor que o primeiro e assim por diante (Shigley et al., 2005). Os resultados do ensaio são apresentados por meio da curva S-N. Em que a ordenada denominada resistência à fadiga S_f é associada ao número de ciclos até a falha N na abscissa. Observa-se que para metais ferrosos e ligas a curva se torna horizontal a partir de certo número de ciclos (Figura 2.7), desse ponto em diante não haverá falha do material por maior que seja a quantidade de ciclos empregada sobre o corpo. O ponto de resistência correspondente a infinitude de vida do material é chamado de limite de resistência à fadiga S_e , ou limite de fadiga. Para metais não-ferrosos ou ligas o limite de fadiga não é bem definido. Desta maneira, o alumínio não possui um limite de resistência visível em sua curva de vida, adotando-se como resistência à fadiga S_f um número de ciclos específico, usualmente $N = 5 \cdot 10^8$ ciclos de tensão alternada (Dowling, 2013). De maneira empírica, usualmente o ajuste utilizado nas curvas de Wöhler (S-N) baseia-se na utilização da relação de Basquin (eq. 2.1), em que N é o número de ciclos até a falha do componente e as constantes a e b podem ser definidas pelos pontos $10^3, (S_f)_{10^3 \text{ ciclos}}$ e $10^6, (S_e')$.

$$S_f = aN^b$$

2.1

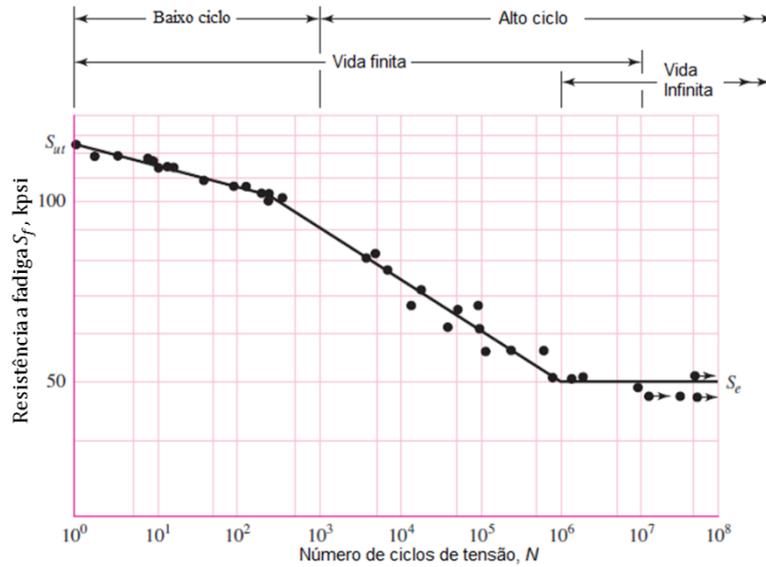


Figura 2.7 - Diagrama S-N de ensaios de fadiga axial completamente reversa (modificado: Shigley et al., 2005).

2.5 Tensões Flutuantes

De maneira geral, as tensões flutuantes de componentes mecânicos assumem a forma de curvas senoidais, isso se deve a características rotativa de grande parte das máquinas. Entretanto, outros padrões de comportamento das tensões podem ser assumidos, alguns inclusive, não periódicos como elucidado pela Figura 2.8 (b e c). Em padrões periódicos sabe-se que a forma da onda não é importante na caracterização das tensões, somente os valores de picos e vales. Desta maneira, conhecendo a tensão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$) e mínima ($\sigma_{m\acute{i}n}$) é possível obter a componente média (σ_m) e alternada (σ_a) do histórico de tensão, como é apresentado pelas equações 2.2 e 2.3.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad 2.2$$

$$\sigma_a = \frac{|\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}|}{2} \quad 2.3$$

a partir das equações 2.2 e 2.3, também é possível traçar a razão de tensão (R) (eq. 2.4) e similarmente a razão de amplitude (A) (eq. 2.5).

$$R = \frac{\sigma_{m\acute{i}n}}{\sigma_{m\acute{a}x}} \quad 2.4$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad 2.5$$

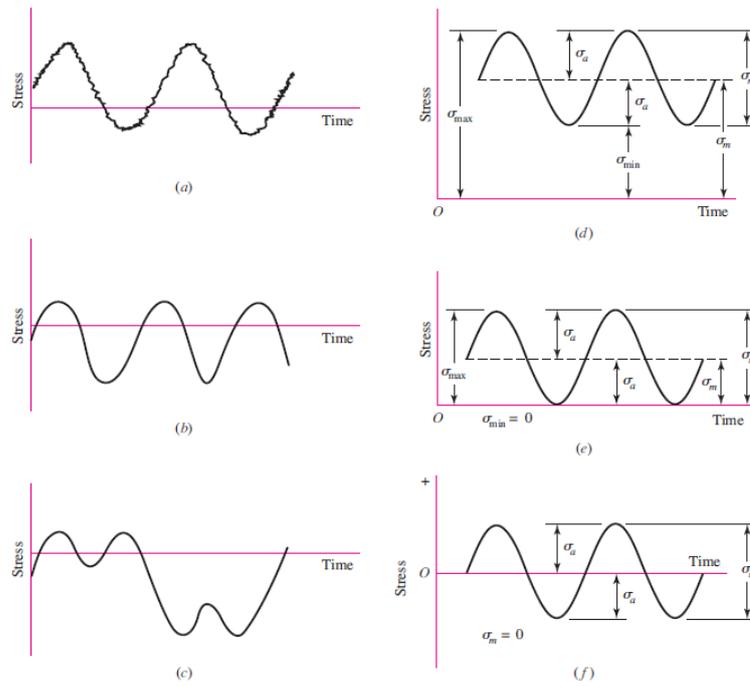


Figura 2.8 - Algumas relações de tensão-tempo: a - tensão flutuante com ondulação de alta frequência, b e c - tensão flutuante não-senoidal, d - tensão flutuante senoidal, e - tensão repetida, f - tensão senoidal completamente inversa (Shigley et al., 2005).

2.6 Critérios de Falha sob Tensões Flutuantes

Definidas as componentes de tensão relacionadas a um espécime sujeito a tensão flutuante, se faz necessário entender como a variação da tensão média e da amplitude de tensão influenciam a resistência à fadiga de corpos sob tais condições. Para isso, vários critérios de falha foram desenvolvidos com o intuito de se delinear as fronteiras de operação para diferentes combinações de tensão alternada e tensão flutuante, tal como explicitado na Figura 2.9.

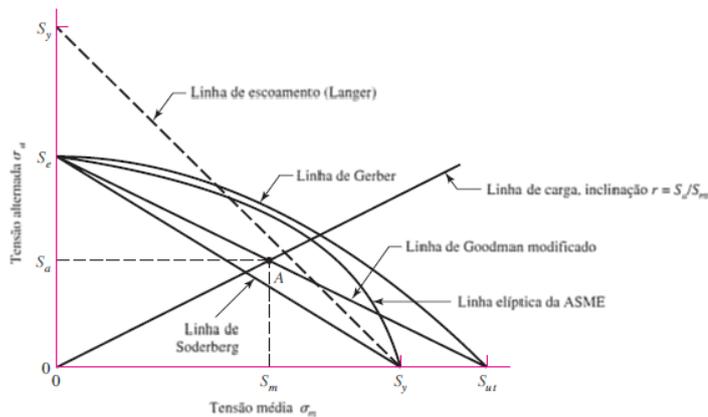


Figura 2.9 - Diagrama de fadiga mostrando diversos critérios de falha. Para cada critério, pontos acima da respectiva curva indicam falha do componente (modificado: Shigley et al., 2005).

Abaixo estão reproduzidas as equações dos critérios que regem as diferentes curvas de falha mostradas na Figura 2.9. S_{ut} representa a resistência ao escoamento, S_y a resistência a tração, S_e o limite de fadiga ou S_f resistência de vida, S_a tensão alternada e S_m tensão média.

A equação de critério para a linha de Soderberg é:

$$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_{yt}} = 1 \quad 2.6$$

similarmente, a relação de Goodman modificado é expressa como:

$$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_{ut}} = 1 \quad 2.7$$

o critério de falha de Gerber é descrito da seguinte maneira:

$$\frac{S_a}{S_e} + \left(\frac{S_m}{S_{ut}}\right)^2 = 1 \quad 2.8$$

o critério elíptico da ASME é escrito como:

$$\left(\frac{S_a}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{S_m}{S_y}\right)^2 = 1 \quad 2.9$$

o critério de escoamento de primeiro ciclo de Langer é descrito na forma:

$$\frac{S_a}{S_{yt}} + \frac{S_m}{S_{yt}} = 1 \quad 2.10$$

2.7 Fadiga por Fretting

De acordo com Lindley (1997), fretting caracteriza-se como o fenômeno que ocorre quando duas superfícies em contato estão sujeitas a forças tangenciais alternantes, zonas de microdeslizamento ocorrem na região de contato onde as duas superfícies deslizam uma sobre a outra. A partir do fretting dois fenômenos podem irromper: *a*) desgaste por fretting, proveniente do desgaste das superfícies *b*) fadiga por fretting, em que trincas de fadiga se iniciam na região afetada pelo contato, provocando grandes reduções da resistência a fadiga do componente ciclicamente carregado.

O fretting é um problema de grande complexidade por abranger vários aspectos, como, ciências dos materiais, mecânica da fadiga, mecânica do contato, tribologia e até mesmo a corrosão. Alguns experimentos tentam reproduzir os efeitos deste fenômeno por meio de máquinas que induzem carregamento tangencial e deslocamento relativo, conforme exemplificado na Figura 2.10, onde está retratado o problema de contato que ocorre nos fios de cabos de transmissão. A Figura 2.10 representa o modelo de contato entre dois cilindros, estes estão submetidos a uma carga radial compressiva P e atritam entre si por meio da carga axial cíclica Q , produzindo na zona de contato uma marca de interação entre os cilindros, ilustrado pela elipse negra.

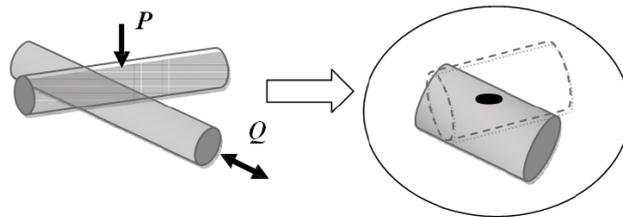


Figura 2.10- Esquema de configuração do problema de contato entre cilindros (Nowell, 1988).

Segundo Nowell (1988), a deterioração superficial ocasionada pelo atrito entre as superfícies em contato, associado ao acentuado gradiente de tensão na região do contato aceleram o processo de nucleação e crescimento das trincas, conforme verificado no trabalho de Araújo & Mamiya (2003), desenvolvido a partir de critério de iniciação de trincas em fadiga de alto ciclo.

2.8 Análise de Falhas por Fadiga

A ferramenta de análise mais útil na investigação de falhas mecânicas é a fractografia, ciência que examina as superfícies de falha. O caráter das falhas é importante nesta análise para se distinguir a ocorrência devido à fadiga ou falhas estáticas, assim como os modos de fratura. As características das falhas por fadiga podem ser observadas por dois prismas, macroscópico e microscópico. Este trabalho apresenta análise com foco em características típicas de fadiga em metais.

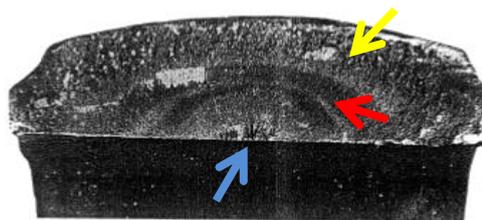


Figura 2.11 - falha por fadiga de um componente mecânico, as setas indicam três características macroscópicas típicas deste tipo de falha: iniciação da trinca (seta azul), marcas de praia (seta vermelha) e fratura final (seta amarela). (Stephens et al., 2000)

Características macroscópicas da falha são observáveis a olho nú. A agudez da superfície de falha e marcas de fretting, por exemplo, são detalhes que podem ser observados sem o auxílio de qualquer equipamento. Entretanto, muitos outros detalhes podem ser observados com maior clareza quando utilizada a microscopia eletrônica, detalhes como crescimentos de bandas e direção de crescimento das trincas. Muitas características macroscópicas são consideradas típicas de falhas por fadiga, pois exibem padrões visuais como: regiões de nucleação de trincas distintas, marcas de praia indicando o crescimento da trinca e a região de fratura instantânea da peça. A Figura 2.11, ilustra características típicas de falha por fadiga em componentes mecânicos. Três padrões típicos de falha por fadiga podem ser observados: regiões de nucleação de trinca, marcas de praia, indicando a direção de crescimento da trinca e uma zona de fratura frágil.

Os padrões identificados na Figura 2.11 são comuns para muitas superfícies de materiais metálicos. Entretanto, marcas de praia podem ser visualizadas mais facilmente em materiais como aço e alumínio. Um apanhado de superfícies típicas de falha por fadiga é apresentado na Figura 2.12.

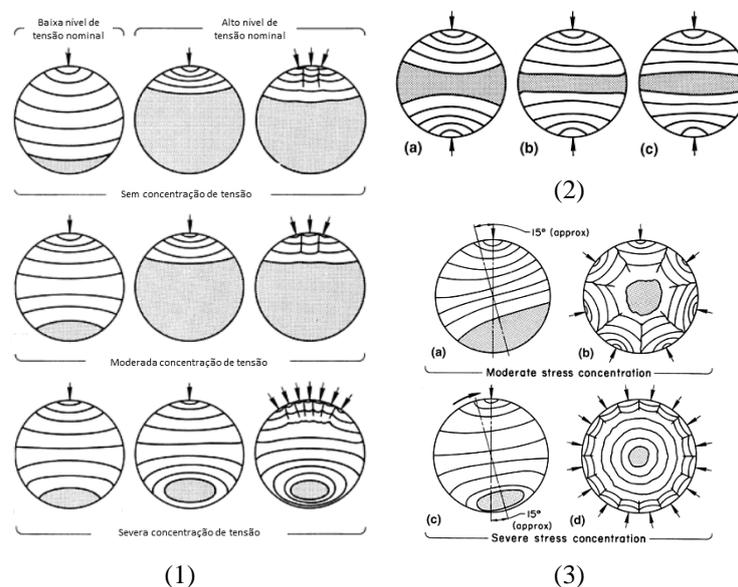


Figura 2.12 - Superfícies típicas de falha para corpos de prova cilíndricos sujeitos a carregamentos cíclicos sob: flexão unidirecional ($R = 0$) (1), flexão reversa ($R = -1$) (2) e torção (3). (ASM Handbook Committee, 2002)

A Figura 2.12 apresenta geometria típica de falha de corpos de prova cilíndricos sujeitos a variados tipos de carregamentos. A Figura 2.12 (1) apresenta CPs sujeitos a carregamentos de flexão cíclica uniforme e unidirecional ($R = 0$). A Figura 2.12 (2) mostra marcas típicas de fadiga para corpos cilíndricos carregadas uniformemente por carregamentos de flexão reversa ($R = -1$) para casos sem concentração de tensão, Figura 2.12 (2a), moderada concentração de tensão, Figura 2.12 (2b), e severa concentração de tensão Figura 2.12 (2c). A Figura 2.12 (3) apresenta superfícies de falha para CPs sob carregamento torcional uniforme, separado em categorias de moderada (a e b) e severa (c e d) concentração de tensão. Os casos a e c são típicos de falha sob torção unidirecional, enquanto que os casos b e d representam falhas para carregamentos torcionais reversos.

A iniciação da trinca é a primeira parte do processo de fadiga mecânica, este processo começa na nucleação da trinca e segue até o ponto em que pode ser observada a olho nú, em geral, é encontrada principalmente em regiões onde a deformação plástica cíclica ocorre, ocasionando concentração de tensão na região. O surgimento de trincas é devido ao acúmulo de dano plástico em regiões com defeitos microestruturais. Por essa razão Felbeck e Atkins (1984) afirmam que o processo de fadiga provavelmente não ocorre em materiais homogêneos de superfície suave e carregamento uniforme.

Como já mencionado, a trinca usualmente se origina em superfícies onde ocorrem descontinuidades como riscos, marcas de ferramenta, mudanças abruptas de seção e outros fatores que geram concentração de tensão. Pang et al. (2007) ressalta a importância de se saber a origem da trinca e a sua propagação em relação ao tempo de vida do componente. A identificação do ponto de iniciação da trinca usualmente é feito por análise fractográfica e se mostra imprescindível para entender e estimar a vida em fadiga em termos de iniciação e propagação de trinca em componentes mecânicos.

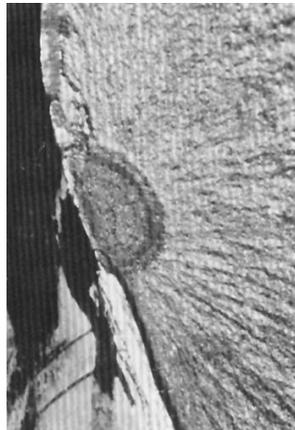


Figura 2.13 - Imagem de iniciação de trinca e propagação de trinca. (ASM Handbook Committee, 2002)

Marcas de praia: esta é a característica mais evidente em fraturas por fadiga em metais, estas marcas estão sempre centradas em volta da região de iniciação de trinca, sendo conhecida como umas das principais características de identificação da falha por fadiga. As marcas de praia podem ocorrer em consequência de fatores como mudanças no carregamento, frequência ou oxidação da superfície durante a propagação das trincas em ciclos intermitentes de serviço do componente. Apesar das marcas de praia serem características irrefutáveis da presença de fadiga, estas não são características de presença obrigatória em superfícies de fadiga.

Estrias de fadiga: na utilização de microscopia eletrônica para análise de falha a característica mais proeminente do ponto de vista microscópico. As estrias podem ser identificadas por trechos com marcas minimamente espaçadas e paralelas entre si. As estrias de estão orientadas em direção perpendicular a direção microscópica da propagação da trinca. Em geral, dois tipos de estrias podem ser reconhecida durante a análise, estrias dúteis e estrias frágeis. As estrias frágeis são conectadas pelo que aparenta ser uma clivagem ao longo de finas facetas. Grande quantidade de marcas de rio separando estas facetas percorrem em direção normal às estrias.

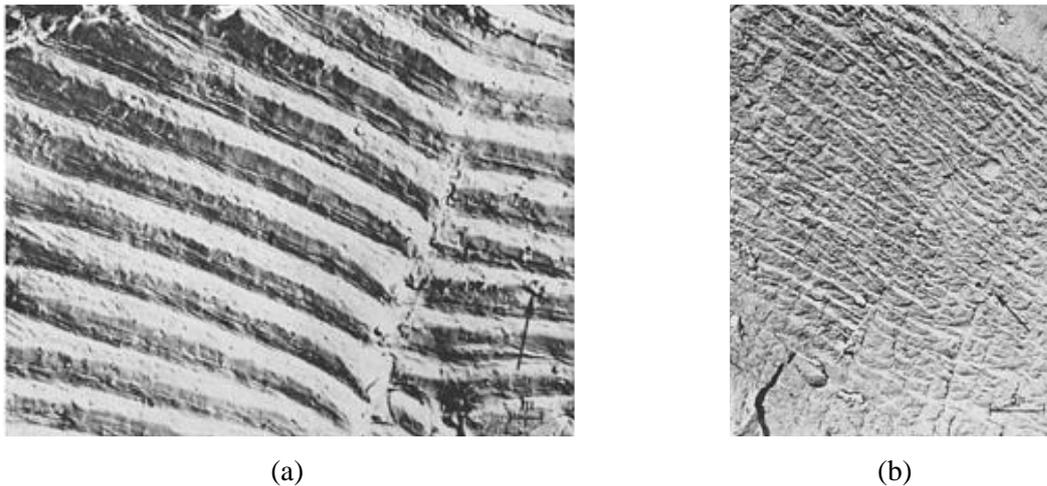


Figura 2.14 – Representação de formação de estrias dúteis e frágeis. (a) Estrias dúteis (b) estrias frágeis.

(ASM Handbook Committee, 2002)

Similar as marcas de praia, cada estria da superfície fraturada representa um ciclo de carregamento aplicado, entretanto a ocorrência de um ciclo de carregamento não necessariamente ocasiona a formação de estria. As estrias são mais visíveis em níveis de tensão maiores do que o limite de fadiga e são mais visíveis em materiais dúteis.

2.8.1 Análise de falha microscópica

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) normalmente é usado para análise minuciosa de detalhes à respeito dos mecanismos de falha. O MEV é preferido em relação ao microscópio ótico devido a sua maior resolução. A fractografia relacionada à fadiga foi primeiramente abordada por Glynn (1844) que analisou a falha por fadiga de um eixo de trem (Lynch et al., 2006). Informações mais aprofundadas utilizando o MEV para análise de falha por fadiga foi feita por Wouters et al. (1996) que investigou a falha por fadiga e falhas por sobrecarga utilizando o MEV.

Recursos literários que tratam de análise de falha em fios de cabos condutores são bastante restritos. Fadel et al (2010) fez análise macroscópica de fios do cabo IBIS após passarem por processo de falha por fadiga, assim, pode-se determinar os tipos de superfície de falha e quantificar as quebras dos fios em relação a sua posição e camada. O MEV foi utilizado por Azevedo et al. (2008) para realizar a fractografia dos fios do cabo Grosbeak, este observou algumas características de fadiga como trincas secundárias, marcas de estria e marcas de fretting nos fios do condutor ensaiado. Nestes dois estudos somente cabos do tipo CAA foram avaliados, utilizando o parâmetro EDS como referência. Entretanto, fractografia de fios de outros tipos de condutores, principalmente utilizando-se o parâmetro H/w possui campo pouco explorado ainda em termo de produção científica.

3 FADIGA EM CABOS CONDUTORES

Conforme mencionado anteriormente, a vibração provocada pela ação dos ventos no condutor aéreo é um dos maiores responsáveis pelas falhas mecânicas nestes componentes. Neste capítulo é apresentado o problema de fadiga em cabos aéreos, bem como a forma que este fenômeno é enfrentado em projeto de linhas de transmissão.

Ao longo da vida útil do cabo condutor as vibrações causadas pela ação dos ventos provocam as falhas por meio da combinação de carregamentos cíclicos no cabo com o processo de fretting, os quais geram quadros propícios ao surgimento e alastramento de trincas nos fios dos cabos. Usualmente, a falha do condutor se encontra nos pontos de restrição do movimento do cabo, sejam elas nos grampos de suspensão, fixação dos amortecedores, espaçadores e etc (CIGRÉ, 1985).

A vibração gerada no cabo é dependente de fatores como a massa do condutor, tipo de condutor, carga de esticamento, tamanho do vão livre, ângulo de incidência da corrente de ar no cabo e sua velocidade.

Mesmo em regime de ventos suaves, se a frequência de excitação dos ventos for igual a frequência natural de vibração do cabo, ocorrerá a gradual absorção da energia do movimento oscilatório da corrente de ar pelo cabo, ocasionando um aumento da amplitude de vibração do condutor aéreo. Desta maneira, a ação do vento sobre os cabos condutores poderá atingir níveis críticos quando não apropriadamente amortecidos, gerando a ruptura dos fios dos cabos e em alguns casos afetando torres e estruturas de suporte da rede de transmissão de energia.

3.1 Excitação Eólica

A vibração em cabos condutores é causada pelo cruzamento da corrente de ar com o condutor, este se desloca para zonas de menor pressão descolando esteiras de vórtices as quais se repetem em períodos regulares, fenômeno conhecido como esteiras de von Kármán (Figura 3.1). Em decorrência desse fenômeno, o cabo desloca-se de maneira alternada para cima e para baixo, sendo o movimento acentuado pela continuidade da passagem de ar pelo condutor.



Figura 3.1 - Esteira de von Kármán.

Dois propriedades são imprescindíveis na análise da formação dos vórtices, o número de Reynolds (eq. 3.1), que caracteriza o tipo de escoamento em função da velocidade do ar (laminar, turbulento ou transiente) e o número de Strouhal (eq. 3.2) o qual revela a frequência de oscilação transversal do cabo em relação a direção de escoamento do vento. O número de Reynolds é definido como:

$$Re = \frac{UD}{\nu} \approx \frac{\text{efeitos inerciais}}{\text{efeitos viscosos}} \quad 3.1$$

em que U é a velocidade de escoamento livre do ar, D o diâmetro do condutor e ν o coeficiente de viscosidade cinemática ($\nu_{ar} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ em condições normais). O número de Strouhal é dado por:

$$St = \frac{f_s D}{U} \quad 3.2$$

De maneira que f_s representa a frequência de descolamento dos vórtices na saída do cilindro ou a quantidade de ciclos completos da esteira de vórtices em Hz. Estudos experimentais permitem fazer a relação entre os números de Strouhal e Reynolds para dado perfil de escoamento. A Figura 3.2 ilustra os diferentes regimes de escoamento e a formação de vórtices através de um perfil cilíndrico.

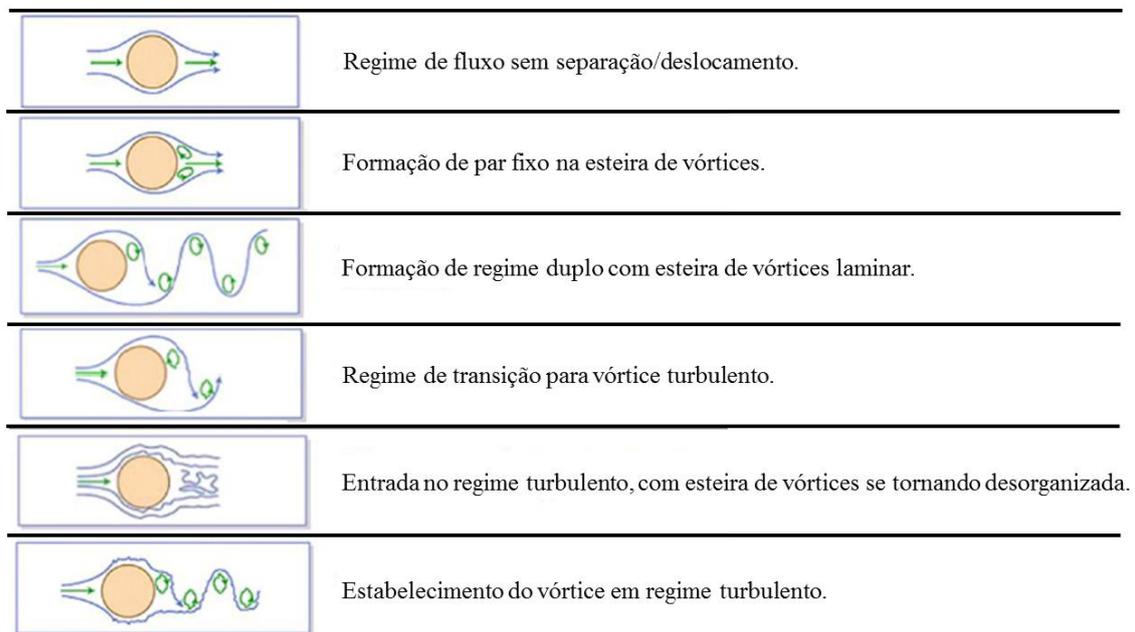


Figura 3.2 - Diferentes regimes de escoamento em torno de um corpo cilíndrico liso (adaptado de Lienhard, 1966).

Na Tabela 3.1 estão descritos os tipos e propriedades de vibrações mais comuns que ocorrem em condutores quando instalados nas linhas de transmissão.

Tabela 3.1 - Comparação entre os tipos de vibração em cabos condutores aéreos (adaptado de EPRI, 1979).

PARÂMETRO	Tipo de vibração		
	EÓLICA	GALOPE	SUB-VÃO
Tipos de condutores afetados	Todos	Todos	Linhas paralelas no plano horizontal
Faixa de frequência [Hz]	3 – 150	0,08 – 3	0,15 – 10
Amplitude pico-pico (nº de diâmetros)	0,01 – 1	5 – 300	0,5 – 80
Tipo de vento que provoca a excitação	Permanente	Permanente	Permanente
Velocidade do vento [km/h]	3 – 23	23 – 60	15 – 60
Superfície do condutor	Sem cobertura ou com depósito simétrico de gelo	Com gelo depositado assimetricamente	Limpa, seca

Devido a inexistência de acúmulo de gelo nas linhas do Brasil, a vibração de galope raramente ocorre. Este tipo de vibração necessita da presença de massas concentradas, como esferas de sinalização, por exemplo. Da mesma maneira, as vibrações de sub-vão são pouco comuns, em virtude do regime de ventos brasileiro. A partir da comparação entre a Figura 3.3, onde mostra o mapa de velocidades média de vento no Brasil, e a Tabela 3.1, é possível inferir que a vibração do tipo eólica possui a maior incidência nos condutores em território nacional. De acordo com Fuchs et al. (1992), estas vibrações são causadas por ventos moderados com velocidades constantes que variam de 2 a 35 km/h e ocorrem em vãos de grandes dimensões, por exemplo, nas travessias de rios onde o fluxo de ar é mais intenso.

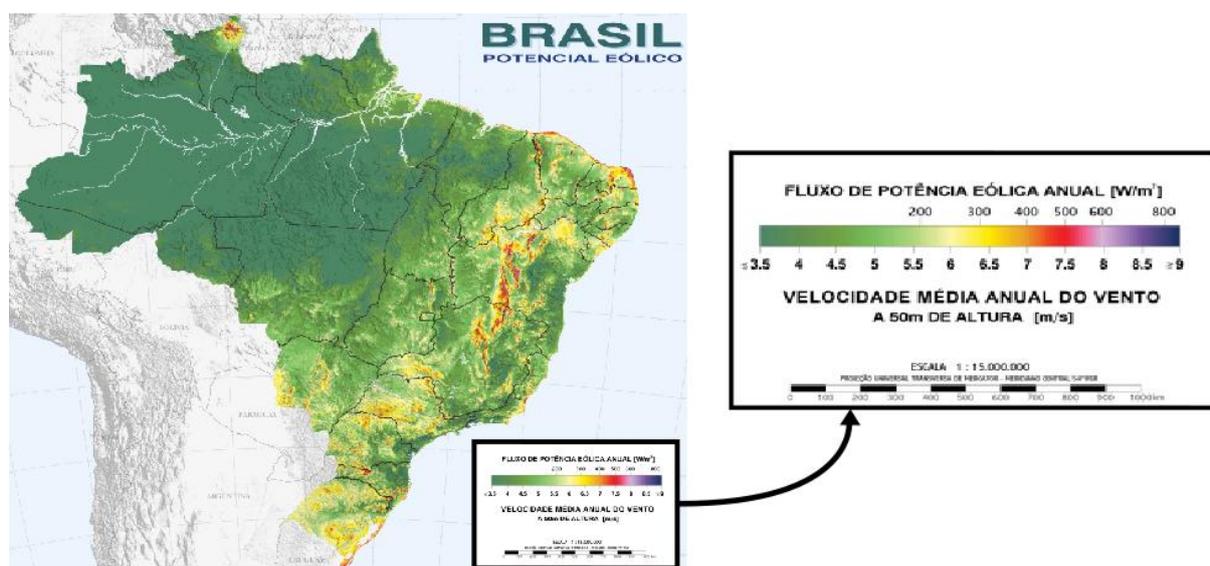


Figura 3.3 - Mapa de distribuição de velocidade média anual dos ventos no Brasil (CEPEL, 2001).

3.2 Mecanismo de Falha por Fadiga em Cabos Condutores

O surgimento e crescimento das trincas nos fios do condutor é proveniente da combinação de carregamentos cíclicos gerados pelas vibrações eólicas com o processo de fretting. Em geral, a falha se inicia nas regiões de contato que ocorrem no interior dos grampos de suspensão. O processo de falha pode ser melhor entendido a partir da compreensão da configuração do cabo descrita a seguir.

O cabo condutor é formado por um conjunto de camadas de fios posicionados concentricamente em relação a um fio central. As camadas, por sua vez, são constituídas por fios com formato helicoidal, de maneira que o sentido de rotação dos fios é alternado entre as camadas, conforme ilustrado na Figura 3.4 (a). Na parte interna do grampo, o condutor está sujeito a uma série de regiões em contato, sejam elas entre os próprios fios do cabo, sejam entre os acessórios de montagem e os fios da camada mais exterior, tal como pode ser destacado em vermelho na Figura 3.4 (b).

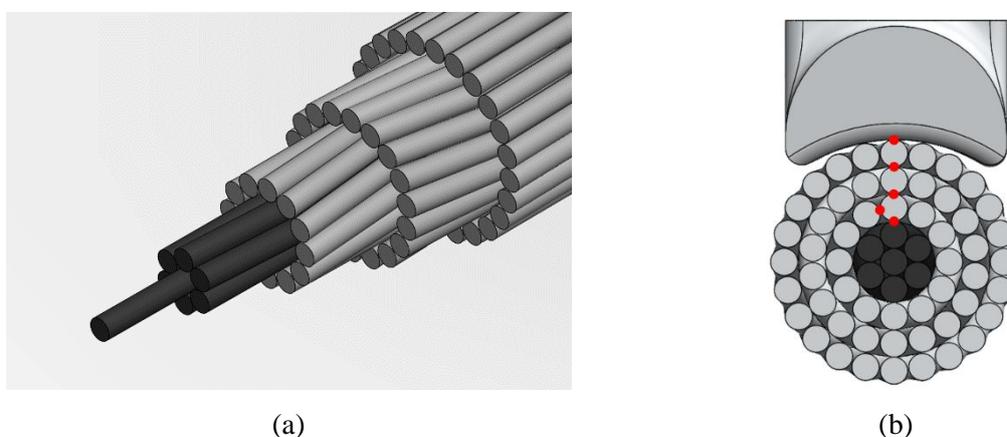


Figura 3.4 – (a) Vista isométrica do condutor. (b) Regiões de contato entre os fios do condutor e a tampa do grampo.

A severidade das cargas de contato está relacionada a vários fatores, dentre eles estão os materiais que compõem o cabo condutor, a carga de aperto dos grampos, geometria da montagem e cargas de esticamento. A Tabela 3.2 apresenta os principais tipos de condutor de acordo com os materiais que o constituem.

Tabela 3.2 - Principais tipos de cabos condutores aéreos

Tipo de condutor	Descrição
CA (AAC)	Cabo de Alumínio (All Aluminium Conductor)
CAA (ACSR)	Cabo de Alumínio com Alma de Aço (Aluminium Conductor Steel Reinforced)
CAL (AAAC)	Cabo de Alumínio Liga (All Aluminium Alloy Conductor)
CALA (ACAR)	Cabo de Alumínio com Alma de Liga de Alumínio (Aluminium Conductor Alloy Reinforced)

Dependendo do tipo de cabo e das condições de carregamento, até três diferentes meios de contato podem induzir a fadiga por fretting. Os contatos: grampo/fio, na camada mais externa do cabo; fio/fio, entre os fios de alumínio e o contato entre fio de aço e fio de alumínio, no caso do CAA.

Devido ao atrito nas regiões de contato, o desgaste das superfícies dos fios de alumínio produz um pó a partir do material arrancado (Figura 3.5) que fica alojado entre os fios e na base do grampo de suspensão. As partículas desse pó quando em contato com o ar se oxidam, formando o óxido de alumínio (Al_2O_3), este possui cor escura, formato acicular e dureza maior que a dos fios. Azevedo et al. (2008) afirma que a configuração macroscópica da falha está ligada a amplitude de deslocamento imposta ao condutor e à quantidade de óxido de alumínio produzido pelo desgaste dos fios.



Figura 3.5 - Óxido de alumínio acumulado na superfície do grampo.

A Figura 3.6 mostra a imagem microscópica de uma falha no fio de um condutor do tipo CA, a quebra ocorreu após seis meses de operação do condutor. Nota-se no detalhe da imagem que a falha se inicia a partir de uma marca de fretting na superfície do fio. As marcas de praia indicam a direção de crescimento da falha até o ponto de súbita ruptura do fio devido a carga trativa no mesmo.

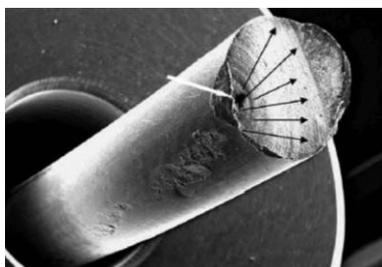


Figura 3.6 - Mecanismo de falha de fadiga por fretting (Boniardi, 2007).

A carga de esticamento aplicada sobre o cabo altera o perfil do contato entre os fios e destes com o grampo, influenciando nas zonas de fretting, na nucleação e no avanço das trincas nos fios, visto que a excitação cíclica, responsável pela formação das marcas de praia, é acentuada no que tange a tendência de arrancamento do material, contribuindo para a formação de uma superfície tortuosa (Fadel, 2010).

Apresentado o mecanismo de falha e a dimensão do problema em cabos condutores, cabe a seguir avaliar os critérios de projeto e manutenção empregados nas linhas, visando prevenir ou mensurar a ocorrência da falha.

3.3 Cálculo da Tensão Dinâmica em Condutores

De acordo com Rosa et al. (1974), a vida de um condutor tem uma relação inversa com o nível de esforços estáticos e dinâmicos. Quanto mais acentuados os esforços estáticos, tais como carga de aperto, esticamento e peso do cabo, menores devem ser os esforços dinâmicos aceitáveis para garantir um valor limite de tensão no componente.

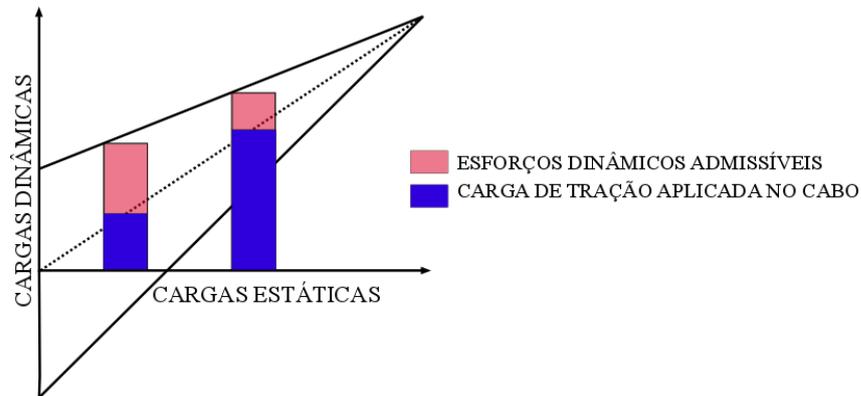


Figura 3.7 - Limite de tensão admissível no condutor, considerando esforços estáticos e dinâmicos.

Sendo assim, se faz necessário mensurar os esforços dinâmicos para estabelecer a vida do condutor. O cálculo da tensão dinâmica se baseia numa metodologia estabelecida pelo IEEE (1966) como modelo para a medição de vibrações nos cabos condutores. Tal metodologia estabelece relação entre a oscilação do condutor e a severidade da fadiga no mesmo. Este modelo fundamenta-se na fórmula de Poffenberger-Swart (1965) cujo a proposição primária do modelo foi feita por Isaachsen (1907).

3.4 Equação de Poffenberger-Swart (P-S)

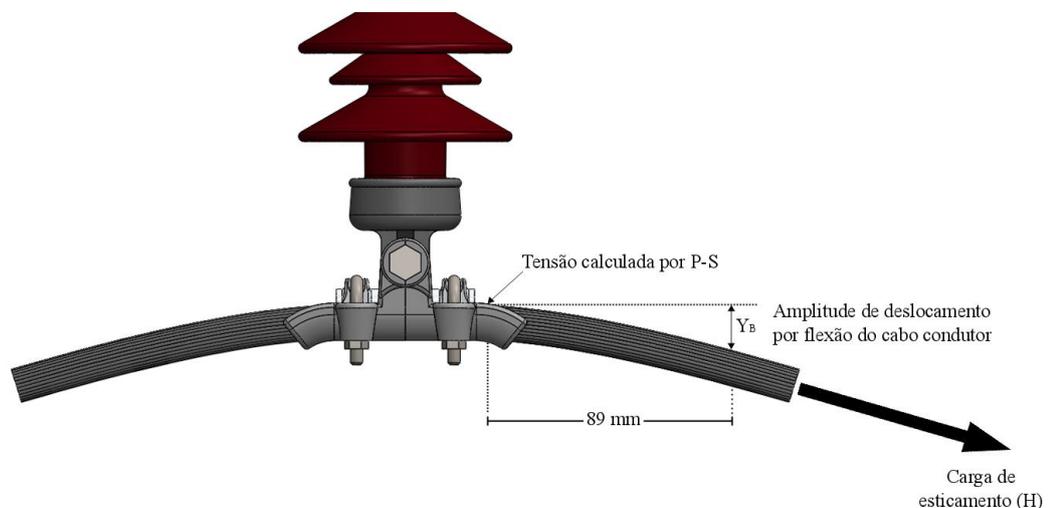


Figura 3.8 - Esquema de montagem cabo-grampo de suspensão.

O modelo teórico experimental proposto considera a região próxima ao ponto de restrição de movimento do cabo (Figura 3.8) como uma viga de Euler. O grau de tensão nominal em um fio da camada mais externa do condutor é calculado com base na amplitude de deslocamento vertical pico a pico do condutor (Y_B) em relação ao grampo de suspensão.

O valor da amplitude de deslocamento (Y_B) é medido a 89 mm (3,5 pol) do último ponto de contato entre o cabo e o grampo (UPC) (Figura 3.8). O valor da amplitude de tensão máxima de flexão é calculado pela equação 3.3, a seguir:

$$\sigma_a = K \cdot Y_B \quad 3.3$$

De maneira que σ_a é a faixa de tensão dinâmica (zero a pico), Y_B corresponde a amplitude de deslocamento (pico-pico), medida num ponto a 89 mm do UPC (ponto 89). O valor de K é calculado a partir da equação 3.4.

$$K = \frac{E_a \cdot d \cdot p^2}{4(e^{-px} - 1 + px)} \quad 3.4$$

Em que E_a e d são o módulo de elasticidade e diâmetro dos fios da camada mais externa do condutor, respectivamente. x representa a distância entre o UPC e o ponto de medição de Y_B , em geral, 89 mm. E p pode ser obtido a partir da equação 3.5.

$$p = \sqrt[2]{\frac{H}{EI}} \quad 3.5$$

H é a carga de esticamento do cabo na temperatura média durante a aquisição dos dados e EI é a rigidez a flexão do condutor, cujo o valor mínimo, normalmente empregado, pode ser obtido pela seguinte equação 3.6:

$$EI_{min} = n_a E_a \frac{\pi d_a^4}{64} + n_s E_s \frac{\pi d_s^4}{64} \quad 3.6$$

n_a , E_a e d_a representam respectivamente, a quantidade, o módulo de elasticidade e diâmetro (individual) dos fios de alumínio e n_s , E_s e d_s representam respectivamente, a quantidade, o módulo de elasticidade e diâmetro (individual) dos fios de aço.

Segundo Azevedo (2008), a utilização da equação 3.5 necessita cautela, pois a variação dinâmica da rigidez à flexão do condutor não é considerada. Destaca também que para pequenos níveis de amplitude de tensão não se pode considerar o deslizamento entre os fios, tomando o cabo como uma barra rígida (máxima rigidez). Em contrapartida, o aumento da amplitude de vibração induz a uma diminuição da rigidez do cabo (mínima rigidez), devido ao escorregamento entre os fios.

3.5 Metodologias de Estimativa de Vida de Fadiga para Linhas de Transmissão

Em virtude da complexidade do problema de fadiga em cabos, que abrange não somente as tensões cíclicas de fadiga, mas também o problema de fadiga por contato (fretting), ainda não há critério analítico aceitável para a representação do problema. A alternativa encontrada faz uso de dois tipos de informação: a quantificação da intensidade de vibração e a adoção de parâmetros de medida de resistência à fadiga da configuração de montagem cabo/grampo dentro da faixa de segurança contra a ocorrência de falhas.

As metodologias propostas partem de um mesmo princípio, cujo a deformação ou tensão no ponto 89 não pode ser superior a limites impostos. Tais limites variam de acordo com as metodologias, que serão apresentadas a seguir.

3.6 Medida da Intensidade de Vibração

Uma variedade de medidas padrão têm sido sugeridas para a quantificação da intensidade de vibração dos cabos, de maneira a garantir a resistência à fadiga dos mesmos, dentre elas destacam-se:

- Método da IEEE, limite de deformação (1966): Este método fundamenta-se na máxima deformação em flexão admissível do condutor.
- Limite de resistência EPRI (1979): o livro Orange Book, proposto pela EPRI, é usado por muitas empresas de distribuição de energia. A metodologia empregada neste livro considera que a tensão dinâmica aproxima-se do limite de resistência a fadiga do condutor, isso sugere que a quantidade de ciclos até a ruptura é elevada, de maneira a garantir longa vida ao condutor.
- Método CIGRÉ WG 22-04: o método da CIGRE propõe a quantificação do dano sofrido pelo condutor durante sua vida útil. Esta baseia-se na superposição de dois conjuntos de informações: as curvas S-N dos condutores, obtidas através de ensaios de laboratório e dados obtidos em campo para avaliar o dano sofrido pelo cabo devido a vibração.

Para a obtenção do dano sofrido pela linha utiliza-se um equipamento conhecido como vibrógrafo, este tem como função medir os níveis de amplitude de vibração (pico-pico) no ponto 89 mm e suas respectivas frequências pelo período de alguns meses.

Os dados de carregamento registrados pelo vibrógrafo são divididos em blocos com N_i ciclos para cada faixa de amplitude (Y_B). Através da fórmula de Poffenberger-Swart calcula-se a tensão σ_{a_i} a qual o cabo foi submetido de acordo com cada bloco de carregamento. Fazendo uso da curva S-N do cabo em análise, é possível determinar a quantidade de ciclos máxima suportada para um mesmo nível de tensão. A partir daí, aplica-se a regra de Miner para se obter a quantidade de vida já consumida do condutor durante o período de registro dos dados. Assume-se então, que o período de medição tem representatividade média das oscilações que o cabo sofrerá ao longo de sua vida e então torna-se possível extrapolar a quantidade de vida consumida ao longo dos anos e estimar o tempo remanescente de utilidade do condutor.

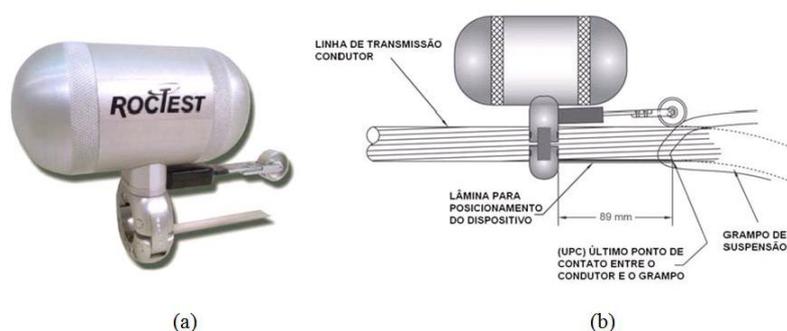


Figura 3.9 - (a) Vibrógrafo modelo Pavica (b) Esquema de montagem do equipamento na linha (Gomes, 2015).

Tendo em vista a dificuldade de obtenção dos parâmetros tensão e deformação em campo, a aplicação dos outros métodos não se mostra tão viável, além de não terem real representatividade do problema mecânico observado na região de falha (Hard, 1958 e Rawlings, 1959). Ainda, parâmetros como a geometria e material dos grampos, bem como as condições de montagem, podem influenciar de maneira significativa nos valores de tensão entre os casos, de maneira a causar grandes dispersões entre dadas amplitudes e níveis de tensão ou deflexão. Assim, o método proposto pela CIGRÉ é o mais utilizado para a obtenção de vida consumida de cabos em serviço.

A metodologia proposta pela CIGRÉ pode ser aplicada de duas maneiras distintas. Uma delas consiste na aplicação da curva padrão para condutores, chamada de Curva Limite de Segurança da CIGRÉ (CSBL). A segunda maneira utiliza-se da curva de Wöhler levantada em laboratório para a montagem cabo/grampo nas condições de ensaio mais próximas às reais possíveis.

A curva padrão adotada pela CIGRE possui resultados extremamente conservativos, atingindo valores de vida até 8 vezes menores que as vidas experimentadas em laboratório. Tal fato justifica economicamente a realização de ensaios em laboratório para as diferentes montagens cabo/grampo.

De acordo com o relatório da CIGRE (2006): “Apesar das limitações de cada critério proposto como base para a determinação da vida em fadiga dos cabos condutores, os critérios apresentados a seguir são mais frequentemente utilizados para estabelecer a severidade da vibração em linhas de transmissão, e, portanto adotados como regra de projeto nas principais instalações elétricas em todo o mundo, bem como os percentuais de utilização”.

3.7 Limites de Resistência à Fadiga de Cabos Condutores

Conforme publicações da CIGRÉ (1979 e 1995), mencionadas por Oliveira (2003), a vida útil considerada economicamente e tecnicamente viável para um condutor é de aproximadamente trinta anos.

Segundo a CIGRÉ, há duas abordagens principais para a definição da vida em fadiga de condutores aéreos (CIGRE, 2006):

3.7.1 Abordagem do Dano Acumulativo (Cumulative Damage Approach)

Tem como fundamento o método apresentado pela CIGRÉ, em que o dano causado pela fadiga ocorre de maneira gradativa e progressiva a cada ciclo de vibração durante o tempo de uso do condutor. Utiliza-se a teoria de Miner, supondo que a acumulação de dano é linear. O uso desta teoria implica em considerações probabilísticas, tanto em relação a periodicidade e intensidade dos ventos que acarretam na vibração do cabo, quanto às curvas de resistência à fadiga do condutor. Desta maneira tensões seguras são calculadas com base na definição de vida útil satisfatória do condutor.

3.7.2 Abordagem do Limite de Resistência (Endurance Limit Approach)

Esta tem como fundamento os métodos da EPRI e IEEE, de maneira que se assume que a preservação dos níveis de vibração abaixo de determinados limites assegura vida infinita ao condutor, ou seja, as tensões seguras são calculadas de maneira que seus limites não sejam excedidos.

Ambas as abordagens citadas são aceitas no meio técnico-científico, vale ressaltar que a abordagem do Dano Acumulativo tolera a variação da vibração do cabo ao longo de sua vida. Enquanto que a abordagem do Limite de Resistência pode ser considerada um caso específico da abordagem do Dano Acumulativo, em que a vida útil do condutor tende ao infinito, caracterizando esta abordagem como conservativa.

3.7.3 A Curva Limite de Segurança da Cigré

A metodologia idealizada pela CIGRÉ (1985) foi proposta com base numa curva sugerida pelo Comitê de Estudos de Linhas Aéreas (SC 22), chamada de CIGRÉ's Safe Border Line (CSBL). Tal curva foi levantada a partir da compilação de uma série de resultados de ensaios de fadiga, realizados em vários laboratórios do mundo utilizando um EDS (*Every Day Stress*) de 18%. Foram feitos ensaios em fios de alumínio, alumínio-liga, condutores de alumínio e de ligas de alumínio.

Com base nessas curvas, a CSBL foi construída de modo a permanecer abaixo dos resultados dos ensaios compilados, sendo esta uma estimativa bastante conservadora da vida útil dos condutores. A Figura 3.10 mostra a CSBL, assim como as outras levantadas pela CIGRÉ. À direita é possível ver a discriminação das curvas, as curvas superiores referem-se aos ensaios dos fios unicamente e as curvas inferiores referem-se aos vários cabos.

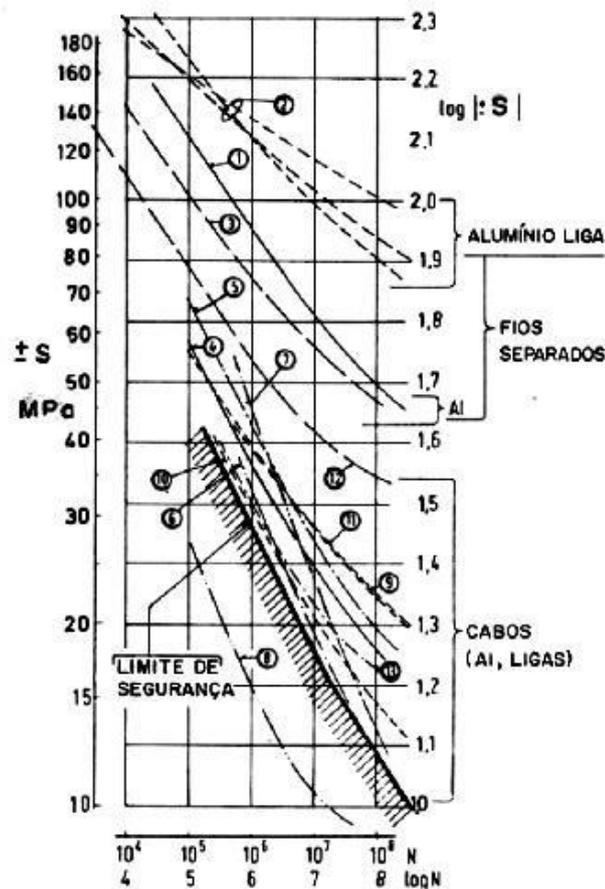


Figura 3.10 - Curva Safe Border Line e outras curvas compiladas pela CIGRÉ (CIGRÉ, 2003 - modificado).

A CSBL é representada pela equação a seguir (relação de Basquin):

$$\sigma_a = AN^b$$

3.7

Em que σ_a correspondente a tensão dinâmica em MPa, N é a quantidade de ciclos de vida e A e b são constantes que podem ser consultadas na Tabela 3.3. Observa-se na tabela que os valores das constantes são separados em grupos de cabos com uma ou mais camadas compostas de fios de alumínio. A tabela Tabela 3.3 mostra que a equação da CSBL para os cabos CAL 900, Orchid e Tern é definida como:

$$\sigma_a = 450N^{-0,2} \quad 3.8$$

Tabela 3.3 - Constantes da curva Limite de Segurança (CSBL). (CIGRÉ, 1985)

Nº de camadas de fios de alumínio do condutor	$N < 2 \cdot 10^7$		$N \geq 2 \cdot 10^7$	
	A	b	A	b
1	730	-0,2	430	-0,168
> 1	450	-0,2	263	-0,168

O método da CIGRÉ foi utilizado na estimativa de vida dos cabos propostos neste trabalho. As curvas S-N levantadas a partir dos dados obtidos em laboratório serão comparadas e análise crítica/comparativa dos resultados será feita.

3.8 Critério de Projeto H/w

O parâmetro H/w tem se mostrado mais adequado em relação ao EDS (Everyday Stress), parâmetro considerado adequado pela CIGRÉ até meados de 2000, para aplicação em projetos de linhas de transmissão. H é a carga de tração do condutor na temperatura média do mês mais frio do ano e w é o peso por unidade de comprimento do condutor. O estabelecimento das tensões de tração estática em condutores aéreos em fase de projeto é fundamental por vários fatores. Em condições climáticas adversas, os limites máximos de tensão não podem ser excedidos pela linha de transmissão. Em contrapartida, a altura do vão livre deve estar contida dentro da faixa de segurança, mesmo em altas temperatura, quando a dilatação térmica se torna um fator de influência na dimensão da catenária da linha. Ademais, a ocorrência de vibrações eólicas prejudiciais está profundamente ligada à tensão de tração.

O parâmetro EDS (*Every Day Stress*), publicado por Zetterholm (1960), é amplamente empregado a mais de quarenta anos em projeto de linhas de transmissão. Porém, pesquisas mostram que os valores recomendados de EDS não são em tal grau confiáveis e falhas em condutores ainda persistem (CIGRÉ, 2005). Compreende-se que alguns fatores não são abrangidos pelo conceito de EDS.

O parâmetro H/w , também chamado de constante de catenária, apresenta uma série de vantagens como critério guia em relação ao estudo de fadiga em cabos condutores se comparado ao EDS. Apesar de ainda não representar a solução definitiva para este estudo, o H/w abrange mais informações para a comparação de vida entre os diferentes condutores. Abaixo são explicitados fenômenos importantes em que o H/w está inserido:

- O H/w relaciona a influência da energia induzida pelo vento com o diâmetro do condutor. A máxima potência ($P_{máx}$) que pode ser transmitida pela corrente de ar ao condutor é expressa pela seguinte equação:

$$P_{máx} = \frac{1}{2} w V_x \sqrt{\frac{H}{w}} \quad 3.9$$

em que V_x é a velocidade do vento.

- O H/w pode ser escrito em função de áreas (A_{al} , $A_{aço}$), tensões ($S_{m,al}$, $S_{m,aço}$) e densidades (ρ_{al} , $\rho_{aço}$) dos fios de alumínio e de aço, respectivamente.

$$\frac{H}{w} = \frac{A_{al} S_{al} + A_{aço} S_{aço}}{g(A_{al} \rho_{al} + A_{aço} \rho_{aço})} \quad 3.10$$

- Como provado por Fadel et al. (2010), a tensão de tração estática no condutor, relacionada à H/w , está ligada a vida em fadiga do cabo.
- O auto-amortecimento pode representar uma das principais formas de dissipação de energia de vibração do condutor. À medida que se aumenta a carga de tração (H), ocorre diminuição no escorregamento dos fios. Como consequência, há a redução do auto-amortecimento do cabo, logo, afetando a vida em fadiga do mesmo.
- O H/w também passa informações a respeito da flecha de catenária do condutor em suspensão. Para um mesmo valor de H/w todos os condutores terão a mesma flecha, dada pela equação:

$$s = \frac{H}{w} \left[\cosh\left(\frac{L w}{2 H}\right) - 1 \right] \quad 3.11$$

s é a expressão da flecha e L corresponde ao comprimento do vão.

A partir dos tópicos apresentados acima, nota-se que o parâmetro H/w é mais adequado como referência no estudo de vida útil em condutores do tipo CAA, CA e CAL, se comparado ao EDS.

A atuação da turbulência eólica nas amplitudes de vibração do condutor é outro fator não abrangido pelo EDS. Hoje, compreende-se que a turbulência está relacionada à cobertura da superfície e não ao relevo como suposto pelo critério EDS. Isto é, a concentração de objetos de médio e pequeno porte no solo, tais como árvores e prédios, tende a causar turbulência no escoamento do vento, ao contrário de elementos da topografia do terreno, como colinas e montanhas, que induzem a diminuição da intensidade de turbulência (CIGRÉ, 2005). Ventos com escoamento predominantemente laminar induzem a acentuadas oscilações nos condutores. O critério de projeto H/w é definido considerando o tipo de terreno em que será instalada a linha de transmissão, conforme Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Valores de H/w para diferentes categorias de terreno (CIGRÉ, 2005).

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

Em terrenos que se enquadram na categoria A emprega-se valor de H/w mais conservativo, a carga de tração deve ser menor para proporcionar maior autoamortecimento ao condutor. Terrenos da categoria D suportam maior carga de tração nos cabos, devido a menor intensidade de vibração gerada pelo vento, por isso um valor maior de H/w é admitido.

Segundo Claren (1978), os diferentes tipos de condutores (CA, CAA, CAL, CALA) devem apresentar mesmos valores de resistência à fadiga quando sujeitos ao mesmo valor de H/w . Tal afirmação parte da condição de razão constante (3:1) entre os módulos de elasticidade e massa específica do alumínio e aço que constituem os cabos. Além do mais, o parâmetro pode ser definido como uma constante multiplicada pela tensão atuante no alumínio S_{al} , a partir da equação 3.10. A equação 3.12 explicita tal relação:

$$S_{al} \cong k \frac{H}{w} \tag{3.12}$$

Considerando $S_s = 3S_{al}$ e $\rho_s = 3\rho_{al}$, na equação 3.10, evidencia-se que o parâmetro H/w independe da quantidade de aço no condutor. Tais considerações, em princípio, são efetivamente seguras para aplicação em projeto de linhas de transmissão para diferentes condutores.

Contudo, Barret & Motils (2001) afirmam que o parâmetro H/w se mostra ineficiente na proposta de se manter constante a tensão do alumínio para diferentes tipos de condutores. A proposição inicial do H/w que os módulos de elasticidade e massas específicas possuem razão de proporção constante (3:1) não leva em consideração efeitos de temperatura e deformações permanentes nos materiais dos condutores.

A diferença entre os coeficientes de dilatação térmica do aço e alumínio provoca comportamentos distintos destes materiais em determinadas faixas de temperatura. Na temperatura média de -5°C a tensão do aço no condutor equivale a cerca de 2,83 vezes a tensão do alumínio enquanto que em temperatura ambiente a tensão do aço atinge valores até 4,7 vezes maior que a tensão do alumínio. Com o decréscimo da temperatura o alumínio sofre contração até duas vezes mais rápido que o aço e as tensões variam de maneira proporcional (Barret & Motils, 2001).

Em suma, segundo Barret & Motils (2001), o parâmetro H/w se mostra acurado apenas em certas faixas de temperatura. Para elevadas tensões no alumínio é necessária baixa temperatura de operação para que o H/w seja válido. A Figura 3.11 ilustra a variação do parâmetro em função do tipo de condutor e temperatura.

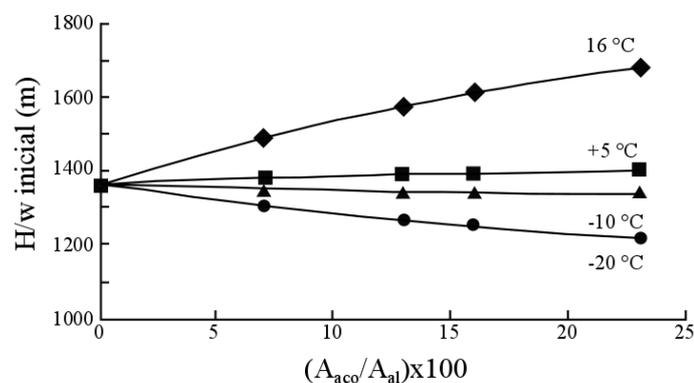


Figura 3.11 - H/w em função da razão de área transversal dos materiais do condutor para variadas temperaturas (Barret & Motils, 2001).

Salvo as restrições, o parâmetro H/w representa um dos critérios de projeto mais aceitáveis e utilizados dentre as alternativas acessíveis, atualmente. Por isso, foco na análise do H/w e seus efeitos sobre o comportamento da vida em fadiga de condutores aéreos foi dado no presente trabalho.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve a bancada de ensaios utilizada e o programa experimental empregado. O programa foi subdividido em duas partes: o levantamento da curva de vida (S-N) da composição cabo/grampo, utilizando o grampo monoarticulado e os condutores Orchid, Tern e CAL 900 para os mesmos níveis de H/w e o emprego da fórmula de Poffenberger-Swart (P-S) para ratificação das amplitudes de tensão no condutor, utilizando a extensometria.

É abrangido por esse capítulo: os objetivos, planejamento e metodologia dos testes a serem realizados. Terminada a descrição da bancada de ensaios, os materiais utilizados nos experimentos serão explanados, seguido do detalhamento de cada etapa do procedimento experimental e montagem da amostra.

4.1 Descrição da Bancada de Ensaios de Cabos Condutores

A Figura 4.1 ilustra a disposição da bancada de ensaios utilizada. O comprimento total do vão é de 46,8 m, sendo dividido em dois sub-vãos: vão ativo e vão passivo. O vão ativo determina o comprimento do cabo ensaiado e é limitado pelo centro da roldana do bloco fixo e centro do grampo de suspensão, localizado no bloco móvel. O comprimento deste vão pode variar de 31 a 41 m, dependendo da posição do bloco móvel. Nesse vão se mede o deslocamento Y_B . O vão passivo tem como única utilidade a fixação do condutor.

Visando a rigidez da montagem os todos os blocos mostrados no desenho esquemático são feitos de concreto armado maciço. O condutor é arranjado sobre dois pontos de apoio que funcionam como pontos de articulação, são eles: o grampo de suspensão e a roldana (bloco fixo). As extremidades do condutor são fixadas aos grampos de ancoragem para a aplicação da carga de esticamento.

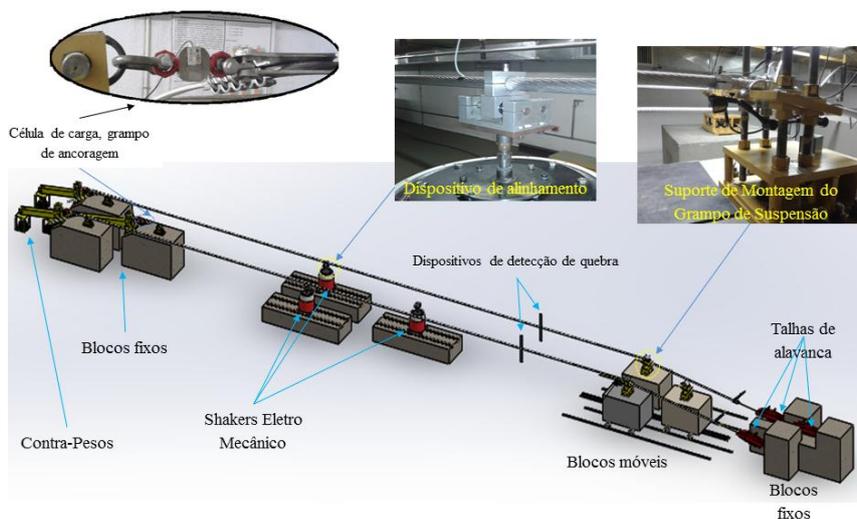


Figura 4.1 - Desenho esquemático da configuração das bancadas de ensaios.

O grampo de ancoragem do lado esquerdo da figura é conectado ao bloco fixo 1 através de uma talha de alavanca (Figura 4.2), que permite submeter o condutor a certa carga de pré-esticamento para se ajustar a altura do braço de alavanca, na extremidade oposta, evitando que este fique muito baixo ao final do processo de montagem.



Figura 4.2 - Talha de alavanca ancorada ao bloco fixo 1.

No bloco fixo 3 é aplicada a carga na amostra por meio do braço de alavanca (Figura 4.3). Para o monitoramento da carga de esticamento, uma célula de carga é posicionada entre o braço de alavanca e o grampo de ancoragem, permitindo o controle da carga durante o ensaio.



(a)



(b)

Figura 4.3 – (a) Grampo de ancoragem conectado à célula de carga e (b) braço de alavanca.

Os blocos móveis foram edificados sobre espessas chapas de aço fixadas sobre dois eixos dotados de rolamentos nas extremidades. Os trilhos são fixados no piso do laboratório para permitir a variação do comprimento do vão ativo por meio da movimentação do bloco móvel (Figura 4.4).



Figura 4.4 - Bloco móvel posicionado sobre eixos com rolamentos na extremidade.

Os blocos fixos, conforme mostrado na Figura 4.5, servem como suporte para o shaker eletromecânico.



Figura 4.5 - Blocos fixos para suporte do shaker eletromecânico.

4.2 Materiais

4.2.1 Cabos Condutores

O alumínio é empregado em cabos condutores de energia elétrica especialmente devido ao seu baixo custo em relação a outros metais condutores e suas características elétricas e mecânicas. Os cabos condutores analisados no trabalho são compostos pelos seguintes materiais: alumínio liga (CAL 900), alumínio puro (Orchid) e alumínio com alma de aço (Tern).

O alumínio puro Al 1350-H19, presente nos cabos Orchid e Tern, não possui tratamento térmico e passa por um estrito controle de impurezas, já que estas podem diminuir consideravelmente a condutividade do material. Como resultado do controle, condutividade elétrica de 60% IACS (International Annealed Copper Standard) é atingida. O Al 1350-H19 apresenta alta resistência à corrosão, boa conformabilidade boa soldabilidade e boa resposta à anodização. Como é sabido, esta liga possui alta ductilidade, por isso, o material sofre um processo de têmpera de encruamento (H19).

O alumínio liga Al 6201-T81 constitui o cabo CAL 900. Esta série do alumínio possui magnésio e silício como os principais elementos de liga, sendo responsáveis pelo endurecimento antes de se atingir o equilíbrio no envelhecimento do material. A condutividade elétrica do Al 6201-T81 é igual à 52% IACS, inferior aos 60% da liga Al 1350-H19. Em contrapartida, a liga Al 6201-T81 apresenta resistência mecânica e resistência à corrosão maiores do que a liga Al 1350-H19. Desta maneira, condutores com esta liga são usualmente empregados em linhas de transmissão próximas ao mar ou em ambientes de atmosfera agressiva. A liga Al 6201-T81 passa por tratamento de solubilização, trabalho à frio e envelhecimento artificial para se atingir os devidos graus de resistência (T-81). As Tabelas Tabela 4.1 e Tabela 4.2 apresentam a composição química e propriedades mecânicas das ligas Al 1350-H19 e Al 6201-T81, respectivamente.

Tabela 4.1 - Composição química das ligas Al 1350-H19 e Al 6201-T81.

Liga	Al	B	Cr	Cu	Ga	Fe	Mn	Mg	Si	V+Ti	Zn	Total (outros)
Al 1350-H19	≥ 99,5	≤ 0,05	≤ 0,01	≤ 0,05	≤ 0,03	≤ 0,4	≤ 0,01	–	≤ 0,1	≥ 0,02	≤ 0,05	≤ 0,1
Al 6201-T81	97,3 – 98,9	≤ 0,06	≤ 0,03	≤ 0,1	–	≤ 0,5	≤ 0,03	0,6 – 0,9	0,5 – 0,9	–	≤ 0,1	≤ 0,1

Tabela 4.2 - propriedades mecânicas das ligas Al 1350-H19 e Al 6201-T81.

Liga	Módulo Elasticidade (GPa)	Limite de Resistência			Dureza (HBn)	Deformação de ruptura (%)
		Limite	Tensão	Fadiga		
		Escoamento σ_y (MPa)	Última σ_{rt} (MPa)	σ_e (MPa)		
Al 1350-H19	68,9	186	165	48,3	50	≥ 1,7
Al 6201-T81	69,0	330	310	105	88	6,0

Os condutores possuem encordoado concêntrico dos fios e direção de torção alternada em cada camada. As várias camadas podem mover entre si quando submetidas à vibração. As cargas são distribuídas por todos os fios do condutor e cada fio deforma-se na direção de seu respectivo enrolamento, como exemplificado na Figura 4.6. A Tabela 4.3 apresenta as propriedades geométricas principais dos condutores abordados no trabalho.

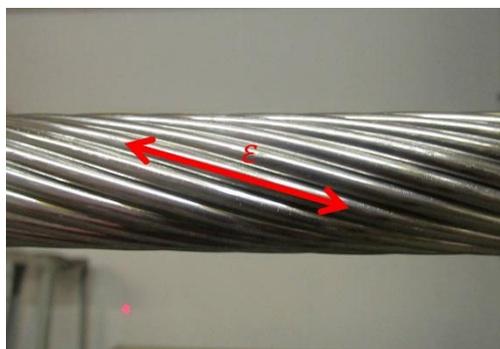


Figura 4.6 - Deformação longitudinal do fio (cabo Orchid).

Tabela 4.3 – Propriedades geométricas dos condutores.

Condutor	Bitola (<i>kcmil</i>)	Seção Transversal (<i>mm</i> ²)	Número de Fios	Diâmetro (<i>mm</i>)	Diâmetro Nominal do Condutor (<i>mm</i>)	Peso Nominal (<i>kg/km</i>)	Carga de Ruptura (<i>kgf</i>)
CAL 900	900	456,26	37	3,962	27,74	1251,9	13421
Orchid	636,0	322,24	37	3,330	23,31	888,4	5143
Tern	795,0	402,82 ¹	45 ¹	3,376 ¹	6,75 ⁴	1116,0 ¹	9807
		430,65 ²	7 ³	2,250 ³	27,01 ²	1333,4 ²	

¹ Alumínio

² Total

³ Aço

⁴ Alma de aço

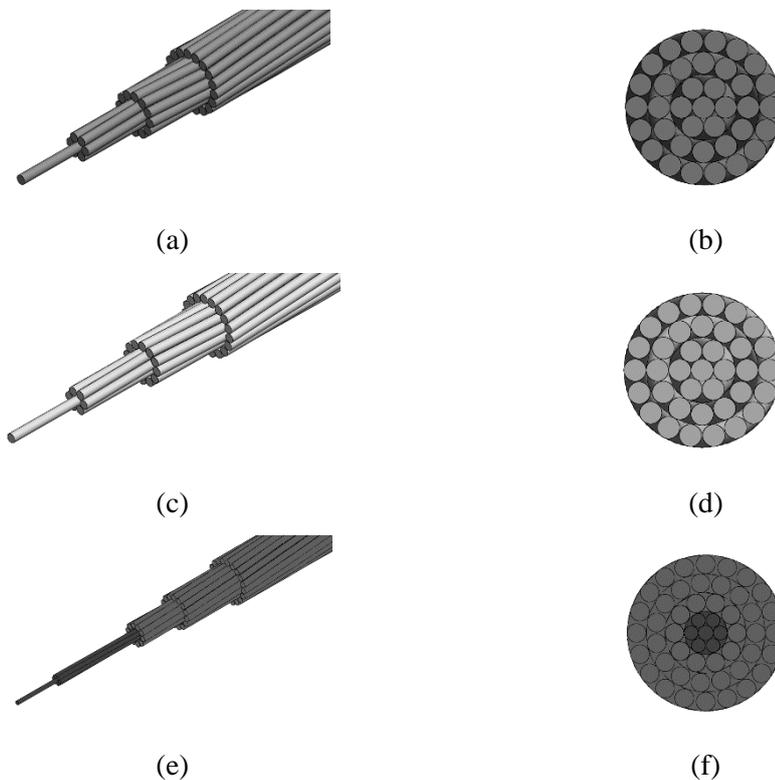


Figura 4.7 – Modelos dos cabos condutores CAL 900 (a, b); Orchid (c, d); e Tern (e, f)

4.2.2 Grampo de Suspensão

Para se evitar a introdução de novos parâmetros que podem modificar a vida dos componentes a serem analisados nos ensaios de fadiga é importante a padronização das condições dos ensaios. Por isso adotou-se como padrão nos mesmos o uso do grampo monoarticulado, fornecido pela empresa Forjasul.

O grampo é composto por duas partes basicamente, o corpo e a tampa, ambos são fabricados em liga de alumínio de alta resistência mecânica, não magnética e boa resistência à corrosão, adicionando elementos ferrosos de aço carbono e zincado por imersão a quente conforme a NBR. Tal componente possui resistência de 60% da carga de ruptura do condutor de maior bitola suportada pelo mesmo. Possui também, superfície suave e uniforme, com boca de saída de no máximo 20°, características importantes para se preservar a integridade do cabo. O grampo utilizado nos ensaios é ideal para aplicação em conjunto com condutores do tipo CA (cabo de alumínio) e do tipo CAA (cabo de alumínio com alma de aço) com diâmetros entre 17 e 29 mm. A Figura 4.8 ilustra a geometria e composição elementar do grampo monoarticulado.



Figura 4.8 - Grampo monoarticulado utilizado nos ensaios.

4.2.3 Grampo de Ancoragem

O grampo de ancoragem é o componente de fixação das extremidades do condutor. Este faz a conexão da célula de carga com uma das extremidades do cabo (Figura 4.9) e a conexão da talha de alavanca com a outra. O modelo utilizado nos ensaios, fornecido pela Forjasul, é fabricado em liga de alumínio não magnética isenta de cobre e elevada resistência mecânica. A Tabela 4.4 mostra algumas especificações técnicas do grampo.



Figura 4.9 - Montagem cabo/grampo de ancoragem/célula de carga.

Tabela 4.4 - Especificações técnicas do grampo de ancoragem.

Modelo	Diâmetro máximo (mm)	Diâmetro mínimo (mm)	Carga de Ruptura (kgf)	Torque máximo (Nm)	Massa (kg)
55121/003	31	23	13,5	90	5,8

4.2.4 Extensômetro

Em cada ensaio são utilizados três extensômetros de resistência elétrica (ERE) adequados para aplicação em alumínio, modelo unidirecional e forma tradicional da marca *Excel Sensores*. Os extensômetros, possuem fator de sensibilidade de 2,13 e são do tipo PA-03-120BA-350L. A Figura 4.10 apresenta codificação dos extensômetros fabricados pela empresa *Excel*.



Figura 4.10 - Codificação utilizada para os extensômetros da marca Excel.

O aquisitor de dados foi configurado para a utilização de $1/4$ de ponte, com disposição de três fios, compensação interna em 350 Ω e alimentação estabilizadas de 7,5 VCC.

4.3 Programa Experimental para Levantamento das Curvas De Wöhler

O levantamento das curvas de Wöhler tem como propósito precisar parâmetros métricos que possibilitam a determinação da durabilidade da montagem cabo/grampo considerando os fenômenos que afetam a vida deste componente, como a fadiga e o fretting. A realização dos ensaios utilizando diferentes valores de H/w é imprescindível para a análise desse critério, bem como para o aperfeiçoamento desse parâmetro em projetos de linhas de transmissão e também para a comparação com o critério EDS.

4.3.1 Metodologia

O método utilizado nos ensaios de fadiga em cabos é feito de maneira similar àquele aplicado em corpos de prova padrão. Para o levantamento dos pontos de cada curva, testes de flexão cíclica são realizados de forma a manter constante a amplitude de tensão durante o seu andamento. Monitoramento da ocorrência de ruptura dos fios é feita e relacionada com o número de ciclos decorrentes até o momento de cada ruptura.

Para a validação da pesquisa, a padronização dos ensaios é essencial, visto que além de fornecer resultados confiáveis, ainda serve para que o aperfeiçoamento de projetos, operação e manutenção das linhas de transmissão seja possível a partir das curvas padronizadas. Ambicionando tal padronização os ensaios são executados de acordo com as recomendações da CIGRÉ (1985), EPRI (1979) e IEEE (1978). A CIGRÉ (1985) sugere que o ensaio tenha como critério de parada a quebra de 3 fios ou 10% do total de fios de alumínio do condutor, considera-se o maior valor das duas opções. Para os condutores testados, assumiu-se o critério de parada: 4 fios para o CAL 900, 4 fios para o Orchid e 5 fios para Tern.

Tal quantidade de quebras ainda permite a transmissão de energia elétrica dentro da tolerância estabelecida, não sendo este valor de critério um fator de inutilização total da linha em aplicação real e não havendo o risco de falha mecânica catastrófica do cabo.

Variando-se a amplitude de deslocamento (equivalente à amplitude de tensão) em cada ensaio e anotando a quantidade de ciclos ocorridos até a falha torna-se possível o esboço da curva que correlaciona os níveis de tensão às quantidades de ciclos experimentadas pelo condutor, a curva S-N.

4.3.2 Definição de Parâmetros Controlados no Ensaio

A determinação dos parâmetros que possuem grande influência durante o ensaio na dispersão dos resultados é obtida a partir da equação que correlaciona a tensão ao número de ciclos até a ocorrência da falha, a relação de Basquin (equação 3.7).

Inserindo os parâmetros da equação de Poffenberger-Swart (P-S), equações 3.3 a 3.5, na equação 3.7 e isolando a quantidade de ciclos N , obtém-se a seguinte expressão:

$$N = \left[\frac{E_a d_a H}{4 \left(e^{-\sqrt{\frac{H}{EI_{min}}} x} - 1 + \sqrt{\frac{H}{EI_{min}}} x \right) A(EI_{min})} Y_B \right]^{-1/b} \quad 4.1$$

De maneira que o cálculo da vida do condutor é realizado considerando a rigidez mínima do mesmo, ou seja, como se os fios se movessem de forma independente entre si. O EI_{min} é calculado de acordo com a equação 3.6.

Avaliando a equação 4.1, infere-se que a vida avaliada através da utilização de P-S depende dos seguintes fatores: *i*) os módulos de elasticidade nominais dos fios da camada externa e da alma (em caso de alma de aço), E_a e E_s , *ii*) os diâmetros dos fios de alumínio da camada externa e da alma (em caso de alma de aço), *iii*) a carga de esticamento (H), *v*) a localização do transdutor de amplitude de deslocamento do cabo (x) e *vi*) o deslocamento do ponto 89 (Y_B). Dos fatores acima citados somente os três últimos podem ser controlados durante o ensaio: H , x e Y_B .

Desta maneira, de acordo com Fadel (2010) e Henriques (2006), os seguintes parâmetros são determinados previamente ao início do ensaio:

- O ângulo de mergulho (ângulo de inclinação do grampo em relação a horizontal): tal parâmetro é função de diversos outros como a tensão mecânica diária (EDS), densidade do condutor, comprimento do vão e flecha admissível. Nos ensaios adotou-se o ângulo de mergulho de 10°.

Nos pontos de suspensão do condutor em linha, devido ao seu peso e rigidez, tensões de flexão bastante elevadas surgem. Casos em que a curvatura inferior da calha do grampo não adere bem à curvatura do cabo com a carga de esticamento aplicada, o esmagamento de fios pode ocorrer, pois a região de apoio do condutor fica bastante reduzida (Fuchs, 1992).

- Torque de aperto dos parafusos de fixação do condutor no grampo de suspensão: este torque tem a finalidade de impedir o escorregamento do cabo em relação ao grampo, como consequência uma carga compressiva é adicionada aos fios do cabo podendo causar amassamento dos fios e imaturo rompimento dos mesmos durante sua vida útil a depender do nível de carga aplicado ao parafuso. Para os ensaios de laboratório a carga de aperto adotada foi de 50 Nm, valor menor que o indicado pelo fabricante (60 Nm), pois no passado observou-se demasiado amassamento dos fios.
- Carga de esticamento: quanto maior a carga de esticamento no condutor menor será sua vida em fadiga, pois ocorrerá um aumento da tensão média e consequente aumento da tensão máxima no cabo.
- Amplitude de deslocamento (Y_B): tal parâmetro correlaciona-se com a amplitude de tensão que gera a falha sobre o cabo. Esta variável é dinamicamente controlada durante o ensaio, Y_B é coletado no ponto 89, tal como estabelece a fórmula de Poffenberger-Swart.

Para o levantamento da curva S-N de cada cabo nove pontos (ensaios) são necessários. Três amplitudes de tensão nominais são definidas, e em seguida são convertidas para as respectivas amplitudes de deslocamento em cada tipo de cabo condutor.

A escolha das combinações de carga de esticamento (H) e amplitudes de tensão nominais (σ_{p-s}) para estes ensaios foi restringida por dois motivos: *i*) a duração de cada ensaio não deve se estender por mais de uma semana, visando a viabilidade do ensaio, *ii*) as cargas atuantes no condutor e nos equipamentos não podem ultrapassar seus limites de operação. Além disso, a escolha do valor H/w é feita de maneira que se possa comparar os resultados dos cabos condutores com a base de dados de resultados que o LabCabos já possui para outros tipos de condutores. A Tabela 4.5 apresenta os valores dos parâmetros de ensaio selecionados para o levantamento das curvas S-N.

Tabela 4.5 - Parâmetros adotados para o ensaio

$H/w = 2144 \text{ m}$							
Condutor	EDS (%)	K (MPa/mm)	H (kgf)	Amplitude de deslocamento (Y_B) (mm)			
				23,7 (MPa)	26,8 (Mpa)	28,22 (MPa)	31,35 (MPa)
CAL 900	20,00	34,83	2684	0,68	-	0,81	0,9

Orchid	37,00	32,49	1903	-	0,82	0,87	0,96
Tern	28,70	33,66	2873	-	0,8	0,84	0,93

4.4 Procedimento Experimental

O levantamento das curvas do cabo CAL 900, Orchid e Tern deverá seguir as recomendações da CIGRÉ (1985), EPRI (1979) e IEEE (1978).

Os corpos de prova foram retirados diretamente das bobinas do cabo condutor, armazenada sob condições controladas, descartando-se sempre o comprimento da primeira espira e evitando torções e dobramentos excessivos. Os mínimos cuidados foram adotados para que a superfície do cabo não sofresse nenhum tipo de dano causado por eventuais contatos com outros materiais mais tenazes (Figura 4.11).



(a)



(b)

Figura 4.11 - a) Pano sobre shaker, b) lona de borracha sobre suporte do bloco móvel.

4.4.1 Montagem do Corpo de Prova

Os seguintes procedimentos são adotados para a montagem do ensaio:

- I. O tracionamento do condutor a ser ensaiado utiliza-se de polias ao longo do vão para o suporte do mesmo durante a montagem do ensaio, tal como ilustrado pela Figura 4.12.



Figura 4.12 - Conductor estendido apoiado nas polias ao longo do vão.

- II. O condutor é desenrolado da bobina, localizada atrás do bloco fixo 1 (Figura 4.13), e estendido ao longo do vão sobre as polias.



Figura 4.13 - Bobina do Orchid.

- III. Em seguida o grampo de suspensão é colocado em sua posição no bloco móvel (Figura 4.14).



Figura 4.14 - Grampo de suspensão posicionado.

- IV. Fixar ambas as extremidades do condutor nos grampos de ancoragem, é importante que o aperto se dê de maneira gradual e cruzada para se evitar o empenamento destes componentes (Figura 4.15).



(a)

(b)

Figura 4.15 - Grampos de ancoragem conectados à: (a) célula de carga e (b) tifor.

- V. Aplicar pré-carga (50% da carga de ensaio) utilizando o tifor (Figura 4.16);



Figura 4.16 - Aplicação de pré-carga usando tifor.

- VI. Abaixar a gaiola de contrapeso (item IV) para se atingir a carga de esticamento final utilizada no ensaio (Figura 4.17), eventual ajuste de cargas da gaiola se faz necessário;

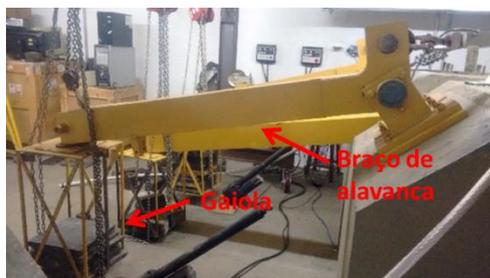


Figura 4.17 – Gaiola e Braço de alavanca.

- VII. Retirar as polias de suporte distribuídas ao longo do vão (Figura 4.18);



Figura 4.18 - Polias ao longo do vão.

- VIII. Terminado o processo de ancoragem do cabo, espera-se 6 horas para acomodação por fluência (creep) do mesmo antes que se inicie o procedimento instrumentação do ensaio.

4.4.2 Instrumentação do Ensaio

Nesta seção será explicado o processo de instrumentação do ensaio que constitui-se de extensometria e posicionamento dos lasers de deslocamento e acelerômetros.

- I. Aplica-se a carga de aperto ao grampo de suspensão com torque de 50 Nm sobre as porcas;



Figura 4.19 - Fixação do grampo de suspensão.

- II. Localiza-se com uma régua a região diametralmente oposta ao último ponto de contato entre o condutor e o grampo de suspensão, bem como os três fios mais superiores nesse ponto.

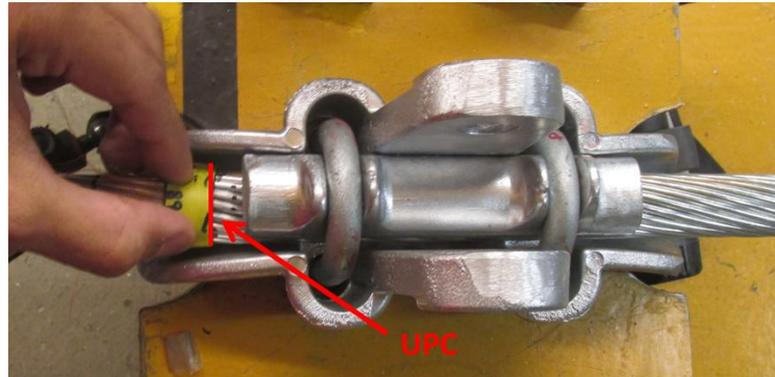


Figura 4.20 - Posição do último ponto de contato e fios de topo.

- III. A superfície da região onde serão colados os extensômetros é lixada para se aumentar a aderência entre o condutor e o strain gauge.

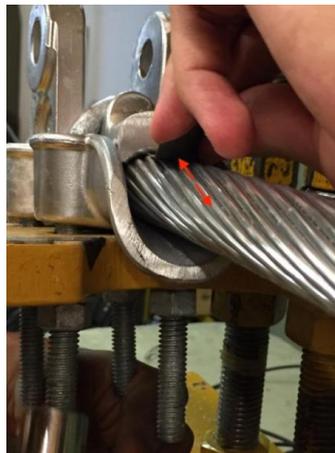


Figura 4.21 - Lixamento da superfície para colagem do extensômetro.

- IV. Limpa-se a superfície onde os extensômetros serão colados usando álcool isopropílico e hastes flexíveis.



Figura 4.22 - Limpeza do local onde serão colados os extensômetros.

- V. Cola-se o extensômetro sobre uma fita adesiva, para auxiliar no manuseio e colagem do mesmo no fio.



Figura 4.23 - Extensômetro sobre fita adesiva.

- VI. Confere-se com um resistômetro se cada extensômetro apresenta resistência adequada para seu funcionamento ($350 \Omega \pm 5\%$).
- VII. Em seguida aplica-se uma cola especial sobre a região predeterminada do fio e cola-se o extensômetro.



Figura 4.24 - Colocação da cola no extensômetro.

- VIII. Com o auxílio das hastes flexíveis o extensômetro é mantido pressionado contra o fio até que sua fixação esteja completa, cerca de 1 minuto. Em seguida verifica-se se houve a correta aderência deste ao fio.



Figura 4.25 - Colagem do extensômetro.

- IX. Fixa-se o acelerômetro no ponto 89, para se obter o deslocamento (Y_B), essencial para o controle e monitoramento do ensaio (Figura 4.26);

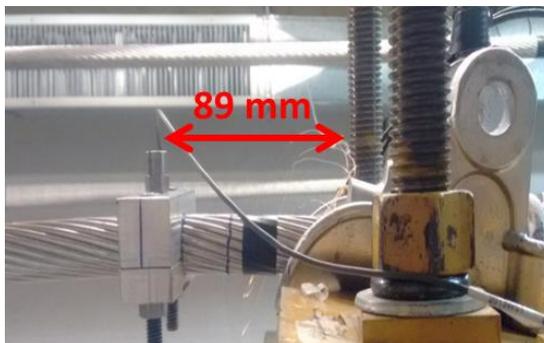


Figura 4.26 - Fixação da braçadeira com acelerômetro no ponto 89.

- X. Esboça-se uma linha entre a boca do grampo e o ponto 89 para detecção de falha de fios externos e posiciona-se o laser de contagem de ciclos abaixo da braçadeira do ponto 89 (Figura 4.27);



Figura 4.27 - Linha de detecção de quebra externa.

- XI. Fixa-se dispositivo de alinhamento e braçadeira com acelerômetro (Figura 4.28);



Figura 4.28 - Dispositivo de alinhamento do shaker e braçadeira com acelerômetro.

- XII. Fixa-se hastes para detecção de quebras dos fios sobre o nó de vibração do condutor em seguida alinha-se os transdutores (lasers) com as hastes (Figura 4.29). Para se encontrar a posição do nó, inicia-se a vibração do cabo utilizando os parâmetros de ensaio e com uma caneta marca-se no condutor a posição do nó mais próximo ao grampo de suspensão;



Figura 4.29 - Posição do sistema de detecção de quebra.

4.5 Programa Experimental para Avaliação da Fórmula de Poffenberger-Swart

O processo de extensometria feito na região do último contato do cabo com o grampo (UPC) permite ratificar que o deslocamento Y_B do ponto 89 gera uma amplitude de tensão experimental do ensaio que seja semelhante a tensão alternada nominal da fórmula de Poffenberger-Swart.

4.5.1 Metodologia

Três extensômetros são colados na região do UPC, onde há os maiores níveis de tensão. Os ensaios dinâmicos permitem a obtenção das tensões experimentadas pelo condutor a partir do deslocamento Y_B do ponto 89. As tensões registradas são comparadas com a fórmula de P-S para atestar se o ensaio de fadiga ocorrerá de acordo com a amplitude de tensão esperada.

Três ensaios dinâmicos são feitos para cada ensaio de fadiga a ser realizado. Desta maneira, após os procedimentos de esticamento do condutor e instrumentação do ensaio (tópicos I à XIV), os strain gauges são conectados a uma ponte de Wheatstone e então é feito o balanceamento e calibração dos mesmos através de software.



Figura 4.30 - Posição dos extensômetros.

Os ensaios dinâmicos ocorrem em frequências próximas a frequência natural do cabo. A frequência natural do condutor é obtida por meio de varredura feita através do software *Shaker Control*.

Encontrada a frequência natural do condutor, inicia-se o ensaio com o deslocamento Y_B previsto para o ensaio de fadiga, em seguida a coleta-se dados por 30 s com frequência de 100 Hz de aquisição, 3000 pontos são adquiridos para cada extensômetro. Ao fim da coleta de dados é feita uma média dos valores lidos pelos três extensômetros e tal valor é comparado a tensão calculada através da fórmula de P-S. A Tabela 4.5 mostra valores adotados para a realização dos ensaios dinâmicos do cabo Orchid.

4.6 Armazenamento de Dados

A correta realização do ensaio necessita que sejam mantidas constantes a carga de tração do condutor, bem como a amplitude de deslocamento Y_B no ponto 89.

A operação do ensaio é monitorada por um controlador que recebe os sinais coletados pelos transdutores e os compara com valores pré-definidos para o teste, reajustando deslocamento, velocidade e força no excitador eletromecânico para se aproximar dos valores pré-estabelecidos.

A Figura 4.31 esquematiza o monitoramento e controle do ensaio, tais ações envolvem aquisição e transmissão de diversos sinais provenientes dos transdutores.

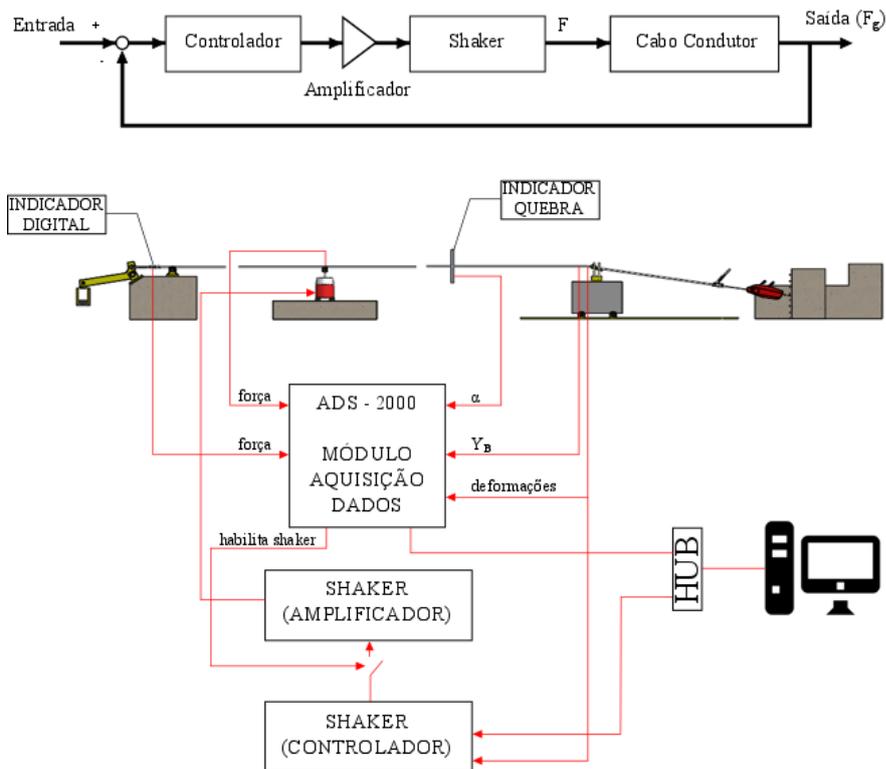


Figura 4.31 - Esquema de funcionamento do sistema de controle e monitoramento de ensaios.

O armazenamento dos dados é feito em simultâneo com o andamento do ensaio e é composto de cinco passos:

- I. No microcomputador utilizado no ensaio, abre-se o software *LTD*;
- II. No ícone *Arquivos*, seleciona-se o ícone *Estatística*;
- III. Abre-se o arquivo de ensaio;
- IV. Copia-se os dados;
- V. Cola-se os dados numa planilha do *Excel*, onde ficam registrados informações como ângulo de torção do condutor (monitoramento das quebras) e quantidade de ciclos ocorridos no ensaio.

O software *LTD* é configurado para armazenar os dados a cada 30 minutos, logo é necessário repetir os procedimentos I à V para cada meia hora de ensaio.

4.7 Retirada do Cabo e Coleta de Amostra

A retirada do cabo condutor da bancada, bem como a extração da amostra é feita nos seguintes passos:

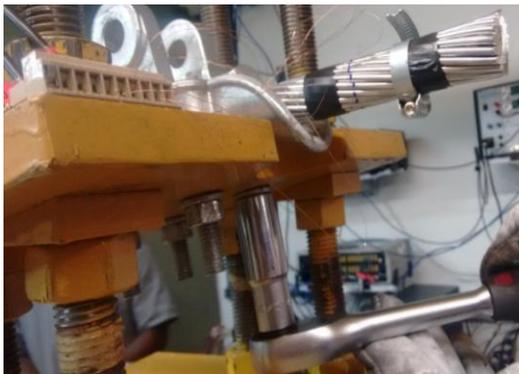
- I. Recolocação das polias;
- II. Retira-se os equipamentos:
 - a. Hastes de detecção de quebras;

- b. Transdutores laser da régua e ponto 89;
 - c. Acelerômetros e suas braçadeiras;
 - d. Dispositivo de alinhamento do shaker;
- III. Reduz-se de maneira progressiva a carga de esticamento, alternando entre diminuição da carga do titor e do braço de alavanca.
- IV. Desmonta-se os grampos de ancoragem.
- V. Fixa-se duas braçadeiras no cabo na parte posterior ao grampo e outras duas na parte inferior do grampo para evitar o desenrolamento dos fios após o processo de corte do cabo.
- VI. Com um alicate específico para corte de condutores, corta-se o cabo entre cada um dos pares de braçadeiras (Figura 4.32).



Figura 4.32 - Corte para retirada de amostra.

- VII. Desmonta-se e retira-se o conjunto amostra/grampo do suporte onde estavam fixados.



(a)



(b)

Figura 4.33 – (a) Retirada da amostra do ensaio e (b) Amostra do ensaio.

- VIII. As seguintes informações são extraídas da amostra:
- a. Medida da distância axial de cada fio rompido (tomando como base a boca do grampo)

- b. Retirada dos fios que sofreram a falha
- c. Registro do número de falhas, suas respectivas quantidades de ciclos
- d. Armazenamento dos fios em que ocorreram a falha. Considera-se somente o lado dos fios que passam por dentro do grampo.

5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental. Como já mencionado, 27 ensaios de fadiga foram realizados para o nível de $H/w = 2144 m$. A análise dos resultados começa com a apresentação e análise das curvas S-N para os diferentes tipos de condutores. Apresentam-se, também, resultados relativos às distâncias entre a falha dos fios e a região de UPC, bem como a comparação entre esses resultados para os diferentes tipos de cabo. Além disso, é feita a apresentação das ordens de quebra dos fios relacionados à quantidade de ciclos até o momento da falha, bem como contabilização das quebras nas camadas interiores e exterior. Por fim uma análise da superfície de falha dos fios é feita.

5.1 Resultados das curvas S-N

Durante os 27 ensaios foram utilizadas frequências de vibração do condutor entre 17 e 30 Hz, operando na condição ótima de trabalho do shaker, para preservar a vida do equipamento. A escolha da frequência para a execução do ensaio é baseada no procedimento de varredura de frequência, em que se procuram as frequências de ressonância do sistema.

O critério de parada do ensaio empregado é o mesmo proposto pela CIGRÉ (1979), que orienta a utilização do maior valor dentre as duas opções: ruptura de 3 fios ou ruptura de 10% da quantidade total de fios de alumínio do condutor. Apesar de ter havido mudança nessa orientação, para ruptura de somente 1 fio de alumínio (CIGRÉ, 2008), neste trabalho considerou-se a proposição de 1979 da CIGRÉ (4 fios para o CAL 900, 4 fios para o Orchid e 5 fios para Tern) para que possa haver a possibilidade de comparação dos dados aqui produzidos com a base de dados do LabCabos. Os resultados dos ensaios realizados de acordo com a Tabela 4.5 são apresentados na Tabela 5.1.

Para a construção da curva S-N de cada tipo de condutor, as médias dos pontos experimentais de cada amplitude de tensão são representadas em gráficos que descrevem o número de ciclos decorridos até o momento da ruptura (eixo horizontal) versus a amplitude de tensão nominal de cada ensaio (eixo vertical). Ressalta-se que apesar do controle dos ensaios de fadiga serem feitos a partir do deslocamento Y_B , utilizam-se as amplitudes de tensão como base de comparação de comportamento dos cabos condutores. Para tanto, a equação de P-S (equação 3.3) permite traduzir o deslocamento Y_B em amplitude de tensão no ponto diametralmente oposto ao UPC. No intuito de melhorar a visualização das curvas, utilizou-se escala logarítmica para a representação da quantidade de ciclos, ocasionando a exibição do comportamento de vida em termos de linhas retas.

Tabela 5.1 - Resultados dos ensaios realizados para levantamento das curvas S-N.

H/w = 2144 m									
Condutor	Y_b (mm)	$\sigma_{a_{p-s}}$ (MPa)	Amostra	Quantidade de ciclos até a falha (N) (Megaciclos)					Média (10% quebra)
				1ª quebra	2ª quebra	3ª quebra	4ª quebra	5ª quebra	
CAL 900	0,68	23,7	1	0,56	0,60	1,08	1,08	-	1,29
			2	1,03	1,12	1,18	1,50	-	
			3	0,69	0,83	1,11	1,29	-	
	0,81	28,22	4	0,24	0,37	0,37	0,61	-	0,71
			5	0,29	0,41	0,47	0,59	-	
			6	0,40	0,44	0,60	0,92	-	
	0,90	31,35	7	0,43	0,46	0,60	0,74	-	0,70
			8	0,30	0,57	0,65	0,76	-	
			9	0,55	0,57	0,60	0,61	-	
Orchid	0,82	26,8	1	1,29	1,62	1,75	1,98	-	2,14
			2	1,42	1,62	1,78	2,05	-	
			3	1,06	1,83	2,19	2,38	-	
	0,87	28,22	4	0,72	0,99	1,12	1,32	-	1,55
			5	1,23	1,26	1,33	1,49	-	
			6	0,61	0,91	1,59	1,84	-	
	0,96	31,35	7	0,53	0,63	0,69	1,08	-	1,16
			8	0,33	0,43	0,83	1,15	-	
			9	0,96	1,12	1,19	1,25	-	
Tern	0,80	26,8	1	2,54	2,54	2,90	2,90	3,09	3,03
			2	1,38	1,38	1,38	2,07	2,56	
			3	1,12	1,12	2,21	2,77	3,43	
	0,84	28,22	4	1,64	1,64	2,00	2,94	3,04	3,02
			5	0,99	1,35	2,10	2,53	2,89	
			6	1,45	1,67	1,67	3,11	3,14	
	0,93	31,35	7	1,36	1,36	1,36	1,36	1,65	1,71
			8	1,30	1,33	1,33	1,33	1,49	
			9	1,10	1,10	1,99	1,99	1,99	

As curvas de vida dos cabos foram elaboradas utilizando o software Microsoft Office Excel. O delineamento das curvas S-N é feito a partir de regressão linear utilizando equação exponencial ($y = A \cdot x^B$), correspondente à equação de Basquin. O método dos mínimos quadrados é utilizado para se encontrar o melhor ajuste dos parâmetros da curva (A e B) com os dados experimentais. Na Figura 5.1, são apresentadas as curvas de vida dos três cabos condutores, valores médios de quantidade de ciclos são contabilizados para cada deslocamento/amplitude de tensão. Em complemento as equações, os coeficientes de correlação de Pearson (R^2) também são mostrados com propósito de se medir o grau de correlação linear dos dados experimentais com as curvas geradas.

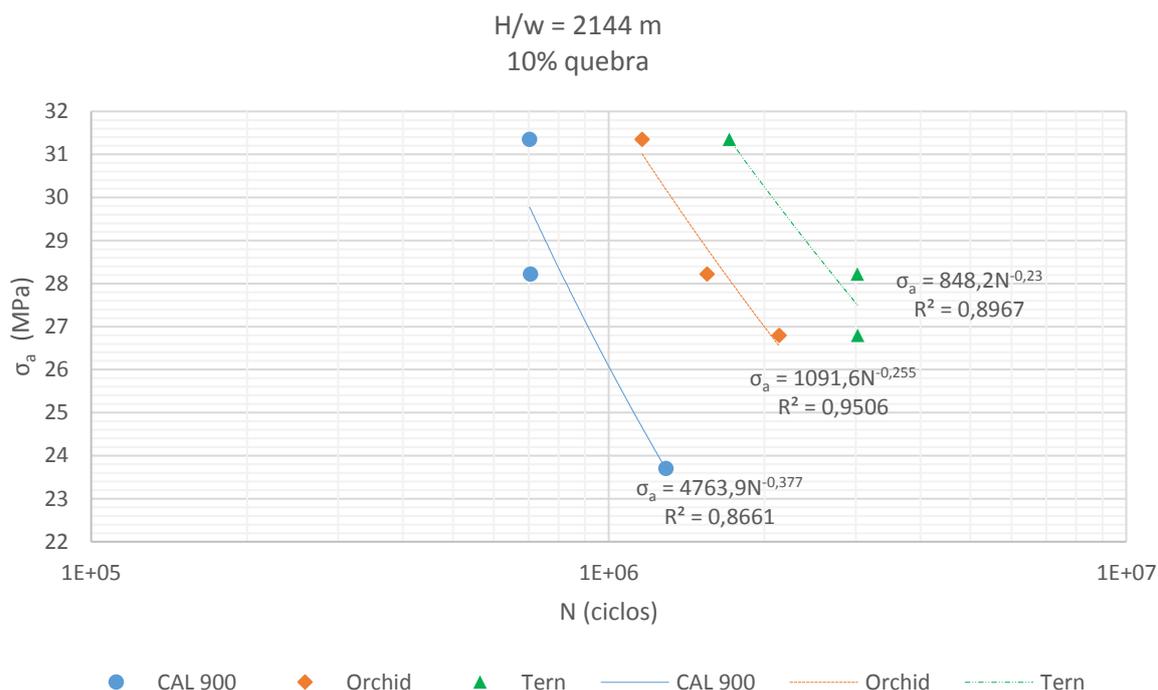


Figura 5.1 - Curvas de fadiga para os condutores CAL 900, Orchid e Tern (H/w = 2144 metros).

O gráfico da Figura 5.1 apresenta a curva de vida em fadiga para os três condutores, Cal 900, Orchid e Tern, no nível de H/w igual à 2144 metros, utilizando como critério de comparação a falha de 10% da quantidade de fios total de cada um dos condutores (4 fios para os cabos CAL 900 e Orchid e 5 fios para o cabo condutor Tern).

Do ponto de vista estatístico, verifica-se que a correlação das curvas com os seus respectivos dados experimentais variam de 0,85 a 0,95, recaindo sob categorias de correlação forte (CAL 900 e Tern) ou muito forte (Orchid).

Analisando as curvas da Figura 5.1, observa-se que a durabilidade do cabo condutor CAL 900 é significativamente inferior. A resistência à fadiga do cabo Tern para as condições de ensaio impostas se mostra superior, ficando o condutor Orchid com o comportamento de vida intermediário.

Devido a inclinação da curva do condutor CAL 900, nota-se que este apresenta menor sensibilidade à variação de amplitude de tensão quando comparado aos outros cabos condutores. Esta observação é reflexo da magnitude do expoente da curva, 1,5 vezes maior que as demais curvas. Em consequência disso, observa-se que para maiores amplitudes de tensão a diferença entre as vidas dos condutores CAL 900 e Orchid ou Tern é menor do que aquela apresentada em ensaios com amplitudes de tensão menores. Para regiões de amplitudes de tensão maiores do que aquelas testadas neste trabalho podem apresentar um comportamento superior do CAL 900 em relação aos outros cabos.

Se comparado ao EDS, o parâmetro H/w abrange mais variáveis e expressa melhor a natureza do comportamento dos cabos condutores instalados em campo. São exemplos de fatores contabilizados pelo H/w : a energia de indução dos ventos, a capacidade de autoamortecimento e flecha da catenária.

Outra característica afirmada pelos propositores do parâmetro H/w é que este critério de projeto deve prover aos diferentes tipos de cabos o mesmo comportamento em fadiga quando submetidos ao mesmo nível de H/w (Leblond, 2000). Entretanto, os ensaios levantados no Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia da UnB mostram que os diferentes tipos de cabos, o Cabo de Alumínio (Orchid), Cabo de Alumínio Liga (CAL 900) e Cabo de Alumínio com Alma de Aço (Tern) apresentam comportamentos em fadiga visivelmente diferentes quando ensaiados sob mesmo H/w (2144 metros). Tal diferença pode ser notada com maior clareza comparando-se as razões entre as vidas dos cabos, nota-se que a depender da amplitude de tensão aplicada, a durabilidade de um tipo de cabo condutor atinge valores cerca de 3,3 vezes maiores do que a durabilidade de outro tipo, conforme explica o item 5.1.1.

5.1.1 Razão de durabilidade dos cabos

Outra maneira de salientar as diferenças de comportamento em fadiga dos cabos condutores é expressar a razão entre as durabilidades dos cabos sob diferentes amplitudes de tensão. O gráfico da Figura 5.2 apresenta no eixo horizontal duas categorias de amplitude de tensão, 28,22 e 31,35 MPa. No eixo vertical está representada a razão entre a quantidade de ciclos decorridos até o momento da falha de 10% dos fios de cada cabo em relação ao CAL 900. Para efeito de contabilização do comportamento médio dos cabos condutores, os valores de quantidades de ciclos utilizados para a montagem do gráfico da Figura 5.2 são baseados nas equações de vida provenientes da Figura 5.1.

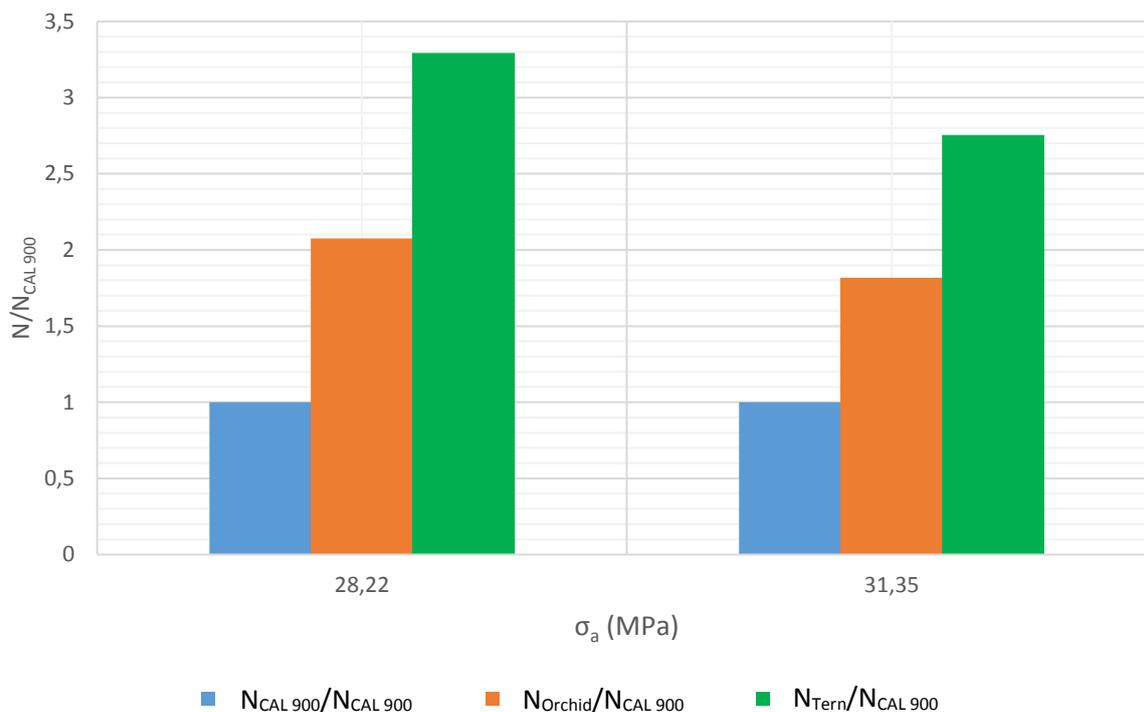


Figura 5.2 - Razão de vidas dos cabos em termos da durabilidade do CAL 900.

As barras azuis em ambas as amplitudes de tensão da Figura 5.2 mostram que a normalização das razões de vida são feitas com base no comportamento do cabo de menor durabilidade, o CAL 900, dando como resultado 1. Para o Orchid, nota-se que a sua vida útil pode durar de 2,05 (em 28,22 MPa) à 1,8 (em 31,35 MPa) vezes mais que a vida do CAL 900, a partir dessa informação, conclui-se que para o mesmo valor de H/w não se pode afirmar que o comportamento em fadiga destes dois tipos de condutores são iguais, também pode se reparar que o aumento da amplitude de tensão acarreta na diminuição da diferença entre as vidas destes dois condutores. O cabo condutor Tern mostrou-se o mais duradouro dentre os três cabos, esta é uma tendência esperada, pois a presença da alma de aço induz o melhoramento do comportamento mecânico do cabo. Observou-se que para a amplitude de tensão 28,22 MPa, o cabo Tern apresentou durabilidade de cerca de 3,3 vezes maior do que o CAL 900, sob amplitudes de tensão de 31,35 MPa, esta razão cai para 2,75. Nota-se novamente que o parâmetro H/w não descreve de forma satisfatória o comportamento em fadiga destes dois tipos de cabos condutores. Em segunda análise, pode-se comparar o comportamento entre os cabos Orchid e Tern, através das razões de durabilidade calculadas neste parágrafo. Nota-se que o Tern possui a capacidade de suportar 1,58 vezes (28,22 MPa) e 1,51 vezes (31,35 MPa) a quantidade de ciclos suportada pelo Orchid.

De modo geral, os gráficos das figuras Figura 5.1 e Figura 5.2 deixam claro a diferença de comportamento exibida por diferentes tipos de condutores (CA, CAA e CAL) sob o mesmo valor de H/w (2144 m), assim pode-se afirmar que do ponto de vista de fadiga o emprego deste parâmetro como único fator de determinação do comportamento em fadiga de cabos condutores não pode ser considerado adequado, mesmo que seu emprego, em detrimento do EDS, possa contabilizar mais variáveis relevantes para a caracterização da natureza de comportamento do cabo condutor instalado nas linhas de transmissão.

5.2 Evolução das rupturas

Outra análise feita para a avaliação do critério de H/w foi a contabilização da taxa de evolução das rupturas. Dada a possibilidade de identificação de cada quebra relativo ao seu respectivo ciclo, foi possível traçar a curva de comportamento médio dos cabos a cada ruptura. A partir daí, construiu-se o gráfico da Figura 5.3 onde é mostrada a percentagem de vida decorrida do cabo até o momento de cada falha.

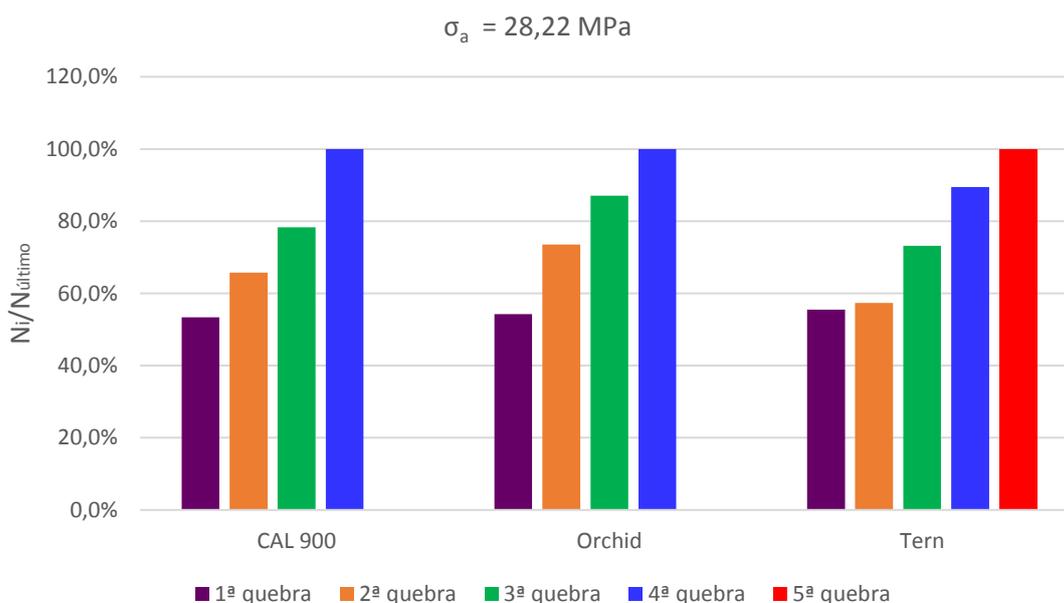


Figura 5.3 - Evolução das quebras em relação a vida consumida.

O gráfico da Figura 5.3 mostra a evolução de cada quebra em termos do percentual de vida consumida para a amplitude de tensão de 28,22 MPa. Na representação gráfica, o valor 100% significa a ocorrência da quarta ruptura, para os cabos condutores Orchid e CAL 900 e a quinta quebra para o cabo Tern.

Observa-se que os cabos Orchid e CAL 900 possuem progresso linear da evolução de falhas, em contrapartida, o condutor Tern apresenta como característica a ocorrência das duas primeiras falhas ao mesmo tempo. Apesar deste comportamento entre a primeira e a segunda ruptura, o progresso das demais falhas é linear para o cabo Tern. Comportamento similar foi observado para as outras amplitudes de tensão abordadas no ensaio sendo suas representações não mostradas neste trabalho afim de se evitar redundâncias de informação.

5.3 Distâncias das rupturas

Outra avaliação feita a partir dos dados dos ensaios foi a medida das distâncias (horizontais) das falhas em relação ao UPC. Esta análise se mostra interessante, pois traz informações úteis para a investigação de causas das falhas nos fios. A Figura 5.4 ilustra a forma como a medidas foram feitas.

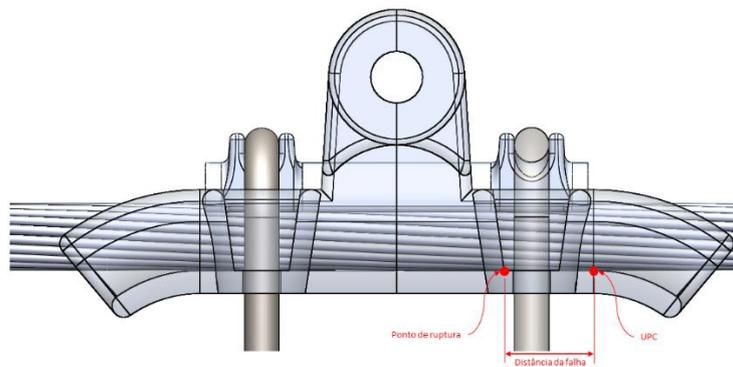


Figura 5.4 - Distância das rupturas em relação ao UPC.

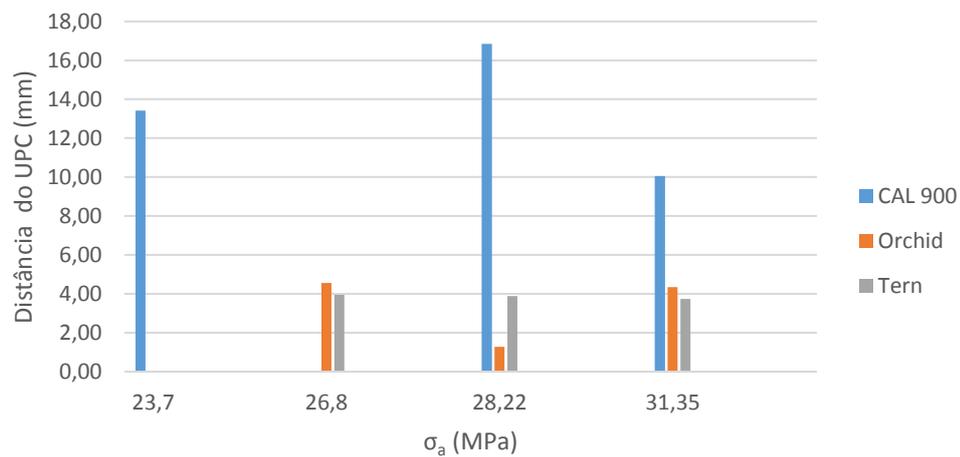


Figura 5.5 - Distância média das rupturas em relação ao UPC.

O gráfico da Figura 5.5 apresenta informações sobre as distâncias médias das falhas em relação ao último ponto de contato (UPC). No eixo horizontal estão representadas as amplitudes de tensão dos ensaios, no eixo vertical estão representadas as distâncias médias entre a superfície de falha dos fios e o UPC. Observa-se que as quebras dos fios dos cabos Orchid e Tern ocorrem em regiões próximas a área de restrição de movimento dos condutores, onde as amplitudes de tensão são altas de acordo com a equação de P-S. Em contrapartida, as falhas do cabo CAL 900 ocorrem em regiões que variam de 10 a 17 milímetros do UPC, próximas ao centro do grampo.

5.3.1 Posição das Falhas

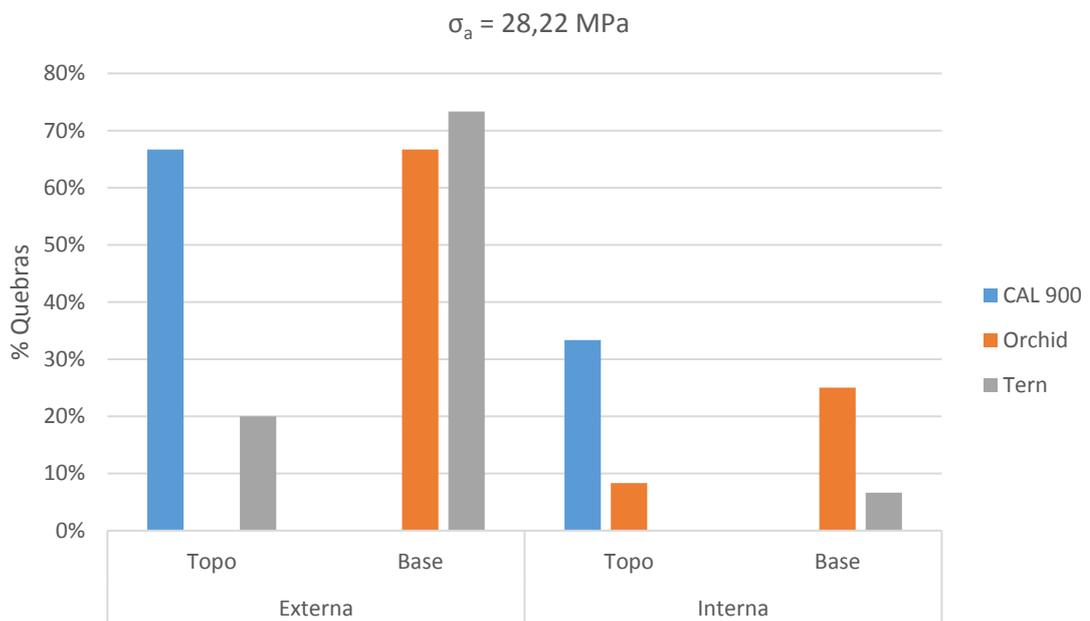


Figura 5.6 - Posição das quebras.

O percentual de quebras, representado no eixo vertical do gráfico da Figura 5.6 é calculado com base na quantidade total de fios de alumínio rompidos após o ensaio. O eixo horizontal do gráfico possui duas categorias, quebras externas (camada mais externa do condutor) e internas (demais camadas do condutor), contendo outras duas subcategorias, quebra no topo ou na base do cabo Figura 5.7.

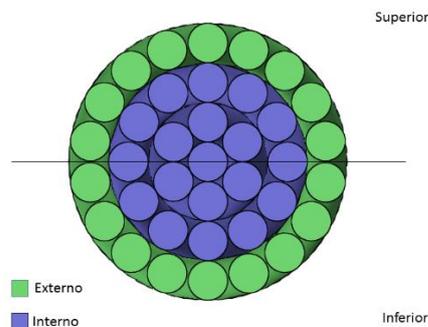


Figura 5.7 - Referências adotadas: superior/inferior, externo e interno.

Nota-se que para a amplitude de tensão 28,22 MPa, todas as falhas do condutor CAL 900 ocorreram no topo, 67% delas na camada externa e 33 % nas camadas internas. Observando os corpos de prova após os ensaios, notou-se que as quebras ocorreram frequentemente próximas à região da tampa do grampo, o que pode justificar o fato das falhas ocorrerem tão distantes do UPC, conforme ilustra o gráfico da Figura 5.5. Uma possível causa das falhas está na forma do contato que ocorre entre a tampa do grampo e os fios desta região que pode gerar tensões acima daquelas suportadas pelos fios. Em contrapartida, a maioria das falhas do Orchid e do Tern acontecem na base, principalmente na camada externa, neste caso a justificativa deste tipo de falha também deve estar ligada a forma de contato, desta vez, entre os fios desta região com a superfície da base do grampo. O mesmo padrão de comportamento se repete para as outras amplitude de tensão, não sendo necessária a representação dos demais gráficos.

5.4 Tipos de superfícies de falha

Análises macroscópicas e microscópicas das superfícies de ruptura são feitas neste trabalho. Em virtude da variabilidade e dispersão dos tipos de superfícies de falhas encontradas nos fios, análise estatística das principais geometrias de falha será exposta a seguir. Para tanto, as falhas foram divididas em quatro categorias, falhas em V, 45°, L e QP (quase planas), apresentadas na seção 0 e 2.2.2. A análise microscópica foi feita a partir da maior representatividade das falhas em cada modelo de cabo. A Figura 5.8 mostra a quantidade em termos percentuais dos tipos de falha para cada um dos cabos em amplitude de tensão igual a 28,22 MPa. O mesmo padrão de representatividade acontece para as demais amplitudes de tensão.

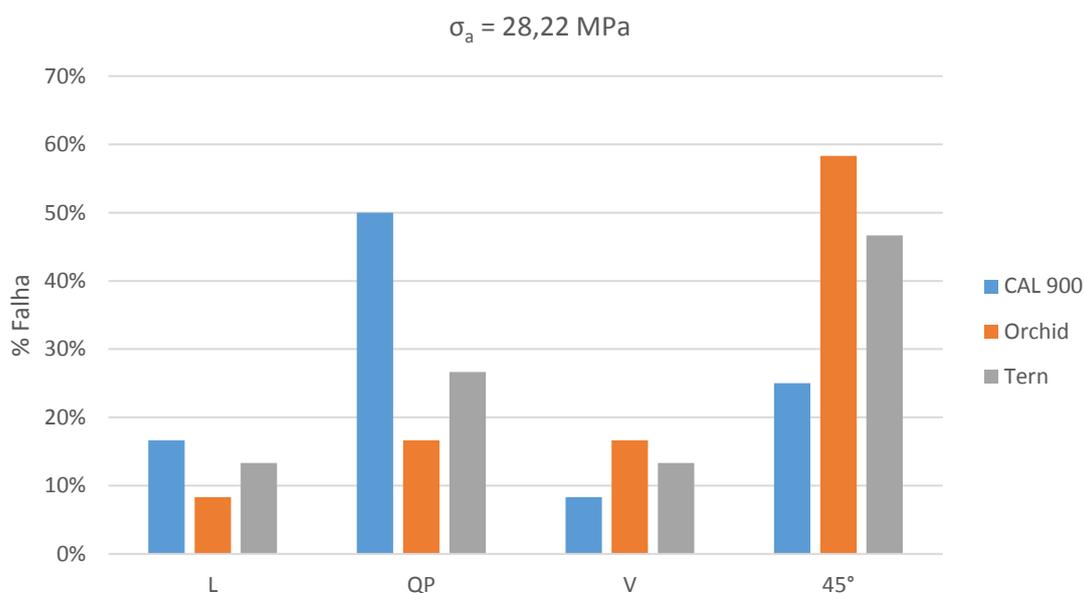


Figura 5.8 - Tipos de superfícies de falha.

Analisando os padrões para os diferentes cabos, notam-se predominâncias de tipos de falhas em cada um destes. Por exemplo, o cabo condutor CAL 900 apresentou predominância de ruptura do tipo quase-plana. Sabe-se que este tipo de falha é comum a fraturas do tipo frágil. Para os cabos condutores Orchid e Tern, a maior parte das falhas ocorreram na categoria 45° (cerca de 50% das falhas), formato típico de falha dútil. Ressalta-se que para as demais amplitudes de tensão o mesmo tipo de comportamento ocorre.

5.5 Análise microscópica

Observada a predominância das categorias de ruptura em cada tipo de cabo condutor, foram selecionados fios que apresentassem tais características para melhor avaliação microscópica da superfície de falha, na tentativa de se encontrar características que indicassem as causas de falha nos fios destes condutores.

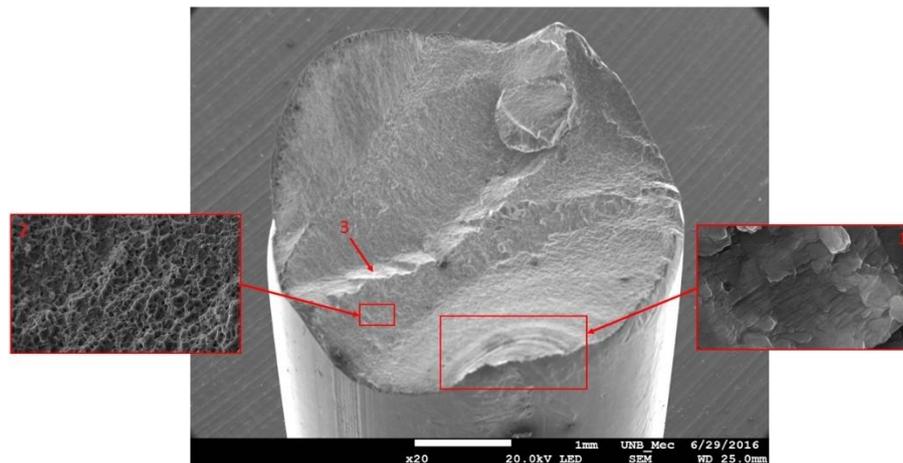


Figura 5.9 - Análise microscópica do cabo CAL 900, falha QP. Detalhe 1: estrias (x15.000), detalhe 2: dimples (x800).

Em se tratando do CAL 900, como já mencionado, o tipo de superfície de ruptura mais observado foi o tipo QP (quase-plano). Em análise no MEV, foram observadas características típicas de falha por fadiga seguida por fratura frágil. Na

Figura 5.9, ainda sob escala macroscópica (x20), é possível observar a ocorrência de formação de marcas de praia, típicas de falha por fadiga, nota-se que a região de convergência das marcas indicam a origem da formação das trincas. Dada a característica de ruptura dos fios na região superior do cabo e a presença de deformação plástica na parte externa do fio, há forte evidência de que o início da trinca é consequência do contato entre o fio e a tampa do grampo. No detalhe 1 da

Figura 5.9 (x15.000), observa-se que entre as marcas de praia há a formação de estrias, caracterizando a propagação da trinca a cada ciclo de carregamento sofrido pelo fio. No detalhe 2 da

Figura 5.9 (x800), é possível notar a presença dos chamados dimples, tipicamente comuns em superfícies que sofreram fratura frágil, ressalta-se que a direção de orientação dos dimples sugere a direção de máxima tensão atuante no momento da ruptura, neste caso, a orientação é normal a superfície de falha, indicando falha por tensão normal nesta região. Em complemento a informação do detalhe 2, observa-se a presença de clivagem no detalhe 3, a clivagem é a mudança abrupta de direção de plano a superfície de falha, indicando novamente a ocorrência de fratura frágil nesta região.

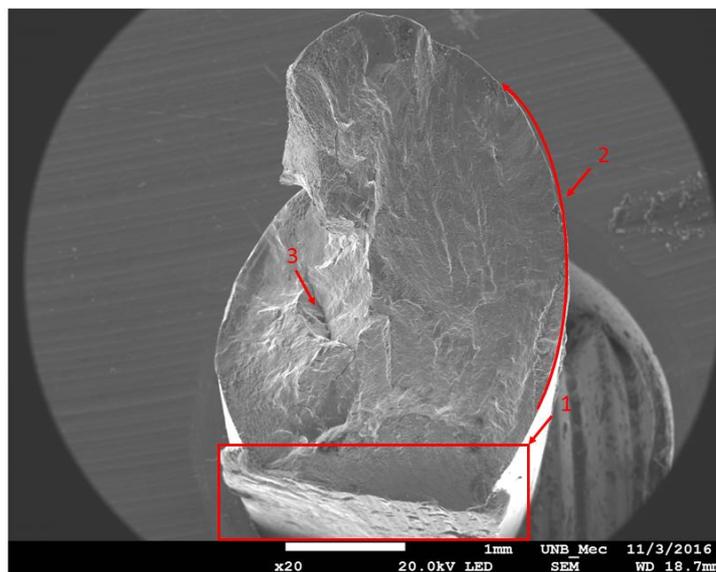


Figura 5.10 - Presença de orelha de lobo e amassamento na base, cabo Orchard. (x20)

Para o cabo condutor Orchard, observou-se a predominância de falha do tipo 45° , esse tipo de fratura é comum em falhas em que a tensão cisalhante é crítica, ou seja, a superfície de ruptura possui tendência a se propagar em ângulo a 45° com a direção de carga agindo sobre o corpo. Na Figura 5.10, detalhe 1, nota-se a presença de uma grande região de deformação permanente na borda inferior do fio, tal perfil de deformação provavelmente é causado pelo contato entre o fio e o grampo de suspensão em consequência da combinação das cargas de fadiga do ensaio com a carga de aperto empregada na fixação do grampo. No detalhe 2 da mesma figura, observa-se a formação helicoidal da superfície de ruptura, chamada de orelha de lobo, frequente nas falhas deste cabo. O perfil orelha de lobo indica que além das cargas de tração, provavelmente havia cargas de torção sobre os fios desta camada, contribuindo para a propagação da falha. Apesar de não se identificar nesta quebra características de fadiga que indiquem a origem da trinca, é provável que a falha tenha partido da região de contato fio/grampo devido a combinação de três evidências observadas, o grande amassamento no detalhe 1, o caminho helicoidal que a superfície segue, detalhe 2 e à presença de regiões com clivagem em partes opostas à zona de amassamento, como exemplificado no detalhe 3.

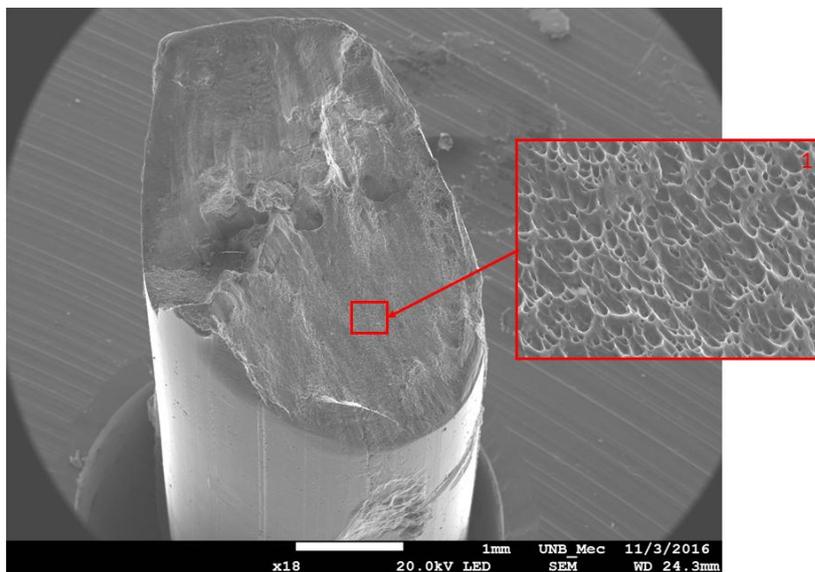


Figura 5.11 - Ruptura tipo 45° fio do cabo Orchid. No detalhe presença de dimples na direção cisalhante. (x550).

Na Figura 5.11 observa-se a ocorrência de dimples na região próxima ao centro do fio, no detalhe 1, utilizando uma aproximação de x550, torna-se visível a ocorrência de dimples com orientação paralela ao plano de falha, tal característica indica que o tipo de tensão responsável pela falha nesta região foi a tensão cisalhante.

Para o cabo condutor Tern, geometrias de falha semelhantes àqueles observados no Orchid ocorreram.

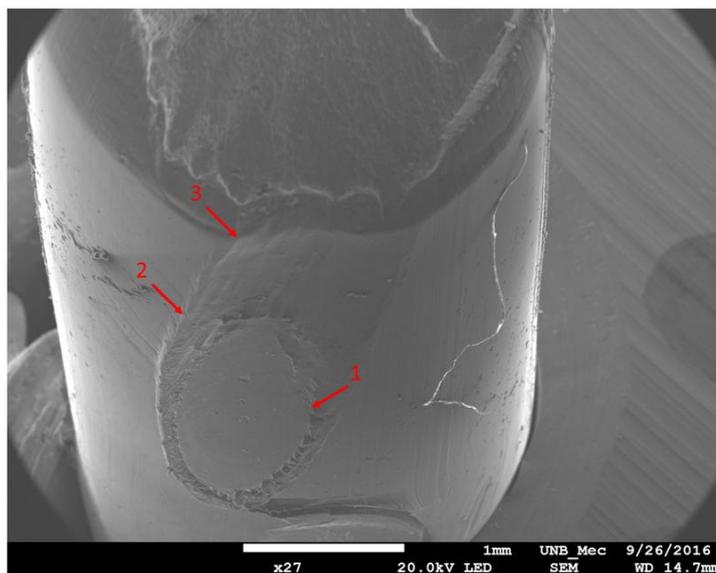


Figura 5.12 - Região de fretting entre fios do cabo Tern. (x27) Detalhe 1: zona de aderência. Detalhe 2: zona de escorregamento. Detalhe 3: provável região de iniciação da trinca.

Na Figura 5.12 está representada a região de contato entre dois fios de alumínio do cabo Tern. Destaca-se com clareza a região de fretting no fio do cabo condutor sendo esta a provável causa de iniciação de trinca na zona de falha, parte superior da imagem. No detalhe apontado pela seta 1, encontra-se a marca do contato entre os fios, a região interna a estas bordas é chamada de zona de aderência do contato entre os fios. No detalhe apontado por 2, está representada a região de escorregamento entre os fios, observam-se marcas de desgaste em toda a região. Em concordância com o detalhe 2, o detalhe 3 destaca a fronteira entre a zona de deslizamento com a zona de falha do fio, sendo esta região do provável ponto de iniciação de trinca. Tal afirmação é feita observando as extremidades das zonas de escorregamento onde ocorrem as maiores tensões deste tipo de falha.

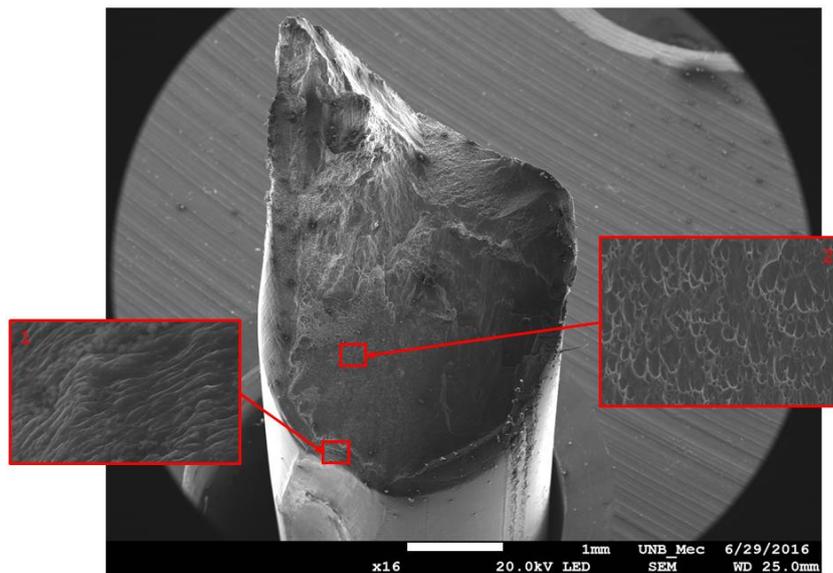


Figura 5.13 - Fio do cabos condutor Tern. Detalhe 1: estrias (x10.000). Detalhe 2: dimples na direção de cisalhamento(x350).

Analisando a superfície de falha apresentada na Figura 5.13, observa-se o fio do cabo Tern rompido, a superfície de falha segue o padrão 45° com torção na geometria formando a orelha de lobo. Duas características de fadiga podem ser identificadas nesta superfície: no detalhe 1, próxima a provável região de iniciação de trinca, observa-se a presença de estrias (x10.000), no detalhe 2 nota-se a presença de dimples (x350) sobre a superfície de fratura frágil, nota-se que a orientação dos dimples indicam que a direção de máxima tensão é paralela a superfície de falha, ou seja, a ruptura instantânea ocorreu devido tensão de cisalhamento nesta região.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho levanta aspectos teóricos e práticos para o problema de fadiga em cabos condutores utilizando o parâmetro H/w empregado em projeto de linhas de transmissão. Revisão de conceitos importantes para a compreensão e estudo deste fenômeno foi feita. Todo o levantamento experimental foi feito no Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia da Universidade de Brasília. Foi apresentada no trabalho a descrição detalhada da bancada de ensaios e a realização das etapas dos procedimentos experimentais para a efetuação dos testes nos condutores CAL 900, Orchid e Tern correspondentes aos tipos CA (Cabo de Alumínio), CAA (Cabo de Alumínio com Alma de aço) e CAL (Cabo de Alumínio Liga).

Os resultados obtidos no LabCabos/UnB mostram a clara diferença de comportamento da vida em fadiga de diferentes tipos de cabos condutores para $H/w = 2144 m$. Observa-se que este critério ainda não é ideal para a descrição do comportamento dos diferentes cabos em termos de fadiga. Analisados os dados obtidos durante o trabalho, as seguintes inferências podem ser feitas:

- Para o mesmo valor de H/w (2144 metros), os cabos CAL 900, Orchid e Tern apresentaram diferentes comportamentos de vida em fadiga.
- Ainda sob o mesmo H/w , nota-se que as diferenças entre as vidas dos cabos tende a ser acentuadamente maiores para baixas amplitudes de tensão. Por exemplo, a durabilidade do Tern atinge valores 3,3 vezes maior que a durabilidade do CAL 900 para a amplitude de tensão de 28,22 MPa.
- A velocidade de evolução de ruptura dos fios tende a ser constante, com ressalva em relação ao cabo Tern que apresenta a ocorrência das duas primeiras rupturas simultaneamente para todas as amplitudes de tensão observadas.
- Nota-se através da análise das distâncias de falhas que o CAL 900 apresenta falhas em regiões distantes do UPC, enquanto que os cabos Tern e Orchid apresentaram rupturas em regiões próximas ao UPC, onde a formulação de P-S indica como sendo o ponto de tensões críticas nos condutores na montagem cabo/grampo.
- A posição das falhas indica que o cabo CAL 900 apresenta rupturas em sua maioria na camada externa, na região do topo e próxima ao último ponto de contato do cabo com a telha do grampo, em contrapartida os cabos Orchid e Tern apresentam falhas na última camada, dessa vez na base, próximo ao UPC.
- A análise macroscópica das superfícies de falha mostram que as quebras no CAL 900 apresentam padrão quase plano de ruptura, típico em materiais frágeis. Em compensação, os cabos Orchid e Tern desenvolvem padrão 45° de falha, típico em materiais dúteis.

- A análise microscópica dos cabos evidencia que o CAL 900 apresenta características típicas de falha por fadiga, como a formação de marcas de praia, com região de ruptura por fratura frágil. O cabo condutor Orchid não apresentou sinais claros de falhas por fadiga em sua superfície, apesar de apresentar características secundárias que podem dar indícios de fadiga, como os dimples (direção cisalhante) e regiões de clivagem em partes opostas aos pontos de restrição de movimento dos fios (regiões de amassamento). Notou-se a presença do padrão orelha de lobo nas superfícies de falha do Orchid, comuns em componentes submetidos a cargas axiais e torcionais. O cabo Tern apresentou visíveis vestígios de falha por fadiga, dentre eles estão as marcas de praia e a presença de estrias indicando a origem e direção de propagação das trincas. Bem como o Orchid, o cabo Tern apresentou o perfil orelha de lobo em suas fraturas.

6.1 Proposta para trabalhos futuros

O problema em cabos condutores é bastante complexo e envolve muitas variáveis, muitas delas ainda não abordadas do ponto de vista de fadiga, revelando-se um campo de pesquisa com grande potencial a ser explorado. Como proposta para trabalho futuros, sugere-se a ampliação do levantamento dos mesmos tipos de dados utilizando outros níveis de H/w e outros modelos de cabos condutores, para que se crie know-how, permitindo mais adiante a proposição de alguns critérios de projeto que complementem a utilização do parâmetro H/w . Outra sugestão para trabalhos futuros é fazer uma avaliação detalhada nas formas de contato dos fios da camada externa com a tampa do grampo, CAL 900, e com a base do grampo, Orchid e Tern, pois mudanças nas formas de contato dos fios com o grampo nessas regiões podem significar alteração significativa da vida em fadiga destes componentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araújo, J. A., Mamiya, E. N. (2003), **The Application of a Mesoscopic Scale Approach in Fretting Fatigue**, J. Braz Soc. Mech. Sci & Eng., vol 25 N°1, Rio de Janeiro, Jan/Mar.
- ASM Handbook Committee, (2002), **Failure Analysis and Prevention**. Vol. 11 2002 edition.
- Azevedo, C. R. F. et al. (2008), **Fretting Fatigue in Overhead Conductors: Rig Design and Failure Analysis of a Grosbeak Aluminium Cable Steel Reinforced Conductor**. ELSEVIER: Engineering Failure Analysis. pp 136 – 151.
- Barrett, J.S. and Motlis, Y. (2001), **Allowable Tension Levels for Overhead-Line Conductors**. IEEE Proc - Gener Transm Distrib Vol 148 No 1, January.
- Blanchard, P., Colombier, C., Pellerin, V., Fayeulle, S., Vincent, L., (1991), **Material Effect in Fretting Wear**. Metallurgica Transaction, 22A, July, p. 1535-1544.
- Boniardi, M., Diana, G., Taliabue, C. (2007), **Fenomeni di Fretting-Fatigue su um Conduttore Elettrico**. Revista La Metallurgia Italiana. Ottobre.
- CALLISTER, Jr., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 705 p.
- CEPEL (2001), **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf Acesso em: 20 junho 2016.
- CIGRE, TF B2.11.04 (2005), **Overhead Conductor Safe Design Tension with Respect to Aeolian Vibrations**, June.
- CIGRÉ SC22-WG04 (1985), **Guide for Endurance Tests of Conductors Inside Clamps**, Electra, No 100, pp. 77-86, May.
- CIGRÉ, WG 11 SC B2 (2006), **Fatigue Endurance Capability of Conductor/Clamp Systems Update of Present Knowledge**, Jan.
- Claren, R. (1978), **The response of overhead line conductors to vortex shedding under laminar and turbulent air flow**. Presented to CIGRÉ.
- Deresiewicz, H. (1974), **Bodies in Contact with Applications to Granular Media**, in R. D. Mindlin and Applied Mechanics, Pergamon Press, Inc. New York, pp. 105-147.
- Dowling N. E. (2013), **Mechanical Behavior of Materials**. 4rd. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall. 936 pp.

- EPE (2015), Balanço Energético Nacional 2015 – Ano base 2014: Relatório Síntese. Rio de Janeiro: 62 p. :18 il.; 14,8 cm.
- EPRI (1979), **Transmission Line Reference Book: The Orange Book**. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA.
- Fadel, A. A. (2010), **Avaliação do Efeito de Tracionamento em Elevados Níveis de EDS Sobre a Resistência em Fadiga do Condutor IBIS (CAA 397,5 MCM)**. 185 p. Tese de Doutorado em Ciências Mecânicas – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Fouvry, S., Kapsa, Ph., Vincent, L., (1996), **Quantification of Fretting Damage Wear**, 200, p. 186-205.
- Fuchs, R. D., Almeida, M. T., Labegalini, P., (1992). **Projetos Mecânicos de Linhas Aéreas de Transmissão**, 1ª. Ed. Itajubá:Edgard Blücher, 252p.
- Felbeck, D. K. e Atkins, A. G. (1984). **Strength and Fracture of Engineering Solids**, Prentice Hall. 2nd edition.
- Garcia, A.; Spim, J. A.; Santos, C. A. (2012), **Ensaio dos Materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC. 365 p.
- Garrison, W.M. e Moody, N.R. (1987). *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 48, pp. 1035–74.
- Gomes, F. B. (2010), **Análise Comparativa de Aparelhos para Medição de Vibração em Cabos Condutores de Energia e Cálculo da Vida Remanescente em Cabos**. 110 p. Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Green, R. A. (2001), **Energy Based Evaluation and Remediation of Liquefiable Soils**, PhD Dissertation, Civil Engineering Depth. Virginia Polytechnic Institute and State University, USA.
- Hard, A. R. (1958), **Studies of Conductor Vibrations in Laboratory Span, Outdoor Test Span and Actual Transmission Lines**. CIGRÉ report 404.
- Henriques, A. M. D. (2006), **Bancada de Ensaios Mecânicos à Fadiga de Cabos Condutores de Energia**. 162 p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- IEEE (1966), **Standardization of Conductor Vibration Measurements**, IEEE PAS vol. 85 N°. 1, Trans. 31 TP65-156.
- IEEE, Std 563 (1978), **Guide on Conductor Self Damping Measurements**.
- Leblond, A.; Hardy, C.(2000), **Assesment of Safe Design Tension with Regard to Aeolian Vibrations of Single Overhead Conductors**. IEEE report.

- Juvinall, R. C.; Marshek, K. M. (2011), **Fundamentals of Machine Component Design**. 5th. ed. Wiley, 899 p.
- Lienhard, J. H. (1966), **Synopsis of Lift, Drag and Vortex Frequency Data for Rigid Circular Cylinders**. Washington State University, College of Engineering, Research Division Bulletin 300.
- Lindley, T. C. (1997), **Fretting Fatigue in Engineering Alloys**, Int. J. Fatigue, Vol 19, Issue 9, June, N° 1, pp. S39-S49.
- Nowell, D. (1988), **An Analysis of Fretting Fatigue**, D. Phil. Thesis, Oxford University.
- Oliveira, M. C. (2013), **Desenvolvimento de um vibrógrafo para medir e armazenar dados de vibração de cabos de transmissão de energia elétrica**. 204 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Poffenberger, J.C., and Swart, R. L. (1965), **Differential Displacement and Dynamic Conductor Strain**, IEEE Transactions Paper, Vol PAS 84, pp. 281-289.
- Rawlins, C. B. (1959), **Improved Systems for Recording Conductor Vibration**. AIEE Transactions, Vol. PAS 78. pp. 1494-1500.
- Rosa, A. A.; Monetti J. and SIter, R. B. (1974), **Overhead Line Vibration and Inspection Techniques**; trabalho apresentado no IEE Laticon, São Paulo.
- Shigley, J. E.; Mischke, C. R.; Budynas, R. G. (2005), **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 960 p.
- Srivatsan, T. S. (1990), **Strength, Deformation, Fracture Behaviour and Ductility of Aluminium-Lithium Alloys**. Journal of Materials Science 25 (2).
- Stephens, R. I. *et al.* (2001), **Metal Fatigue in Engineering**. 2nd ed. Wiley. 496 p.
- Zetterholm, O. D. (1960), Report on the Work of the International CIGRÈ. SC, 110.6: **Bare Conductors and Mechanical Calculation of Overhead Lines**.

ANEXOS

ANEXO I: Operação do software de controle	1
ANEXO II: Balanceamento e Calibração dos Extensômetros.....	7

ANEXO I: Operação do software de controle

O manual a seguir foi extraído do relatório do LabCabos escrito por Renato E. R. Vieira.

I. Abrir o software "shaker control"



Figura A. 1 - Janela inicial do software.

II. Na opção "Global Parameters Setup":

a. Definir as unidades das variáveis: "Engineering Units"

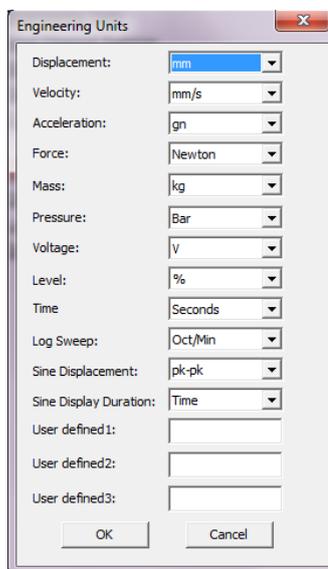


Figura A. 2 - Definição de unidades.

b. Definir os parâmetros do shaker: "Global Shaker Parameters"

Deve-se consultar a tabela de parâmetros do modelo do shaker. Caso não esteja no laboratório, é possível acessar no site do fabricante.

Figura A. 3 - Tabela de parâmetros do shaker.

Figura A. 4 Janela global shaker parameter.

- c. Abrir um projeto e configurar os parâmetros de acordo com a ordem dos ícones na parte esquerda da tela.
- d. Verificar se os parâmetros do shaker estão de acordo clicando no primeiro ícone "Shaker".

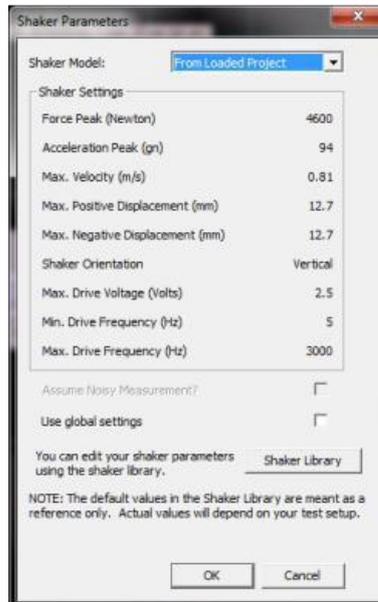


Figura A. 5 - Parâmetros do shaker.

e. Configurar as leituras de entradas analógicas "Channel".

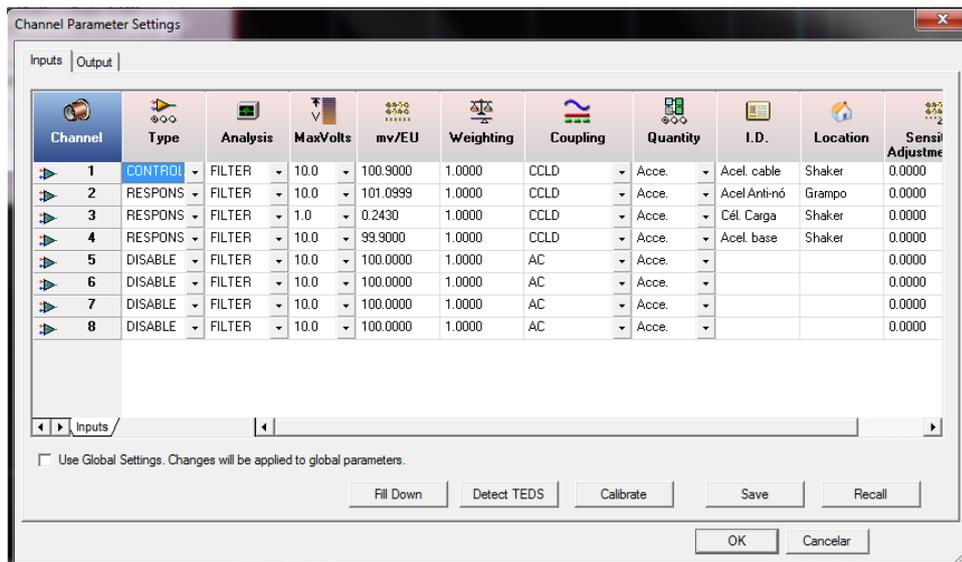


Figura A. 6 – Channel.

- Type: Seleciona os sinais que controlam e monitoram o ensaio.
- mv/EU: Os diferentes tipos de acelerômetros e células de carga possuem diferentes calibrações, sendo necessário informar ao software o valor de cada modelo (procurar a caixa do receptor utilizado através do Serial Number). Para os acelerômetros, existe um papel colado 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 o ensaio.



Figura A. 7 - Serial number de um acelerômetro.

- f. Configurar os controles do ensaio "Control".

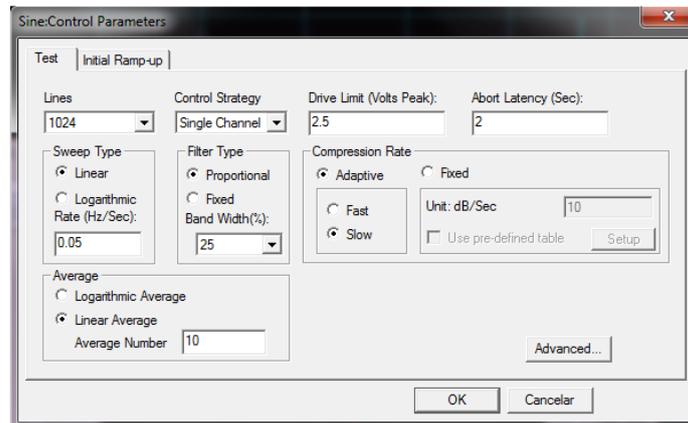


Figura A. 8 - Control.

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

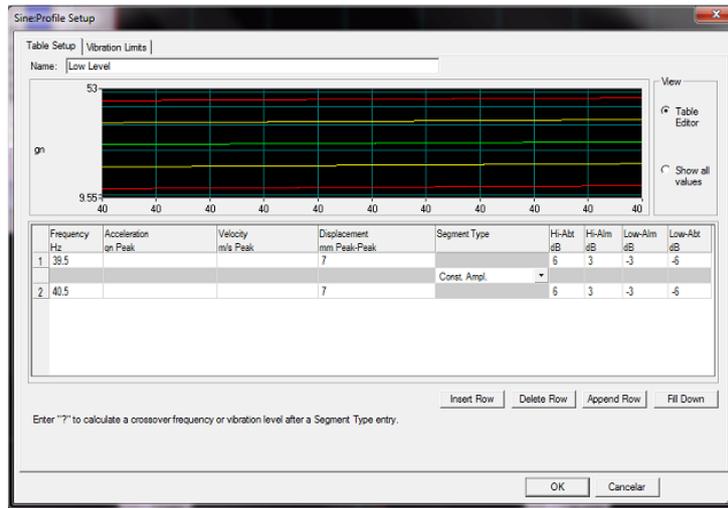


Figura A. 9 - Profile.

- h. No ícone "Schedule" o tipo de ensaio é selecionado. Para realizar uma varredura, seleciona-se a opção "Sweep" já o ensaio de fadiga, é feito por meio da opção "Dwell". Nessa janela fixa-se a duração do ensaio e as frequências de trabalho.

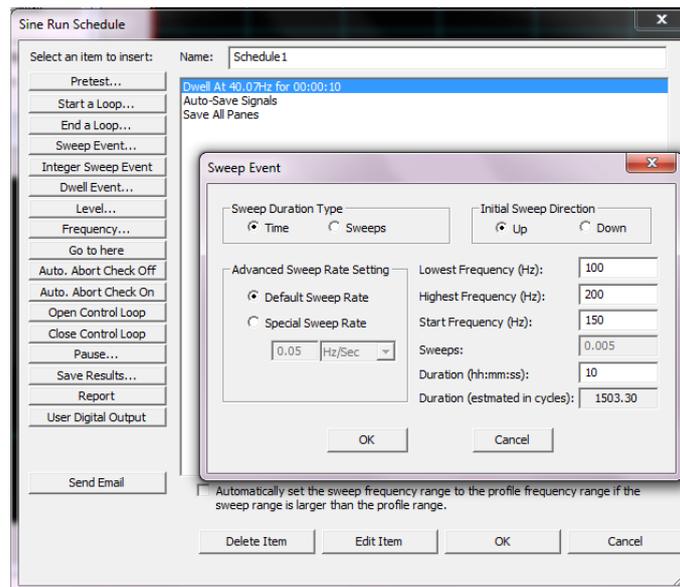


Figura A. 10 - Sweep.

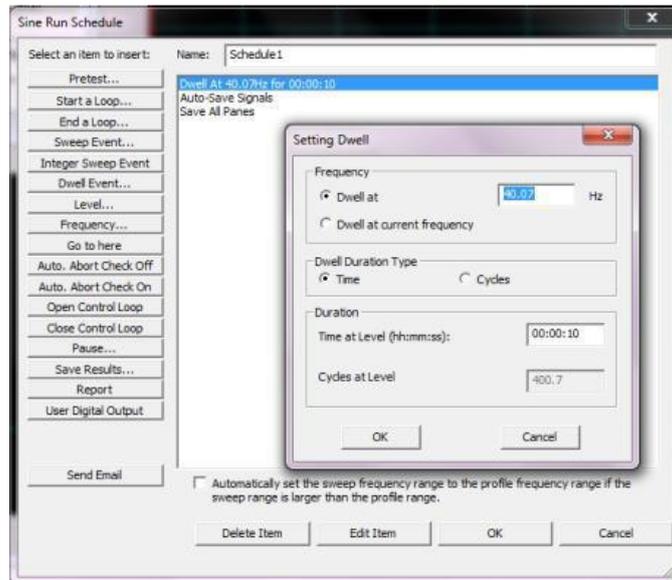


Figura A. 11 - Dwell

- i. "Transmiss": Nesse ícone, escolhe-se os sinais que serão combinados para análise posterior. Os ícones "Response" e "Excitation" referem-se à uma fração onde os sinais devem ser escolhidos de acordo com a saída proposta no ensaio.

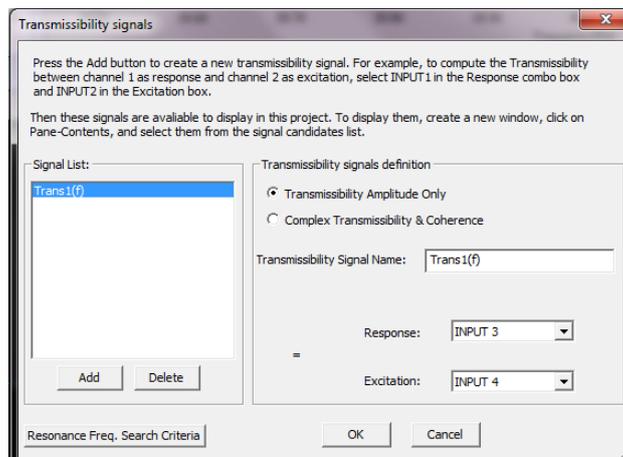


Figura A. 12 - Transmissibility

- j. Por fim, na janela inicial ao clicar com o botão direito no gráfico, a opção "contents" permite escolher os sinais que serão visualizados.

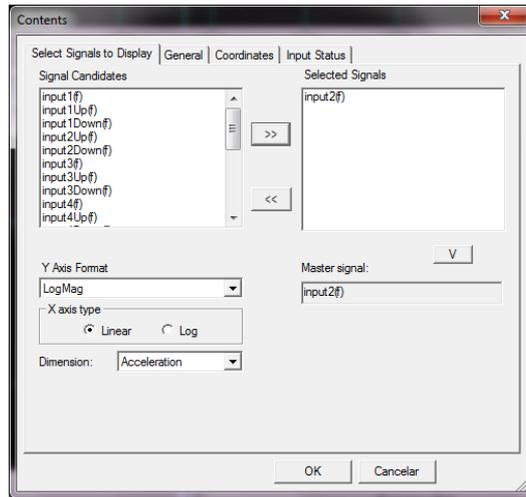


Figura A. 13 - Content

ANEXO II: Balanceamento e Calibração dos Extensômetros

O manual a seguir foi extraído do relatório do LabCabos escrito por Renato E. R. Vieira.

- I. Abrir o AqDados e selecionar a opção "configuração do driver de aquisição".



Figura B. 1 - Software AqDados.

- II. Na janela de Configuração do Driver:
 - a. Barramento de expansão: ADS2000.
 - b. Driver de Aquisição: Deve-se escolher uma das opções dadas pelo programa para encontrar o driver utilizado. Geralmente a opção utilizada é "AC2122-VB: Controlador Ethernet para o ADS2000".
 - c. Clicar em configurar.

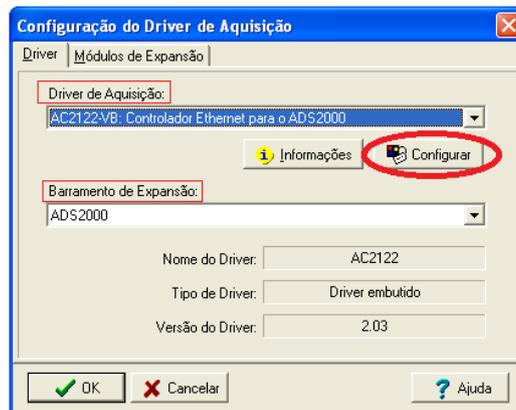


Figura B. 2 - Configuração do driver de aquisição.

- d. O endereço de IP deve ser modificado para 192.168.1.1 (o último número do endereço IP pode variar para 2 ou 3 dependendo do ADS utilizado).

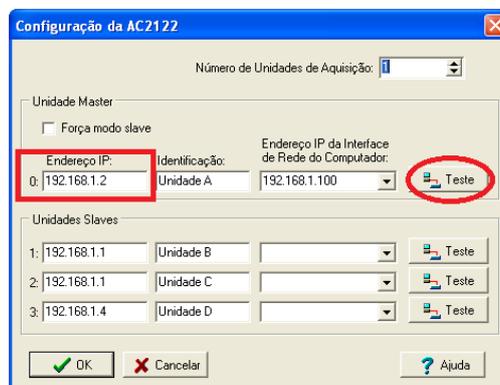


Figura B. 3 - Comunicação entre hardware e software.

- e. Clicar em teste. Deve aparecer uma caixa informando que o AC2122 respondeu, caso contrário o endereço de IP deve ser modificado.

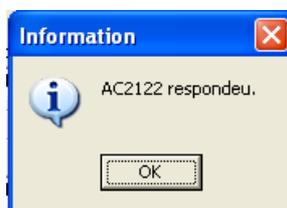


Figura B. 4 - Comunicação feita com sucesso.

III. Na janela Módulos de expansão:

- a. Selecionar o módulo e o modelo de driver utilizado. Geralmente marca-se as caixas correspondentes à "Módulo 0" e "Módulo 1".

b. Modulo 0: Modelo AI-2164 16 entradas.

c. Modulo 1: Modelo AI-2164 32 entradas.



Figura B. 5 - Configuração do modelo do ADS utilizado

- Obs: As aba endereço refere-se à quantidade de entradas que o ADS utilizado possui. Com relação ao modelo, pode acontecer de diferir do escolhido neste manual, caso isso ocorra o programa irá informar no momento de calibração do extensômetro (ilustração abaixo), bastando voltar às configurações e trocar pelo modelo correto.

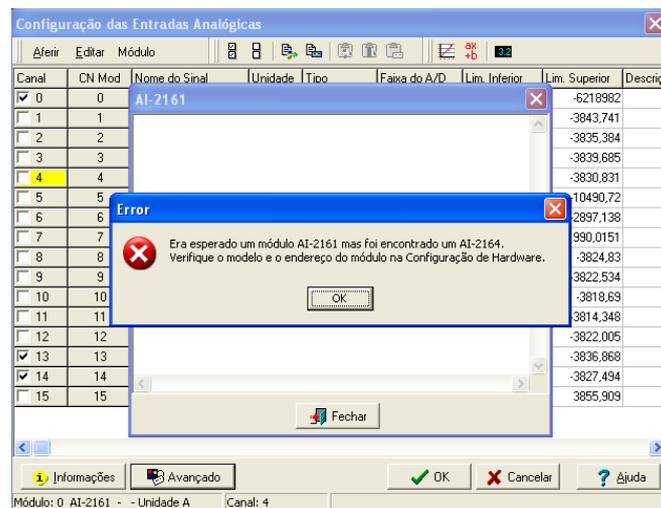


Figura B. 6 - Erro frequente na caracterização do modelo do hardware.

IV. De volta à página inicial do programa, clicar em ensaio e seleccionar a opção entradas analógicas.



Figura B. 7 - Preparação do ensaio.

V. Clicar na opção informações.

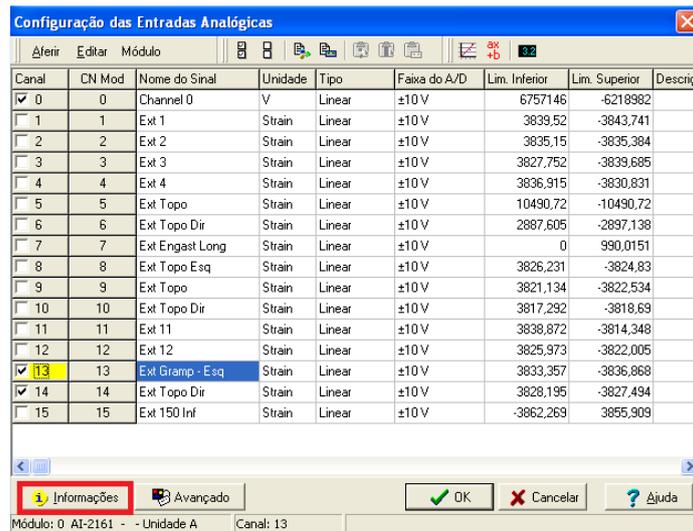


Figura B. 8 - Configuração das entradas analógicas

VI. A janela aberta mostra a configuração manual que o ADS deve estar para funcionar corretamente. Deve-se certificar de que esta configuração está correta abrindo o hardware e conferindo com a figura mostrada pelo software.

- O laboratório geralmente utiliza extensômetro de resistência 350Ω ou 120Ω na configuração $1/4$ de ponte.

Tipo mais utilizado no laboratório

¼ ponte 120Ω (2 fios)		¼ ponte 120Ω	Ganho sugerido: ≥ 1000 Excitação sugerida: ≤ 5 V
¼ ponte 120Ω (3 fios)		¼ ponte 120Ω	Ganho sugerido: ≥ 1000 Excitação sugerida: ≤ 5 V
¼ ponte 350Ω (2 fios)		¼ ponte 350Ω	Ganho sugerido: ≥ 1000 Excitação sugerida: ≤ 5 V
¼ ponte 350Ω (3 fios)		¼ ponte 350Ω	Ganho sugerido: ≥ 1000 Excitação sugerida: ≤ 5 V
Contato seco		Ganho sugerido: 1	Ganho sugerido: 1
Saída coletor aberto		Ganho sugerido: 1	Ganho sugerido: 1

Configuração manual

⚠ Para todas as configurações de entrada apresentadas na tabela acima, os jumpers **JB1n** (onde n: A a H) devem ficar na posição **OFF** e os jumpers **JB2n** devem ficar na posição **ON**.

Figura B. 9 - Menu de informações.

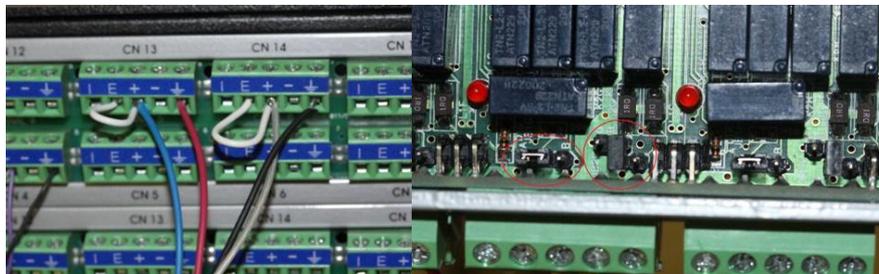


Figura B. 10 - Configuração necessária para a leitura dos extensômetros.

- a. Feitas as configurações necessárias para a comunicação correta entre o ADS e o computador, deve-se agora calibrar o extensômetro. De volta à aba "Configurações das entradas analógicas":
 - i. Marcar as caixas dos canais que estão sendo utilizados e o canal 0.
 - ii. Alterar o nome do sinal para identificar o local onde o extensômetro está fixo no cabo (basta clicar 2x).
 - iii. Seccionar o tipo de leitura que será feita pelo AqDados. No caso de extensômetro: "Strain" e "Linear". Quando o software permitir, a faixa deve ser modificada para o valor fornecido no menu de informações.
 - iv. Clicar na opção Avançado.

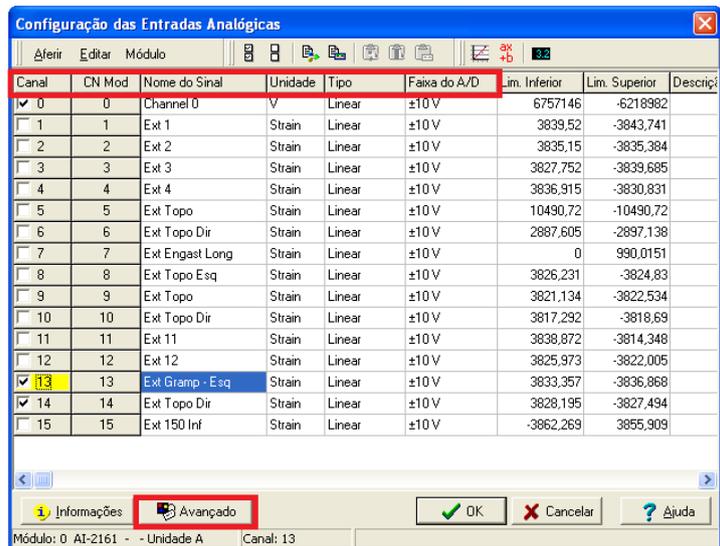


Figura B. 11 - Configuração dos extensômetros.

VII. Na janela de configurações avançadas:

- Marcar as caixas dos canais que estão sendo utilizados e o canal 0
- Escolher o tipo de entrada que o software irá ler, no caso deste manual: 1/4 de ponte.
- Selecionar o ganho do sinal, geralmente x1000 pois é o valor sugerido no menu informações para a configuração 1/4 de ponte.
- Escolher o filtro de Passa Baixas, geralmente de 30Hz
- Selecionar a excitação do extensômetro, também sugerida no menu informações: 5V
- 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. Existe uma tabela com os respectivos valores de faixas de medição do RCAL e a fórmula utilizada para o cálculo do shunt fixada no AqDados. Para facilitar, uma planilha com o valor do shunt de cada RCAL foi criada no Excel.

Gf	2,08	2 k
Rcal 1	57733	579425 rcall
Rcal 2	190807	120 rg
Rcal 3	578676	
Rgage	350	-103,529
Shunt1	-2897,05	
Shunt2	-880,267	
Shunt3	-290,607	

Figura B. 12 - Planilha Excel com cálculo do Shunt para cada Rcal.

Canal	CN Mod	Nome do Sinal	Unidade	Faixa do A/D	Tipo de Entrada	Ganho	Filtro Passa Baixas	Excitação	Balanco	Repouso	Repouso Eng.	RCAL	Shunt Cal	Shunt Eng	Lim. Inferior	Lim. Super
0	0	Channel 0	V	±10 V	1/4 ponte 350	×1000	30 Hz	E = 5V	0,0000 V	0,0000 V	0	RCEal na Exc	1,0000 V		6757146	-6218
1	1	Ext 1	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	×1000	30 Hz	E = 5V	0,0000 V	0,0000 V	0	RCEal na Exc	1,0000 V	95	3839,52	-3843
2	2	Ext 2	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	×1000	30 Hz	E = 5V	0,0000 V	0,0000 V	0	RCEal na Exc	1,0000 V	95	3835,1499	-3835
3	3	Ext 3	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	×1000	30 Hz	E = 5V	0,0000 V	0,0000 V	0	RCEal na Exc	1,0000 V	95	3827,752	-3839,6
4	4	Ext 4	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	×1000	30 Hz	E = 5V	0,0000 V	0,0000 V	0	RCEal na Exc	1,0000 V	95	3836,915	-3839,6
5	5	Ext Topo	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	×1000	30 Hz	E = 5V	0,0000 V	0,0000 V	0	RCEal na Exc	1,0000 V	95	10490,72	-1049
6	6	Ext Topo Dir	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	×1000	30 Hz	E = 5V	0,0000 V	0,0000 V	0	RCEal na Exc	1,0000 V	95	2887,605	-2897,1
7	7	Ext Engast Long	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	×1000	1000 Hz	E = 5V	0,0000 V	0,0000 V	0	RCEal na Exc	1,0000 V	95	0	990,01
8	8	Ext Topo Esq	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	×1000	30 Hz	E = 5V	0,0000 V	0,0000 V	0	RCEal na Exc	1,0000 V	95	3826,231	-3824,8
9	9	Ext Topo	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	×1000	30 Hz	E = 5V	0,0000 V	0,0000 V	0	RCEal na Exc	1,0000 V	95	3821,134	-3822,5
10	10	Ext Topo Dir	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	×1000	30 Hz	E = 5V	0,0000 V	0,0000 V	0	RCEal na Exc	1,0000 V	95	3817,292	-3818,6
11	11	Ext 11	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	×1000	30 Hz	E = 5V	0,0000 V	0,0000 V	0	RCEal na Exc	1,0000 V	95	3838,8721	-3814,3
12	12	Ext 12	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	×1000	30 Hz	E = 5V	0,0000 V	0,0000 V	0	RCEal na Exc	1,0000 V	95	3825,9729	-3822,0
13	13	Ext Gramp - Esq	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	×1000	30 Hz	E = 5V	0,0070 V	0,0073 V	0	RCAL1 na Exc	7,5620 V	-2897,05	3837,6113	-3831,9
14	14	Ext Topo Dir	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	×1000	30 Hz	E = 5V	-0,0073 V	-0,0089 V	0	RCAL1 na Exc	7,5626 V	-2897,05	3822,915	-3829,6
15	15	Ext 150 Int	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	×1000	30 Hz	E = 5V	0,0000 V	0,0000 V	0	RCEal na Exc	1,0000 V	95	-3862,269	3859,9

Figura B. 13 - Caracterização do extensômetro e da faixa de leitura.

- g. Uma vez que os dados do software estão de acordo, faz-se então o balanceamento dos canais e a calibração dos extensômetros:



Figura B. 14 - Balanceamento.

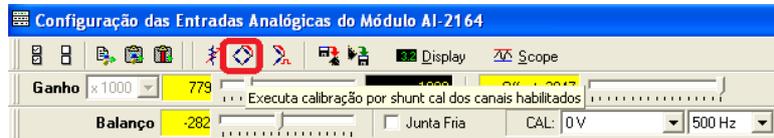


Figura B. 15 - Calibração.

- h. Ao final da calibração, o software abre uma janela de resposta como a ilustrada abaixo. Caso não exista nenhum erro destacado na parte direita da janela, a extensometria foi realizada com sucesso.

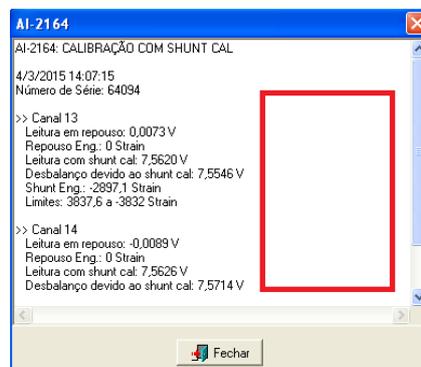


Figura B. 16 - Relatório da extensometria.