



**PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**ESTIMATIVA DOS ESFORÇOS DINÂMICOS DE  
FADIGA EM CABOS CONDUTORES DE  
ENERGIA UTILIZANDO VARIAÇÕES DA  
RELAÇÃO DE POFFENBERGER-SWART**

Por:

**JEAN LUCCA JULIANNI NOÉ**

**Brasília, 29 de Junho de 2018**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**ESTIMATIVA DOS ESFORÇOS DINÂMICOS DE FADIGA EM CABOS  
CONDUTORES DE ENERGIA UTILIZANDO VARIAÇÕES DA  
RELAÇÃO DE POFFENBERGER-SWART**

Por:  
**Jean Lucca Julianni Noé**

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

**Banca Examinadora**

Prof. Jorge Luiz de Almeida Ferreira, UnB/ ENM  
(Orientador)

---

Prof. Luis Augusto Conte Mendes Veloso, UnB/ ENM

---

Prof. Thiago de Carvalho Rodrigues Doca, UnB/ ENM

---

Brasília, 29 de Junho de 2018

## AGRADECIMENTOS

*A Deus, que sempre me abençoou e permitiu que eu chegasse aqui. É por Ele que estou concluindo mais uma etapa importante na vida.*

*Aos meus pais Marco Aurélio e Lucília, por todo amor, compreensão, sacrifício, apoio nos momentos de dificuldade para que eu fosse sempre mais longe em busca dos meus objetivos e por contribuírem para eu me tornar a cada dia uma pessoa melhor.*

*Aos meus avós Ubaldo e Marlene, pelo amor, apoio e por sempre cuidarem de nossa família, zelando pelo nosso bem.*

*Ao meu irmão Christopher, pela amizade e companheirismo.*

*Ao meu primo Yago e tia Raquel, pela amizade, carinho, companheirismo e pelo apoio de sempre.*

*Aos meus amigos conterrâneos Jonas, Fabiano (primo), Enéas, Desueta e Hérlis Jr, pelos 9 anos de convivência na república, pela amizade sincera, por serem pessoas incríveis, por estarem nos momentos bons, por compartilharem as dores nos momentos de dificuldade.*

*Aos professores Alex, Thiago Doca e Luis Augusto pelas críticas construtivas e pela ajuda que permitiram a realização do trabalho. Ao Professor Jorge Luiz, meu orientador, que esteve disposto a ajudar na realização desse trabalho.*

*Aos colegas de laboratório Remy, Thiago, Pedro Henrique, Renato e Ricardo, que sempre estiveram dispostos e não mediram esforços em me ajudar nos procedimentos experimentais. Além de contribuírem com os ensaios, contribuíram com a amizade existente no ambiente do laboratório de cabos.*

*Aos companheiros da “Diretoria”, amigos da Engenharia, que me proporcionaram amizades verdadeiras, companheirismo. Houve muito tempo de estudo para as provas, trabalhos mas houve momentos de descontração que permitiram a passagem pelo curso de Engenharia Mecânica ser mais satisfatória.*

*Aos amigos e irmãos em Cristo, que foram fundamentais no meu processo de passagem pela Engenharia diante de todo apoio, carinho e orações que me fortaleceram nesse processo.*

*À Apuama Racing, equipe de Fórmula SAE da Universidade de Brasília, que me proporcionou crescimento como pessoa, experiências de trabalho. Além disso, foram feitas muitas amizades com as quais levarei por muito tempo.*

---

**RESUMO**

Comumente, o processo de fadiga em linhas de transmissão de energia inicia-se em locais como: grampo de suspensão e de ancoragem, espaçadores e esferas sinalizadoras. A medição das tensões atuantes nos pontos críticos dos cabos condutores é realizada de forma indireta por meio de uma idealização proposta por Poffenberger e Swart (1965). De acordo com essa idealização, assume-se que o cabo está esticado e vibra de forma estacionária. As equações deduzidas no trabalho foram retiradas do livro EPRI Transmission Line. A equação que tem como parâmetro a deflexão próxima ao último ponto de contato já foi testada em muitos trabalhos e seu uso permite estimar de forma consistente a tensão efetiva no condutor, apesar do nível de idealização das hipóteses utilizadas para sua dedução. O objetivo do trabalho foi realizar ensaios que permitissem validar a equação, cuja tensão dinâmica depende do deslocamento do cabo no anti-nó e verificar se a equação que tem como parâmetro a deflexão utilizada no ponto correspondente ao anti-nó, é válida. Os ensaios realizados nesse trabalho com os cabos CAL 900 MCM e TERN permitiram avaliar as equações e verificar para as condições de ensaio utilizadas que a equação que depende do deslocamento do cabo no anti-nó afasta-se dos valores obtidos experimentalmente enquanto que a equação obtida pela deflexão se aproxima das tensões obtidas experimentalmente.

Palavras chave: Poffenberger-Swart; Fadiga; Tensões dinâmicas; Cabo condutor.

---

**ABSTRACT**

Commonly, the fatigue process in power transmission lines begins in places such as: suspension and anchoring clamps, splices and signaling balls. The measurement of the stresses at the critical points of the conductor cables is performed indirectly through an idealization proposed by Poffenberger and Swart (1965). According to this idealization, it is assumed that the cable is stretched and vibrates stationary. The equations deducted at work were taken from EPRI Transmission Line book. The equation that has as parameter the deflection close to the last point of contact has already been tested in many studies and its use allows to consistently estimate the effective stress in the conductor, despite the level of idealization of the hypotheses used for its deduction. The objective of the work was to carry out tests that allowed to validate the equation, whose dynamic stress depends on the displacement of the cable in the anti-node and verify if the equation that has as parameter the deflection used in the point corresponding to the anti-node, is valid. The tests performed in this work with cables CAL 900 MCM and TERN cables allowed to evaluate the equations and verify for the test conditions used that the equation that depends on the displacement of the cable in the anti-node departs from the values obtained experimentally while the equation obtained by the deflection approaches the stress obtained experimentally.

Keywords: Poffenberger-Swart; Fatigue; Dynamic stress; Conductor cable.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Motivação.....	1
1.2	Objetivo.....	3
1.3	Estrutura do Trabalho.....	3
2	FADIGA EM CABOS .....	5
2.1	Fadiga em Cabos de Transmissão de Energia.....	5
2.1.1	Tipos de vibrações nos cabos condutores.....	6
2.2	Mecanismos de Falha por Fadiga em Cabos Condutores.....	9
2.3	Metodologias de Estimativa de Vida em Fadiga para Linhas de Transmissão .....	10
2.3.1	Máxima deformação devido à deflexão (IEEE) .....	11
2.3.2	Limite de resistência à fadiga (EPRI).....	11
2.3.3	Estimativa de tempo do condutor (CIGRÉ) .....	12
2.4	Esforços Dinâmicos em Cabos Condutores .....	13
2.4.1	Equação de Poffenberger-Swart (PS).....	14
2.5	Esforços Estáticos em Cabos Condutores .....	16
2.5.1	Every Day Stress .....	16
2.5.2	Critério H/w.....	17
3	EQUAÇÃO DE POFFENBERGER-SWART .....	20
3.1	Histórico.....	20
3.2	Formulação matemática .....	21
4	METODOLOGIA .....	28
4.1	Descrição da bancada experimental .....	28
4.1.1	Dispositivo para fixação do grampo de suspensão.....	31
4.1.2	Sistema de aquisição de dados .....	31
4.2	Materiais.....	32
4.2.1	Cabos CAL 900 e TERN.....	32
4.2.2	Grampos de suspensão .....	33
4.2.3	Acelerômetros .....	34
4.2.4	Extensometria.....	35
4.3	Posicionamento e tracionamento do cabo condutor .....	35
4.4	Instrumentação dos cabos condutores .....	37
4.4.1	Posicionamento dos extensômetros.....	37
4.4.2	Posicionamento dos sensores .....	39
4.5	Procedimento Experimental .....	41
4.5.1	Varredura.....	42
4.5.2	Localização do anti-nó .....	42

4.5.3	Calibração e Balanceamento dos extensômetros.....	42
4.5.4	Leitura dos extensômetros.....	42
4.6	Avaliação da Fórmula de P-S.....	43
4.7	Parâmetros de ensaio.....	43
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	45
5.1	Resultados comparativos entre tensões experimentais e tensões teóricas da Equação modificada (28) de Poffenberger-Swart.....	45
5.1.1	Condutor CAL 900.....	45
5.1.2	Condutor TERN .....	50
5.2	Resultados comparativos entre tensões experimentais e tensões teóricas pela Equação (29) de Poffenberger-Swart.....	54
5.2.1	Condutor CAL 900.....	55
5.2.2	Condutor TERN .....	59
5.3	Discussões .....	63
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	65
6.1	Resultados dos ensaios dinâmicos.....	65
6.2	Propostas para trabalhos futuros .....	66
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	67
	ANEXOS.....	69
	Anexo A – Manuseio do Software de controle .....	70
	Anexo B – Calibração e balanceamento dos extensômetros.....	76

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Principais componentes de uma linha de transmissão. ....	1
Figura 1.2- Representação esquemática cabo/grampo mostrando a posição padrão para medida da amplitude de deslocamento, $Y_b$ (ROCHA, 2016). ....	3
Figura 2.1 - Montagem cabo-grampo de suspensão na torre (FADEL, 2010). ....	5
Figura 2.2 – Representação da incidência do vento sobre o cabo em x pela velocidade U e deslocamento vertical do cabo em y. (FADEL, 2010) .....	6
Figura 2.3– Velocidade média anual dos ventos no Brasil (CEPEL, 2013). ....	7
Figura 2.4 – Tipos de vibração em cabos condutores (modificado: EPRI, 2006) .....	8
Figura 2.5 – (a) Vista isométrica do cabo condutor. (b) Vista em corte do cabo mostrando em vermelho as regiões de contato (ROCHA, 2016). ....	9
Figura 2.6 – Fio CA rompido devido à fadiga por <i>fretting</i> (BONIARDI, 2007) .....	10
Figura 2.7 - (a) Vibrógrafo modelo Pavica (b) Esquema de montagem do vibrógrafo na linha (GOMES, 2015) .....	13
Figura 2.8 - Disposição dos fios de um cabo condutor (EPRI, 2006). ....	14
Figura 2.9 - Montagem esquemática cabo/grampo mostrando a posição padrão para medida da amplitude de deslocamento, $Y_b$ (ALMEIDA <i>et al</i> , 2013). ....	14
Figura 3.1 – Onda resultante da vibração do cabo (modificado: EPRI, 2006). ....	22
Figura 3.2 – Região adjacente ao ponto de engaste do cabo condutor ( EPRI, 2006: Modificado) .....	22
Figura 3.3 – Momento resultante entre a linha de carregamento e a linha neutra do cabo (modificado: EPRI, 2006). ....	23
Figura 4.1 – Representação esquemática da bancada experimental (ROCHA, 2016). ....	28
Figura 4.2 – Blocos móveis das bancadas .....	29
Figura 4.3 – Blocos fixos com trilhos e excitadores eletromecânicos .....	29
Figura 4.4 – (a) Grampo de ancoragem; (b) Tifor. ....	30
Figura 4.5 – Bloco fixo 3 .....	30
Figura 4.6 – Dispositivo para fixação do grampo de suspensão .....	31
Figura 4.7 – Aquisitor de dados ADS 2000 .....	32
Figura 4.8 – Grampo de suspensão modelo 55101/003 Forjasul .....	34
Figura 4.9 – Código dos extensômetros (Excel) .....	35
Figura 4.10 – Polias utilizadas para suportar o cabo .....	36
Figura 4.11 – Região lixada dos fios do cabo .....	37
Figura 4.12 – Extensômetros colados no ponto oposto ao UPC e conector sindal .....	38
Figura 4.13 – Conector sindal para conexão dos fios dos extensômetros .....	39
Figura 4.14 – Acelerômetro posicionado sobre a mesa do shaker .....	40
Figura 4.15 – Acelerômetro no ponto a 89 mm de distância do UPC. ....	40
Figura 4.16 – Acelerômetro localizado no primeiro anti-nó .....	41
Figura 5.1 – Tensões alternadas para o cabo CAL 900 com parâmetro $H/w = 1820$ m. ....	46
Figura 5.2 – Erros entre tensões para o cabo CAL 900 com parâmetro $H/w = 1820$ m. ....	46
Figura 5.3 – Tensões alternadas para o cabo CAL 900 com parâmetro $H/w = 2144$ m. ....	47
Figura 5.4 – Erros entre tensões para o cabo CAL 900 com parâmetro $H/w = 2144$ m. ....	48
Figura 5.5 – Tensões alternadas para o cabo CAL 900 com parâmetro $H/w = 2725$ m. ....	49
Figura 5.6 – Erros entre tensões para o cabo CAL 900 com parâmetro $H/w = 2725$ m. ....	49
Figura 5.7 – Tensões alternadas para o cabo TERN com parâmetro $H/w = 1820$ m .....	50
Figura 5.8 – Erros entre tensões para o cabo TERN com parâmetro $H/w = 1820$ m .....	51
Figura 5.9 – Tensões alternadas para o cabo TERN com parâmetro $H/w = 2144$ m .....	51
Figura 5.10 – Erros entre tensões para o cabo TERN com parâmetro $H/w = 2144$ m .....	52
Figura 5.11 – Tensões alternadas para o cabo TERN com parâmetro $H/w = 2725$ m .....	53
Figura 5.12 – Erros entre tensões para o cabo TERN com parâmetro $H/w = 2725$ m .....	53
Figura 5.13 – Tensões alternadas para o cabo CAL 900 com parâmetro $H/w = 1820$ m. ....	55

Figura 5.14 – Erros entre tensões para o cabo CAL 900 com parâmetro $H/w = 1820$ m.....	56
Figura 5.15 – Tensões alternadas para o cabo CAL 900 com parâmetro $H/w = 2144$ m.....	57
Figura 5.16 – Erros entre tensões para o cabo CAL 900 com parâmetro $H/w = 2144$ m.....	57
Figura 5.17 – Tensões alternadas para o cabo CAL 900 com parâmetro $H/w = 2725$ m.....	58
Figura 5.18 – Erros entre tensões para o cabo CAL 900 com parâmetro $H/w = 2725$ m.....	58
Figura 5.19 – Tensões alternadas para o cabo TERN com parâmetro $H/w = 1820$ m.....	59
Figura 5.20 – Erros entre tensões para o cabo TERN com parâmetro $H/w = 1820$ m.....	60
Figura 5.21 – Tensões alternadas para o cabo TERN com parâmetro $H/w = 2144$ m.....	61
Figura 5.22 – Erros entre tensões para o cabo TERN com parâmetro $H/w = 2144$ m.....	61
Figura 5.23 – Tensões alternadas para o cabo TERN com parâmetro $H/w = 2725$ m.....	62
Figura 5.24 – Erros entre tensões para o cabo TERN com parâmetro $H/w = 2725$ m.....	62

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Tipos de condutores e descrição.....	6
Tabela 2 – Cabos condutores e limites de resistência EPRI.....	12
Tabela 3 – Porcentagem de linhas danificadas em função do nível de EDS (CIGRÉ, 1999). ....	17
Tabela 4 – Limites recomendados para H/w de acordo com o terreno. ....	18
Tabela 5 – Propriedades dos cabos CAL 900 e TERN .....	33
Tabela 6 – Propriedades do grampo de suspensão .....	33
Tabela 7 – Acelerômetros utilizados no ensaio.....	34
Tabela 8 – Frequências mediante Equação (30).....	44
Tabela 9 – Parâmetros de ensaio .....	44
Tabela 10 – Valores para cálculo mediante formulação de Poffenberger-Swart .....	54

**LISTA DE ABREVIACOES**

ACAR	Cabos de Alumínio com Alma de Liga de Alumínio (Aluminium Conductor Alloy Reinforced)
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA (AAC)	Cabos de Alumínio (All Aluminium Conductor)
CAA (ACSR)	Condutores de Alumínio com Alma de Aço (Aluminum Conductor Steel Reinforced)
CAL (AAAC)	Condutores de Alumínio Liga (All Aluminum Alloy Conductor)
CIGRÉ	Conseil International des Grands Réseaux Electriques (International Council on Large Electric Systems)
EDS	Every Day Stress
EPRI	Electric Power Research Institute
ERE	Extensmetro de Resistência Elétrica
IEEE	Institute of Electrical and Eletronics Engineers
LT	Linhas de Transmissão
P-S	Poffenberger-Swart
SIN	Sistema Interligado Nacional
TW	Fios Trapezoidais (Trapezoidal Wires)
UnB	Universidade de Brasília
UPC	ltimo Ponto de Contato

## LISTA DE SÍMBOLOS

**Latinos**

$A_a$	Área do fio de alumínio, mm <sup>2</sup> .
$A_s$	Área do fio de aço, mm <sup>2</sup> .
$d_a$	Diâmetro de um fio de alumínio, mm.
$d_s$	Diâmetro de um fio de aço, mm.
$E$	Módulo de elasticidade, MPa
$E_a$	Módulo de elasticidade dos fios de alumínio, MPa.
$E_s$	Módulo de elasticidade dos fios de aço, MPa.
$EI$	Rigidez flexural, kgf.
$EI_{\text{mín}}$	Mínima rigidez do cabo à flexão, kgf.
$f$	Frequência de vibração do cabo, Hz.
$G$	Constante gravitacional, m/s <sup>2</sup> .
$I$	Momento de inércia, mm <sup>4</sup>
$M$	Massa de cabo por unidade de comprimento, kg/m.
$M(x)$	Momento fletor no ponto analisado, N.m
$n_a$	Número de fios de alumínio.
$n_s$	Número de fios de aço.
$A_s$	Tensão média atuante nos fios de alumínio do condutor, MPa.
$S_s$	Tensão média atuante nos fios de aço do condutor, MPa.
$x$	Distância medida a partir do UPC, mm.
$x_1$	Distância medida entre o ponto de engaste do cabo e onde há interceptação da linha de ação da carga de esticamento $H$ e o eixo $x$
$w$	Peso específico do condutor, kgf/km
$Y_b$	Faixa de deslocamento pico a pico, mm.
$y_{\text{max}}$	Amplitude de deslocamento do anti-nó, mm

**Gregos**

$\beta$	Ângulo de inclinação do nó, graus.
$\sigma_{\text{exp}}$	Tensão dinâmica experimental, MPa
$\sigma_{Y_b}$	Tensão dinâmica calculada por meio da equação de Poffenberger-Swart, MPa
$\sigma_{y_{\text{max}}}$	Tensão dinâmica calculada por meio da equação modificada de Poffenberger-Swart, MPa
$\rho_a$	Massa específica dos fios de alumínio do condutor, kg/m <sup>3</sup> .
$\rho_s$	Massa específica dos fios de aço do condutor, kg/m <sup>3</sup> .

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação

A energia elétrica é uma das formas de energia mais utilizadas nas sociedades atuais, devido ao fácil transporte e alta eficiência energética. O acesso à energia se deve por meio de redes de transmissão que conectam as unidades geradoras aos centros consumidores. Diante da grande extensão territorial brasileira e da matriz energética ser proveniente principalmente de hidroelétricas, os centros consumidores estão localizados a centenas ou milhares de quilômetros dos pontos de geração de energia elétrica (MIRANDA, 2017).

O Brasil conta com um grande sistema de geração e transmissão de energia elétrica. Esse sistema principal é composto por usinas, linhas de transmissão e ativos de distribuição, o Sistema Interligado Nacional (SIN), que se trata de uma imensa “rodovia elétrica”, sendo constituída por conexões realizadas ao longo do tempo abrangendo a maior parte do território brasileiro. Há outros sistemas de menor porte, não-conectados aos SIN que são chamados de Sistemas Isolados, sendo concentrados principalmente na região Amazônica. (ANEEL, 2008).

A composição das linhas de transmissão se deve aos seguintes elementos: cabos condutores de energia, estruturas de suportes, acessórios e estruturas isolantes, fundações, para-raios, aterramentos e outros acessórios. Conforme Figura 1.1, são mostrados os principais componentes de uma linha de transmissão.

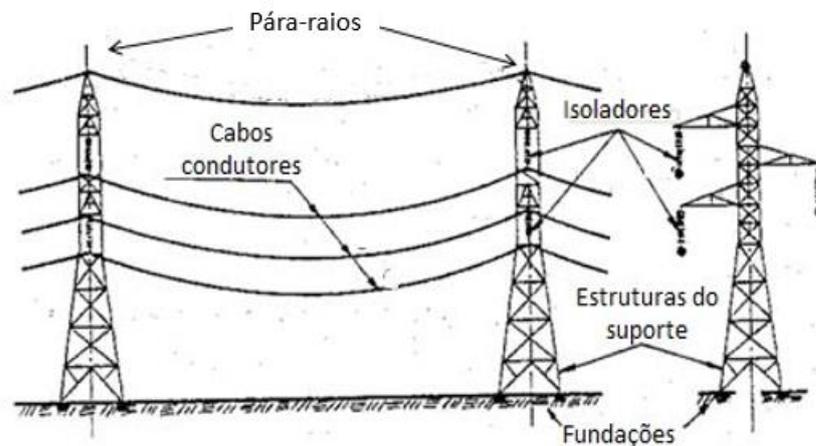


Figura 1.1 – Principais componentes de uma linha de transmissão.  
(modificado: FUCHS, 1992)

Nas linhas de transmissão, o cabo condutor é considerado o elemento mais importante, por ser responsável pela transmissão de energia elétrica. Os cabos condutores são responsáveis também por sustentar cargas mecânicas, elétricas e ambientais. Pelo fato dos cabos corresponderem por boa parte dos custos, valor que chega a 40% dos investimentos (EPRI, 2006). É importante analisar a fadiga por *fretting* que ocorre devido às vibrações eólicas, para a realização das manutenções. A realização de estudos dos cabos condutores é de extrema importância (FRONTIN et. al, 2010).

As ocorrências de falhas nos cabos condutores se devem a presença de vibrações eólicas, caracterizadas por altas frequências e baixas amplitudes, contribuindo para que o fio do cabo sofra falha por fadiga. As vibrações causadas pelos ventos ocorrem em uma faixa de 3 a 200 Hz para velocidades de 1 a 7 m/s (CIGRE, 2008). Devido à flexão do fio, aparecem tensões dinâmicas. Com os fios do cabo tensionados, pressão é gerada sobre as camadas abaixo, o que resulta em fricção entre os fios do cabo durante as vibrações. Em locais de restrição de movimento do cabo condutor, como nas proximidades da boca do grampo de suspensão, as curvaturas são máximas e ocorrem deslizamentos entre os fios do cabo, permitindo a geração de fissuras. Sob pequenas amplitudes de vibração, a pressão de contato pode estabilizar as fissuras, mas caso as amplitudes sejam grandes ocorrerão propagações dessas fissuras, provocando a falha do fio (GUÉRARD, 2011).

As falhas por fadiga das linhas de transmissão tornam importante avaliar as tensões atuantes nos cabos condutores, visando garantir a integridade e durabilidade dos mesmos. No entanto, medir as tensões em cabos condutores é difícil devido às complicações de acesso às linhas de transmissão após a instalação. Diante disso, uma simplificação foi realizada através de uma metodologia desenvolvida para medições de amplitude de deslocamento por meio da flexão do cabo, conhecida como formulação de Poffenberger-Swart (POFFENBERGER, 1965). Essa formulação correlaciona linearmente o deslocamento do condutor com o nível de tensão próximo ao ponto de restrição do cabo, localizado no grampo de suspensão.

A formulação de Poffenberger-Swart relaciona a tensão nominal na zona de falha com a amplitude de deslocamento no ponto padronizado a 89 mm (3,5”) a partir do último ponto de contato entre o cabo e o grampo, conforme representa Figura 1.2.

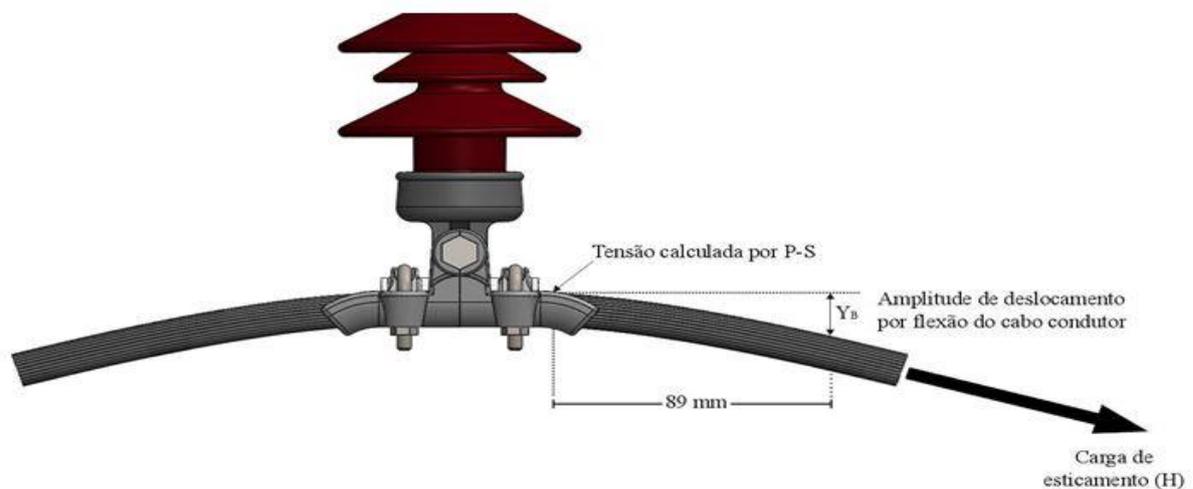


Figura 1.2- Representação esquemática cabo/grampo mostrando a posição padrão para medição da amplitude de deslocamento,  $Y_b$  (ROCHA, 2016).

Alguns grampos utilizados, no entanto, possuem geometria ou estrutura que impossibilitam a medição das tensões atuantes, a partir do deslocamento no ponto a 89 mm do último ponto de contato. Assim sendo, é cogitado que uma possível solução para os casos em que não se tem condições de medir as tensões no ponto medido a 89 mm do último ponto de contato seria estimar as tensões atuantes a partir de medidas de deslocamento no anti-nó.

## 1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho de natureza experimental foi relacionar a formulação analítica de tensões nominais encontradas pelo deslocamento do anti-nó, que é uma variante da formulação de Poffenberger-Swart com as tensões obtidas por meio das deformações dos extensômetros colados em regiões diametralmente opostas do cabo no último (UPC) e verificar a validade dessa formulação para estimativas de tensões em cabos condutores de energia. Além disso, a Equação de Poffenberger relacionada à deflexão do cabo foi calculada considerando os deslocamentos no anti-nó e comparada aos valores de tensões obtidos experimentalmente.

Os parâmetros utilizados são valores de  $H/w$  iguais a 1820, 2144 e 2725 m e cabos com constituições diferentes, sendo um de liga de alumínio, o cabo CAL 900 MCM e outro constituído de alma de aço e fios de alumínio, o cabo TERN.

## 1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho encontra-se dividido em seis capítulos.

O segundo capítulo trata especificamente do fenômeno de fadiga em cabos condutores de energia, abordando os modos de vibrações existentes e suas características, os mecanismos de falha e como ocorrem, as metodologias de estimativa de vida em fadiga para cabos condutores e como os esforços dinâmicos e estáticos padronizados são calculados ou estimados.

O terceiro capítulo aborda a equação de Poffenberger-Swart através do seu histórico e dedução considerando os cabos como vigas de Euler. Para isso, levando em conta a curvatura do cabo no ponto de engaste do cabo com o grampo, são deduzidas três formas de se medir a tensão nominal atuante, que são vistas no capítulo 3, dentre elas a que depende do deslocamento no primeiro anti-nó .

O quarto capítulo trata dos métodos e materiais utilizados para realização dos experimentos nas bancadas do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores da Universidade de Brasília.

O quinto capítulo resulta nos dados obtidos pelos ensaios e comparações feitas para os valores de tensões analíticas e experimentais.

O sexto capítulo faz as considerações finais a respeito dos ensaios realizados.

## 2 FADIGA EM CABOS

### 2.1 Fadiga em Cabos de Transmissão de Energia

Os cabos representam uma boa parte dos custos de um sistema de transmissão de energia. Assim sendo, falhas nos cabos de transmissão de energia significam um prejuízo financeiro muito grande. Por isso, é de extrema importância o estudo de fadiga em cabos.

O estudo de fadiga em cabos de transmissão de energia é importante, devido aos altos danos que os cabos sofrem por conta das vibrações. As falhas ocorrem por meio das vibrações, devido aos carregamentos cíclicos que provocam o *fretting*, propiciando surgimento e propagação de trincas nos fios do condutor (BELLORIO, 2009).

As falhas mecânicas dos cabos condutores ocorrem em pontos de restrição de deslocamento longitudinal do cabo, que são: grampo de suspensão, fixação dos amortecedores, espaçadores, etc (CIGRÉ, 1985).

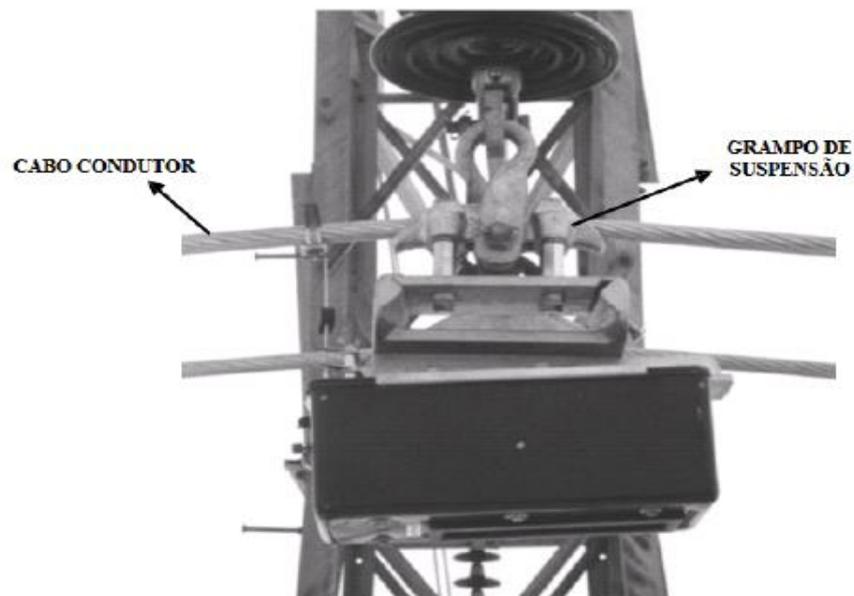


Figura 2.1 - Montagem cabo-grampo de suspensão na torre (FADEL, 2010).

A Tabela 1 exibe alguns tipos de cabos existentes que compõem as linhas de transmissão.

Tabela 1 – Tipos de condutores e descrição

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

### 2.1.1 Tipos de vibrações nos cabos condutores

Os tipos de vibrações que podem ocorrer nos cabos condutores de energia são:

- Excitação Eólica

Tipo de vibração considerada como principal causa de falhas por fadiga nos cabos condutores das linhas de transmissão, no Brasil. Conhecida também por vibrações de Von Kármán são vibrações que ocorrem em faixas de altas frequências (3 a 200 Hz) e baixas amplitudes (iguais ou menores que o diâmetro do condutor). Vibrações eólicas podem ocorrer em qualquer linha de transmissão e em qualquer momento, com ventos de níveis de 1 a 7 m/s (EPRI, 2006).

A vibração eólica é causada pela ação do vento. Os ventos ao atingirem as linhas de transmissão descolam os cabos para as áreas de menor pressão em movimento alternado vertical em intervalos regulares conforme mostrado na Figura 2.2, sendo o deslocamento autoalimentado por continuidade do fluxo de ar, com velocidade  $U$  (FADEL, 2010).

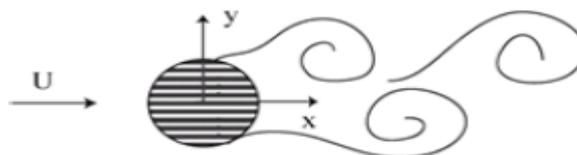


Figura 2.2 – Representação da incidência do vento sobre o cabo em  $x$  pela velocidade  $U$  e deslocamento vertical do cabo em  $y$ . (FADEL, 2010)

Conforme Figura 2.3 percebe-se a incidência dos ventos no Brasil, com velocidade predominante de 3,5 a 4,0 m/s, que corresponde justamente à faixa de velocidades dos ventos que caracterizam a vibração eólica. Assim sendo, nota-se que a vibração eólica é altamente propensa a ocorrer e esse tipo de vibração não deve ser negligenciada.

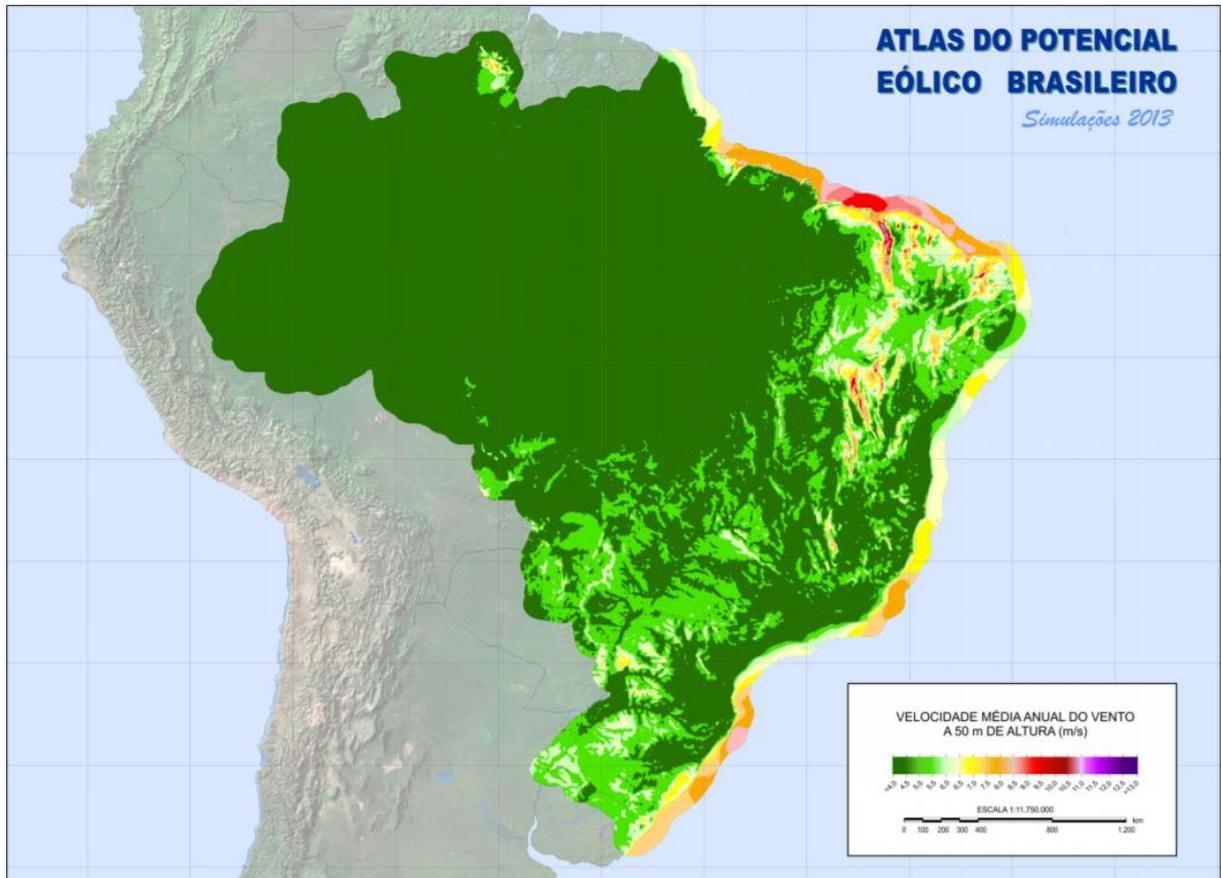


Figura 2.3– Velocidade média anual dos ventos no Brasil (CEPEL, 2013)

- Galope

O galope ocorre tanto em condutores singelos quanto em feixes de condutores e é caracterizado por baixas frequências (0,1 a 3 Hz) e elevadas amplitudes (entre 5 e 300 vezes o diâmetro do condutor). Sua ocorrência se dá devido ao perfil aerodinâmico formado pelo acúmulo de gelo na linha de transmissão e incidência dos ventos de 7 a 18 m/s (EPRI, 2006).

O galope pode causar um grande deslocamento do cabo, provocando assim altas cargas dinâmicas nos componentes das linhas de transmissão sendo que as falhas podem ocorrer em curtos períodos de tempo além de provocar choques mecânicos entre os condutores.

- Subvão

Tipo de vibração que ocorre em linhas de transmissão que utilizam feixes de condutores com disposições paralelas e em direção perpendicular ao fluxo de vento. O subvão é causado por ventos moderados a fortes, com variações de velocidade que vão de 4 a 18 m/s e variações de frequências que ocorrem entre 1 a 5 Hz. Por apresentar grandes amplitudes de vibração, o subvão pode ocasionar grandes choques mecânicos entre os componentes (KIESSLING, 2002).

A corrente de ar ao incidir sobre o primeiro cabo é perturbada de modo que movimentos aerodinâmicos ocorrem no condutor seguinte propiciada por ela, sendo então gerados componentes de forças que induzem o cabo a apresentar movimentos elípticos regulares, capazes de resultar na falha por fadiga do condutor em um pequeno número de ciclos.

Após analisar os tipos de vibrações causadas pelos ventos nos cabos condutores, estes são mostrados conforme a Figura 2.4.

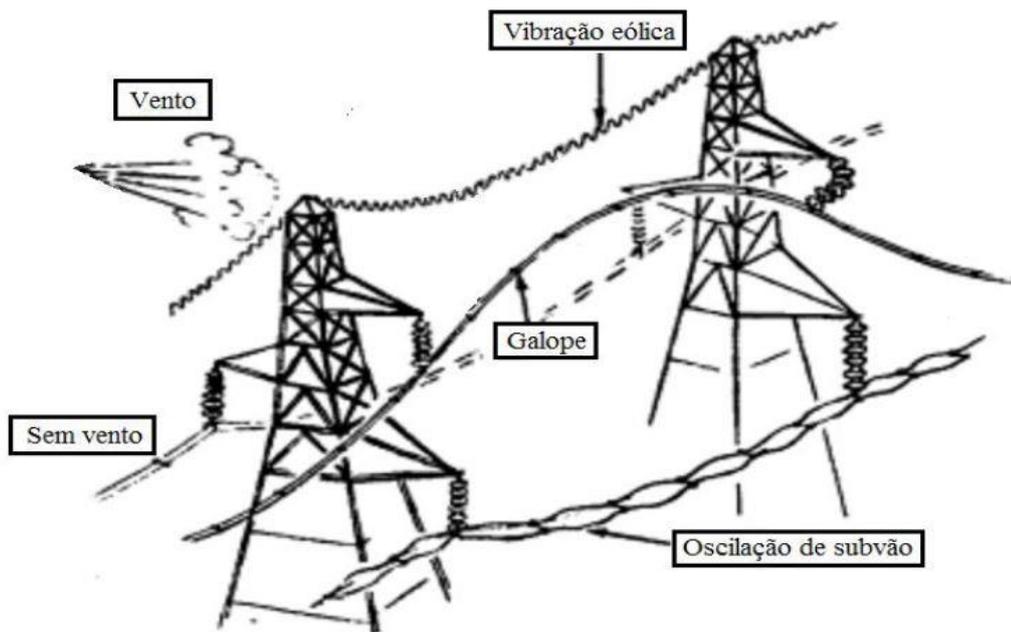


Figura 2.4 – Tipos de vibração em cabos condutores (modificado: EPRI, 2006)

No Brasil, inexistente acúmulo de gelo nas linhas de transmissão, logo, a vibração por galope não se faz presente no país. Devido ao regime de ventos no Brasil, oscilações de subvão são pouco comuns. Assim, a predominância é de vibrações eólicas.

## 2.2 Mecanismos de Falha por Fadiga em Cabos Condutores

A fadiga nos cabos condutores é a principal falha causada pela vibração eólica. O fenômeno de fadiga ocorre devido aos esforços cíclicos gerados nos pontos de restrição do movimento do cabo. Esses pontos são: locais de suporte, grampos de suspensão, isoladores de pinças, espaçadores de amortecedores, etc. (EPRI, 2006).

Para uma melhor compreensão das falhas que ocorrem nos cabos condutores, é necessário conhecer a configuração dos fios. Conforme Figura 2.5 são ilustradas algumas regiões de contato na montagem cabo/grampo de suspensão de um condutor do tipo ACSR. Essas regiões são zonas críticas onde possivelmente ocorrem o processo de *fretting* e fadiga por *fretting*. Os contatos envolvem fios de alumínio, fio de alumínio com grampo, fio de alumínio com fio de aço e fios de aço.

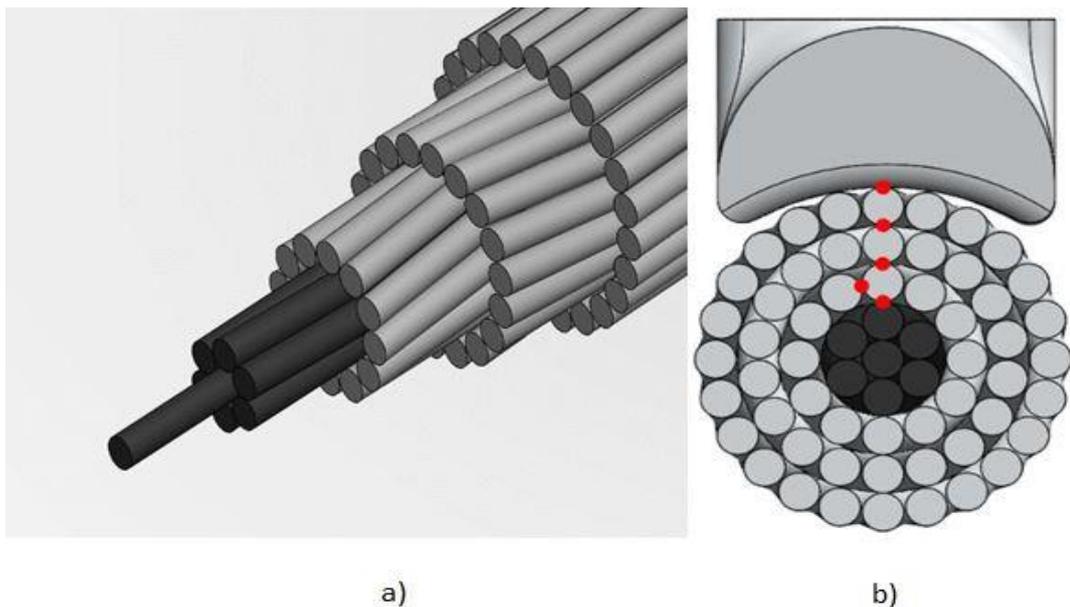


Figura 2.5 – (a) Vista isométrica do cabo condutor. (b) Vista em corte do cabo mostrando em vermelho as regiões de contato (ROCHA, 2016).

A fadiga por *fretting* é um mecanismo de falha causado quando a estrutura com carga de fadiga sofre dano superficial sob carga de aperto por outro corpo que entra em contato. O *fretting* causa uma redução de vida à fadiga dos componentes, que depende dos danos da superfície e resulta de duas superfícies em contato, que provocam entalhe e/ou rachaduras devido às tensões (REEVES, 1976).

Nos cabos o *fretting* ocorre por causa das restrições de deslocamento, em função do deslizamento dos fios constituintes, gerando microdeslizamentos somados às forças de fricção. O *fretting* resulta do desgaste causado pelo atrito entre as superfícies (AZEVEDO, 2008).

Conforme Figura 2.6 é mostrado um cabo do tipo CA (condutor de alumínio puro) rompido (BONIARDI 2007).

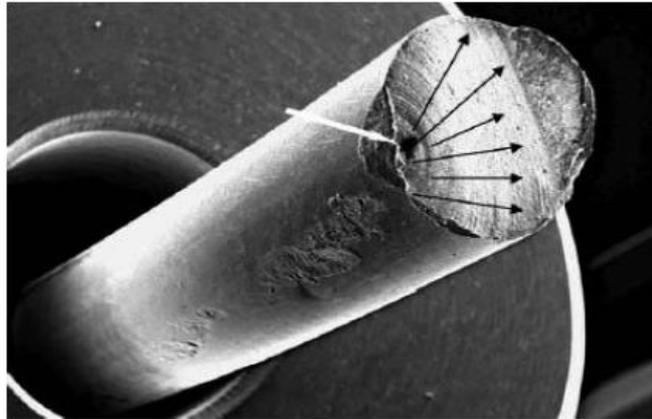


Figura 2.6 – Fio CA rompido devido à fadiga por *fretting* (BONIARDI, 2007)

A fadiga por *fretting* depende de fatores como a pressão de contato, amplitude de deslizamento entre os fios, coeficiente de fricção, tipo de material em contato, condições da superfície do material e ambiente externo (FRONTIN et. al, 2010).

Um parâmetro de grande importância é a carga de esticamento aplicada ao cabo, que altera o perfil do contato entre os fios e destes com o grampo, influenciando de forma significativa nas zonas de *fretting*, na nucleação e no avanço das trincas nos fios (FADEL, 2010).

### 2.3 Metodologias de Estimativa de Vida em Fadiga para Linhas de Transmissão

É difícil descrever o problema de fadiga em cabos devido à complexidade. A descrição do problema de fadiga em cabos é algo complexo e não há solução analítica que descreva o problema. No entanto, através de metodologias apropriadas é possível representar o fenômeno de fadiga por meio de dois tipos de informações que são: quantificação da intensidade de vibração e a adoção de parâmetros de medida da resistência à fadiga da montagem condutor/grampo que previnem a ocorrência de falhas.

As metodologias partem do pressuposto que o mesmo princípio deve ser seguido, sendo que tanto a deformação quanto a tensão a partir do ponto medido a 89 mm a partir do

UPC entre o cabo e o grampo não devem ser superiores aos limites de acordo com cada metodologia. As metodologias são:

- IEEE: Máxima deformação devido à deflexão;
- EPRI: Limite de resistência à fadiga;
- CIGRÉ: Estimativa de tempo do condutor

### **2.3.1 Máxima deformação devido à deflexão (IEEE)**

Metodologia que se baseia na formulação de Poffenberger-Swart juntamente com o método padrão da amplitude de flexão, tendo em vista a avaliação da durabilidade do condutor em função da deformação máxima que a vibração promove no cabo. Considerando um condutor ACSR, mesmo que possa suportar um valor de deformação máxima ao qual seja submetido, as falhas por fadiga não são precisamente especificadas. No entanto, a faixa de valores entre 150 e 200 *microstrains*, é adotada como segura (IEEE, 1966).

### **2.3.2 Limite de resistência à fadiga (EPRI)**

O EPRI sugeriu valores de tensão 0-pico após a realização de vários ensaios de fadiga em tipos distintos de cabos condutores. As tensões foram tratadas como limites de resistência, com a vida em fadiga suficientemente alta. A maioria dos cabos ensaiados era do tipo ACSR, montados de forma rígida em grampos de suspensão convencionais, de material metálico. A durabilidade da EPRI tem seu limite baseado na formulação de Poffenberger-Swart (EPRI, 2006).

A Tabela 2 mostrada a seguir, exhibe os tipos de cabos com seus respectivos limites de resistência, tensão 0-pico.

Tabela 2 – Cabos condutores e limites de resistência EPRI

Cabo condutor	Limites de resistência EPRI Tensão 0-pico (MPa)
ACSR, Al 1350 ou liga Al 5005 1 camada	22,5
ACSR, Al 1350 ou liga Al 5005 multicamadas	8,5
Ligas de alumínio 6201 e similares 1 camada	15
Ligas de alumínio 6201 e similares multicamadas	5,7

Podem ser utilizadas também como parâmetro de medida, as amplitudes de flexão de pico a pico, colocando a amplitude de deslocamento  $Y_b$ , em termos do limite de resistência EPRI e de K, que é explicado na seção 2.4.1 deste capítulo.

O critério do EPRI definiu valores limites de resistência ao serem empregados nos cabos condutores ensaiados. No entanto, para amenizar uma avaliação tão rígida, algumas concessões foram feitas, tendo em vista que às vezes em que os cabos foram submetidos a valores um pouco acima dos valores limite, o cabo não foi prejudicado por danos a fadiga. As concessões são:

- A amplitude de flexão pode ultrapassar o valor limite em até 5% o número de ciclos;
- O número de ciclos que podem ultrapassar em 1,5 vezes a amplitude limite é igual a 1% do total de ciclos;
- O ciclo não pode ultrapassar o limite de resistência à fadiga.

### 2.3.3 Estimativa de tempo do condutor (CIGRÉ)

A CIGRÉ baseou sua metodologia de estimativa de vida dos cabos condutores nos efeitos causados pelas vibrações pela teoria do acúmulo de dano. A teoria de Palmgren-Miner, utilizada pela CIGRÉ, trata-se de um modelo preditivo, fundamentado na teoria do dano acumulativo que tem por fim determinar a vida residual do condutor em quantidade de anos.

As medições são feitas por meio da instalação de vibrógrafos nas linhas de transmissão, que verificam a amplitude de flexão do condutor pela vida em serviço. O

vibrógrafo é instalado próximo ao grampo de suspensão, são realizadas medições de 1 a 10 segundos, em até 4 vezes por hora durante 24 horas por dia. Matrizes são utilizadas para armazenar os dados aferidos e estas por sua vez, são extrapolados para o período de um ano relacionando o número de ciclos em função da frequência de vibração e da faixa de deslocamento do cabo. É necessário o número de ciclos de carregamento ao qual o material resiste para realização do cálculo da fração de dano por nível de amplitude de tensão para um determinado nível de tensão (curva S-N). O resultado que essa metodologia apresenta implica em fornecer a vida remanescente do cabo, em anos de serviço (FRONTIN et. al, 2010).

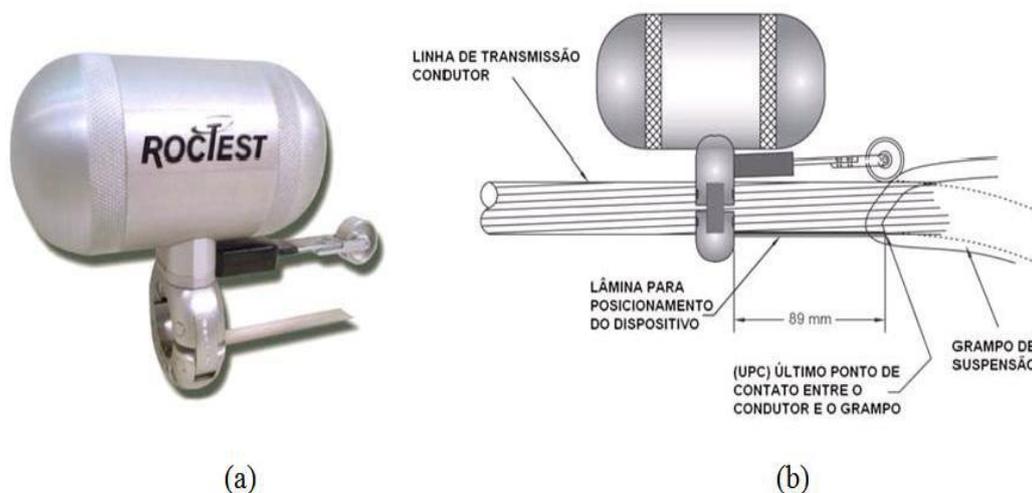


Figura 2.7 - (a) Vibrógrafo modelo Pavica (b) Esquema de montagem do vibrógrafo na linha (GOMES, 2015)

## 2.4 Esforços Dinâmicos em Cabos Condutores

As linhas de transmissão são submetidas a grandes esforços devido às vibrações eólicas, esta como principal causa de falha. Diante disso, é importante a avaliação das tensões atuantes visando garantir a integridade dos elementos.

No entanto, não é simples aferir as tensões atuantes nas regiões críticas diante das complicações de acesso aos cabos condutores. Essas complicações surgem depois que a linha de transmissão foi instalada e devido a essas limitações, uma metodologia foi desenvolvida para análise das tensões atuantes nos cabos.

Com base nas medições de amplitude de deslocamento por meio da flexão no cabo, foi proposta a formulação de Poffenberger-Swart (1965). Esse método relaciona o

deslocamento do condutor com o nível de tensão próximo ao ponto de restrição do cabo, que é no grampo de suspensão e assim pode avaliar os esforços exercidos sobre os condutores.

#### 2.4.1 Equação de Poffenberger-Swart (PS)

A equação de Poffenberger-Swart apresentou-se como uma alternativa tendo como objetivo analisar as tensões atuantes nos cabos condutores. Os cabos condutores são compostos por camadas de fios e estes são dispostos de forma que são entrelaçados helicoidalmente em sentidos opostos, conforme ilustra a Figura 2.8.

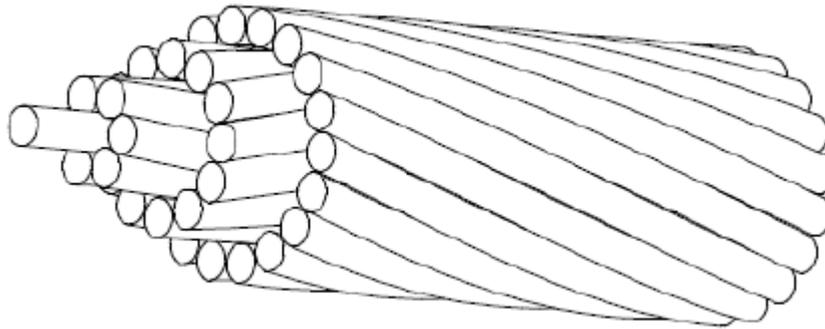


Figura 2.8 - Disposição dos fios de um cabo condutor (EPRI, 2006).

O modelo teórico experimental de P-S considera o cabo como uma viga de Euler, quando próximo ao ponto de restrição de movimento do cabo conforme Figura 2.9.

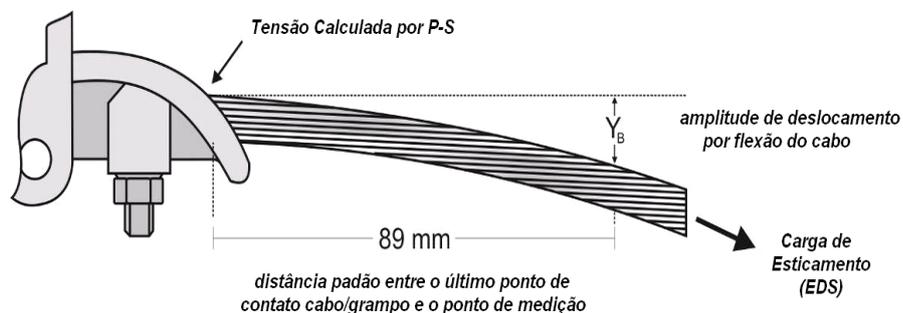


Figura 2.9 - Montagem esquemática cabo/grampo mostrando a posição padrão para medida da amplitude de deslocamento,  $Y_b$  (ALMEIDA *et al*, 2013).

Por meio da amplitude de deslocamento do cabo,  $Y_b$ , determina-se a tensão nominal em um fio do condutor na camada mais externa, em relação ao grampo de suspensão. O  $Y_b$  é medido a 89 mm (3,5 pol) do UPC entre o cabo e o grampo e é relacionado com a tensão máxima de flexão por:

$$\sigma_a = K \cdot Y_b \quad (1)$$

Onde:

$\sigma_a$ : Amplitude de tensão dinâmica, em MPa.

$Y_b$ : Faixa de deslocamento pico a pico, em mm.

O valor de K é calculado a partir de:

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

Onde:

$E_a$ : Módulo de elasticidade da camada mais externa do condutor, em GPa.

d: Diâmetro dos fios da camada mais externa do condutor, em mm.

x: Distância entre o UPC e o ponto de medição de  $Y_b$ , em mm.

O valor de p é calculado por:

$$p = \sqrt[2]{\frac{H}{EI}} \quad (3)$$

Onde:

H: Carga de esticamento do cabo, em kgf.

EI: Rigidez flexural do condutor, em kgf

A rigidez mínima considerada para o cálculo de p é dada por:

$$EI_{min} = n_a E_a \frac{\pi d_a^2}{64} + n_s E_s \frac{\pi d_s^2}{64} \quad (4)$$

Onde:

$n_a$ : Número de fios de alumínio

$n_s$ : Número de fios de aço

$E_a$ : Módulo de Elasticidade dos fios de alumínio

$E_s$ : Módulo de Elasticidade dos fios de aço

$d_a$ : Diâmetro dos fios de alumínio, em mm

$d_s$ : Diâmetro dos fios de aço, em mm

## 2.5 Esforços Estáticos em Cabos Condutores

Os esforços estáticos, aos quais os cabos condutores são submetidos dependem da carga de esticamento empregada. A utilização de altas cargas de esticamento diminui a vida útil dos cabos empregados na LT, o que sugere assim uma limitação superior para a carga de esticamento, sendo assim capaz de garantir a integridade do cabo por um tempo considerável.

Diante disso, definir uma carga de esticamento conservativa tendo em vista as vibrações eólicas é significativo, porém apresenta dificuldades. O CIGRÉ estabeleceu dois parâmetros: o EDS (Every Day Stress), porcentagem da carga de ruptura do cabo e o parâmetro  $H/w$ .

### 2.5.1 Every Day Stress

O EDS é um critério de projeto, que possui como propósito estimar a vida dos cabos condutores, sendo que o comitê 6 da CIGRÉ exibiu em 1953 o relatório conhecido como “EDS Panel” para investigar os danos causados pela fadiga nos cabos das linhas de transmissão, por meio das vibrações eólicas (CIGRÉ, 1999).

O critério de projeto EDS representa a tensão em termos percentuais da carga de tração as quais os cabos são submetidos, tendo sido realizados testes considerando condições próximas da temperatura do dia mais frio do ano sem sobrecarga (BARRET, 2001).

Experiências mais amplas foram realizadas, a partir da emissão do relatório 223, com novos condutores em linhas construídas em novas áreas. Essas experiências permitiram notar que os valores de EDS recomendados não eram suficientes para explicar os danos de fadiga causados, ou seja, não garantiam a integridade dos cabos. Conforme a Tabela 3, são mostradas as porcentagens de linhas de transmissão sendo que estando em serviço entre 10 e

20 anos, 45% com  $EDS < 18\%$  e 78% com  $EDS \geq 18\%$  foram danificadas devido às vibrações (CIGRÉ, 1999).

Tabela 3 – Porcentagem de linhas danificadas em função do nível de EDS (CIGRÉ, 1999).

Vida em serviço (anos)	% de linhas danificadas	
	EDS < 18%	EDS ≥ 18%
≤ 5	5,26	25,00
> 5 ≤ 10	20,93	35,29
> 10 ≤ 20	45,00	78,00
> 20	58,93	91,67

### 2.5.2 Critério H/w

Um critério interessante proposto é o H/w, onde H é a tração horizontal e w é o peso por unidade de comprimento, utilizado para determinar um valor de segurança para a carga de esticamento nos condutores. O H/w é o critério da catenária constante e afirma-se que os condutores estarão sujeitos ao mesmo comportamento caso submetidos a um mesmo vão. Assim sendo, para um determinado valor de H/w os condutores ASC, ACSR, AAAC e ACAR alcançarão um mesmo valor de resistência ou período de vida (BARRET, 2001).

Como dito anteriormente (seção 2.2), as vibrações eólicas, que ocorrem por meio da ação do vento, representam uma grande influência na fadiga de condutores. Com isso, os terrenos nos quais são montadas as linhas de transmissão devem ser levados em conta, tendo em vista que o tipo de terreno influencia na intensidade da turbulência do vento por conta da vegetação em questão (CIGRÉ, 1999).

Tendo como referência o tipo de terreno no qual as linhas de transmissão são instaladas, a Tabela 4, exibe as tensões (limites de segurança) que são utilizadas para as categorias de terrenos. A carga de esticamento H é a carga referente à tensão inicial, considerando a temperatura média do mês mais frio do ano (CIGRÉ, 1999).

Tabela 4 – Limites recomendados para H/w de acordo com o terreno.

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

Uma relação envolvendo o critério H/w, as tensões, áreas e massas específicas são mostradas pela Equação (5).

$$\frac{H}{w} = \frac{A_a S_a + A_s S_s}{g(A_a \rho_a + A_s \rho_s)} \quad (5)$$

Onde:

$A_a$  é a área do fio de alumínio, em mm<sup>2</sup>

$A_s$  é a área do fio de aço, em mm<sup>2</sup>

$\rho_a$  é a massa específica do fio de alumínio

$\rho_s$  é a massa específica do fio de aço

$S_a$  é a tensão média do fio de alumínio, em MPa

$S_s$  é a tensão média do fio de aço, em MPa

Há uma relação linear existente entre a tensão média atuante nos fios de alumínio do cabo e o parâmetro H/w, que é dada por aproximações dos módulos de elasticidade e massas específicas dos materiais, como mostradas nas equações (6) e (7), respectivamente:

$$3\rho_a \cong \rho_s \quad (6)$$

$$E_s = 3E_a \quad (7)$$

Por meio da lei de Hooke, a tensão é diretamente proporcional à deformação que o material é submetido.

$$\sigma = \varepsilon E \quad (8)$$

Ao considerar que a deformação é a mesma para os fios de alumínio e aço, a equação (H/w) é reescrita:

$$S_a = g\rho_a \left( \frac{H}{w} \right) \quad (9)$$

Pela equação (9) mostrada, é possível obter a tensão média atuante nos fios condutores tendo definido o valor de H/w na fase de projeto e considerando os valores da constante gravitacional e massa específica. Deve ser lembrado que algumas aproximações foram feitas, como os módulos de elasticidade, massas específicas e deformação uniforme da seção transversal do condutor quando o mesmo foi carregado.

### 3 EQUAÇÃO DE POFFENBERGER-SWART

#### 3.1 Histórico

A equação de Poffenberger-Swart (POFFENBERGER, 1965), mencionada no capítulo 2 é uma solução matemática que tem como objetivo relacionar a tensão dinâmica de flexão com a tração aplicada no condutor e sua rigidez flexural. Além disso, a solução analítica mostra que essa dependência é linear, exceto para altas frequências quando os comprimentos de onda são curtos em relação à deflexão do braço do instrumento de medição. A não linearidade dos testes da tensão deformação em cabos mostra a necessidade de investigar mais aprofundada a rigidez flexural de fios múltiplos.

O termo deslocamento diferencial foi introduzido por TEBO (1941), da Comissão de Potência hidroelétrica de Ontário, Canadá. Ele descreveu por meio de linhas não energizadas, experimentos que empregaram um transformador diferencial para medir o deslocamento do condutor a 3,5 pol (89 mm) do ponto de engaste na boca do condutor com o grampo de suspensão totalmente rígido (POFFENBERGER, 1965).

No ano de 1962, foi desenvolvido por Edwards e Boyd, um instrumento eletromecânico cuja aplicação se dava na medição de deslocamento dos condutores energizados. No mesmo quarto de século, o medidor de resistência elétrica teve um grande desenvolvimento, sendo utilizado em problemas dinâmicos estruturais e se tornou uma precisa e confiável técnica em análises experimentais de tensões (POFFENBERGER, 1965).

As duas técnicas utilizadas para medir vibrações nos condutores evoluíram bem no mesmo período de tempo, no entanto, a técnica que prevaleceu foi a dos extensômetros, contribuindo para que pesquisadores inexperientes fossem incentivados a pesquisarem sobre a técnica destes. Entretanto, a utilização dos deslocamentos diferenciais foi questionada nas medições quantitativas, pois nem os métodos analíticos nem os experimentais tiveram base para suportar as declarações feitas que as amplitudes de vibração são bons medidores de momento fletor nos condutores. Ruhlman & Poffenberger acreditaram que quatro variáveis eram envolvidas na tensão do condutor, que são comprimento de onda, tensão, rigidez e configuração de suspensão (POFFENBERGER, 1965).

Foi reconhecida a necessidade de padronização de campos de dados de vibração dos condutores. *The Tower, Poles and Conductors Subcommittee da AIEE Transmission e*

*Distribution Committee* autorizaram a criação de um grupo em 1961 para a investigação do problema. O Grupo criado, the Task Force, recomendou adotar o método do deslocamento diferencial, tendo sido recorrido a dados experimentais relacionados ao deslocamento diferencial e à tensões dinâmicas (POFFENBERGER, 1965).

A partir do trabalho de Edwards & Boyd, Rawlins fez experimentos que realizaram medições em cabos a partir dos deslocamentos diferenciais e deformações por meio de extensômetros, variando os níveis de tensões e frequências aplicadas e chegou à conclusão de que a tensão nos condutores eram afetadas sim pela carga de esticamento mas não pela frequência. Os experimentos feitos compreenderam os condutores 1/0 ACSR 6/1 (POFFENBERGER, 1965).

Em 1963, Ruhlman e Swart publicaram resultados sobre experimentos realizados no condutor 26/7 ACSR modelo Drake, nos quais foram comparadas as medições realizadas por deslocamentos diferenciais e por extensômetros, por meio de faixas de tensões e frequências distintas, concluindo então que a tensão afeta o resultado, diferentemente das frequências que acabam não contribuindo para o resultado final. Edwards e Boyd realizaram experimentos com outros 5 tipos de condutores ACSR, sendo os suportes fixos e amarrados investigados além de uma configuração utilizando armadura pré-formada (POFFENBERGER, 1965).

Após realizar os experimentos, Edwards e Boyd verificaram que a relação entre deformação e deslocamento diferencial é afetada pela rigidez do condutor e pelos diâmetros dos fios individuais. Além do mais, praticamente todas as curvas de deformação e deslocamento diferencial apresentaram não linearidade para altos níveis de deslocamento (POFFENBERGER, 1965).

### **3.2 Formulação matemática**

Poffenberger & Swart desenvolveram uma simplificação, assumindo que o cabo condutor está esticado e vibra de forma estacionária. Os cabos condutores são constituídos por fios enrolados em diferentes camadas e em sentidos opostos tornando complexa a construção em relação à estrutura e o estado de tensão causado pela flexão do cabo, quando este é tensionado. Também é assumido que o grampo de suspensão é rigidamente fixo.

O trabalho experimental mostrou que o método do deslocamento diferencial ou amplitude de flexão forneceria uma boa medida do esforço de flexão nos condutores testados, desde que a consideração da tensão do condutor e rigidez flexural fosse levada em conta. A

solução analítica baseia-se na teoria elástica e princípios da mecânica, que são bem conhecidos, considerando-se um problema estático, haja visto que o caso dinâmico torna difícil o entendimento do significado físico (POFFENBERGER, 1965).

As Equações deduzidas nesse capítulo se encontram no livro EPRI Transmission Lines.

Conforme a Figura 3.1, a região adjacente ao grampo, definida pelo comprimento  $a$ , a deflexão ao longo do cabo condutor nessa distância, afasta-se de forma significativa de uma onda de comportamento senoidal.

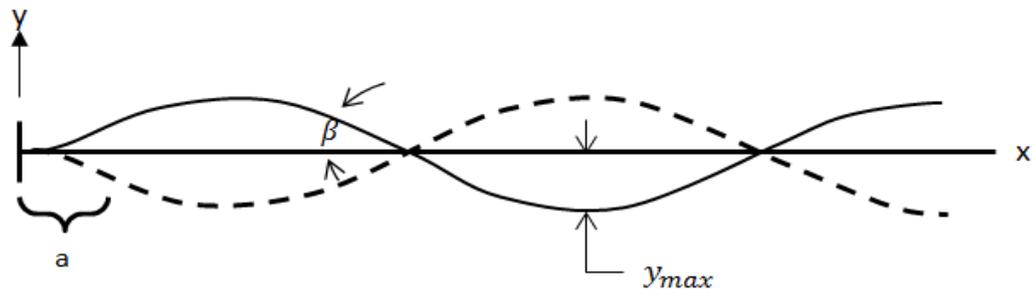


Figura 3.1 – Onda resultante da vibração do cabo (modificado: EPRI, 2006)

A forma defletida do cabo na região adjacente é mostrada em detalhe, conforme Figura 3.2.

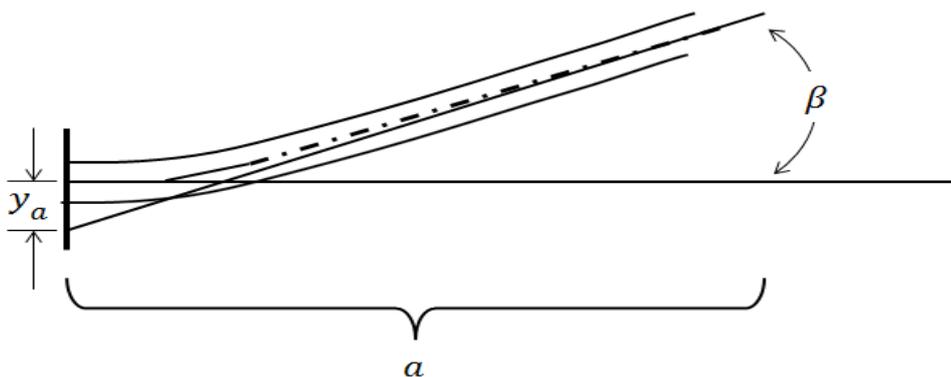


Figura 3.2 – Região adjacente ao ponto de engaste do cabo condutor (modificado: EPRI, 2006)

Com a consideração de que a linha tracejada é caracterizada como uma linha reta nas proximidades do ponto de engaste do cabo e que a amplitude seja bastante pequena, leva-se em conta considerar que a linha tracejada coincida com a linha referente ao esforço trativo que atua no cabo.

A relação da tensão de flexão com a curva de deflexão ocorre considerando-se que esta define a posição de qualquer elemento de corpo elástico em sua posição defletida em função de um sistema de referência de coordenadas. Se a curva de deflexão pode ser calculada matematicamente, então através da segunda derivada do deslocamento, que é a equação da linha elástica, é possível calcular o momento fletor, através da força trativa  $H$  pelo braço  $y_t$ , conforme visto na Figura 3.3, onde:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} = \frac{Hy_t}{EI} \quad (10)$$

Em que  $EI$ , é a rigidez flexural, em kgf e  $M(x)$  é o momento fletor, em N.m, no ponto analisado no eixo  $x$ .

Conforme Figura 3.3, a linha tracejada representa a forma senoidal enquanto que a linha traço e ponto representa o comportamento da linha neutra (eixo axial) próximo ao ponto de engastamento do cabo. A linha tracejada possui boa parte representada por uma linha reta, em grande parte do comprimento  $a$  enquanto que a linha traço e ponto (deflexão) possui parte na posição horizontal no ponto de engaste, obtendo um comportamento assintótico com a forma senoidal assim que a distância em relação ao ponto de engaste aumenta.

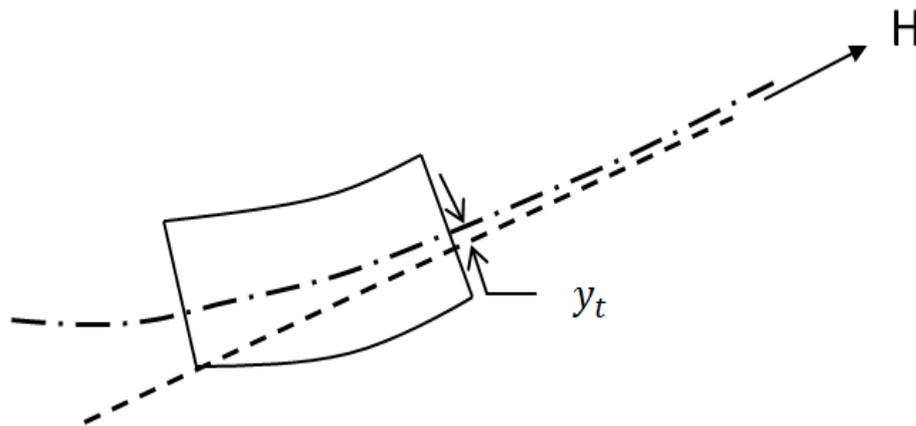


Figura 3.3 – Momento resultante entre a linha de carregamento e a linha neutra do cabo (modificado: EPRI, 2006)

A Equação (10) é uma equação cuja solução para  $y_t$  é dada, conforme vista na Equação (11).

$$y_t = Ae^{\pm px} + C_1x + C_2 \quad (11)$$

Onde:

$C_1$  e  $C_2$  são constantes dependentes das condições de contorno;

$$p = \sqrt{\frac{H}{EI}}$$

Para a determinação de  $y_t$ , são aplicadas as condições de contorno. Como condição de contorno, tem-se que  $y_t \rightarrow 0$  quando  $x \rightarrow a$ . Essa situação faz a Equação (11) resultar na Equação (12).

$$y_t = Ae^{\pm px} \quad (12)$$

O próximo passo é determinar o valor de A e para isso é necessário considerar as primeira e segunda derivadas da função  $y_t$ , que são apresentadas em seguida.

$$\frac{dy(x)}{dx} = -Ape^{-px} = -py_t(x) \quad (13)$$

$$\frac{d^2y(x)}{dx^2} = Ap^2e^{-px} = p^2y_t(x) = -p\frac{dy(x)}{dx} \quad (14)$$

Com relação à Figura 3.2, para  $x = 0$ , a inclinação da linha de carregamento é igual a  $\beta$  e assim a Equação (14) é reescrita conforme a Equação (15).

$$\frac{d^2y(x)}{dx^2} = p\frac{dy(x)}{dx} = p\beta = \sqrt{\frac{H}{EI}}\beta \quad (15)$$

Observando a Figura 3.1, o ângulo  $\beta$  é relacionado à frequência e amplitude de vibração do cabo. Em função da condição de vibração estacionária, a resposta vibratória do cabo, em ponto distante do engaste, ou seja,  $x > a$  tem-se que a amplitude,  $y$ , é dada por:

$$y(x) = y_{max} \sin\left[\left(\frac{2\pi f}{c}\right)(x - x_1)\right] \quad (16)$$

Onde:

$y_{max}$  é o deslocamento ou deflexão no anti-nó, em mm;

$f$  é a frequência da onda estacionária, em Hz;

$c$  é a velocidade de propagação da onda.

A velocidade de propagação  $c$  é dada por  $\sqrt{H/m}$ , sendo  $H$  o carregamento aplicado ao cabo condutor e  $m$  a densidade linear do cabo, que é massa por unidade de comprimento. A distância  $x_1$  é a distância entre o ponto de engaste do cabo e o local em que há interceptação da linha de ação do esforço  $H$  e o eixo  $x$ .

Pela Figura 3.1, que indica a deflexão máxima, tem-se que a inclinação  $\beta$  é máxima e fazendo a derivada da Equação (16), obtém-se:

$$\frac{dy(x)}{dx} = \frac{2\pi f}{c} y_{max} \cos\left[\left(\frac{2\pi f}{c}\right)(x - x_1)\right] \quad (17)$$

A derivada obtida na Equação (17) é a inclinação do cabo. A onda é estacionária e periódica, logo, o valor máximo da inclinação do cabo é obtido quando a função senoidal é igual a 1.

$$\left.\frac{dy(x)}{dx}\right|_{max} = \frac{2\pi f}{c} y_{max} = \beta \quad (18)$$

Ao obter a relação da inclinação máxima, é possível relacionar as Equações 15 e 18. Assim, substituindo a Equação (18) na Equação (15), obtém-se:

$$\frac{d^2y(x)}{dx^2} = 2\pi f \sqrt{\frac{m}{EI}} y_{max} \quad (19)$$

A dedução matemática realizada até aqui mostra que o momento fletor próximo ao ponto de engaste do cabo depende das condições de vibração do cabo e independe do carregamento realizado no cabo, que é constatado na Equação (20). Substituindo a Equação (19) na Equação (10), para o momento, obtém-se:

$$M(0) = 2\pi f \sqrt{mEI} y_{max} \quad (20)$$

A frequência e o deslocamento no anti-nó são quantificados de forma fácil, no entanto, considerando as operações reais de transmissão de energia, existem dificuldades em medir os parâmetros mencionados, pois a frequência de vibração é o que determina a amplitude de deslocamento no anti-nó e assim sendo o posicionamento de instrumentação deve mudar quando a frequência é alterada. Diante disso, uma alternativa deve ser adotada visando resolver o problema de mensurar a amplitude de deslocamento no anti-nó. Pelas Figuras 3.2 e 3.3, o deslocamento  $y$ , é dado por:

$$y(x) = -y_a + \beta x + y_t \quad (21)$$

Realizando a derivada segunda da Equação (11) para  $x = 0$ , obtém-se:

$$\frac{1}{p} \frac{d^2 y(x)}{dx^2} = pA \quad (22)$$

Para  $\beta \rightarrow 0$ , a Equação (21), é modificada e exibida a seguir:

$$y(x) = A[e^{-px} + px - 1] \quad (23)$$

Depois das considerações feitas, a curvatura, em  $x = 0$  é explicitada pela Equação (24), logo a seguir, onde  $y(x) = \frac{y_b}{2}$ , sendo  $y_b$  o deslocamento de pico a pico, em mm.

$$\frac{d^2 y(x)}{dx^2} = p^2 A = \frac{p^2}{e^{-px} + px - 1} \frac{y_b}{2} \quad (24)$$

As equações acima encontradas juntamente com a teoria de viga permitem estimativas da tensão nas proximidades do ponto de restrição do grampo com o cabo, por meio da multiplicação da curvatura dinâmica atuante na seção transversal pela distância entre a linha neutra do cabo com a extremidade do fio mais externo.

A equação da tensão máxima sob condições de flexão, é dada por:

$$\sigma(x, c) = \frac{M(x)c}{I} \quad (25)$$

A combinação das Equações (10) e (25) permite encontrar a tensão em função da curvatura no cabo. Assim, temos que:

$$\sigma(x, c) = \frac{c}{I} \left( EI \frac{d^2 y(x)}{dx^2} \right) \quad (26)$$

Após realizar as deduções matemáticas para a curvatura, relaciona-se esta com a tensão sob condição de flexão e 3 equações são obtidas para a tensão, quando faz-se a substituição dos valores de curvatura na Equação (25).

Substituindo-se as Equações 15, 19 e 24 na equação 26, são obtidas as seguintes relações para a tensão nominal alternada no ponto mais solicitado do condutor.

$$\sigma(x, c)_{Nom.Max} = \frac{dE_a}{2} \sqrt{\frac{H}{EI}} \beta \quad (27)$$

$$\sigma(x, c)_{Nom.Max} = \pi d E_a f \sqrt{\frac{m}{EI}} y_{max} \quad (28)$$

$$\sigma(x, c)_{Nom.Max} = d E_a \frac{p^2}{4(e^{-px} + px - 1)} Y_b \quad (29)$$

A Equação (29) foi chamada de fórmula de Poffenberger-Swart e padronizada para medição do deslocamento em  $x = 89$  mm (IEEE, 1966). As Equações (27) e (28) são variações de Poffenberger-Swart.

## 4 METODOLOGIA

O capítulo 4 descreve a bancada experimental, os materiais e a realização dos experimentos. Os experimentos foram realizados no Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia, SG-9, Universidade de Brasília.

### 4.1 Descrição da bancada experimental

A bancada é dividida em dois vãos: um ativo e um passivo. O comprimento total dos vãos é igual a 46,8 m. O vão ativo define o comprimento do cabo submetido aos ensaios, sendo que o comprimento pode variar de 31 a 41 m e é composto por um bloco móvel e pelos blocos fixos, para cada bancada existente. O laboratório é composto por três bancadas, designadas por A, B e C. O bloco móvel é composto por grampo de suspensão, sensores de medição, dispositivo de fixação. Os blocos fixos são compostos pelo shaker e pela roldana, respectivamente. O vão passivo é composto pelo bloco fixo e pelo grampo de ancoragem para fixação do cabo. A bancada é representada pela Figura 4.1.

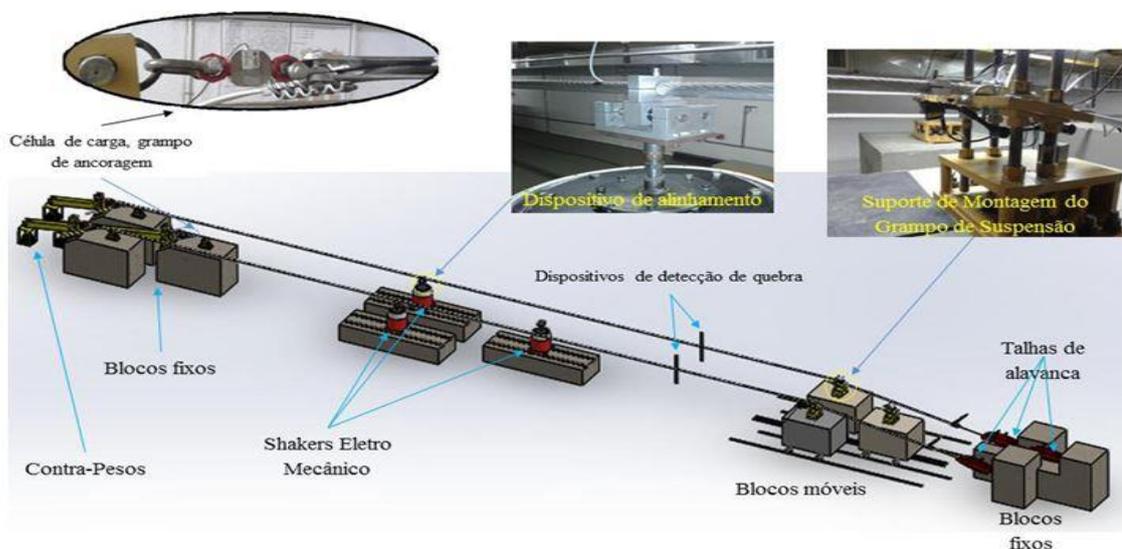


Figura 4.1 – Representação esquemática da bancada experimental (ROCHA, 2016).

Os blocos da bancada foram construídos em concreto armado para garantir boa rigidez para realização dos ensaios. Os blocos móveis possuem rolamentos e se movimentam sobre trilhos, determinando o tamanho do vão ativo no ensaio em questão.



Figura 4.2 – Blocos móveis das bancadas

Para fixação dos excitadores eletromecânicos são utilizados blocos fixos. O excitador eletromecânico, ou shaker, excita o cabo simulando vibração por meio da ação do vento conforme Figura 4.3 e o bloco fixo 3 contém a roldana e a célula de carga. Os pontos de articulação do cabo são o grampo de suspensão localizado no bloco móvel e a roldana do bloco fixo 3.

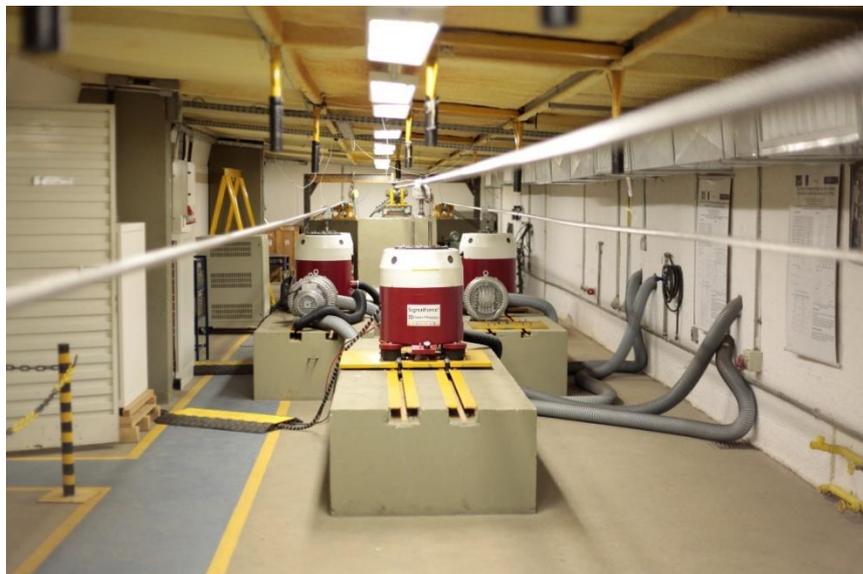


Figura 4.3 – Blocos fixos com trilhos e excitadores eletromecânicos

São utilizados grampos de ancoragem nas extremidades do cabo para fixação do mesmo. No vão passivo, o grampo de ancoragem é utilizado para conectar o cabo à talha de alavanca, que é presa ao bloco fixo 1, conforme Figura 4.4.

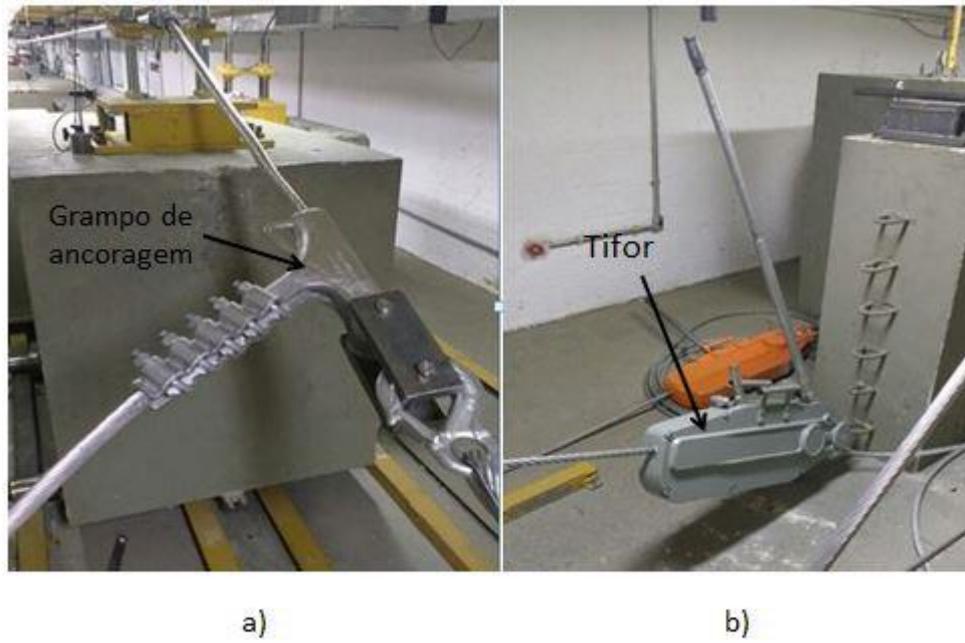


Figura 4.4 – (a) Grampo de ancoragem; (b) Tifor

No vão ativo, o grampo de ancoragem é utilizado para fixar o cabo à célula de carga, conforme Figura 4.5.

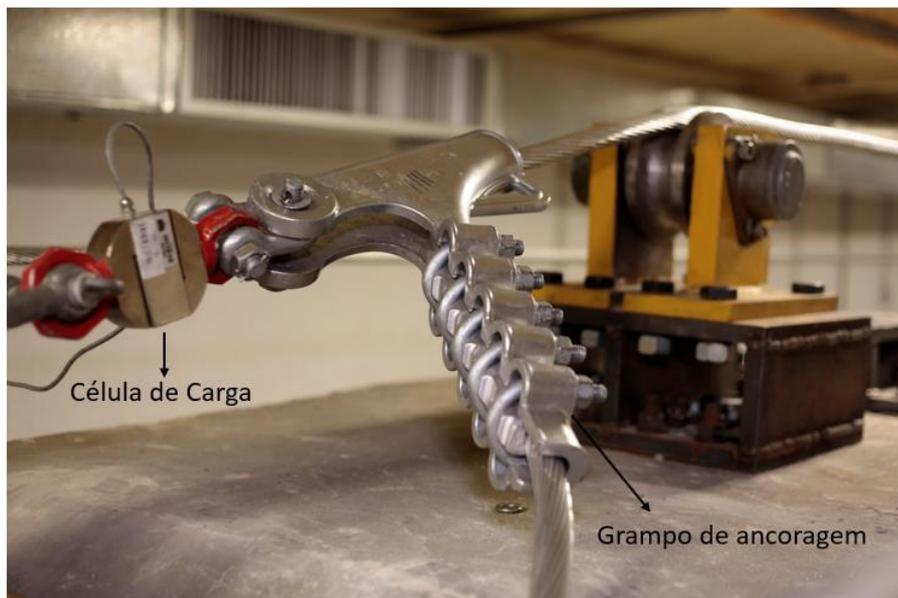


Figura 4.5 – Bloco fixo 3

#### 4.1.1 Dispositivo para fixação do grampo de suspensão

O dispositivo para fixação do grampo é de composição metálica e é utilizado para representar a realidade observada nas linhas de transmissão, quanto ao ângulo de saída do condutor, que na bancada é de  $10^\circ$ .

A fixação do grampo no dispositivo é feita por quatro arruelas montadas junto a quatro porcas de aperto do grampo. Conforme Figura 4.6, observa-se a montagem do grampo com o suporte de fixação.



Figura 4.6 – Dispositivo para fixação do grampo de suspensão

#### 4.1.2 Sistema de aquisição de dados

A central de dados ou sistema de aquisição de dados, utilizada nos ensaios é composta por 2 módulos de aquisição, com 16 canais de aquisição por módulo. O sistema é capaz de captar sinais digitais e analógicos, do software de aquisição de dados e do software de controle de bancada.

A rede coleta de forma simultânea os 32 canais. O sistema de aquisição de dados possui entrada para configuração de transdutores, extensômetros, termopares, tensão, corrente e sensores de platina. Uma chave é utilizada para configurar o sistema.

O ADS 2000 faz a aquisição de sinais de: temperatura, extensômetros, células de carga, sensores de deslocamento e acelerômetros.

Os ajustes, calibração e balanceamento necessários são feitos mediante software nos computadores de controle das bancadas.

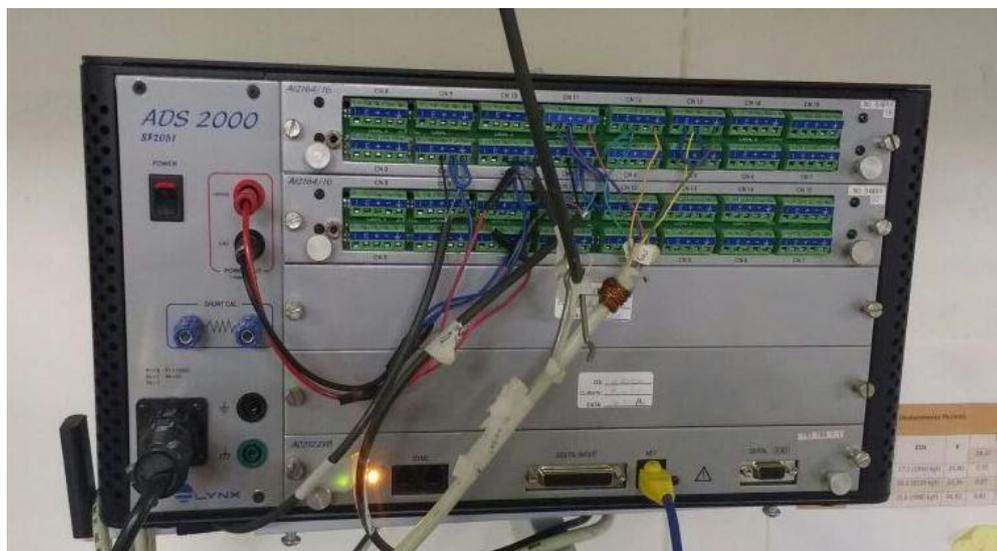


Figura 4.7 – Aquisitor de dados ADS 2000

## 4.2 Materiais

### 4.2.1 Cabos CAL 900 e TERN

Os cabos CAL 900 da Fabricante NEXANS e TERN da fabricante ALUBAR serão utilizados nos experimentos. A Tabela 5 exibe características referentes aos cabos utilizados.

Tabela 5 – Propriedades dos cabos CAL 900 e TERN

Cabo	Bitola (mcm)	Área nominal alumínio (mm <sup>2</sup> )	Área nominal aço (mm <sup>2</sup> )	Fios de alumínio (mm)	Fios de aço (mm)	Diâmetro nominal cabo (mm)	Massa linear (kg/km)	Carga ruptura (kgf)
CAL 900	900	455,7	-	37x3,962	-	27,74	1.252,8	13.421
TERN	795	403,77	27,82	45x3,38	7x2,25	27,03	1.336,08	10.013,6

#### 4.2.2 Grampos de suspensão

Os grampos de suspensão utilizados são do tipo monoarticulado da marca Forjasul, modelo 55101/003. Esse grampo é composto pelo corpo, tampa (ou telha) e dois parafusos em U, conforme Figura 4.8. A fabricação do grampo é feita em liga de alumínio SAE 305, por ter uma ótima fluidez, o que possibilita a produção de peças de geometrias complicadas, como é o caso. O corpo e a tampa são produzidos em alumínio de alta resistência mecânica, que resiste à corrosão.

A massa do conjunto do grampo de suspensão é de 1,28 kg. A carga de ruptura é de 7000 kg. A superfície do grampo é lisa, apresenta uniformidade, sem arestas cortantes e a “boca” de saída possui ângulo máximo de 20° para que os cabos utilizados não sejam prejudicados. O grampo é próprio para cabos de alumínio ou alumínio/aço, sendo que os diâmetros destes devem estar entre 17 e 29 mm, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Propriedades do grampo de suspensão

Marca	Modelo	Acomodação (mm)	Carga de ruptura (kgf)	Massa (Kg)
Forjasul	55101/003	17-29	7.000	1,28



Figura 4.8 – Grampo de suspensão modelo 55101/003 Forjasul

#### 4.2.3 Acelerômetros

No ensaio são utilizados 3 acelerômetros: um no shaker, como acelerômetro de controle durante a varredura; um no ponto a 89 mm medido a partir do UPC entre o cabo e o grampo, para monitorar os deslocamentos  $Y_b$ ; e um no anti-nó, que mede o deslocamento  $y_{max}$  variando de 1,0 a 6,0 mm para cada ensaio.

Tabela 7 – Acelerômetros utilizados no ensaio

Acelerômetro			
Local	Marca	Série	Sensibilidade (mV/g)
Shaker	Brüel & Kjaer	30021	499,5
Ponto a 89 mm do UPC	PCB Piezotronics	149702	99,4
Anti-nó	Brüel & Kjaer	30658	100,7

#### 4.2.4 Extensometria

Os extensômetros utilizados nos ensaios são de resistência elétrica (ERE) e medem a deformação do fio, ao qual estão colocados. A deformação no fio ocorre de forma uni-axial, logo, o modelo utilizado nos ensaios é unidirecional simples, da marca Excel Sensors, do tipo PA-03-120BA-350L. Conforme Figura 4.9, são mostrados os códigos referentes aos extensômetros.

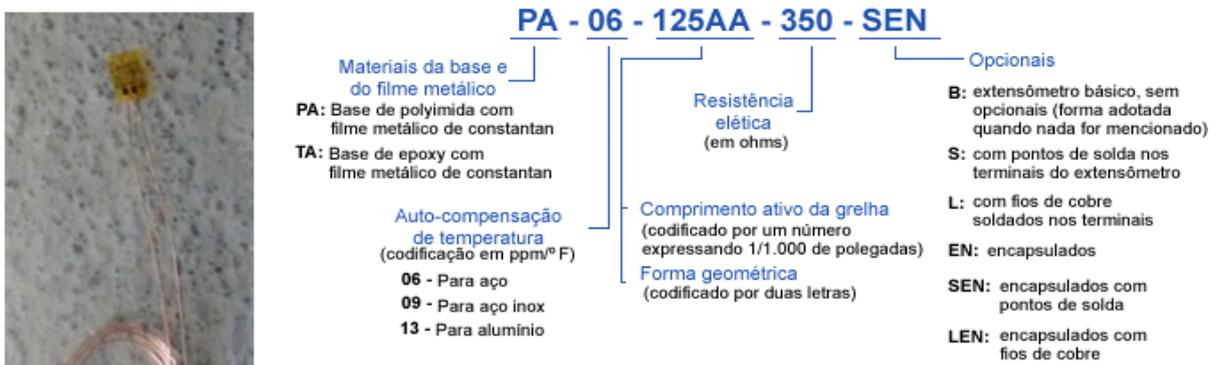


Figura 4.9 – Código dos extensômetros (Excel)

Para ligação dos extensômetros, a ponte extensométrica foi configurada em  $\frac{1}{4}$  no ADS2000 (central de dados). Os extensômetros utilizados possuem dois fios e resistência de 350  $\Omega$ .

#### 4.3 Posicionamento e tracionamento do cabo condutor

Para iniciar o experimento, polias são posicionadas ao longo do vão ativo para assegurar que o cabo seja suportado quando este for esticado e preso, conforme Figura 4.10.



Figura 4.10 – Polias utilizadas para suportar o cabo

Após as polias estarem posicionadas, a bobina deve ser desenrolada e o cabo é puxado passando por uma polia localizada antes do bloco móvel, posicionada no suporte do grampo de suspensão, colocado sobre o excitador eletromecânico, é passado pelas polias até chegar ao bloco fixo 3, indicado na Figura 4.5. Ressalta-se a importância da utilização de elementos de proteção no shaker e no suporte do grampo de suspensão para evitar que o atrito do cabo com eles, danifique suas estruturas.

Depois de o cabo ser posicionado, o mesmo é preso pelos grampos de ancoragem por meio do aperto dos parafusos na talha de alavanca do bloco fixo 1 e na célula de carga.

Após a fixação do cabo, deve ser realizado o tracionamento do mesmo nos blocos fixos do vão passivo e 3 por meio da talha de alavanca (ou tifor) e célula de carga presa ao braço de alavanca, respectivamente.

Uma pré-carga é aplicada ao cabo através do tifor e uma carga de esticamento é obtida mediante braço de alavanca, que possui gaiola, nas quais são inseridas pesos de ferro fundido. No mesmo instante, deve ser verificada através do leitor da célula de carga a necessidade de ajuste da pré-carga ou não e normalmente a carga aplicada ao final deve ser de 10 a 20% da carga de esticamento de ensaio.

Após o tracionamento do cabo, este é deixado em repouso por volta de 8 h para acomodação por fluência, para que as deformações no fio sejam mínimas.

Depois do tempo necessário de acomodação do cabo para ensaios dinâmicos, a carga de esticamento deve ser reduzida ao valor definido para o ensaio. O grampo de suspensão é fixado por meio do aperto dos parafusos com valor de torque igual a 50 Nm.

Conforme Figura 4.10, são indicados o sistema de ar condicionado e isolamento térmico. A variação de temperatura possui uma grande influência nos ensaios do cabo condutor, por isso é importante manter a estabilidade térmica no laboratório, o que é garantido pelo sistema de ar condicionado. Além disso, é importante minimizar as trocas de calor entre o laboratório e o meio externo, o que faz necessário o uso de isolamento térmico.

#### 4.4 Instrumentação dos cabos condutores

##### 4.4.1 Posicionamento dos extensômetros

Tendo realizado o posicionamento e o tracionamento do cabo condutor na bancada experimental, a fase seguinte consiste em posicionar os extensômetros na localização oposta ao UPC do cabo em relação ao grampo. Antes de realizar a extensometria nos fios do cabo condutor são feitos alguns procedimentos, que se dividem em 5 etapas. A extensometria se encontra descrita no Anexo II.

i) Preparo da superfície:

A superfície do fio, ao qual é colado o extensômetro deve ter as impurezas removidas e a rugosidade superficial aumentada, o que permite um melhor funcionamento e melhor aderência do extensômetro, sendo conseguido por meio do lixamento dos fios do cabo condutor utilizados no ensaio, conforme Figura 4.11;



Figura 4.11 – Região lixada dos fios do cabo

ii) Limpeza da superfície:

Após o lixamento da superfície do fio na qual é colocado o extensômetro, realiza-se a limpeza por meio de cotonetes e álcool isopropílico. O cotonete deve remover os resíduos deixados pela primeira etapa, de forma unidirecional.

iii) Verificação e posicionamento do extensômetro:

A resistência do ERE deve ser verificada por meio de um multímetro, podendo considerar um erro de 5% para mais ou menos do valor fornecido pelo fabricante. Uma fita adesiva é colada no extensômetro pelo lado oposto ao lado que faz a leitura.

iv) Colagem do extensômetro

A colagem dos extensômetros é feita nos três fios mais altos da camada externa do cabo utilizando cola adesiva na superfície do fio em que será colocado o extensômetro. Deve ser aplicada uma quantidade para que a colagem seja satisfatória, mas não seja excessiva. É utilizada uma almofada de silicone para ajudar o extensômetro a aderir ao fio. Em seguida, é retirada a fita adesiva, utilizada na etapa anterior.



Figura 4.12 – Extensômetros colados no ponto oposto ao UPC e conector sindal

Após a colagem, deve-se verificar novamente a resistência dos extensômetros.

v) Fixação dos fios do extensômetros:

Os fios dos extensômetros são ligados a um conector sindal por meio de apertos por parafuso, sendo este conector que conecta os extensômetros ao ADS 2000, conforme Figura 4.12 acima.

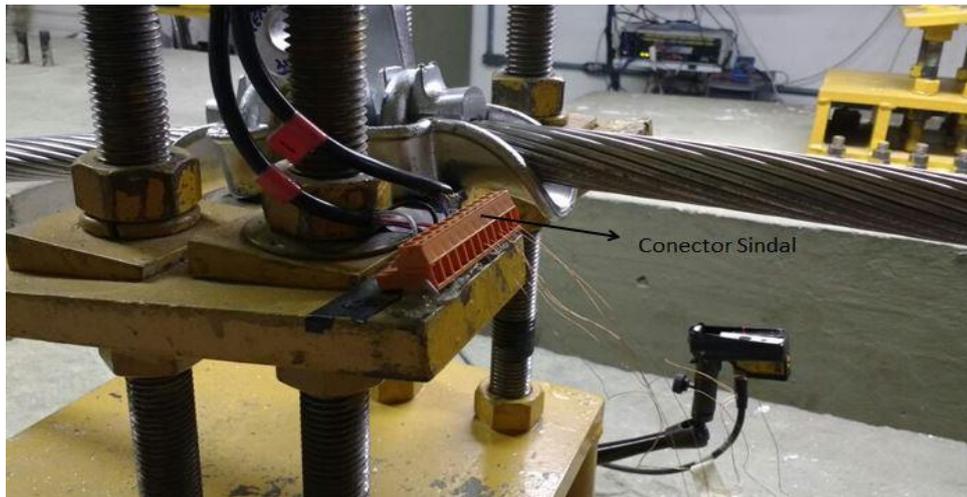


Figura 4.13 – Conector sindal para conexão dos fios dos extensômetros

Os extensômetros devem ser calibrados e balanceados tendo em vista garantir que as medidas obtidas sejam confiáveis e a ponte de Wheatstone é balanceada para indicar a leitura referente dos dispositivos.

#### 4.4.2 Posicionamento dos sensores

Tendo em vista realizar os ensaios dinâmicos, alguns sensores devem ser utilizados para medição dos deslocamentos. Nos ensaios são utilizados 3 sensores, em posições definidas. Deve-se garantir durante os ensaios, que a vibração realizada pelo excitador eletromecânico seja controlada de modo que a amplitude dos deslocamentos pico a pico sejam constantes. Algumas etapas devem ser seguidas, para garantir o posicionamento adequado dos sensores.

- i) Conectar o shaker ao cabo através de uma braçadeira e um dispositivo de alinhamento. Utiliza-se fita isolante para evitar o contato direto entre o cabo e a braçadeira;

- ii) Posicionamento de um acelerômetro no shaker, conforme Figura 4.14.



Figura 4.14 – Acelerômetro posicionado sobre a mesa do shaker

- iii) Após medir a distância de 89 mm a partir do UPC (entre o grampo de suspensão e o cabo), uma braçadeira é colocada. Após colocar a braçadeira, um acelerômetro é posicionado para medir o deslocamento  $Y_b$ .

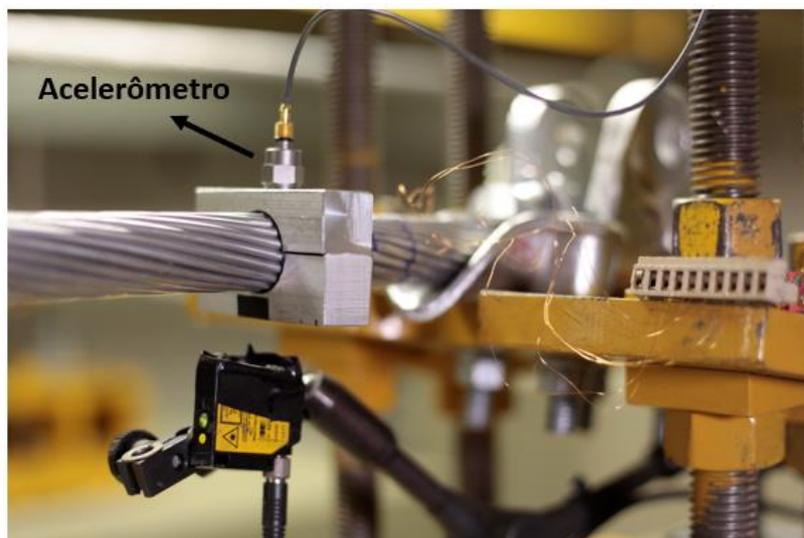


Figura 4.15 – Acelerômetro no ponto a 89 mm de distância do UPC

- iv) Outro sensor é colocado de modo a medir o  $y_{max}$ . Para isso, o shaker é posto em funcionamento e de acordo com a frequência utilizada, é possível medir a distância entre o primeiro nó e o UPC. A distância na qual se localiza o anti-nó é metade da distância entre o primeiro nó e o UPC.



Figura 4.16 – Acelerômetro localizado no primeiro anti-nó

#### 4.5 Procedimento Experimental

Os ensaios dinâmicos foram realizados com os condutores CAL 900 e TERN, na bancada experimental B, do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia utilizando os parâmetros H/w iguais a 1820, 2144 e 2725 m. Após o posicionamento dos cabos condutores, extensômetros e sensores, os experimentos foram colocados em execução. Para realização dos ensaios, em cada mudança do parâmetro H/w foram trocados os extensômetros para ambos os condutores, ressaltando a importância do cabo repousar 8 horas depois de tracionado. Após 8 horas de repouso, foi feita a colagem dos extensômetros e a partir da colagem dos extensômetros, os itens 4.5.1 ao 4.5.4 descrevem os procedimentos feitos nos ensaios.

#### 4.5.1 Varredura

O primeiro passo para iniciar o ensaio após estar pronto para funcionar é a realização da varredura, na qual a frequência de excitação do condutor é definida como sendo próxima à frequência de ressonância do condutor. A varredura é feita por meio do programa *Shaker Control*. O intervalo de frequências para a realização da varredura foi feita com valores de 23 a 26 Hz, tendo em vista que foram frequências próximas da frequência de ressonância. A varredura foi controlada para deslocamento do shaker fixado em 0,5 mm, por ser um valor fácil de controlar.

#### 4.5.2 Localização do anti-nó

Após realizar a varredura para escolher a frequência utilizada nos ensaios, o segundo passo consiste em encontrar a localização do cabo que corresponde ao primeiro anti-nó do cabo. Para isso, é imposto um deslocamento de 0,8 mm de pico a pico, no acelerômetro de controle correspondente ao acelerômetro localizado no ponto a 89 mm a partir do último ponto de contato entre o cabo e o grampo. Em seguida o ensaio é posto para rodar. Ao colocar o ensaio para rodar, o condutor é posto em movimento e é possível localizar o ponto em que se encontra o primeiro nó. No ponto em que é localizado o primeiro nó coloca-se uma fita isolante para marcar e o ensaio é parado. Com o ensaio parado, mede-se com uma trena o comprimento entre o ponto de localização do nó e o último ponto de contato (UPC). Ao saber o quanto é a distância entre esses dois pontos, é medida a partir do ponto de localização do nó, metade da distância entre o primeiro nó e o último ponto de contato (UPC). Com essa medição encontra-se o ponto de localização do anti-nó. Feito isso, um acelerômetro é colocado no ponto correspondente ao anti-nó e utilizado como sensor de controle nos ensaios. O procedimento é feito para cada deslocamento de  $y_{max}$  de 1,0 a 6,0 mm de pico a pico para cada parâmetro H/w nos dois cabos condutores.

#### 4.5.3 Calibração e Balanceamento dos extensômetros

Seguido da definição das frequências utilizadas nos ensaios e determinação da localização do anti-nó, realiza-se a calibração e balanceamento dos extensômetros, por meio do programa *Lynx AqDados*. O ensaio dinâmico é iniciado.

#### 4.5.4 Leitura dos extensômetros

O shaker controla as vibrações pelo deslocamento pico a pico no primeiro anti-nó. Com o ensaio estabilizado, realiza-se a leitura dos extensômetros. A gravação de leitura de dados dos extensômetros é realizada por um período de 30 segundos. São realizadas 3 gravações. Uma tabela do Software Microsoft *Excel* é utilizada para ler os dados aferidos, após a transferência destes. A cada gravação realizada, os extensômetros são calibrados depois de pausar os ensaios. A realização do ensaio abrange valores para  $y_{max}$  de 1,0 a 6,0 mm de pico a pico, com intervalos de 1,0 mm. Assim sendo, o procedimento de gravar 3 vezes com calibração e balanceamento dos extensômetros entre cada gravação, é feito para cada valor de  $y_{max}$ .

#### 4.6 Avaliação da Fórmula de P-S

Os ensaios feitos são dinâmicos e tem a finalidade de analisar os valores de tensão aferidos, por meio das deformações medidas pelos extensômetros. A Equação (28) é calculada tendo em vista sua validade nos ensaios realizados e a Equação (29) é utilizada para comparar os valores encontrados, além das tensões encontradas pelas deformações. Análises são feitas para comparar as tensões alternadas calculadas e as tensões alternadas obtidas experimentalmente. As Equações (28) e (29) se encontram a seguir:

$$\sigma(x, c)_{Nom.Max} = \pi d E_a f \sqrt{\frac{m}{EI}} y_{max} \quad (28)$$

$$\sigma(x, c)_{Nom.Max} = d E_a \frac{p^2}{4(e^{-px} + px - 1)} Y_b \quad (29)$$

#### 4.7 Parâmetros de ensaio

As faixas de frequência e deslocamentos de  $y_{max}$  são considerados conforme IEEE (2007). A Equação de frequência utilizada tem relação com a velocidade do vento (V), em km/h e o diâmetro (D), em mm, conforme Equação (30).

$$f[Hz] = 50 \frac{V}{D} \quad (30)$$

Considerando que a velocidade média do vento ( $V$ ) é igual a 3,5 m/s e que os diâmetros dos cabos CAL 900 e TERN são respectivamente iguais a 27,74 e 27,03 mm, as frequências para cada cabo estão representadas pela tabela 8.

Tabela 8 – Frequências mediante Equação (30)

Cabo	Frequência (Hz)
CAL 900	22,71
TERN	23,30

As frequências são bem próximas e é utilizado um valor de 24 Hz, para encontrar a faixa de  $y_{max}$  (anti-nó) empregada na realização dos ensaios. De acordo com as Equações (30) e (31):

$$Y_{max} = \frac{150}{f} \quad (31)$$

$$Y_{min} = \frac{25}{f} \quad (32)$$

A frequência para calcular as Equações (31) e (32) é igual a 24 Hz. Os valores de  $Y_{max}$  e  $Y_{min}$  são iguais a 6,25 mm e 1,04 mm. Logo, a faixa de deslocamento de  $y_{max}$  utilizada é de 1,0 a 6,0 mm.

Conforme tabela 9, os parâmetros de ensaio utilizados nos ensaios são mostrados em seguida.

Tabela 9 – Parâmetros de ensaio

Cabo	H/w (m)	Carga de tração (kgf)	K	Frequência (Hz)	Comprimento de onda (m)
CAL 900 MCM	1820	2282	33,30	24,3	2,88
	2144	2684	34,83	23,46	3,18
	2725	3409	37,35	23,53	3,48
TERN	1820	2432	32,00	24,27	3,00
	2144	2873	33,66	23,67	3,30
	2725	3644	36,38	23,86	3,62

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos pelos ensaios dinâmicos realizados. As Equações (28) e (29) mencionadas no capítulo 3 são utilizadas para analisar a proximidade dos resultados teóricos com os dados medidos experimentalmente. As tensões são analisadas em relação ao ponto de restrição do movimento do cabo.

### 5.1 Resultados comparativos entre tensões experimentais e tensões teóricas da Equação modificada (28) de Poffenberger-Swart

O controle dos ensaios foi feito a partir da amplitude de vibração,  $y_{max}$ , no cabo com um acelerômetro localizado no primeiro anti-nó. As tensões alternadas experimentais são obtidas por meio das deformações lidas pelos extensômetros posicionados em pontos diametralmente opostos à localização do UPC. As deformações dos fios e as tensões atuantes são relacionadas pela Lei de Hooke, Equação (8), que permite comparar com as tensões calculadas analiticamente pelas Equações (28) e (29). O termo “K” da Equação (2) é calculado de acordo com as características do cabo do ensaio e utilizado para cálculo das tensões, Equação (29). Para os valores de  $y_{max}$ , são considerados valores de 1 a 6 mm, pico a pico.

#### 5.1.1 Condutor CAL 900

Conforme Figura 5.1, observa-se o comportamento das curvas de tensões para o parâmetro  $H/w=1820$  m. Foi utilizada frequência igual a 24,3 Hz, escolhida a partir da varredura realizada pelo *Shaker Control*. O valor de K, constante da formulação de Poffenberger-Swart, é igual a 33,3 MPa/mm. As curvas apresentam os valores de tensões dinâmicas teóricas ( $\sigma_{yb}$  e  $\sigma_{ymax}$ ) e tensões experimentais ( $\sigma_{exp}$ ). O acelerômetro de medição do deslocamento do anti-nó se localiza no ponto a 1,44 m a partir do UPC, sendo o comprimento de onda para as condições estabelecidas igual a 2,88 m.

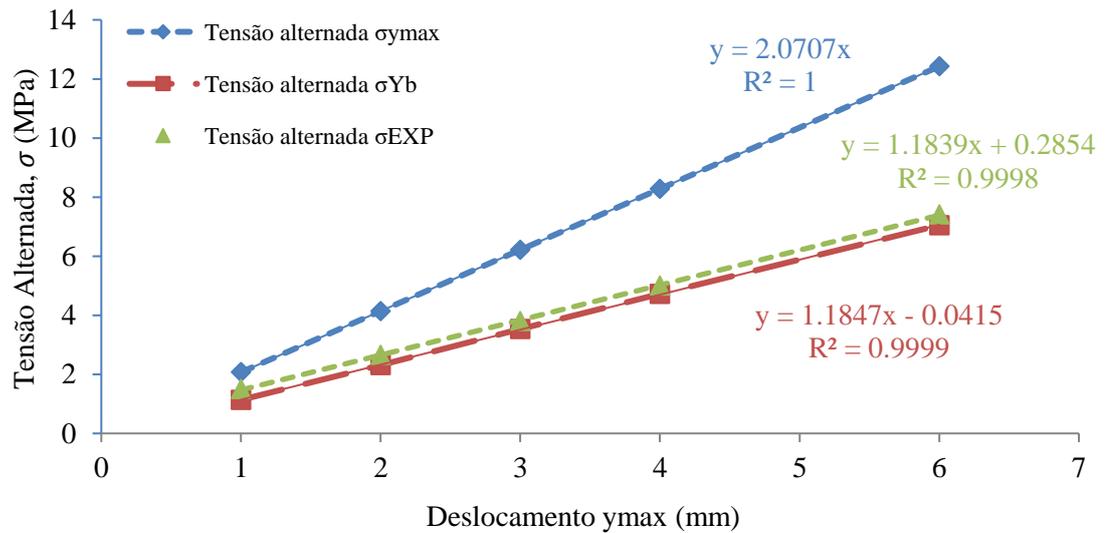


Figura 5.1 – Tensões alternadas para o cabo CAL 900 com parâmetro  $H/w = 1820$  m

As curvas mostradas na Figura 5.1 indicam que os valores obtidos para  $\sigma_{y_{max}}$  se distanciaram dos valores obtidos para  $\sigma_{Yb}$  e  $\sigma_{exp}$  à medida que os valores de  $y_{max}$  aumentaram. Pela Equação (29) os valores de tensões se mostraram próximos das tensões medidas experimentalmente quando a amplitude de deslocamento no ponto correspondente à localização de  $y_{max}$ , aumentou.

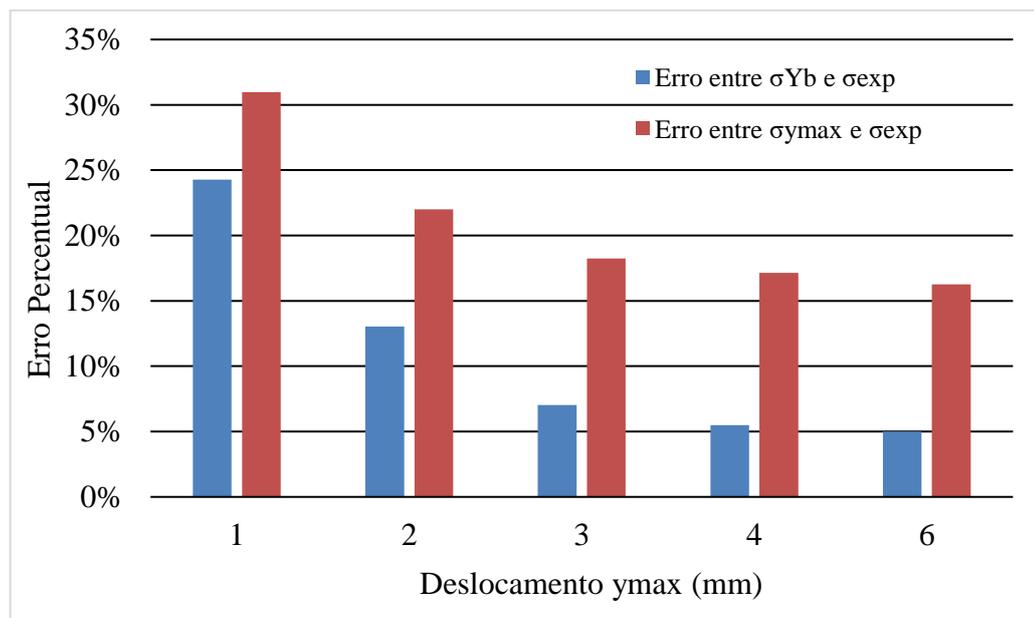


Figura 5.2 – Erros entre tensões para o cabo CAL 900 com parâmetro  $H/w = 1820$  m

Considerando a Equação (29) em relação às tensões obtidas experimentalmente, para  $y_{max} = 1,0$  mm, o erro foi de 24% enquanto que para  $y_{max} = 6,0$  mm, o erro é de 5%, ou seja, o erro decresceu à medida que o  $y_{max}$ , aumentou. Pela Equação (28), as tensões calculadas se afastaram das tensões obtidas experimentalmente quando a amplitude de deslocamento,  $y_{max}$ , aumentou. Para  $y_{max} = 1,0$  mm, o erro é de 38% enquanto que para  $y_{max} = 6,0$  mm, o erro é de 67%, ou seja, o erro cresceu à medida que o  $y_{max}$  aumentou.

De igual modo, os resultados de tensões teóricas e tensões medidas experimentalmente em função da amplitude de deslocamento no anti-nó foram plotadas para o parâmetro  $H/w=2144$  m. Foram considerados no ensaio frequência igual a 23,46 Hz, escolhida a partir da varredura realizada pelo *Shaker Control* e  $K$  igual a 34,83 MPa/mm. Conforme Figura 5.3, as curvas apresentam os valores de tensões dinâmicas teóricas ( $\sigma_{Yb}$  e  $\sigma_{Ymax}$ ) e tensões experimentais ( $\sigma_{exp}$ ). O acelerômetro que mede a amplitude de deslocamento do anti-nó se localiza no ponto a 1,59 m a partir do UPC, já que o comprimento de onda para as condições estabelecidas é igual a 3,18 m.

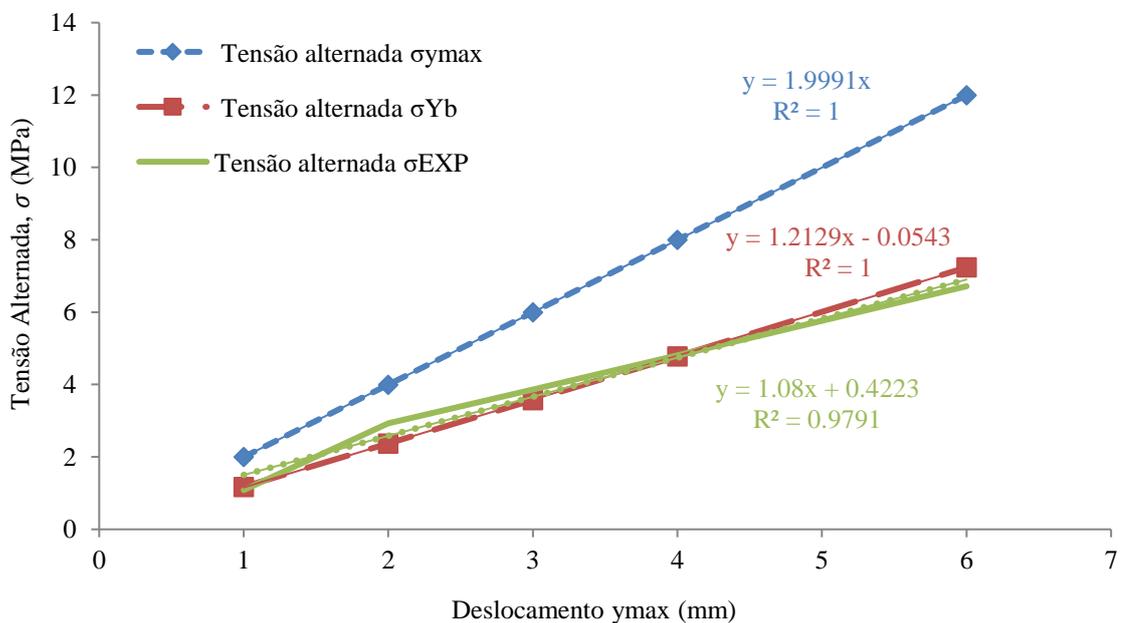


Figura 5.3 – Tensões alternadas para o cabo CAL 900 com parâmetro  $H/w = 2144$  m

As curvas mostradas na Figura 5.3 indicam que os valores obtidos para  $\sigma_{Ymax}$  se distanciaram dos valores obtidos para  $\sigma_{Yb}$  e  $\sigma_{exp}$  à medida que os valores de  $y_{max}$  aumentaram.

Pela Equação (29) os valores das tensões ficaram próximos das tensões medidas experimentalmente.

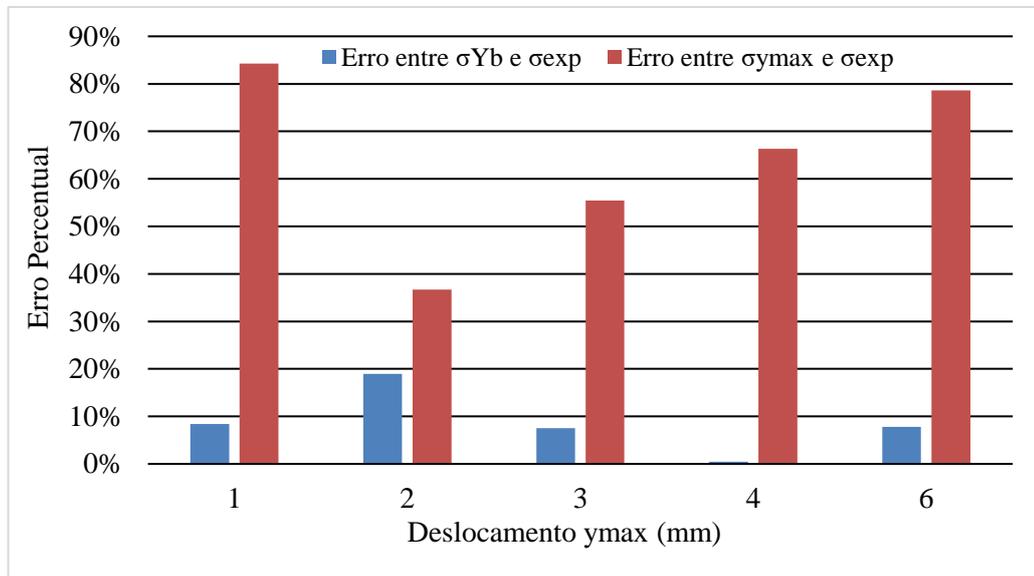


Figura 5.4 – Erros entre tensões para o cabo CAL 900 com parâmetro  $H/w = 2144$  m

Para  $y_{max} = 1,0$  mm, o erro é de 8% enquanto que para  $y_{max} = 6,0$  mm, o erro é de 8%. Houve um aumento no erro no deslocamento do anti-nó para  $y_{max} = 2,0$  mm e um decréscimo do erro. Pela Equação (28) os valores de tensões se distanciaram das tensões obtidas experimentalmente quando a amplitude de deslocamento,  $y_{max}$ , aumentou. Para  $y_{max} = 1,0$  mm, o erro é de 84%, enquanto houve um decréscimo para 37% para o deslocamento igual a  $y_{max} = 2,0$  mm e cresceu até 79% para o deslocamento de  $y_{max} = 6,0$  mm.

Para o parâmetro  $H/w=2725$ m foram considerados no ensaio frequência igual a 23,53 Hz, escolhida a partir da varredura realizada pelo Shaker Control e “K” igual a 37,35 MPa/mm. Conforme Figura 5.5, as curvas apresentam os valores de tensões alternadas ( $\sigma_{Yb}$  e  $\sigma_{Y_{max}}$ ) e tensões experimentais ( $\sigma_{exp}$ ). O acelerômetro que mede o deslocamento no anti-nó se localiza no ponto a 1,74 m a partir do UPC, já que o comprimento de onda para as condições estabelecidas é igual a 3,48 m.

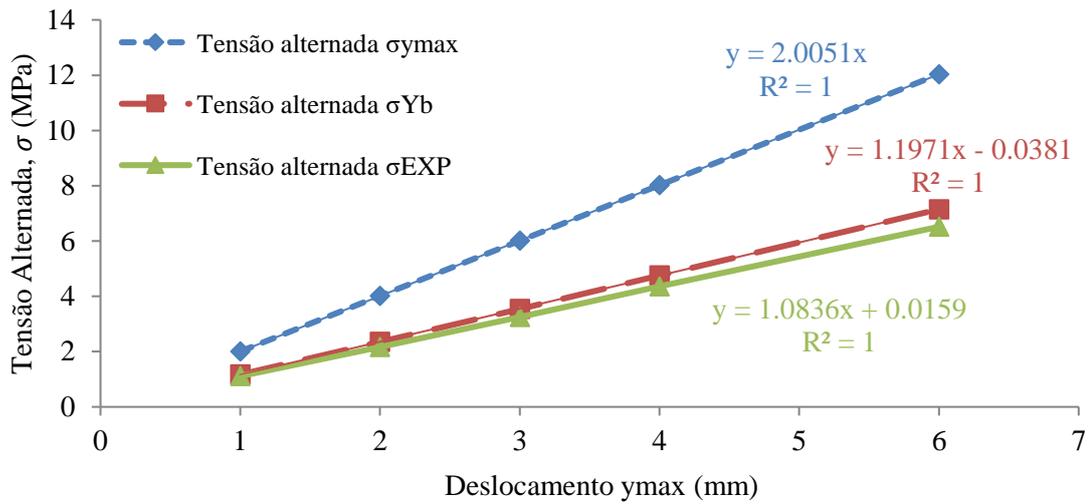


Figura 5.5 – Tensões alternadas para o cabo CAL 900 com parâmetro  $H/w = 2725$  m

As curvas mostradas na Figura 5.5 indicam que os valores obtidos para  $\sigma_{y_{max}}$  se distanciaram dos valores obtidos para  $\sigma_{Yb}$  e  $\sigma_{exp}$  à medida que os valores de  $y_{max}$  aumentaram. Pela Equação (29), é observado que os valores das tensões calculadas se aproximaram das tensões medidas experimentalmente.

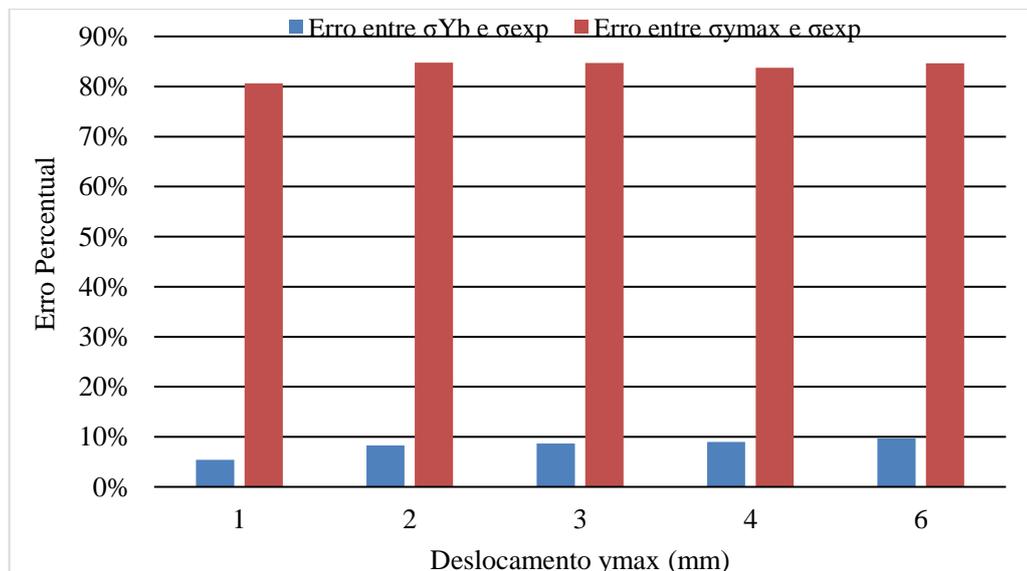


Figura 5.6 – Erros entre tensões para o cabo CAL 900 com parâmetro  $H/w = 2725$  m

Para  $y_{max} = 1,0$  mm, o erro é de 5% enquanto que para  $y_{max} = 6,0$  mm, o erro é de 10%, ou seja, o erro cresceu à medida que o deslocamento  $y_{max}$ , aumentou. Pela Equação (28)

os valores de tensões se afastaram das tensões obtidas experimentalmente quando a amplitude de deslocamento,  $y_{max}$ , aumentou. Para  $y_{max} = 1,0$  mm, o erro é de 81% enquanto que para  $Y_b = 6,0$  mm, o erro é de 85%, ou seja, o erro cresceu à medida que o  $y_{max}$ , aumentou.

### 5.1.2 Condutor TERN

Para o parâmetro  $H/w=1820$  m foram considerados no ensaio frequência igual a 24,27 Hz, escolhida a partir da varredura realizada pelo Shaker Control, K igual a 32,00 MPa/mm. Conforme Figura 5.7, as curvas apresentam os valores de tensões alternadas ( $\sigma_{Yb}$  e  $\sigma_{y_{max}}$ ) e tensões experimentais ( $\sigma_{exp}$ ), sendo estas obtidas por meio de deformações devido a vibração do cabo. O deslocamento do anti-nó se localiza no ponto a 1,50 m a partir do UPC, pois o comprimento de onda para as condições estabelecidas é igual a 3,00 mm.

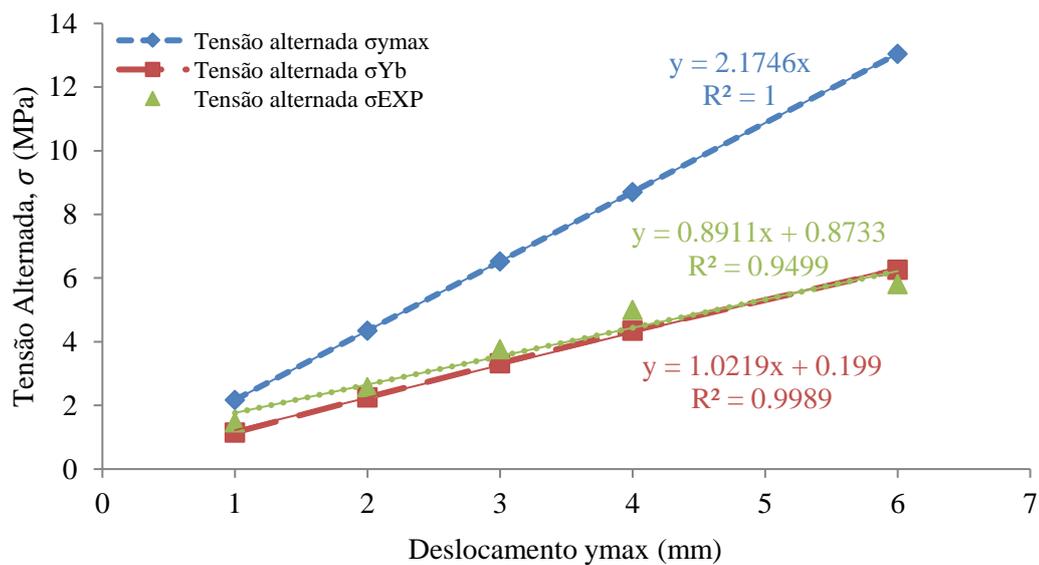


Figura 5.7 – Tensões alternadas para o cabo TERN com parâmetro  $H/w = 1820$  m

As curvas mostradas na Figura 5.7 indicam que os valores obtidos para  $\sigma_{y_{max}}$  se distanciaram dos valores obtidos para  $\sigma_{Yb}$  e  $\sigma_{exp}$  à medida que os valores de  $y_{max}$  cresceram. Pela Equação (29) os valores das tensões se aproximaram das tensões medidas experimentalmente quando a amplitude de deslocamento no ponto correspondente à localização de  $y_{max}$ , aumentou.

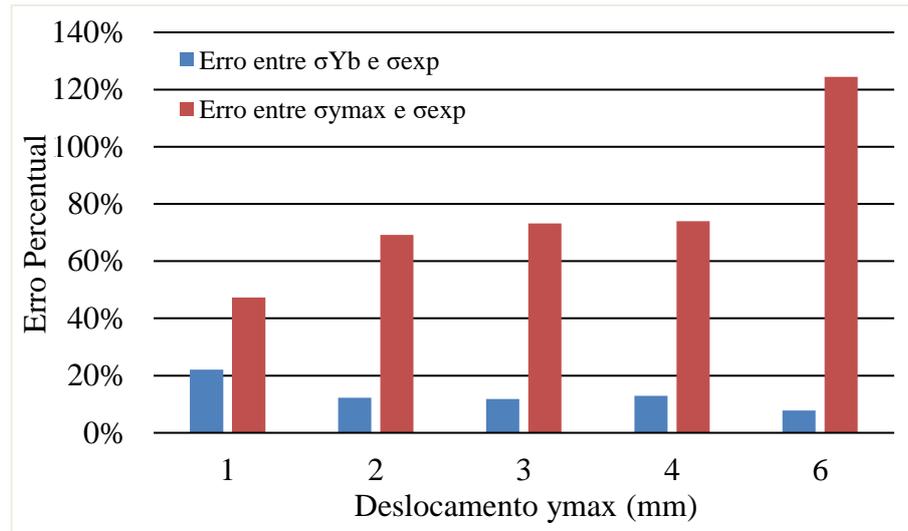


Figura 5.8 – Erros entre tensões para o cabo TERN com parâmetro  $H/w = 1820$  m

Para  $y_{max} = 1,0$  mm, o erro é de 22% enquanto que para  $y_{max} = 6,0$  mm, o erro é de 8%, ou seja, o erro decresceu à medida que o deslocamento  $y_{max}$ , aumentou. Pela Equação (28) os valores se aproximaram das tensões obtidas experimentalmente quando a amplitude de deslocamento,  $y_{max}$ , diminuiu. Para  $y_{max} = 1,0$  mm, o erro é de 47% enquanto que para  $y_{max} = 6,0$  mm, o erro é de 124%, ou seja, o erro cresceu à medida que o  $y_{max}$ , aumentou.

Para o parâmetro  $H/w=2144$  m, foram considerados no ensaio frequência igual a 23,67 Hz, escolhida a partir da varredura realizada pelo Shaker Control, K igual a 33,66 MPa/mm. Conforme Figura 5.9, as curvas apresentam os valores de tensões dinâmicas teóricas ( $\sigma_{Yb}$  e  $\sigma_{Ymax}$ ) e tensões experimentais ( $\sigma_{exp}$ ) em função do deslocamento do cabo. O acelerômetro se localiza no ponto a 1,65 m a partir do UPC, pois o comprimento de onda para as condições estabelecidas é igual a 3,30 m.

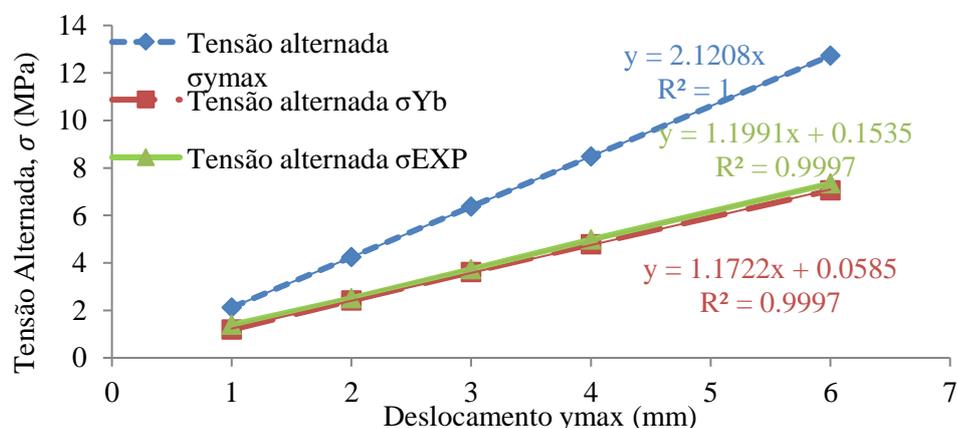


Figura 5.9 – Tensões alternadas para o cabo TERN com parâmetro  $H/w = 2144$  m

As curvas mostradas na Figura 5.9 indicam que os valores obtidos para  $\sigma_{y_{max}}$  se distanciaram dos valores obtidos para  $\sigma_{Yb}$  e  $\sigma_{exp}$  à medida que os valores de  $y_{max}$  aumentaram. Pela Equação (29) os valores das tensões calculadas se aproximam das tensões medidas experimentalmente.

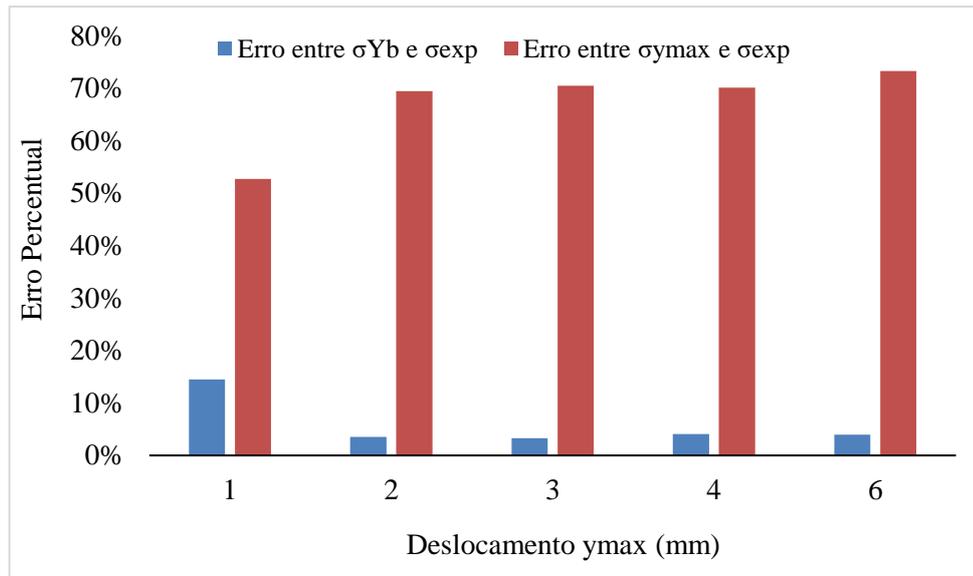


Figura 5.10 – Erros entre tensões para o cabo TERN com parâmetro  $H/w = 2144$  m

Para  $y_{max} = 1,0$  mm, o erro é de 15% enquanto que para  $y_{max} = 6,0$  mm, o erro é de 4%, ou seja, o erro decresceu à medida que o  $y_{max}$ , aumentou. Pela Equação (28) os valores se aproximaram das tensões obtidas experimentalmente quando a amplitude de deslocamento,  $y_{max}$ , diminuiu. Para  $y_{max} = 1,0$  mm, o erro é de 53% enquanto que para  $y_{max} = 6,0$  mm, o erro é de 73%, ou seja, o erro cresceu à medida que o  $y_{max}$ , aumentou.

Para o parâmetro  $H/w=2725$  m foram considerados no ensaio frequência igual a 23,86 Hz, escolhida a partir da varredura realizada pelo Shaker Control, K igual a 36,38 MPa/mm. Conforme Figura 5.11, as curvas apresentam os valores de tensões alternadas ( $\sigma_{Yb}$  e  $\sigma_{Y_{max}}$ ) e tensões experimentais ( $\sigma_{exp}$ ) sendo estas obtidas por meio de deformações devido a vibração do cabo. O deslocamento medido pelo acelerômetro no primeiro anti-nó se localiza no ponto a 1,81 m do UPC, já que o comprimento de onda para as condições estabelecidas é igual a 3,62 m.

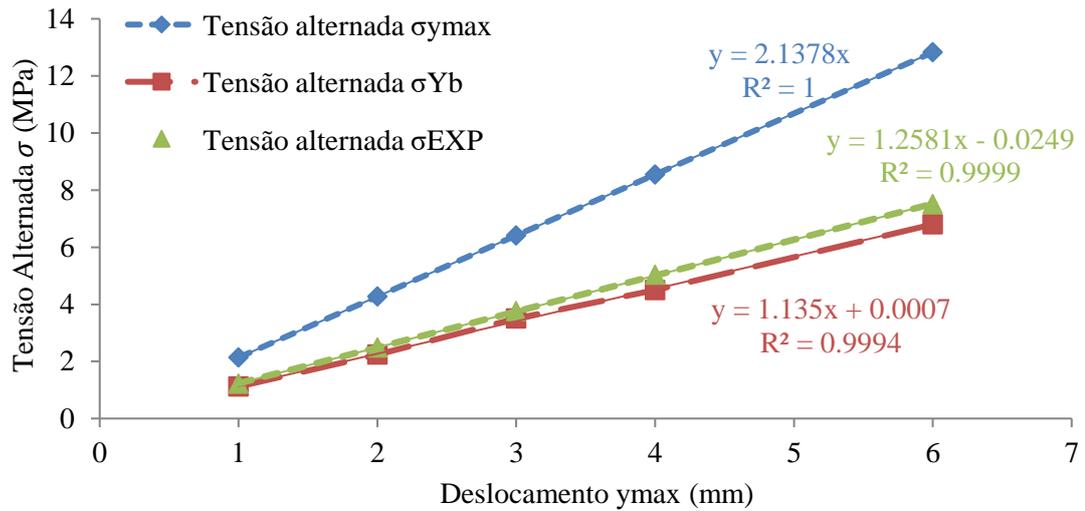


Figura 5.11 – Tensões alternadas para o cabo TERN com parâmetro  $H/w = 2725$  m

As curvas mostradas na Figura 5.11 indicam que os valores obtidos para  $\sigma_{y_{max}}$  se distanciaram dos valores obtidos para  $\sigma_{Yb}$  e  $\sigma_{exp}$  à medida que os valores de  $y_{max}$  aumentaram. Pela Equação (29) os valores se aproximaram das tensões medidas experimentalmente quando a amplitude de deslocamento no ponto correspondente à localização de  $y_{max}$ , aumentou.

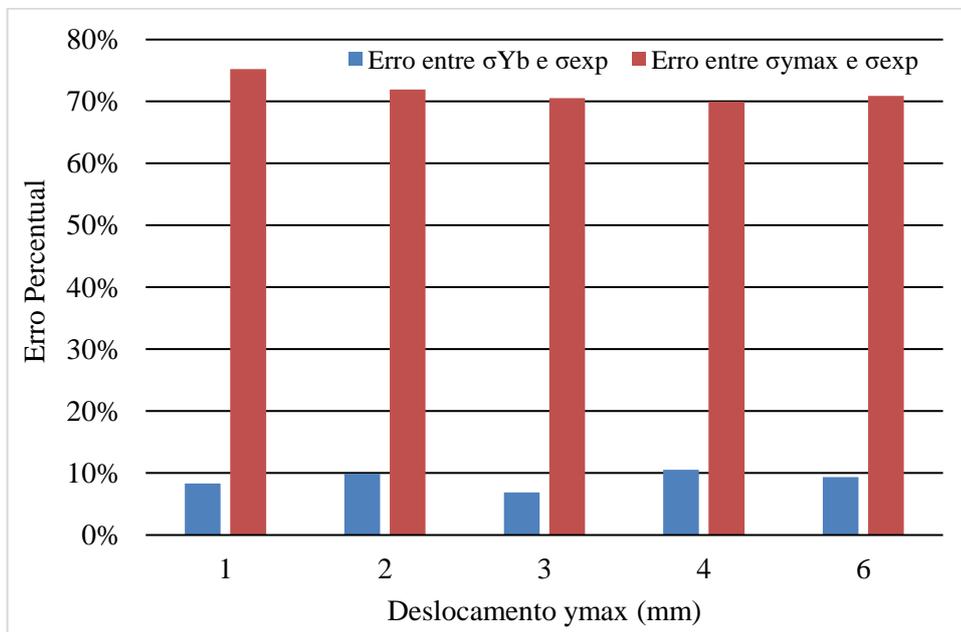


Figura 5.12 – Erros entre tensões para o cabo TERN com parâmetro  $H/w = 2725$  m

Para  $y_{max} = 1,0$  mm, o erro é de 8% enquanto que para  $y_{max} = 6,0$  mm, o erro é de 9%, ou seja, o erro aumenta e diminui considerando os diferentes deslocamentos de  $y_{max}$ . Pela

Equação (28) os valores das tensões medidas se afastam das tensões obtidas experimentalmente quando a amplitude de deslocamento,  $y_{max}$ , aumentou. Para  $y_{max} = 1,0$  mm, o erro é de 75% enquanto que para  $Y_b = 6,0$  mm, o erro é de 71%, ou seja, o erro diminuiu à medida que o  $y_{max}$ , aumentou.

## 5.2 Resultados comparativos entre tensões experimentais e tensões teóricas pela Equação (29) de Poffenberger-Swart

A formulação de Poffenberger-Swart representada pela Equação (29), que depende da amplitude de deslocamento de pico a pico do cabo e das características do mesmo, é usualmente utilizada considerando uma distância igual a 89 mm a partir do UPC entre o cabo e o grampo até um ponto do cabo (IEEE, 1966). No entanto, tendo em vista que os resultados obtidos pela Equação (28), correspondente ao cálculo de tensão alternada pelo deslocamento no ponto referente ao anti-nó e frequência, não foram obtidos resultados satisfatórios, foram feitas investigações das tensões dinâmicas em relação aos deslocamentos referentes ao ponto do anti-nó utilizando a formulação de Poffenberger-Swart, Equação (29). Portanto, para utilização da Equação (29) considerando o deslocamento no anti-nó, foi necessário realizar os cálculos do valor de “K”, tendo em vista que este termo depende das características do cabo utilizado e da distância em que se encontra o ponto de deslocamento analisado do cabo, conforme Equação (2). Conforme Tabela 9, os valores de “K” para os cabos e condições estabelecidas considerando o deslocamento no anti-nó são mostrados juntamente com os valores da distância ‘x’, que para cada caso leva em conta a metade do comprimento de onda.

Tabela 10 – Valores para cálculo mediante formulação de Poffenberger-Swart

Cabo	H/w (m)	Distância ‘x’ a partir do UPC até o deslocamento do anti-nó (mm)	K
CAL 900 MCM	1820	1440	1,268
	2144	1590	1,236
	2725	1740	1,268
TERN	1820	1500	1,266
	2144	1650	1,248
	2725	1810	1,274

Por meio do Software Excel foram realizados os cálculos para a Equação (29), sendo considerado o deslocamento do cabo no ponto do anti-nó e foram plotados gráficos comparando os resultados para as tensões alternadas obtidas por meio das deformações dos extensômetros e tensões alternadas calculadas pela Equação (29) nos pontos de deslocamento do cabo correspondentes aos pontos localizados a 89 mm a partir do UPC e no anti-nó, sendo representadas por  $\sigma_{P-S(Yb)}$  e  $\sigma_{P-S(y_{max})}$ , respectivamente.

As condições para os cabos CAL 900 e TERN são as mesmas considerando os resultados no item 5.1, onde a mudança se deve ao fato de que a Equação (28) não foi utilizada e sim a Equação (29), com adaptação em que o ponto de deslocamento do cabo considerado é o anti-nó.

### 5.2.1 Condutor CAL 900

Para o cabo CAL 900, considerando  $H/w = 1820$  m, tem-se que os resultados comparados são mostrados pelo gráfico da Figura 5.13 e as diferenças entre as tensões obtidas experimentalmente e calculadas são mostrados pela Figura 5.14.

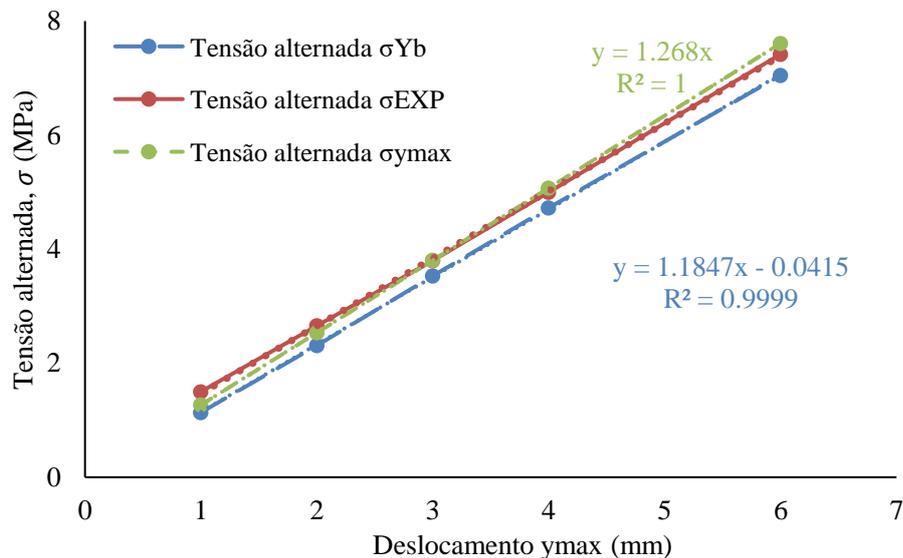


Figura 5.13 – Tensões alternadas para o cabo CAL 900 com parâmetro  $H/w = 1820$  m

Conforme Figura 5.13, as curvas do gráfico apresentam proximidade entre as tensões obtidas experimentalmente e calculadas em função dos deslocamentos do cabo no ponto correspondente ao anti-nó.

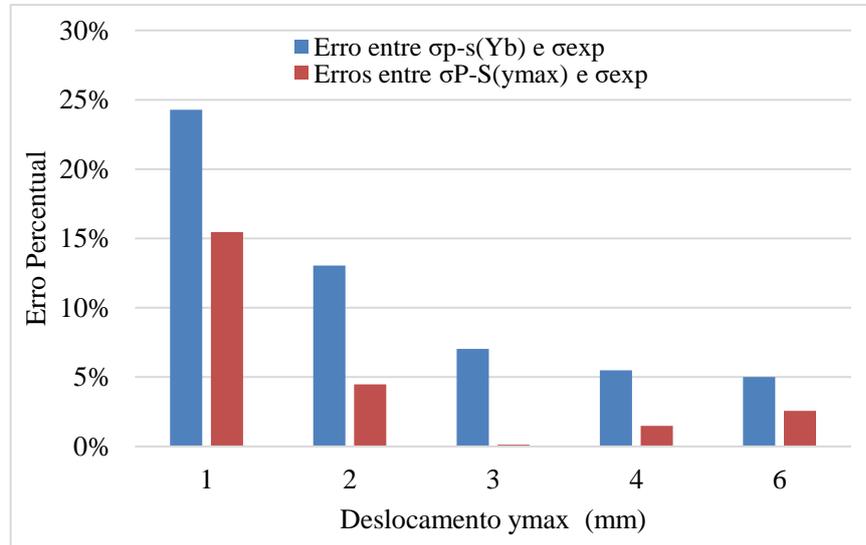


Figura 5.14 – Erros entre tensões para o cabo CAL 900 com parâmetro  $H/w = 1820$  m

Conforme Figura 5.14, o erro entre as tensões é de 15% para  $y_{max} = 1,0$  mm, enquanto que para  $y_{max} = 6,0$  mm, o erro é de 3%, ou seja, o erro diminuiu à medida que o deslocamento aumentou. É possível observar que o erro ao longo da faixa de deslocamento considerada diminuiu.

Considerando  $H/w = 2144$  m, tem-se que os resultados comparados são mostrados pelo gráfico da Figura 5.15 e os erros entre as tensões obtidas experimentalmente e calculadas mostrados pela Figura 5.16.

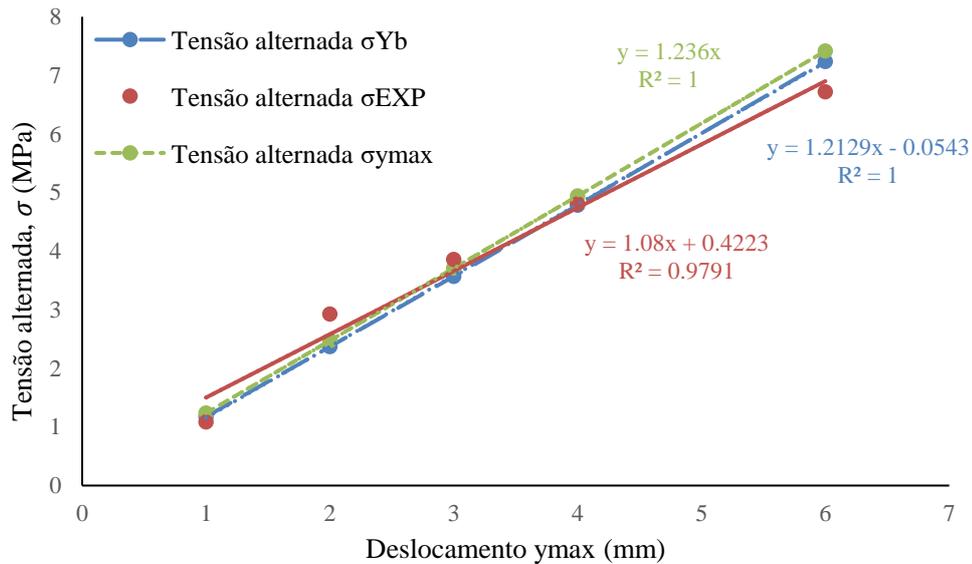


Figura 5.15 – Tensões alternadas para o cabo CAL 900 com parâmetro  $H/w = 2144$  m

Conforme Figura 5.15, as curvas do gráfico apresentam proximidade entre as tensões obtidas experimentalmente e calculadas em função dos deslocamentos do cabo no ponto correspondente ao anti-nó.

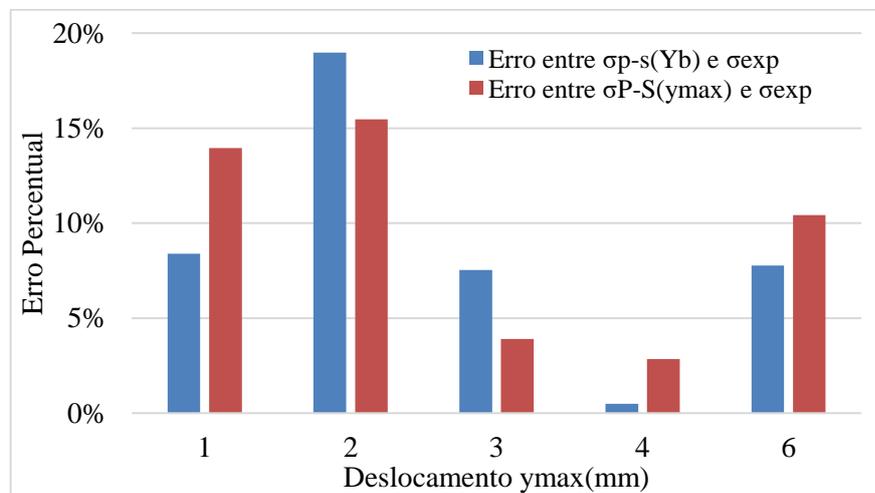


Figura 5.16 – Erros entre tensões para o cabo CAL 900 com parâmetro  $H/w = 2144$  m

Conforme Figura 5.16, os erros, representados pelas barras em vermelho, entre as tensões é de 14% para  $y_{max} = 1,0$  mm, enquanto que para  $y_{max} = 6,0$  mm, o erro é de 10%. É possível observar que a variação do erro ao longo da faixa de deslocamento considerada ocorreu por meio de sucessivos aumentos e diminuições.

Considerando  $H/w = 2725$  m, tem-se que os resultados comparados são mostrados pelo gráfico da Figura 5.17 e os erros entre as tensões obtidas experimentalmente e calculadas mostrados pela Figura 5.18.

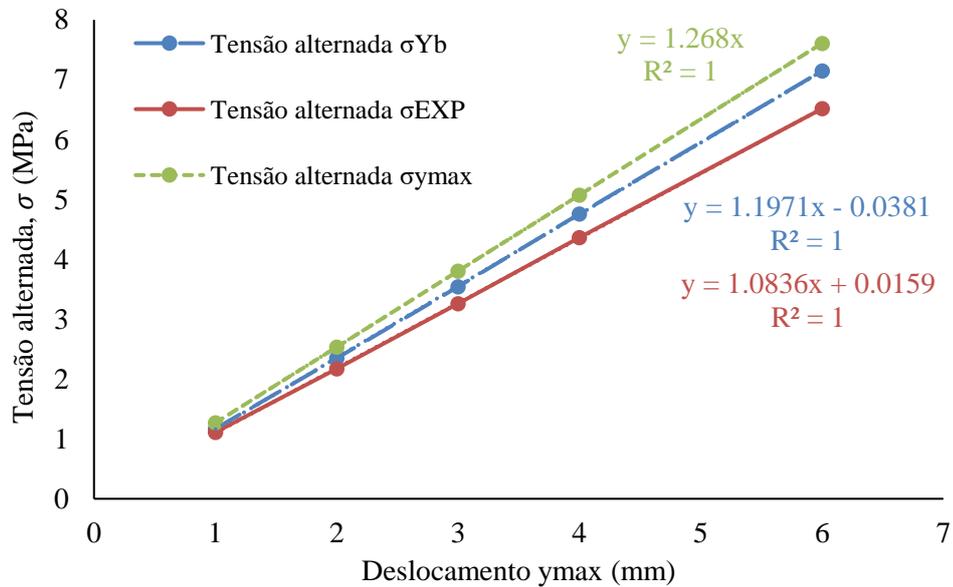


Figura 5.17 – Tensões alternadas para o cabo CAL 900 com parâmetro  $H/w = 2725$  m

Conforme Figura 5.17, as curvas do gráfico apresentam proximidade entre as tensões obtidas experimentalmente e calculadas em função dos deslocamentos do cabo no ponto correspondente ao anti-nó. Porém os valores entre as tensões apresenta um pequeno distanciamento a medida que o deslocamento no anti-nó aumenta de  $y_{max} = 1,0$  mm a  $y_{max} = 6,0$  mm.

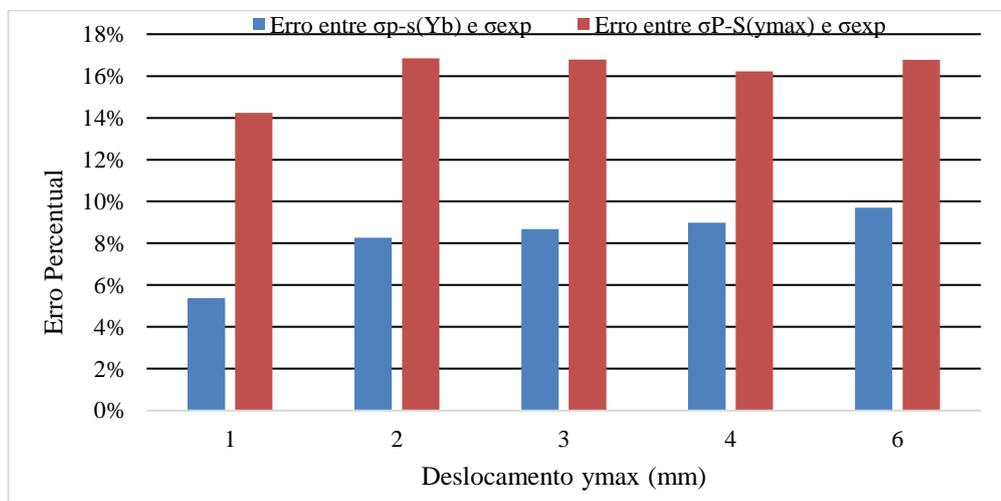


Figura 5.18 – Erros entre tensões para o cabo CAL 900 com parâmetro  $H/w = 2725$  m

Conforme Figura 5.18, os erros, representados pelas barras em vermelho, entre as tensões é de 14% para  $y_{max} = 1,0$  mm, enquanto que para  $y_{max} = 6,0$  mm, o erro é de 17%. É possível observar que o erro aumentou durante a faixa de deslocamento considerada mas se manteve praticamente constante entre os deslocamentos de  $y_{max} = 2,0$  mm a  $y_{max} = 6,0$  mm.

### 5.2.2 Condutor TERN

Para o cabo TERN, considerando  $H/w = 1820$  m, tem-se que os resultados comparados são mostrados pelo gráfico da Figura 5.19 e os erros entre as tensões obtidas experimentalmente e calculadas mostrados pela Figura 5.20.

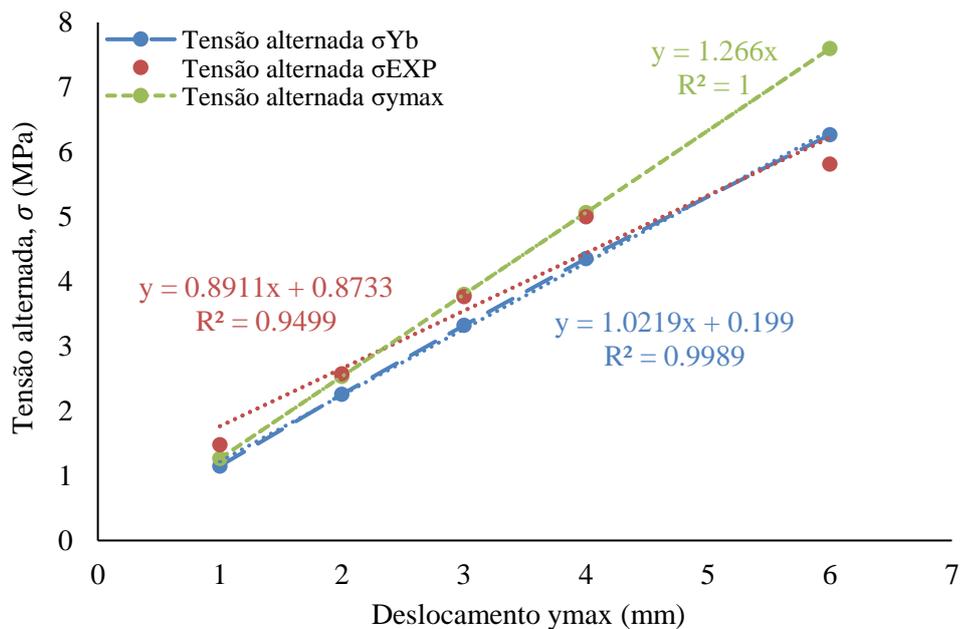


Figura 5.19 – Tensões alternadas para o cabo TERN com parâmetro  $H/w = 1820$  m

Conforme Figura 5.19, as curvas do gráfico apresentam proximidade entre as tensões obtidas experimentalmente e calculadas em função dos deslocamentos do cabo no ponto correspondente ao anti-nó. Porém os valores entre as tensões apresenta distanciamento a medida que o deslocamento no anti-nó aumenta de  $y_{max} = 1,0$  mm a  $y_{max} = 6,0$  mm, como pode ser visto pelas curvas em verde e vermelho.

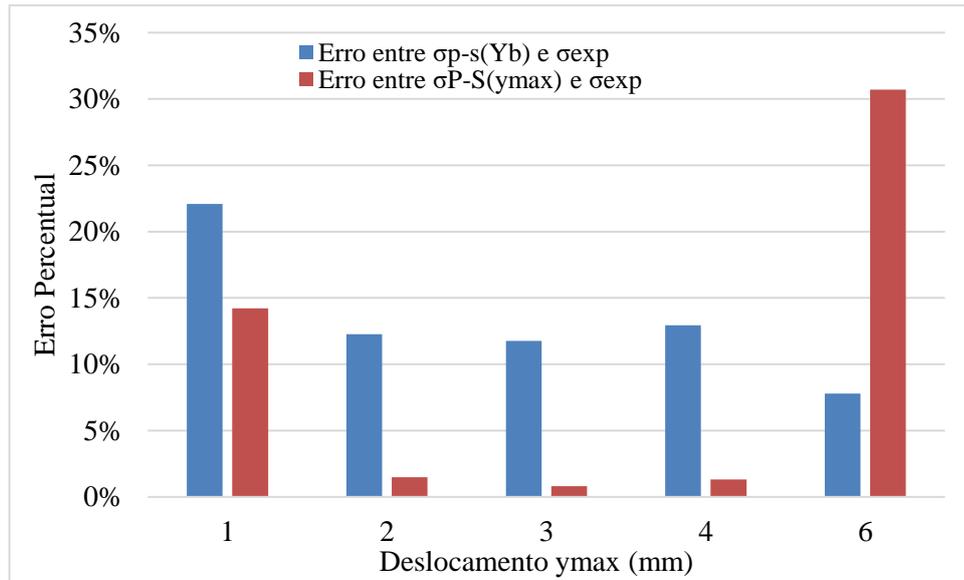


Figura 5.20 – Erros entre tensões para o cabo TERN com parâmetro  $H/w = 1820$  m

Conforme Figura 5.20, os erros, representados pelas barras em vermelho, entre as tensões é de 14% para  $y_{max} = 1,0$  mm, enquanto que para  $y_{max} = 6,0$  mm, o erro é de 31%. Observa-se que houve diminuição do erro de  $y_{max} = 1,0$  mm até  $y_{max} = 4,0$  mm e um aumento abrupto de  $y_{max} = 4,0$  mm a  $y_{max} = 6,0$  mm.

Para  $H/w = 2144$  m, tem-se que os resultados comparados são mostrados pelo gráfico da Figura 5.21 e as diferenças entre as tensões obtidas experimentalmente e calculadas são mostradas pela Figura 5.22.

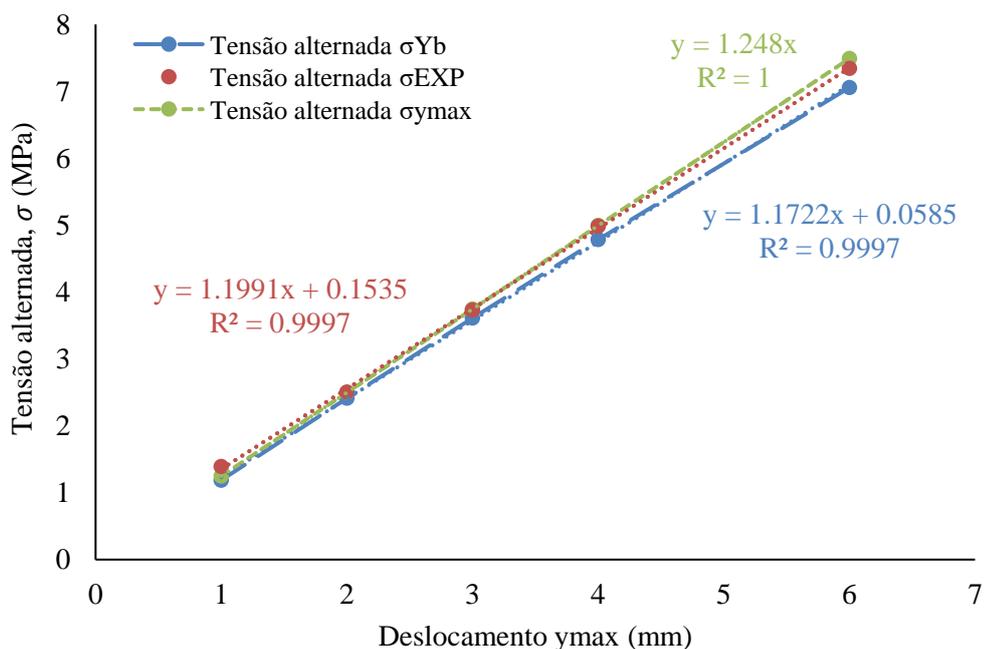


Figura 5.21 – Tensões alternadas para o cabo TERN com parâmetro  $H/w = 2144$  m

Conforme Figura 5.21, as curvas do gráfico apresentam proximidade entre as tensões obtidas experimentalmente e calculadas em função dos deslocamentos do cabo no ponto correspondente ao anti-nó.

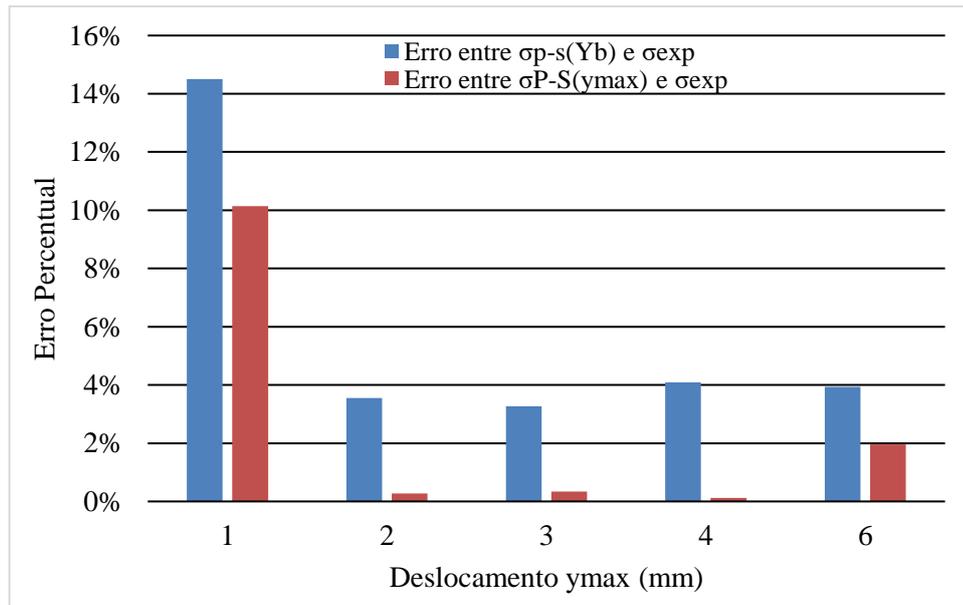


Figura 5.22 – Erros entre tensões para o cabo TERN com parâmetro  $H/w = 2144$  m

Conforme Figura 5.22, os erros percentuais, representados pelas barras em vermelho, entre as tensões é de 10% para  $y_{max} = 1,0$  mm, enquanto que para  $y_{max} = 6,0$  mm, o erro é de 2%. Observa-se que houve diminuição do erro de  $y_{max} = 1,0$  mm até  $y_{max} = 6,0$  mm.

Considerando  $H/w = 2725$  m, tem-se que os resultados comparados são mostrados pelo gráfico da Figura 5.23 e os erros entre as tensões obtidas experimentalmente e calculadas mostrados pela Figura 5.24.

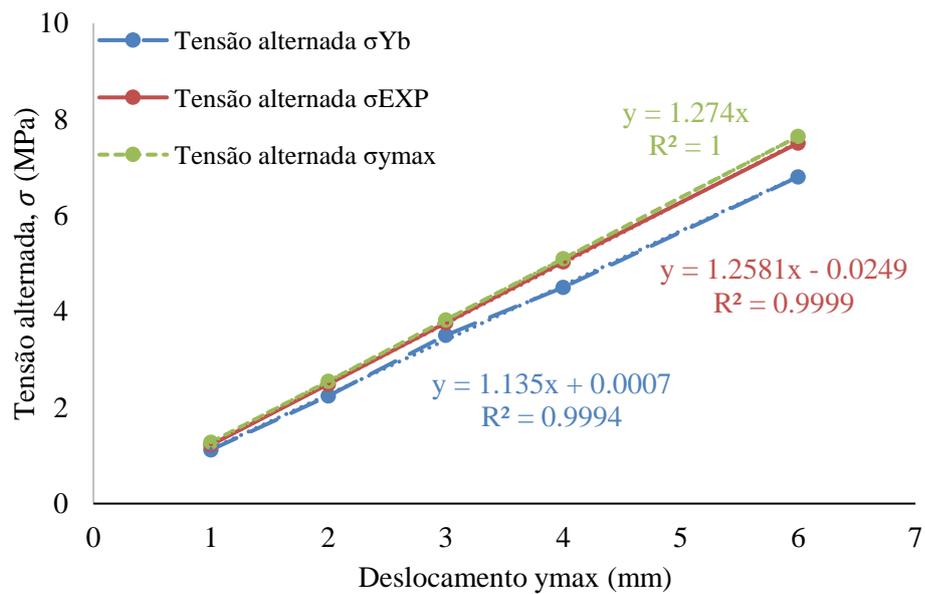


Figura 5.23 – Tensões alternadas para o cabo TERN com parâmetro  $H/w = 2725$  m

Conforme Figura 5.23, as curvas do gráfico apresentam proximidade entre as tensões obtidas experimentalmente e calculadas em função dos deslocamentos do cabo no ponto correspondente ao anti-nó.

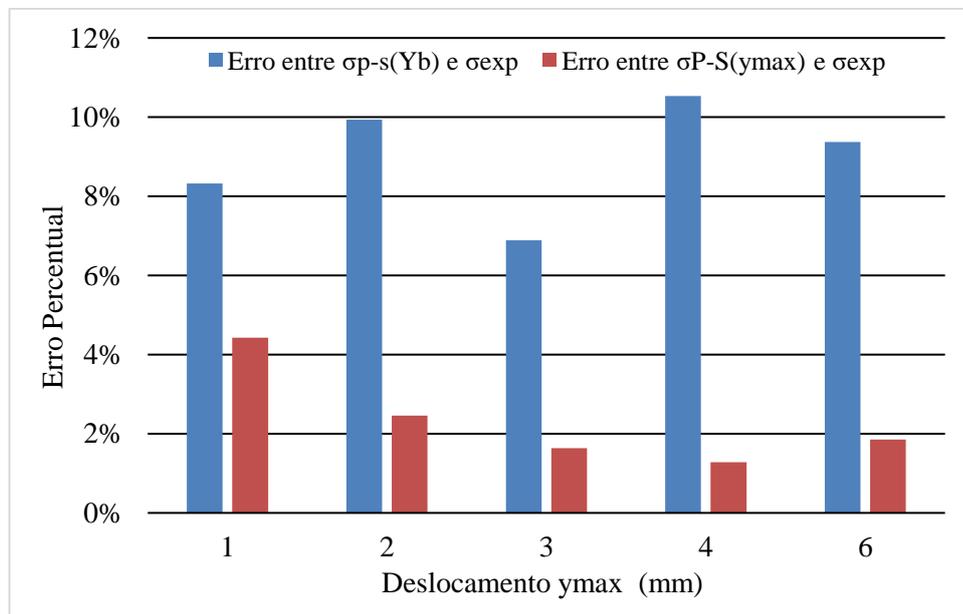


Figura 5.24 – Erros entre tensões para o cabo TERN com parâmetro  $H/w = 2725$  m

Conforme Figura 5.24, os erros, representados pelas barras em vermelho, entre as tensões é de 4% para  $y_{max} = 1,0$  mm, enquanto que para  $y_{max} = 6,0$  mm, o erro é de 2%. Observa-se que houve diminuição do erro de  $y_{max} = 1,0$  mm até  $y_{max} = 6,0$  mm.

### 5.3 Discussões

Após realizados os ensaios, é constatado que houve distanciamento das tensões calculadas pela Equação (28) do anti-nó em relação as tensões calculadas analiticamente pela Equação (29) e pelas deformações medidas pelos extensômetros à medida que o deslocamento do anti-nó é alterado de 1,0 a 6,0 mm, conforme item 5.1. Os erros entre as tensões calculadas pela Equação (28) e tensões medidas pelas deformações obtidas são altos.

Os erros envolvidos nos experimentos podem ter sido: por medições do comprimento de onda, posicionamento dos extensômetros, posicionamento errado do acelerômetro do anti-nó, deslocamento horizontal e vertical do cabo durante as vibrações. São erros que podem implicar em valores de tensões obtidos diferentes do que realmente deveriam ser. Outra análise a ser feita é que mesmo que o cabo sofra alterações na carga de esticamento, este não influencia de forma a fazer grandes alterações nos valores de tensões, como visto nos resultados obtidos.

Os ensaios foram realizados com a máxima cautela possível para que os resultados analisados não fossem prejudicados. No item 5.1, a análise dos resultados, para o cabo CAL 900, mostrou que os erros percentuais entre as tensões calculadas e obtidas experimentalmente diminuíram considerando o parâmetro  $H/w = 1820$  m, aumentaram conforme o parâmetro  $H/w = 2144$  m e para o parâmetro  $H/w = 2725$  m se mantiveram constantes em torno de 80 a 85%. Para o cabo TERN, a análise dos resultados mostra que os erros percentuais entre as tensões calculadas e obtidas experimentalmente aumentaram considerando os parâmetros  $H/w = 1820$  m e  $H/w = 2144$  m e os erros percentuais para o parâmetro  $H/w = 2725$  m se mantiveram próximos em torno de 70 a 75%.

Os resultados obtidos conforme o item 5.2 são próximos quando comparados com os resultados do item 5.1. Ao utilizar a formulação para distâncias em que a posição do deslocamento do cabo se encontram no anti-nó a Equação (29), que depende da constante 'K' e da amplitude de deslocamento do cabo, se mostrou adequada, conforme os resultados

mostrados das Figuras 5.13 a 5.24, onde apresentou erros baixos para as tensões nos casos analisados.

Para o cabo CAL 900, o erro percentual entre as tensões obtidas experimentalmente e calculadas decresceu de 15% a 3% para o parâmetro  $H/w = 1820$  m, decresceu de 14% a 10% para o parâmetro  $H/w = 2144$  m e se manteve em torno de 14% a 17% para o parâmetro  $H/w = 2725$  m.

Para o cabo TERN, o erro percentual decresceu de 14% para 2% de acordo com o parâmetro  $H/w = 1820$  m, tendo um erro distoante entre as tensões de 31% para o deslocamento  $y_{max} = 6,0$  mm, no anti-nó. Para o parâmetro  $H/w = 2144$  m, o erro mostrou um decréscimo de 10% para 2% enquanto que para o parâmetro  $H/w = 2725$  m, o erro diminuiu de 4% para 2%.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 Resultados dos ensaios dinâmicos

Devido a dificuldades que podem compreender a obtenção das tensões no cabo por meio do uso de sensores no ponto no cabo localizado a 89 mm a partir do UPC, o objetivo do trabalho foi estimar os esforços dinâmicos por meio do deslocamento do cabo, verificando se as Equações (28) e (29) de Poffenberger-Swart são adequadas.

A Equação (28) calcula as tensões dinâmicas ou alternadas por meio do deslocamento de 0 a pico no ponto do cabo correspondente ao anti-nó, frequência de vibração e características do cabo. A Equação (29) calcula as tensões dinâmicas ou alternadas por meio do deslocamento de pico a pico do cabo e pela constante 'K', que abrange características do cabo e a distância do ponto analisado em relação ao último ponto de contato (UPC).

Os cabos ensaiados foram o CAL 900 e o TERN, com parâmetros  $H/w = 1820$ , 2144 e 2725 m em frequências próximas de 24 Hz, para deslocamentos  $y_{max}$  de 1,0 a 6,0 mm de pico a pico.

De acordo com os resultados obtidos e descritos no item 5.1, a Equação (28) não apresentou resultados próximos das tensões dinâmicas obtidas por meio das deformações, conforme os erros calculados. Foi observado que um fator de aproximadamente 2 diferenciou as tensões calculadas pela Equação (28) das demais tensões em todos os casos analisados. A medida que o deslocamento do cabo no ponto correspondente ao anti-nó variou, tendo aumentado de 1 a 6 mm, em intervalos de 1 mm, as tensões calculadas pela Equação (28) se distanciaram das tensões obtidas experimentalmente.

No item 5.2, a Equação (29) é calculada levando em conta o deslocamento do cabo correspondente ao deslocamento no anti-nó. Assim, os valores de 'K' foram modificados, haja visto que depende da distância do UPC ao ponto de deslocamento e das características do cabo. Os resultados apresentados mostraram que as tensões alternadas calculadas são próximas das tensões dinâmicas obtidas experimentalmente, tanto para o condutor CAL 900 quanto para o TERN. No entanto, a medida que se afasta do ponto de restrição o cabo tende a se comportar como uma corda e isso pode comprometer a hipótese de utilização da Equação (29) para distâncias muito distantes do ponto de restrição do cabo. Para as condições utilizadas nos ensaios a equação de Poffenberger-Swart, funcionou e mostrou-se mais viável sua utilização do

que estimar as tensões por meio da Equação (28). No entanto, não pode se garantir que a formulação de Poffenberger-Swart, Equação (29), funciona para outras condições de ensaios.

## 6.2 Propostas para trabalhos futuros

Mais investigações acerca do assunto devem ser realizadas com o intuito de contribuir para a pesquisa visando encontrar soluções de engenharia que tratem do problema envolvido. Como proposta para trabalhos futuros, é sugerido:

- Realização de ensaios com diferentes cabos condutores, tendo em vista que os cabos possuem comportamentos distintos entre eles;
- Realização de ensaios considerando deslocamentos maiores dos cabos em relação aos utilizados nos ensaios do presente trabalho pois à medida que os deslocamentos são aumentados pode ser que a formulação proposta por Poffenberger & Swart não funcione. Assim sendo, há a necessidade de avaliar a Equação de Poffenberger-Swart comparando as tensões dinâmicas calculadas com as tensões dinâmicas encontradas experimentalmente para maiores deslocamentos do cabo no anti-nó;
- Utilizar outros níveis de frequências com o intuito de avaliar a influência destas nos ensaios;
- Avaliar as tensões dinâmicas em diferentes pontos do cabo, considerando deslocamentos do cabo entre o ponto localizado a 89 mm e o ponto localizado no anti-nó a partir do último ponto de contato para avaliar a relação de Poffenberger-Swart.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, J. L., et al. **Avaliação comparativa da resistência a fadiga de cabos CAA e CAL**, Grupo de estudos de linhas de transmissão – Seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica. Outubro, 2013.

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

ANEEL. **Atlas de energia elétrica no Brasil** ed – Brasília, 2008. 236p

AZEVEDO, C. R. F., et al. **Fretting fatigue in overhead conductors: rig design and failure analysis of a Grosbeak aluminium cable steel reinforced conductor**. ELSEVIER: Engineering failure analysis 2009; 9: 136-151.

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

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

BONIARDI, M., DIANA, G., TAGLIABUE, C. *“Fenomeni di fretting-fatigue su un conduttore elettrico”*. Revista La Metallurgia Italliana. Ottobre, 2007

CEPEL (2013), **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro: Simulações 2013/Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL – Rio de Janeiro: CEPEL, 2017**. Acesso em: 20 de Maio de 2018.

CIGRÉ SC22-WG04. **Guide for Endurance Tests of Conductors Inside Clamps**, Electra, No 100, pp. 77-86 May 1985.

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

CIGRÉ TF B2. 11.07 **Fatigue Endurance Capability of Conductor/ Clamp Systems Update of Present Knowledge**, July 2008.

EPRI. **EPRI Transmission Line Reference Book: Wind-Induced Conductor Motion**. Palo Alto, CA: 2006. 1012317.

FADEL, A. A. **Avaliação do efeito de tracionamento em elevados níveis de EDS sobre a resistência em fadiga do condutor IBIS (CAA 397,5 MCM)**. 2010. 185 p. Tese de Doutorado em Ciências Mecânicas - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

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

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

GOMES, F.B. **Análise comparativa de aparelhos para medição de vibração em cabos condutores de energia e cálculo da vida remanescente em cabos**. Novembro, 2015.

GUÉRARD, S. **Power line conductors, a contribution to the analysis of their dynamic behaviour**. Université de Liège, July 2011. 255p.

IEEE. **Guide on Self-Damping Measurements, Std 563, n. (R2007)**, 1978.

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

KIESSLING, F., et al. **Overhead power lines: planning, desing, construction**. 2002.

MIRANDA, T.B. **Influência do parâmetro H/w sobre o auto amortecimento de cabos condutores de energia**. 2017, 85p. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

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

REEVES, R.K.; HOEPPNER, D. W. **The effect of fretting on fatigue**. Department of Mechanical Engineering, University of Missouri, Columbia, Mo. 65201. June, 1976.

ROCHA, P.H.C. **Estudo comparativo de vida em fadiga de cabos condutores utilizando o critério H/w**. Dezembro, 2016.

**ANEXOS**

## Anexo A – Manuseio do Software de controle

Manual extraído do trabalho de Renato Ewerton Rodrigues Vieira, do Laboratório de Cabos.

Os passos a serem seguidos para manuseio do Software de controle são abordados de I a III.

### I. Abrir o software “Shaker Control”

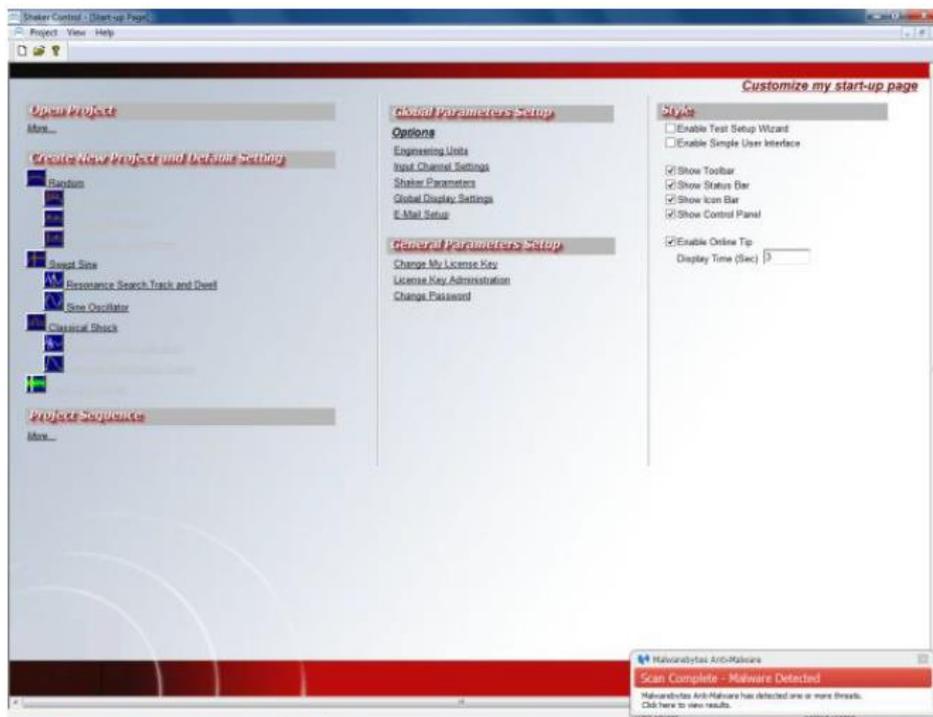


Figura A.1 – Janela inicial do Shaker Control

### II. Na opção “Global Parameters Setup”

- a. Definir as unidades de medida das variáveis na janela “Engineering Units”.
- b. Definir os parâmetros do Shaker no laboratório na janela “Global Shaker Parameters”. Para a correta execução deste procedimento, a tabela de parâmetros do modelo do Shaker deve ser consultada. Caso a tabela não esteja disponível no laboratório, é possível o acesso no site do fabricante.

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

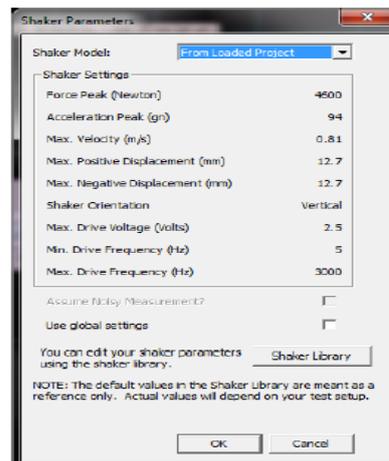


Figura A.2 – Parâmetros do Shaker

- b. Configurar as leituras de entradas analógicas na janela “Channel”.

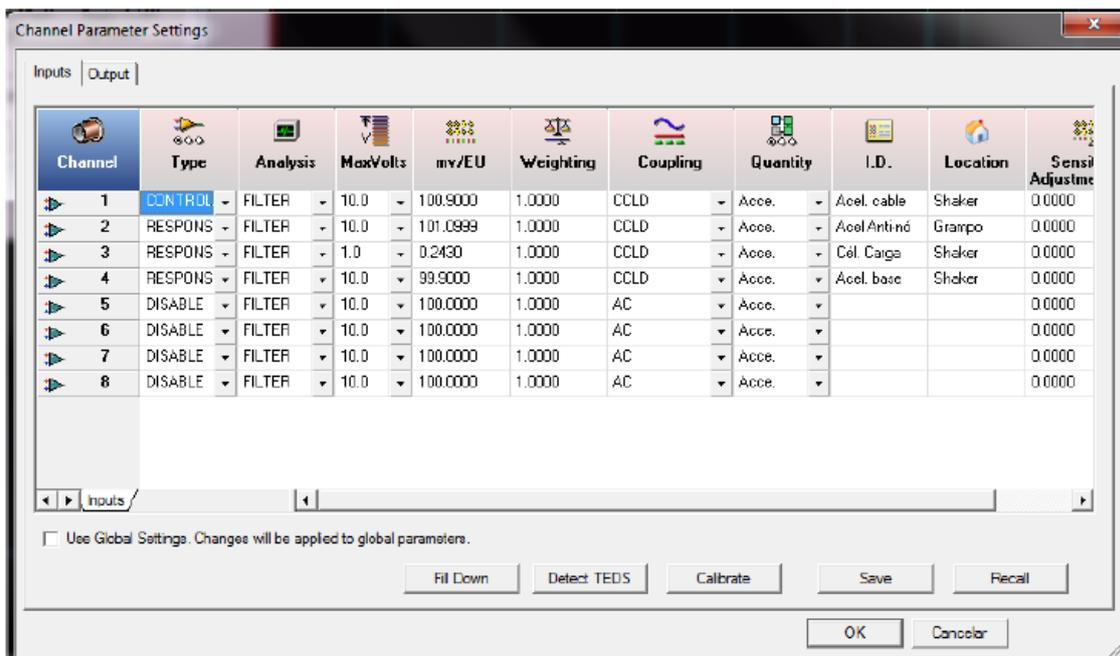


Figura A.3 – Janela de configuração dos canais

As funções dos ícones da janela são descritos:

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.

I.D.: O nome escolhido para cada receptor é o título do gráfico gerado na janela principal durante o ensaio.

- c. Configurar os controles do ensaio na janela “Control”.

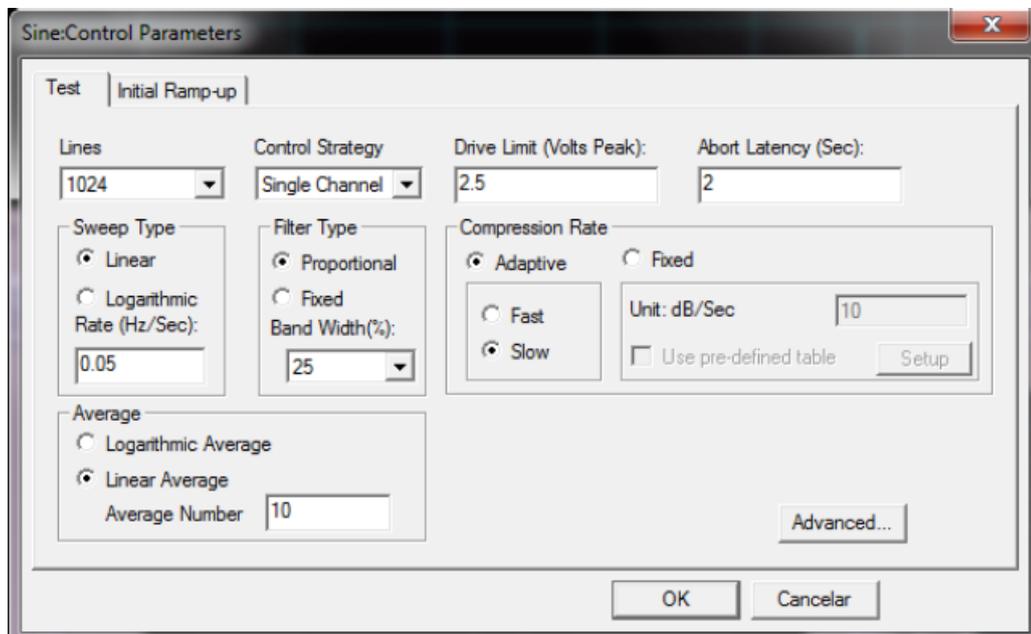


Figura A.4 – Parâmetros de controle dos ensaios

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

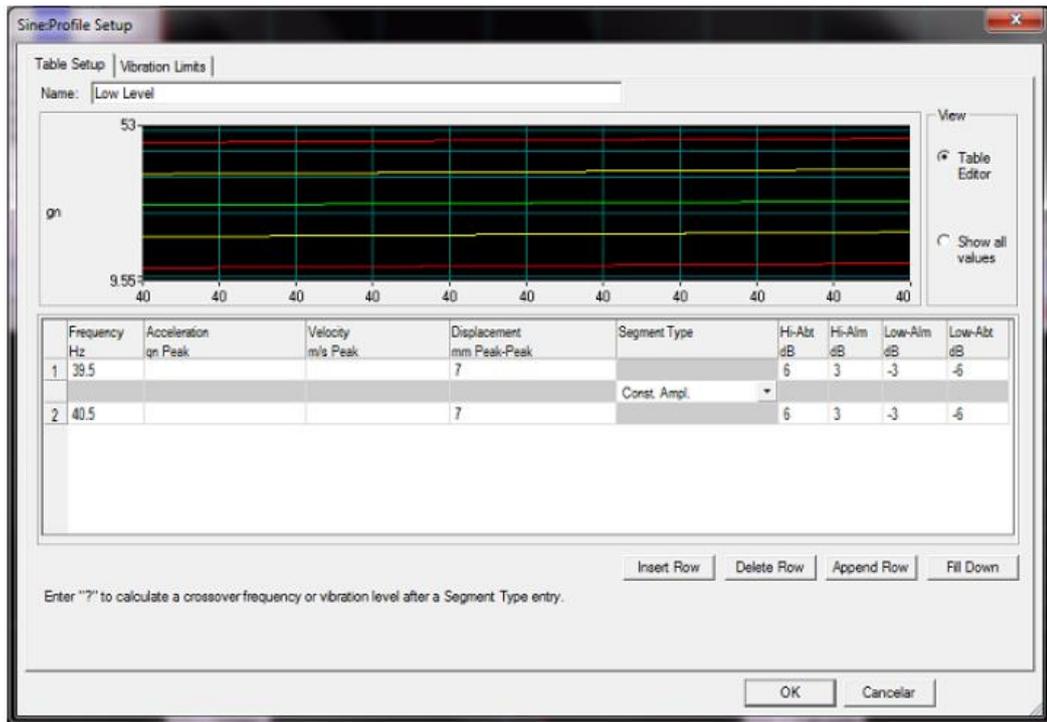


Figura A.5 – Janela de definição do ensaio

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

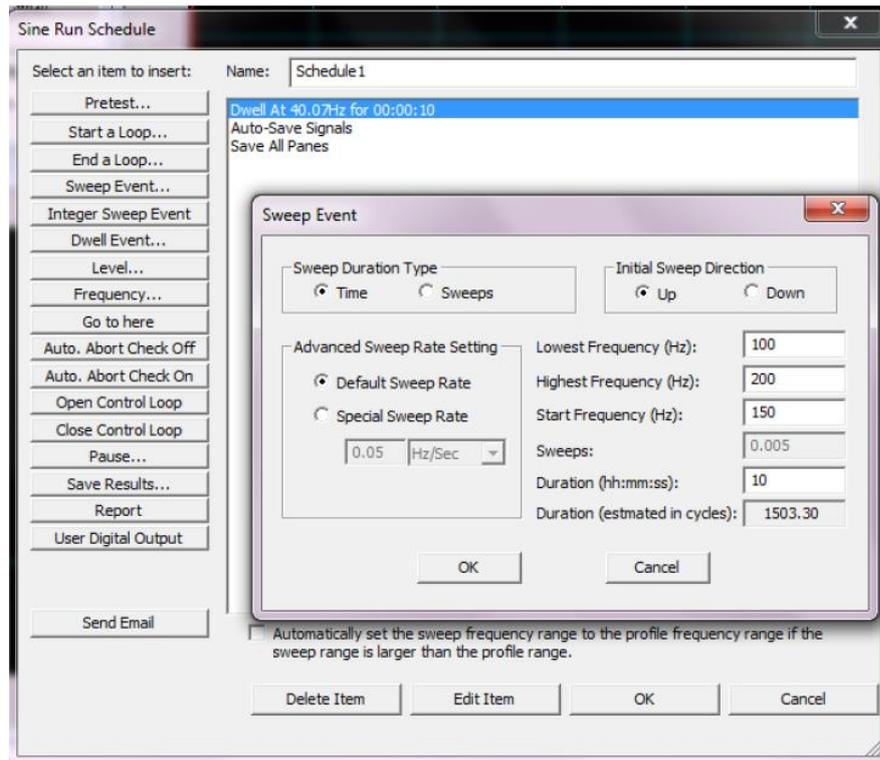


Figura A.6 – Definição de ensaio de Varredura

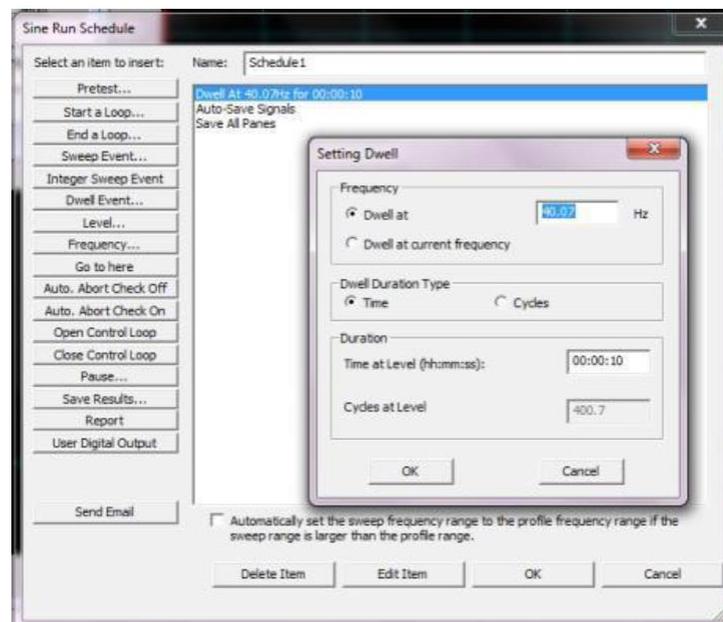


Figura A.7 – Definição de ensaio dinâmico

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

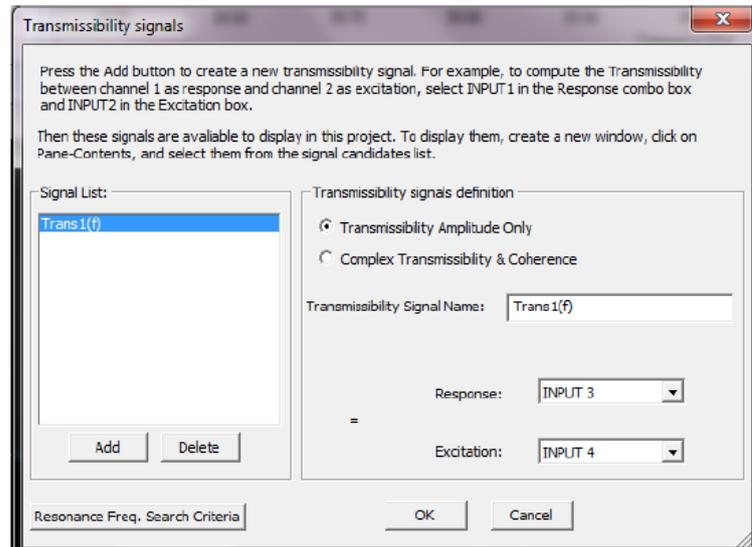


Figura A.8 – Janela de ‘Transmissibility signals’

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

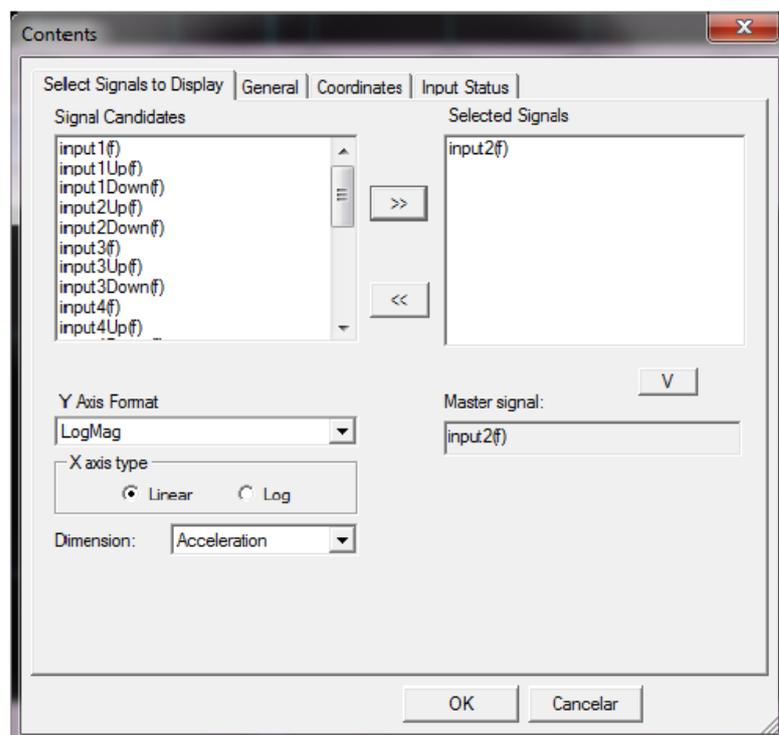


Figura A.9 – Sinais de visualização no ensaio

## Anexo B – Calibração e balanceamento dos extensômetros

Manual extraído do trabalho de Renato Ewerton Rodrigues Vieira, do Laboratório de Cabos.

- I. Abrir o software AqDados selecionar a opção “configuração do driver de aquisição”.



Figura B.1 – Configuração do driver

- II. Na janela de configuração do Driver:
  - a. Barramento de expansão: ADS 2000
  - 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 ADS 2000”.
  - c. Clicar em configurar.



Figura B.2 – Janela de 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).

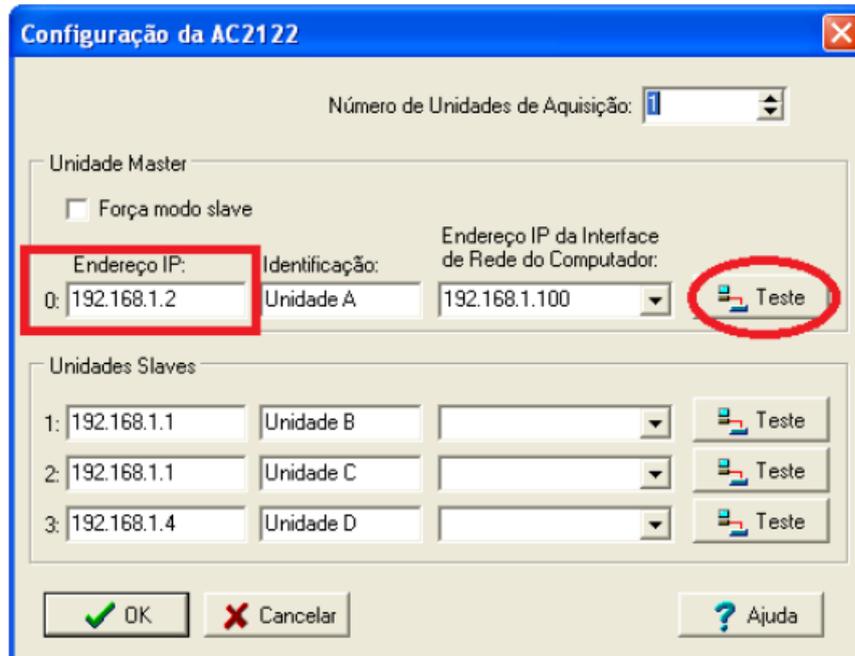


Figura B.3 – Endereço de IP

- e. Clicar em teste. Uma caixa informando que o AC2122 respondeu deve aparecer. Caso contrário, endereço de IP deve mudar.



Figura B.4 – Resposta positiva da comunicação entre Hardware e Software

- 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. Módulo 0: Módulo AI-2164 16 entradas
- c. Módulo 1: Módulo AI-2164 32 entradas



Figura B.5 – Seleção do módulo utilizado

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

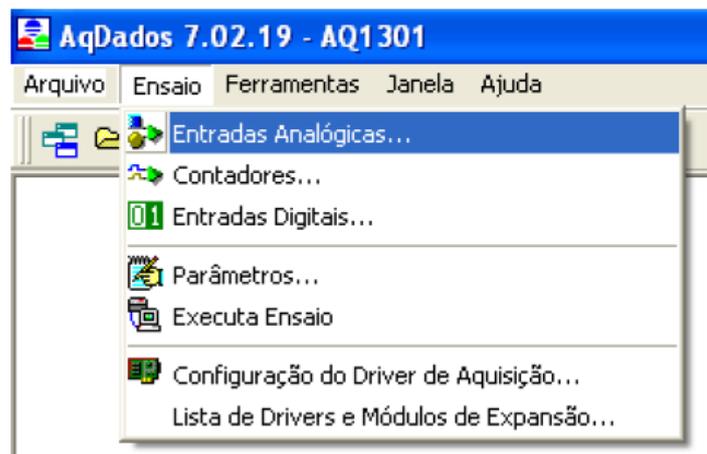


Figura B.6 – Entrada em ensaio

- V. Clicar em informações.

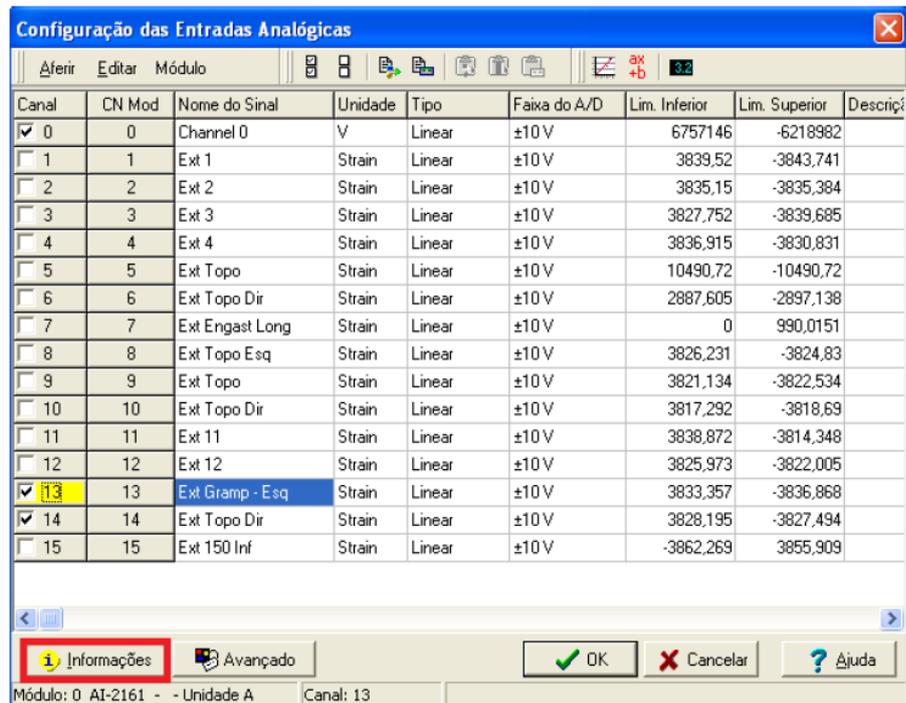


Figura B.7 – Informações dos extensômetros

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

- No laboratório são utilizados extensômetros de resistência igual a  $350 \Omega$  para  $\frac{1}{4}$  de ponte.

Feitas as configurações necessárias para a comunicação entre o ADS e o computador, o extensômetro deve ser calibrado. Na aba “Configurações das entradas analógicas”:

- Marcar as caixas dos canais que estão sendo utilizados e o canal 0.
- Alterar o nome do sinal para identificar o local onde o extensômetro está fixo no cabo (clicar 2x).
- Selecionar 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.
- Ir na opção Avançado.

VII. Na janela de configurações avançadas:

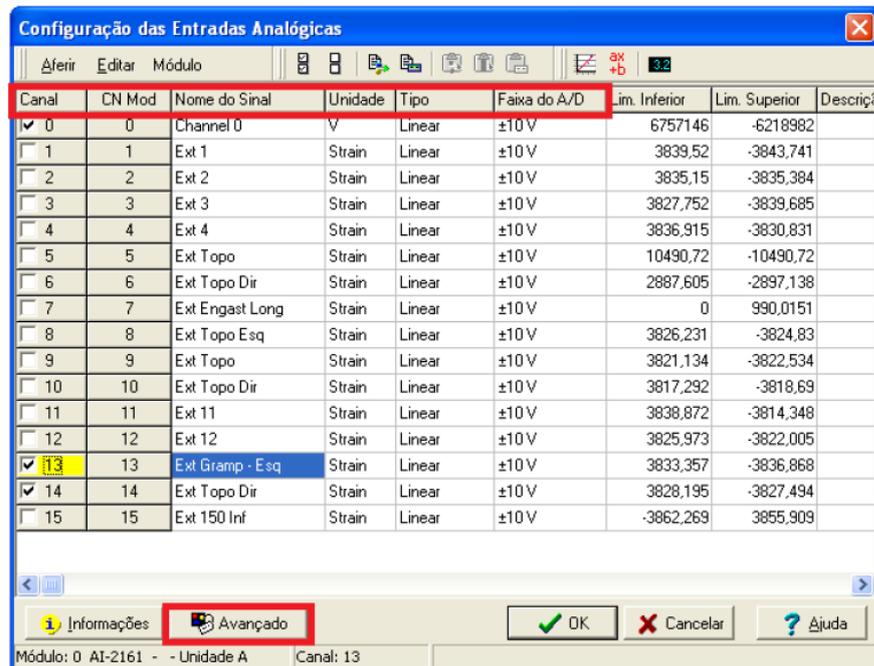


Figura B.8 – Configuração de entradas analógicas

- 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 em questão, é: ¼ de ponte.
- Selecionar o ganho de sinal, geralmente x1000 pois é o valor sugerido no menu informações para a configuração ¼ de ponte.
- Escolher o filtro de Passa Baixas, geralmente igual a 30 Hz.
- Selecionar a excitação do extensômetro igual a 5 V.
- Selecionar o RCAL que será utilizado e o valor de Shunt. O RCAL depende da faixa de medição que o extensômetro irá ler. Existe valores de faixas de medições do RCAL tabelados e existe uma fórmula utilizada para o cálculo do shunt fixada no AqDados. Para facilitar, uma planilha com o valor do shunt de cada RCAL foi feita 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.9 – Planilha do Excel contendo Shunt para Rcal

Canal	CN Mod	Nome do Sinal	Unidade	Faixa do A/D	Tipo de Entrada	Gainho	Filtro Passa Baixas	Excitação	Balanco	Reposuo	Reposuo Eng	RCal	Shunt Cal	Shunt Eng	Lim. Inferior	Lim. Supe
0	0	Channel 0	V	±10 V	1/4 ponte 350	x1000	30 Hz	E = 5V	0,0000 V	0,0000 V		0 RCAL na Exc	1,0000 V		6757146	4218
1	1	Ext 1	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	x1000	30 Hz	E = 5V	0,0000 V	0,0000 V		0 RCAL na Exc	1,0000 V		3839,52	-3843
2	2	Ext 2	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	x1000	30 Hz	E = 5V	0,0000 V	0,0000 V		0 RCAL na Exc	1,0000 V		3835,1499	-3835
3	3	Ext 3	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	x1000	30 Hz	E = 5V	0,0000 V	0,0000 V		0 RCAL na Exc	1,0000 V		3827,752	-3829,6
4	4	Ext 4	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	x1000	30 Hz	E = 5V	0,0000 V	0,0000 V		0 RCAL na Exc	1,0000 V		3836,915	-3830,8
5	5	Ext Topo	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	x1000	30 Hz	E = 5V	0,0000 V	0,0000 V		0 RCAL na Exc	1,0000 V		10490,72	-1049
6	6	Ext Topo Dx	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	x1000	30 Hz	E = 5V	0,0000 V	0,0000 V		0 RCAL na Exc	1,0000 V		2887,605	-2897,1
7	7	Ext Engast Long	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	x1000	1000 Hz	E = 5V	0,0000 V	0,0000 V		0 RCAL na Exc	1,0000 V		0	990,01
8	8	Ext Topo Esq	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	x1000	30 Hz	E = 5V	0,0000 V	0,0000 V		0 RCAL na Exc	1,0000 V		3826,231	-3824,8
9	9	Ext Topo	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	x1000	30 Hz	E = 5V	0,0000 V	0,0000 V		0 RCAL na Exc	1,0000 V		3821,134	-3822,5
10	10	Ext Topo Dx	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	x1000	30 Hz	E = 5V	0,0000 V	0,0000 V		0 RCAL na Exc	1,0000 V		3817,292	-3818,6
11	11	Ext 11	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	x1000	30 Hz	E = 5V	0,0000 V	0,0000 V		0 RCAL na Exc	1,0000 V		3838,8721	-3814,3
12	12	Ext 12	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	x1000	30 Hz	E = 5V	0,0000 V	0,0000 V		0 RCAL na Exc	1,0000 V		3825,9729	-3822,0
13	13	Ext Gramp - Eq	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	x1000	30 Hz	E = 5V	0,0070 V	0,0073 V		0 RCAL1 na Exc	7,5626 V	-2897,05	3837,6113	-3821,9
14	14	Ext Topo Dx	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	x1000	30 Hz	E = 5V	-0,0073 V	-0,0089 V		0 RCAL1 na Exc	7,5626 V	-2897,05	3822,915	-3825,6
15	15	Ext 150 inf	Strain	±10 V	1/4 ponte 350	x1000	0 Hz	E = 5V	0,0000 V	0,0000 V		0 RCAL na Exc	1,0000 V		-3862,269	3895,9

Figura B.10 – Configuração dos extensômetros

- g. Estando os dados do software de acordo, são feitos o balanceamento dos canais e a calibração dos extensômetros, simultaneamente.

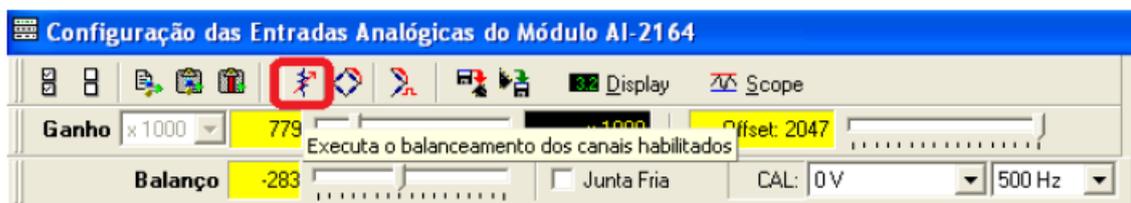


Figura B.11 – Execução de balanceamento da ponte de Wheatstone



Figura B.12 – Execução de calibração dos extensômetros

- h. Por fim, o software abre uma janela de resposta como a ilustrada abaixo. Caso não exista erro, a extensometria foi realizada com sucesso.

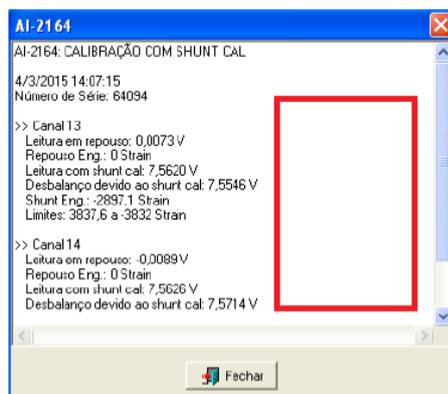


Figura B.13 – Resultado da leitura de extensômetros