



PROJETO DE GRADUAÇÃO

UTILIZAÇÃO DE VIBRÓGRAFOS PARA
PREDIÇÃO DE VIDA ÚTIL À FADIGA
EM CABOS CONDUTORES DE ENERGIA
COM GRAMPOS AGS

Enzo Matsumoto Sahium Daher

Brasília, maio de 2022

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

UTILIZAÇÃO DE VIBRÓGRAFOS PARA
PREDIÇÃO DE VIDA ÚTIL À FADIGA
EM CABOS CONDUTORES DE ENERGIA
COM GRAMPOS AGS

Enzo Matsumoto Sahium Daher

*Relatório submetido ao Departamento de Engenharia
Mecânica como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico*

Banca Examinadora

Prof. Luís Augusto C. M. Veloso, ENM/UnB
Orientador

Remy Kalombo Badibanga, ENM/UnB
Co-orientador

Prof. Jorge L. de Almeida Ferreira, ENM/UnB
Examinador interno

Prof. José Alexander Araújo, ENM/UnB
Examinador interno

Agradecimentos

O autor agradece à FAPDF - FUNDAÇÃO DE APOIO À PESQUISA DO DISTRITO FEDERAL o suporte financeiro para a realização do trabalho através do Projeto N° 214/2019 – EDITAL N° 03/2018.

Enzo Matsumoto Sahium Daher

RESUMO

O presente trabalho visa analisar a utilização de um protótipo de vibrógrafo em cabo condutor de energia com grampo AGS. O interesse nesse estudo é justificado pela importância dos condutores no atual cenário de alta demanda energética. Para isso, foi desenvolvido um protótipo de vibrógrafo para medição das amplitudes de flexão em cabos condutores montados em grampos AGS adaptável à bancada de ensaios do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia da UnB. Além disso, foi investigada a distribuição de tensões no interior do grampo AGS, através da utilização de extensômetros elétricos instalados no condutor na região interna do grampo. Os testes foram realizados para duas diferentes cargas de esticamento que correspondem a 18% e 15% da carga de ruptura do condutor, respectivamente. Foram estudadas duas diferentes estratégias para melhorar os resultados fornecidos pela Equação de Poffenberger-Swart em relação às tensões medidas no condutor baseadas na distância de medição da amplitude de flexão (parâmetro x). Sobre os principais resultados obtidos na pesquisa, verificou-se que o protótipo desenvolvido mostrou acurácia adequada para medição das amplitudes de flexão do condutor. Com relação à distribuição de tensões no interior do grampo, observou-se dois comportamentos distintos, a saber: para o maior nível de carga estudada, a posição das tensões máximas no grampo ocorreu na extremidade das sapatas metálicas, enquanto que, para o menor nível de carga de esticamento, a posição das tensões máximas ocorreu no último ponto de contato entre o grampo e o cabo (UPC). Finalmente, dentre as duas estratégias estudadas para melhorar os resultados fornecidos pela Equação de Poffenberger-Swart, aquela que utiliza um UPC "virtual", cuja distância x corresponde a distância entre o ponto de medição e o centro do grampo, apresentou melhores resultados.

ABSTRACT

This paper aims to analyze the use of a prototype of a vibrograph on power conductor cable with AGS clamp. The interest in this study is justified by the importance of conductors in the current scenario of high energy demand. To this end, a prototype of a vibrograph was developed to measure bending amplitudes in conductor cables assembled in AGS clamps, adaptable to the test bench of the Laboratory of Fatigue and Structural Integrity of Energy Conductor Cables of UnB. In addition, the stress distribution inside the AGS clamp was investigated by using electrical strain gauges installed on the conductor in the inner region of the clamp. The tests were performed for two different strain loads corresponding to 18% and 15% of the conductor breaking load, respectively. Two different strategies were studied to improve the results provided by the Poffenberger-Swart Equation with respect to the measured stresses on the conductor based on the bending amplitude measurement distance (parameter x). About the main results obtained in the research, it was found

that the developed prototype showed adequate accuracy for measuring the bending amplitudes of the conductor. Regarding the stress distribution inside the clamp, two distinct behaviors were observed, namely: for the highest load level studied, the position of the maximum stresses in the clamp occurred at the housing edge, while for the lowest stretching load level, the position of the maximum stresses occurred at the last point of contact between the clamp and the cable (LPC). Finally, among the two strategies studied to improve the results provided by the Poffenberger-Swart Equation, the one that uses a "virtual"LPC, whose distance x corresponds to the distance between the measurement point and the center of the clamp, presented better results.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	OBJETIVO	3
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2	REVISÃO TEÓRICA	5
2.1	VIBRAÇÃO EÓLICA	5
2.2	FADIGA	7
2.2.1	ETAPAS DA FALHA POR FADIGA	9
2.2.2	MÉTODOS DA VIDA SOB FADIGA	9
2.2.3	CURVA S-N	10
2.2.4	TEORIA DO DANO ACUMULATIVO	13
2.3	FADIGA EM CABOS CONDUTORES	15
2.3.1	TIPOS DE CABOS CONDUTORES	15
2.3.2	FÓRMULA DE POFFENBERGER-SWART	16
2.3.3	METODOLOGIAS DE PROJETO CONTRA FADIGA EM CABOS CONDUTORES	18
2.3.4	INFLUÊNCIA DOS GRAMPOS	20
2.4	VIBRÓGRAFOS	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1	BANCADA DE ENSAIO DOS CABOS CONDUTORES	28
3.2	MATERIAIS	29
3.2.1	CABO CONDUTOR	30
3.2.2	GRAMPO DE SUSPENSÃO	30
3.2.3	MEDIDOR A <i>laser</i>	31
3.2.4	VIBRÓGRAFO	32
3.2.5	EXTENSÔMETROS	34
3.2.6	ACELERÔMETROS	36
3.3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	36
4	RESULTADOS	41
5	CONCLUSÃO	55

LISTA DE FIGURAS

1.1	Esquema dos tipos de vibração em linhas de transmissão (adaptado de EPRI (2006)).	2
2.1	Escoamento ao redor de um cilindro de acordo com o número de Reynolds (modificado: (EPRI, 2006)).	6
2.2	Relações de tensão x tempo: (a) tensão flutuante com ondulação de alta frequência; (b e c) tensão flutuante não-senoidal; (d) tensão flutuante senoidal; (e) tensão repetida; (f) tensão senoidal completamente inversa. (retirado de Shigley <i>et al.</i> (2005)).	8
2.3	Procedimentos utilizados para obter a curva <i>S-N</i> : (a) método padrão e (b) método da tensão constante (adaptado de Garcia <i>et al.</i> (2012)).	11
2.4	Amplitude de tensão (<i>S</i>) de acordo com o logaritmo do número de ciclos até a falha (<i>N</i>) para: (a) metais ferrosos e (b) metais não ferrosos (adaptado de Callister Jr. e Rethwisch (2012)).	12
2.5	Regra de Palmgren-Miner (retirado de Fadel (2010)).	14
2.6	Exemplo da construção de um cabo condutor (retirado de Gomes (2015)).	15
2.7	Esquema da montagem do cabo com o grampo de suspensão (modificado de Gomes (2015)).	16
2.8	Metodologia CIGRÉ WG 22-04 para determinar a vida em condutores (retirado de Henriques (2006)).	20
2.9	Tipos de grampos de suspensão (retirado de EPRI (2006)).	21
2.10	Grampo de suspensão monoarticulado (retirado de FORJASUL (2012)).	21
2.11	Grampo de suspensão monoarticulado (retirado de CIGRE (2017)).	22
2.12	Grampo AGS (retirado de PLP Brasil (2019)).	23
2.13	Elementos e posição dos extensômetros no grampo AGS (adaptado de Miranda <i>et al.</i> (2021)).	23
2.14	Elementos e posição dos extensômetros no grampo AGS (adaptado de Miranda <i>et al.</i> (2021)).	24
2.15	Principais tipos de vibrógrafos utilizados: (a) Vibrec 500 e (b) Pavica (adaptado de Cosmai (2009)).	25
2.16	Instalação padrão do Pavica (retirado de Gomes (2015)).	25
2.17	Instalação com <i>offset</i> do Pavica (retirado de Gomes (2015)).	26
3.1	Componentes presentes na bancada de ensaio (modificado de GFFM (2020)).	28
3.2	Distâncias entre os equipamentos da bancada de ensaio (modificado de GFFM (2020)).	29

3.3	Elementos do grampo AGS (retirado de PLP Brasil (2019)).	31
3.4	Informações acerca do sensor: (a) ilustração e (b) dimensões (modificado de Baumer (2020)).	32
3.5	Protótipos do vibrógrafo Vibrec.	33
3.6	Partes da estrutura do protótipo de vibrógrafo.	33
3.7	Protótipo impresso do vibrógrafo.	34
3.8	Montagem do protótipo de vibrógrafo no suporte do grampo AGS.	34
3.9	Posicionamento dos extensômetros no interior do grampo.	35
3.10	Distâncias entre as posições dos extensômetros no interior do grampo.	35
3.11	Posicionamento do acelerômetro no grampo AGS (modificado de Miranda <i>et al.</i> (2021)).	36
3.12	Levantamento do cabo.	37
3.13	Fixação e posicionamento dos extensômetros, conforme a Tabela 3.5.	37
3.14	Início do posicionamento dos coxins elastoméricos com fixação dos extensômetros, conforme a Tabela 3.5.	38
3.15	Montagem das hastes preformadas no cabo (adaptado de PLP Brasil (2016)).	38
3.16	Calibração do medidor a <i>laser</i> .	39
3.17	Montagem do medidor a <i>laser</i> e do acelerômetro.	39
3.18	Vista frontal e traseira da bancada de ensaio.	40
4.1	Amplitude de flexão medida pelo medidor a <i>laser</i> .	41
4.2	Amplitude de flexão corrigida medida pelo medidor a <i>laser</i> .	42
4.3	Amplitude de flexão medida pelo medidor a <i>laser</i> e pelo acelerômetro para a carga de 2414 kgf (18% da carga de ruptura).	43
4.4	Tensões de flexão medidas pelos acelerômetros nos ensaios com carga de 18% da CRT. Dados obtidos dos valores máximos (a) e das médias (b) .	44
4.5	Distâncias utilizadas no cálculo da Equação de Poffenberger-Swart (Equação 2.12) (modificado de Miranda <i>et al.</i> (2021)).	45
4.6	Comparação entre as tensões de flexão medidas pelos extensômetros com as calculadas pela Equação de Poffenberger-Swart nos ensaios com carga de 18% da CRT. ...	45
4.7	Comparação entre as tensões de flexão calculadas pela Equação de Poffenberger-Swart com a medida pelo extensômetro na borda das sapatas metálicas nos ensaios com carga de 18% da CRT.	46
4.8	Amplitude de flexão medida pelo medidor a <i>laser</i> e pelo acelerômetro para a carga de 15% da CRT.	47
4.9	Tensões de flexão medidas pelos acelerômetros nos ensaios com carga de 15% da CRT. Dados obtidos dos valores máximos (a) e das médias (b) .	49
4.10	Comparação entre as tensões alternadas de flexão medidas pelos extensômetros com as calculadas pela Equação de Poffenberger-Swart nos ensaios com carga de 15% da CRT.	50

4.11	Tensões de flexão medidas pelos extensômetros nos ensaios com amplitude de flexão de 0,2 mm e com cargas de 18% e 15% da CRT, respectivamente. Dados obtidos dos valores máximos (a) e das médias (b)	51
4.12	Tensões de flexão medidas pelos extensômetros nos ensaios com amplitude de flexão de 0,4 mm e com cargas de 18% e 15% da CRT, respectivamente. Dados obtidos dos valores máximos (a) e das médias (b)	51
4.13	Tensões de flexão medidas pelos extensômetros nos ensaios com amplitude de flexão de 0,6 mm e com cargas de 18% e 15% da CRT, respectivamente. Dados obtidos dos valores máximos (a) e das médias (b)	52
4.14	Tensões de flexão medidas pelos extensômetros nos ensaios com amplitude de flexão de 0,8 mm e com cargas de 18% e 15% da CRT, respectivamente. Dados obtidos dos valores máximos (a) e das médias (b)	52
4.15	Tensões de flexão medidas pelos extensômetros nos ensaios com amplitude de flexão de 1,0 mm e com cargas de 18% e 15% da CRT, respectivamente. Dados obtidos dos valores máximos (a) e das médias (b)	52

LISTA DE TABELAS

2.1	Tipos de cabos condutores (retirado de Fadel (2010)).	15
2.2	Limites de resistência à fadiga da metodologia EPRI (modificado de Gomes (2015)) .	19
2.3	Comparativo entre os vibrógrafos Pavica e Vibrec (retirado de Gomes (2015), EPRI (2006), Nogueira (2017), PFISTERER (2020), ROCTEST (2005)).....	25
3.1	Dados do cabo condutor (retirado de ALUBAR METAIS E CABOS S.A. (2013)).....	30
3.2	Dados do grampo AGS (retirado de FORJASUL (2017)).	31
3.3	Características do sensor de distância a <i>laser</i> (retirado de Baumer (2020)).....	32
3.4	Dados dos extensômetros (retirado de EXCEL (2021)).	34
3.5	Relação entre as posições e cores, conforme Figura 3.13	35
3.6	Condições aplicadas nos ensaios laboratoriais.	40
4.1	Frequências utilizadas nos ensaios com 18% da CRT.....	41
4.2	Dados das amplitudes de flexão medidas pelo laser e pelo acelerômetro para a carga de 2414 kgf (18% da carga de ruptura).	43
4.3	Comparação entre as tensões alternadas de flexão medidas pelos extensômetros na borda das sapatas metálicas com as calculadas pela Equação de Poffenberger-Swart com $x = 234$ mm nos ensaios com carga de 18% da CRT.....	46
4.4	Frequências utilizadas nos ensaios com 15% da CRT.....	47
4.5	Dados das amplitudes de flexão medidas pelo laser e pelo acelerômetro para a carga de 15% da CRT.	48
4.6	Comparação entre as tensões alternadas de flexão medidas pelos extensômetros no UPC com as calculadas pela Equação de Poffenberger-Swart com $x = 234$ mm nos ensaios com carga de 15% da CRT.....	50
4.7	Tensões alternadas de flexão [MPa] medidas pelos extensômetros nos ensaios com carga de 18% e 15% da CRT.....	53

LISTA DE SÍMBOLOS

Siglas

AGS	<i>Armor Grip Suspension</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CIGRE	<i>Conseil International des Grands Réseaux Electriques</i>
CRT	Carga de Ruptura à Tração
EDS	<i>Every Day Stress</i>
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
UPC	Último Ponto de Contato

Grupos Adimensionais

Re	Número de Reynolds
S_t	Número de Strouhal

Símbolos Gregos

β	Ângulo de curvatura
σ	Limite de resistência à fadiga obtido em laboratório
σ'	Limite de resistência à fadiga estimado
σ_a	Amplitude de tensão
σ_f	Tensão dinâmica de flexão
σ_r	Variação de tensão
σ_i	Tensão
σ_m	Tensão média
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão de tração máxima
$\sigma_{m\acute{i}n}$	Tensão de compressão mínima
ν	Viscosidade cinemática do fluido

Símbolos Latinos

a	Distância padrão de instalação do Pavica
c	Distância entre o sensor do Pavica e o UPC
D	Dano acumulado
d	Diâmetro
$d_{aço}$	Diâmetro dos fios de aço
d_{al}	Diâmetro dos fios de alumínio
E	Módulo de elasticidade
$E_{aço}$	Módulo de elasticidade dos fios de aço
E_{al}	Módulo de elasticidade dos fios de alumínio
f	Frequência
f_s	Frequência de desprendimento dos vórtices de esteira
I	Momento de inércia
K	Coefficiente de Poffenberger
K_a	Fator de superfície
K_b	Fator de tamanho
K_c	Fator de carga
K_d	Fator de temperatura
K_e	Fator de confiabilidade
K_f	Fator de efeitos diversos
N	Número de ciclos
N_i	Número de ciclos que provocaria a falha no nível de tensão σ_i
$n_{aço}$	Número de fios de aço
n_{al}	Número de fios de alumínio
n_i	Número de ciclos aplicados sob a tensão σ_i
p	Parâmetro
R	Razão de tensões
R'	Razão entre as amplitudes de flexão padrão e inversa
T	Tração
U	Velocidade do escoamento
V	Tempo de vida
V_0	Tempo de operação
V_R	Tempo de vida remanescente
W	Densidade linear do condutor
x	Distância entre o ponto de medição e o UPC
Y_B	Amplitude de flexão
Y_c	Amplitude de flexão medida entre o cabo e as hastes preformadas
Y_I	Amplitude de flexão inversa
$y_{máx}$	Amplitude de vibração (0 a pico)

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

Atualmente, a energia elétrica é um elemento muito importante na vida dos seres humanos. A eletricidade está presente em praticamente todas as atividades realizadas pelas pessoas, proporcionando conforto, bem-estar e segurança para a sociedade. Com o constante aumento da população mundial e da demanda por energia, a busca por novas fontes de eletricidade é cada vez maior (NASCIMENTO *et al.*, 2019). Para suprir essa procura, é necessário que as linhas de transmissão, responsáveis por transportar a energia da fonte até os consumidores, sejam cada vez mais extensas e confiáveis. Falhas nesse sistema podem provocar prejuízos enormes, como é o caso que ocorreu em 2001. Segundo Fadel (2010), 11 estados brasileiros ficaram sem energia durante a crise nesse ano, causando o prejuízo de aproximadamente 100 milhões de reais. O principal motivo desse problema foi o rompimento de um condutor de uma linha de transmissão localizada na região sudeste do país. Portanto, visando reduzir as crises devido as falhas nos cabos, é preciso, primeiramente, entender o fenômeno causador.

No início do século 20, a causa de aparições de fraturas em fios presentes em linhas de transmissão era desconhecida. Porém, com o passar dos anos, estudos revelaram que as falhas apresentavam características muito próximas às da fadiga em metais. Com isso, foi possível concluir que o vento, sob determinadas condições, pode provocar vibrações nos cabos condutores (EPRI, 2006).

Segundo Henriques (2006), o vento pode provocar vibração eólica, oscilação de sub-vão ou galope (*galloping*) nos cabos das linhas de transmissão. O primeiro fenômeno está relacionado ao movimento vibratório com baixas amplitudes e causado por ventos de velocidade baixa a moderada. Já no segundo caso, os feixes de condutores estão sujeitos a ventos laterais de velocidade moderada a alta. A oscilação de sub-vão ocorre devido a esteira originada de um cabo adjacente. Por último, sabe-se que o galope do condutor acontece nos locais em que ocorrem tempestades de neve e, conseqüentemente, acúmulo assimétrico de gelo na linha de transmissão. Em consequência disso, há a formação de um perfil aerodinamicamente instável no condutor. Os três tipos de vibração podem ser visualizados na imagem a seguir.

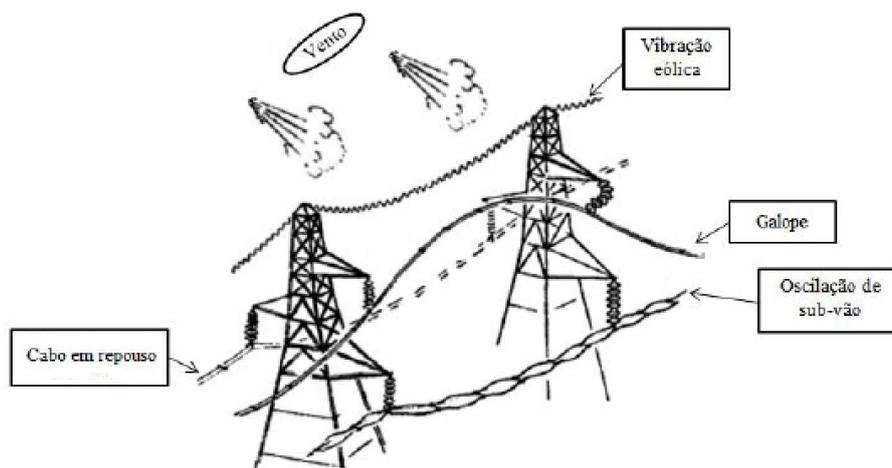


Figura 1.1: Esquema dos tipos de vibração em linhas de transmissão (adaptado de EPRI (2006)).

Com base em Amarante *et al.* (2001), constata-se que o Brasil é um país cuja velocidade média anual dos ventos atinge valores baixos a moderados, não apresentando fluxos de ar muito rápidos. Além disso, também é possível observar que a aparição de neve é muito rara e somente em determinadas regiões. Com isso, conclui-se que o fenômeno da vibração eólica em cabos condutores é relevante no país e deve ser foco de estudos.

A vibração causada pelos ventos provoca tensões cíclicas de flexão nos cabos, danificando progressivamente o condutor por meio da nucleação e propagação de trincas até ocorrer a falha por fadiga. O processo de fadiga ocorre por *fretting*, que gera danos superficiais e acelera o processo de ruptura. Visando reduzir ou evitar esse problema da fadiga, costuma-se adotar técnicas de monitoramento das linhas de transmissão para aumentar a confiabilidade do sistema (GOMES, 2015). Para isso, utilizam-se vibrógrafos, dispositivos que registram os ciclos de vibração dos condutores e coletam dados como amplitude de flexão e frequência (IEEE, 2006). Dentre esses dispositivos, destaca-se o Vibrec, um dos principais modelos utilizados e que ainda continua em produção atualmente.

Além disso, nota-se que, nos últimos anos, foram introduzidos grampos AGS nas linhas de transmissão. Esse tipo de ferragem diminui o nível de compressões no condutor, reduzindo o estado de tensões no cabo e prolongando a vida à fadiga, quando comparado aos grampos de suspensão tradicionais (EPRI, 2006). Porém, devido a geometria mais complexa desses aparelhos, não é possível definir claramente o último ponto de contato entre o cabo e o grampo, medida importante no estudo da fadiga em condutores. Também vale ressaltar que, por serem produtos adicionados recentemente ao mercado, ainda não há muitas publicações acerca do uso desses grampos. Portanto, com base nisso, percebeu-se a oportunidade de aplicar os vibrógrafos nos cabos condutores de energia montados com o grampo AGS.

1.2 Objetivo

O presente trabalho visa estudar os resultados obtidos por um protótipo de vibrógrafo desenvolvido para medição das tensões em cabos condutores montados em grampos tipo AGS para predição de vida útil à fadiga.

Os objetivos específicos desse trabalho são os seguintes:

- Desenvolver um protótipo de vibrógrafo para medição de amplitudes de flexão em cabos condutores montados em grampo AGS adaptável a bancada de ensaios do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia da UnB;
- Compreender melhor a distribuição das tensões no interior do grampo AGS, fazendo-se testes com duas diferentes cargas de esticamento do condutor;
- Fazer um estudo das medidas realizadas pelo vibrógrafo para análise das tensões no cabo condutor, buscando o melhor ajuste para a Equação de Poffenberger-Swart às tensões medidas no condutor;
- Contribuir com o estudo e a utilização de grampos AGS em cabos condutores de energia em linhas de transmissão, fornecendo informações técnicas para as áreas de projeto, manutenção e inspeção de linhas de transmissão.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho divide-se em 5 capítulos, nos quais são abordados os seguintes assuntos:

1. **Introdução:** capítulo que expõe a importância da análise da utilização de vibrógrafos em cabos condutores de energia com grampos AGS. Também são apresentados os objetivos do trabalho, destacando sua relevância dentro de um contexto em que há poucas publicações acerca do uso desses grampos de suspensão em conjunto com os vibrógrafos;
2. **Revisão teórica:** o capítulo aborda conceitos acerca da vibração eólica em cabos condutores, do processo de fadiga, da fadiga em cabos condutores e dos vibrógrafos. Dentro de fadiga, discute-se as etapas do processo, os métodos de cálculo da vida útil, a curva $S-N$ e a teoria de dano acumulativo. Com relação à fadiga nos cabos, serão tratados os tipos de condutores, o *fretting*, a fórmula de Poffenberger-Swart, as metodologias de projeto contra esse tipo de falha e a influência dos tipos de grampo de suspensão;
3. **Metodologia:** o capítulo expõe o procedimento utilizado nos ensaios laboratoriais para analisar o uso do protótipo de vibrógrafo em cabos condutores com o grampo AGS. Também descreve a bancada de ensaios utilizada e os materiais escolhidos, como o cabo, o grampo de suspensão, o medidor a *laser*, o protótipo de vibrógrafo, os extensômetros e os acelerômetros. Por fim, o capítulo trata do procedimento experimental adotado;

4. **Resultados:** capítulo que apresenta os principais resultados obtidos por meio dos ensaios laboratoriais em cabos condutores com o grampo AGS e o protótipo de vibrógrafo;
5. **Conclusão:** o capítulo exhibe as principais conclusões obtidas com a realização do trabalho.

Capítulo 2

Revisão Teórica

2.1 Vibração eólica

A vibração eólica pode ser definida como o movimento de oscilação de uma partícula que ocorre devido ao fluxo de ar. No estudo de cabos de transmissão, esse tipo de agitação é o maior causador de danos às linhas, formadas por um ou vários condutores. A presença dos cabos no escoamento do vento, que é majoritariamente laminar, provoca a formação de vórtices, causando uma diferença de pressão na área próxima aos condutores. Isso acaba gerando movimentos verticais de vibração, cuja frequência é proporcional à velocidade do vento (HENRIQUES, 2006).

De acordo com Henriques (2006), a oscilação eólica nas linhas de transmissão é caracterizada por pequenas amplitudes (normalmente menor que o diâmetro do condutor) e por frequências na faixa de 3 a 150 Hz. Essa vibração costuma ocorrer no início ou ao final do dia em locais planos ou com poucas ondulações e é causada por ventos de velocidade baixa a moderada, normalmente na faixa de 1 a 7 m/s. Para valores menores que 1 m/s, verifica-se que não há a energia necessária para induzir as vibrações, e, para velocidades superiores a 7 m/s, o fluxo de ar passa a ser turbulento, formando vórtices aperiódicos.

O EPRI (2006) destaca outros aspectos gerais da vibração eólica, que são:

- Afeta todos os tipos de linhas de transmissão;
- Pode ocorrer em condutores com a superfície livre ou coberta com uma camada uniforme de gelo;
- Provoca fadiga devido à tensão normal cíclica de flexão nos cabos condutores e nos cabos de guarda;
- Prazo de 3 meses a mais de 20 anos para desenvolver um dano severo.

Henriques (2006) ressalta que, em consequência das vibrações, verifica-se a formação de flexões alternadas de baixa amplitude que causam deformações elevadas nas zonas de transição de rigidez

flexional do cabo. Nessas regiões, localizadas majoritariamente nos pontos de suspensão e de ancoragem do condutor, pode ocorrer dano por fadiga no cabo e sua conseqüente ruptura.

Segundo Fadel (2010), o aparecimento dos vórtices responsáveis pela vibração dos cabos relaciona-se com duas variáveis muito importantes, o número de Reynolds e o número de Strouhal. A primeira grandeza determina o comportamento do regime de escoamento desenvolvido por um fluido, estabelecendo uma relação entre as forças inerciais e as forças viscosas. Pode ser descrito a partir da seguinte equação:

$$Re = \frac{Ud}{\nu} \quad (2.1)$$

em que:

- Re : Número de Reynolds;
- U : Velocidade do escoamento;
- d : Diâmetro do cilindro;
- ν : Viscosidade cinemática do fluido (para o ar a 20°C, $\nu = 1,51 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$).

Para valores baixos do número de Reynolds ($Re < 5$), verifica-se que o escoamento não se separa. Porém, com seu aumento ($5 \leq Re < 40$), a camada limite começa a se descolar dos lados do cilindro, formando uma zona de recirculação com um par fixo de vórtices em turbulência. Em seguida, para $40 \leq Re < 150$, forma-se uma esteira de vórtices laminar ("esteira de Von Karman"). No intervalo $150 \leq Re < 300$, ocorre a transição para o regime turbulento, até que, para $300 \leq Re < 3 \cdot 10^5$, a esteira de vórtices é totalmente turbulenta. Depois, para $3 \cdot 10^5 \leq Re < 3 \cdot 10^6$, nota-se que a camada limite laminar sofreu transição turbulenta e a esteira de vórtices torna-se estreita e desorganizada. Por último, para números de Reynolds maiores que $3 \cdot 10^6$, há o restabelecimento da esteira de vórtices turbulenta. (BLEVINS, 2001)

	$Re < 5$
	$5 \leq Re < 40$
	$40 \leq Re < 150$
	$150 \leq Re < 3 \cdot 10^5$
	$3 \cdot 10^5 \leq Re < 3,5 \cdot 10^6$
	$3,5 \cdot 10^6 \leq Re$

Figura 2.1: Escoamento ao redor de um cilindro de acordo com o número de Reynolds (modificado: (EPRI, 2006)).

Já o número de Strouhal, dado pela equação (2.2), define a frequência de oscilação perpendicular do condutor causada pelo vento transversal (FADEL, 2010).

$$S_t = \frac{f_s D}{U} \quad (2.2)$$

em que f_s representa a frequência de desprendimento dos vórtices da esteira.

Por último, Bellorio (2009) destaca que a tração mecânica dos cabos condutores (*EDS - Every Day Stress*) também afeta bastante a vibração eólica. Essa variável relaciona-se com a tensão média diária a qual o cabo será submetido ao longo de sua vida útil e seu cálculo é feito com base na carga de tração (T) a qual o cabo é submetido e na carga de ruptura a tração (CRT) do condutor, conforme a equação (2.3). Nas linhas de transmissão atuais, costuma-se adotar valores de *EDS* na faixa de 18,5 - 20 % da *CRT*. É importante ressaltar que, quanto maior a *EDS*, menor será o amortecimento do cabo quando submetido à vibrações. Logo, um condutor mais esticado vibraria mais vezes que um condutor menos esticado, sob as mesmas condições.

$$T = EDS \cdot CRT \quad (2.3)$$

2.2 Fadiga

Segundo a norma ASTM STP E1823 (1996), a fadiga é um processo de alteração estrutural permanente, progressivo e localizado que acomete materiais que estão sujeitos a tensões ou deformações dinâmicas, podendo resultar em trincas ou em uma fratura completa após um determinado número de ciclos.

Nesse modo de falha, as tensões podem ser de natureza axial (tração-compressão), de flexão (dobramento) ou de torção. E também é possível destacar algumas relações de tensão x tempo, que são mostradas na Figura 2.2, como a tensão flutuante com ondulação de alta frequência (Figura 2.2(a)), a tensão flutuante senoidal (Figura 2.2(d)) e não-senoidal (Figura 2.2(b e c)) e a tensão repetida (Figura 2.2(e)) (SHIGLEY *et al.*, 2005).

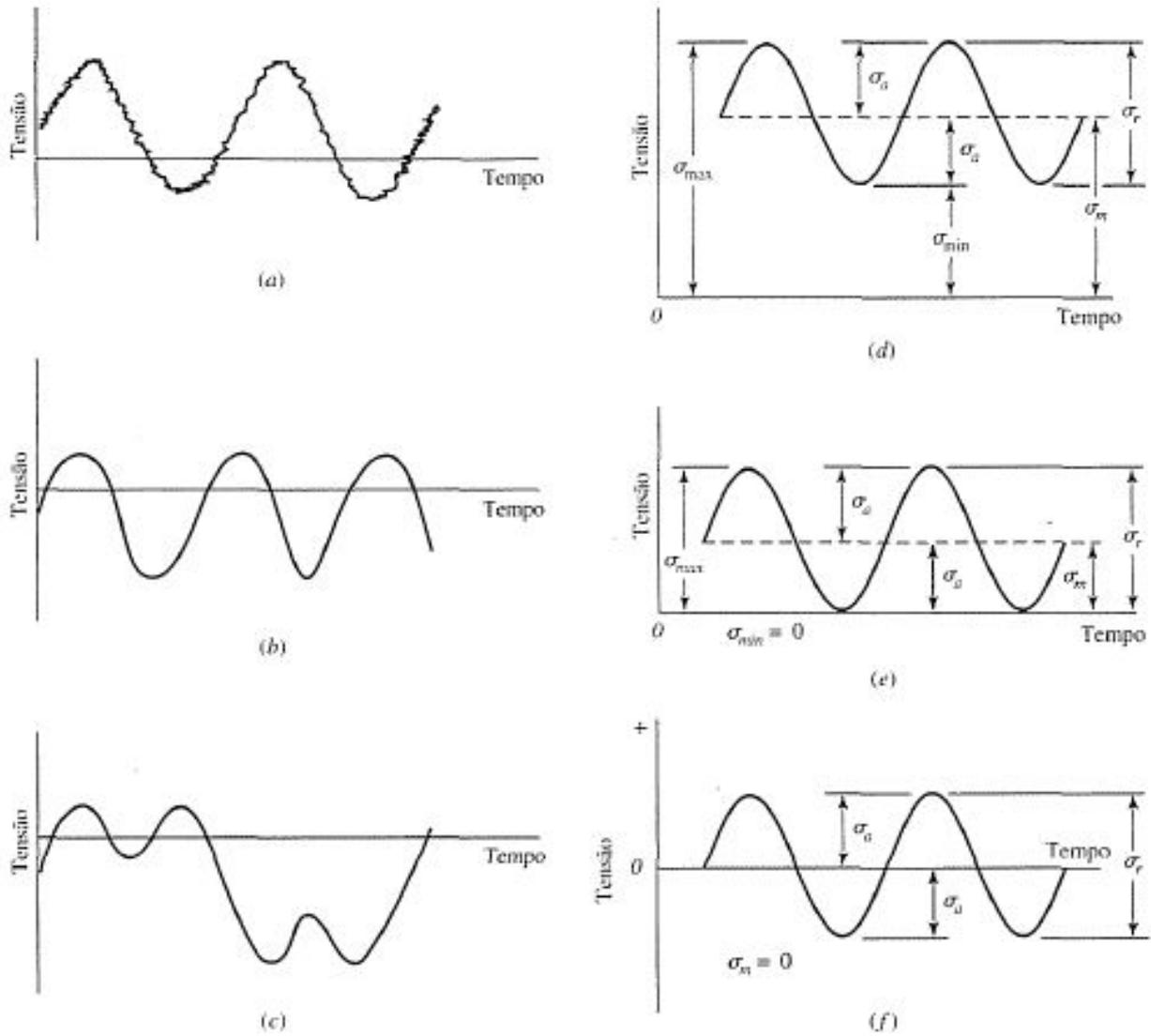


Figura 2.2: Relações de tensão x tempo: **(a)** tensão flutuante com ondulação de alta frequência; **(b e c)** tensão flutuante não-senoidal; **(d)** tensão flutuante senoidal; **(e)** tensão repetida; **(f)** tensão senoidal completamente inversa. (retirado de Shigley *et al.* (2005)).

Com base na Figura 2.2, é possível determinar alguns parâmetros importantes do ciclo de tensões. A tensão média (σ_m), calculada com base nos valores máximo e mínimo do ciclo, é dada por:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}}}{2} \quad (2.4)$$

Já a variação de tensão (σ_r) pode ser calculada por meio de:

$$\sigma_r = \sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}} \quad (2.5)$$

Em seguida, para determinar a amplitude de tensão (σ_a), utiliza-se:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} \quad (2.6)$$

Depois, com base na amplitude das tensões máxima e mínima, pode-se calcular a razão de tensões:

$$R = \frac{\sigma_{\text{mín}}}{\sigma_{\text{máx}}} \quad (2.7)$$

2.2.1 Etapas da falha por fadiga

O mecanismo da falha por fadiga é um processo complexo e envolve algumas etapas, que vão desde o aparecimento das trincas até a ruptura do elemento. De acordo com Gomes (2015), esse processo engloba três estágios: nucleação de trincas, propagação das trincas e fratura final.

O estágio de nucleação das trincas é caracterizado pelo aparecimento de uma ou mais microtrincas, que se estendem por dois a cinco grãos e são provocadas por deformação plástica cíclica seguida de propagação cristalográfica. A trinca provavelmente surgirá em uma descontinuidade no material, que são causadas por (SHIGLEY *et al.*, 2005):

- Mudanças rápidas na seção transversal (chavetas, furos), provocando uma maior concentração de tensões;
- Elevadas pressões de contato, que provocam tensões de contato subsuperficiais concentradas e podem gerar cavidades ou lascamento;
- Falhas de fabricação, como riscos ou marcas de ferramentas;
- Descontinuidades superficiais ou subsuperficiais provenientes dos processos de fabricação.

Além disso, é importante ressaltar que existem algumas condições que podem acelerar o processo de aparição das trincas, como temperaturas elevadas, tensões residuais de tração, ciclagem de alta frequência e meios corrosivos (SHIGLEY *et al.*, 2005).

Na segunda etapa, é possível verificar a progressão de micro a macrotrincas e o aparecimento de superfícies de fratura (SHIGLEY *et al.*, 2005). Nessa fase, a trinca se propaga progressivamente e gera, a cada ciclo de tensão, marcas características na superfície do material, denominadas de marcas de praia (GARCIA *et al.*, 2012).

Por fim, na fratura final, ocorre a fratura rápida e repentina, quando a trinca atinge um tamanho crítico e o elemento não consegue suportar as cargas (SHIGLEY *et al.*, 2005).

2.2.2 Métodos da vida sob fadiga

No estudo da fadiga, uma questão muito importante consiste em prever quando, ou se, ocorrerá a falha em um determinado elemento carregado ciclicamente. Para isso, utilizam-se três métodos

diferentes: método da vida sob tensão, método da vida sob deformação e método da mecânica de fratura linear elástica. Essas técnicas tentam determinar a vida do material, em número de ciclos, até a ocorrência da falha por fadiga (SHIGLEY *et al.*, 2005).

2.2.2.1 Método da vida sob tensão

O método da vida sob tensão, quando comparado com as outras técnicas, é o menos preciso para aplicações de baixa ciclagem (número de ciclos $N \leq 10^3$). Para Gomes (2015), isso ocorre porque essa metodologia não se baseia em conceitos de tensão-deformação verdadeira e, para $N \leq 10^3$, existem tensões maiores que induzem níveis significativos de plasticidade localizada. Porém, essa metodologia é a mais tradicional, visto que sua implementação é simples, possui muitos dados de suporte e representa adequadamente as aplicações de alta ciclagem ($N > 10^3$) (SHIGLEY *et al.*, 2005).

Segundo Fadel (2010), essa técnica calcula as tensões nos locais mais críticos da peça para determinar a vida em fadiga do elemento. O cálculo é feito com base nas tensões médias e é ajustado de acordo com os efeitos concentradores de tensão, como furos e ranhuras.

2.2.2.2 Método da vida sob deformação

No método da vida sob deformação, nota-se uma maior eficácia em aplicações de baixa ciclagem e um maior detalhamento na análise da deformação plástica nas áreas em que as tensões e deformação são consideradas para estimativas da vida (SHIGLEY *et al.*, 2005).

De acordo com Gomes (2015), essa técnica relaciona a amplitude de deformação com o número de ciclos até a falha.

2.2.2.3 Método da mecânica de fratura linear elástica

No método da mecânica de fratura linear elástica, assume-se que o material já possui uma trinca e que ela foi detectada. Em seguida, a técnica é utilizada para prever o crescimento da trinca de acordo com a intensidade da tensão (SHIGLEY *et al.*, 2005).

Segundo Gomes (2015), essa metodologia é melhor empregada quando aliada a códigos computacionais e programas de inspeção que adotam o critério de falha segura, em que tolera-se um determinado nível de dano desde que não haja comprometimento da estrutura.

2.2.3 Curva S-N

No estudo da vibração eólica em cabos condutores, deve-se destacar que a ocorrência da falha por fadiga no cabo demanda muito tempo e milhões de ciclos. Portanto, trata-se de uma aplicação de alta ciclagem que é analisada por meio do método da vida sob tensão.

A curva $S-N$, também chamada de curva de Wöhler (dedicada ao projeto de resistência à fadiga

feito por August Wöhler), consiste em um diagrama que relaciona a tensão aplicada e o número de ciclos necessários até a ruptura do material (FADEL, 2010). Para a obtenção desse gráfico, são necessários diversos ensaios de laboratório, realizados de acordo com os seguintes procedimentos (GARCIA *et al.*, 2012):

- Método padrão: nesse procedimento, são ensaiados poucos corpos de prova, no qual aplica-se uma determinada tensão abaixo de um valor mínimo. Caso o primeiro corpo de prova atinja a vida útil preestabelecida, o segundo é ensaiado com uma tensão maior e assim sucessivamente. Os dados são ajustados por uma curva média mais conservativa;
- Método da tensão constante: nessa técnica, utiliza-se valores espaçados para a tensão, no qual vários corpos de prova são ensaiados para cada tensão. Os dados são traçados em uma curva média que englobe todos os pontos.

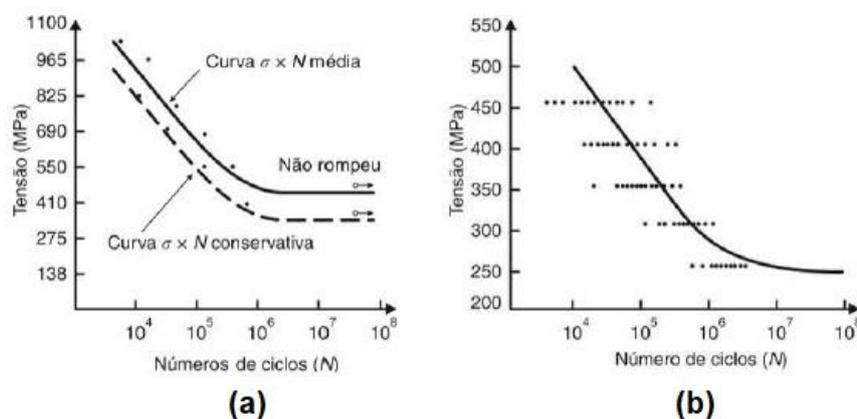


Figura 2.3: Procedimentos utilizados para obter a curva $S-N$: (a) método padrão e (b) método da tensão constante (adaptado de Garcia *et al.* (2012)).

No estudo de cabos condutores, os ensaios laboratoriais são realizados em ambiente controlado, em que uma das extremidades do cabo fica presa ao grampo e ligada a um bloco fixo. Já a outra extremidade deve ser presa a um dispositivo adequado que permita o condutor ser tracionado com a carga desejada (normalmente 18 a 20% do valor da carga de ruptura). Em seguida, utiliza-se um dispositivo agitador (*shaker*) para simular as vibrações eólicas, controlando a frequência de vibração e a amplitude de flexão por meio de sensores fixados no cabo (GFFM, 2020).

CIGRÉ SC22-WG04 (1985) faz algumas recomendações acerca desses ensaios:

- A distância entre o grampo de suspensão e a base fixação do cabo deve ser de no mínimo 1 m;
- A distância entre o grampo de suspensão e o local de excitação (*shaker*) deve ser de no mínimo 5 m, visando minimizar a distribuição não homogênea de carga no cabo;
- O critério de parada (critério de dano) dos ensaios é a quebra de três fios ou 10% dos fios de alumínio, prevalecendo o menor valor.

Além disso, é importante ressaltar que a medição da amplitude de flexão é realizada em um ponto distante 89 mm do último ponto de contato entre o cabo e o grampo (GFFM, 2020).

Os resultados dos ensaios são plotados em gráficos (conforme Figura 2.4), em que o eixo das abscissas representa o número de ciclos (normalmente em escala logarítmica) e o eixo das ordenadas corresponde aos valores de tensão experimentados pelas amostras (FADEL, 2010).

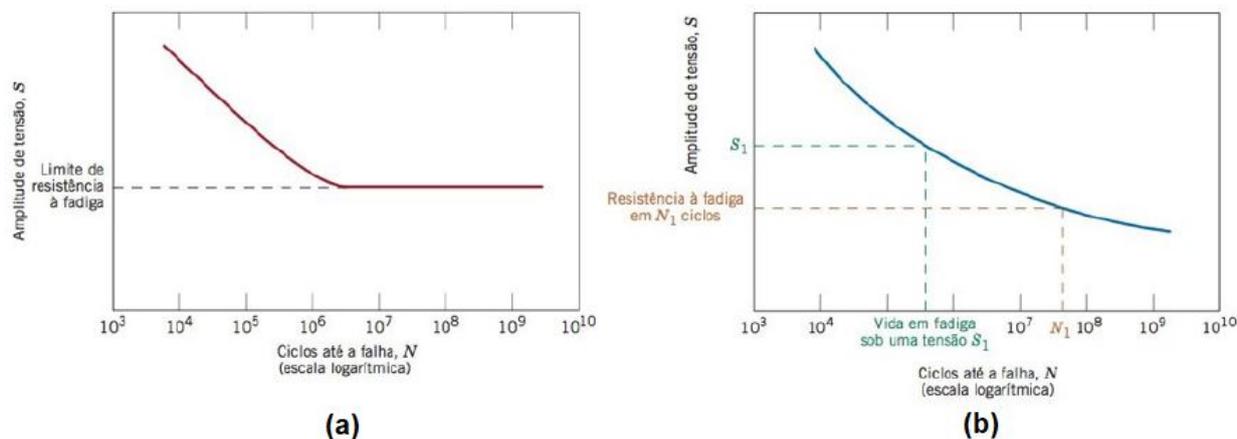


Figura 2.4: Amplitude de tensão (S) de acordo com o logaritmo do número de ciclos até a falha (N) para: (a) metais ferrosos e (b) metais não ferrosos (adaptado de Callister Jr. e Rethwisch (2012)).

A partir da Figura 2.4, conclui-se que, quanto maior o valor da amplitude de tensão, menor será o número de ciclos que o elemento suportará antes de falhar. Além disso, também é possível notar dois tipos de comportamento que variam conforme o material analisado. No primeiro (Figura 2.4(a)), observado em metais ferrosos, verifica-se que a curva $S-N$ fica horizontal a partir de um determinado valor de tensão, denominado de limite de resistência à fadiga. Já o segundo comportamento (Figura 2.4(b)), observado em ligas não ferrosas, não apresenta um limite de resistência à fadiga, visto que a curva continua sua tendência decrescente conforme os valores de N aumentam. Para esses materiais, constata-se que a resposta à fadiga é dada por uma resistência à fadiga, definida como o valor de tensão no qual a falha ocorrerá após um determinado número de ciclos. Logo, deduz-se que, independente do valor da tensão, a fadiga acontecerá (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2012).

Além disso, outro parâmetro importante que pode ser obtido a partir da curva $S-N$ é a vida em fadiga. Ela pode ser definida como o número de ciclos necessários para provocar a falha por fadiga sob um determinado nível de tensão (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2012).

Gomes (2015) ressalta que os ensaios de laboratório realizados com os corpos de prova padronizados e em condições controladas não retratam a realidade de operação do elemento, visto que não consideram algumas variáveis, como o carregamento e a temperatura. Para introduzir esses efeitos, deve-se utilizar alguns fatores (fatores de Marin) que multiplicam o limite de resistência à fadiga obtido em laboratório (σ), resultando no limite de resistência à fadiga estimado da peça (σ'), dado por (GARCIA *et al.*, 2012):

$$\sigma' = K_a \cdot K_b \cdot K_c \cdot K_d \cdot K_e \cdot K_f \cdot \sigma \quad (2.8)$$

em que os fatores K de modificação podem ser descritos como (SHIGLEY *et al.*, 2005):

- Fator de superfície (K_a): considera o acabamento da superfície;
- Fator de tamanho (K_b): considera o tamanho do elemento. Para corpos cilíndricos, refere-se ao diâmetro da peça, enquanto que, para outras geometrias, deve-se utilizar o conceito de diâmetro efetivo;
- Fator de carga (K_c): considera o tipo de esforço aplicado;
- Fator de temperatura (K_d): considera a diferença entre a temperatura de operação da peça e a temperatura ambiente;
- Fator de confiabilidade (K_e): considera a confiança esperada no limite de resistência à fadiga da peça. Quanto maior for o nível de confiança desejado, menor será o valor do coeficiente adotado;
- Fator de efeitos diversos (K_f): considera diversos fatores que podem afetar o limite de resistência à fadiga da peça, como concentradores de tensão, condições ambientais, tratamentos térmicos e tensões residuais.

2.2.4 Teoria do dano acumulativo

No estudo da fadiga, sabe-se que cada ciclo de tensão provoca a formação de danos permanentes e irreversíveis no material, por meio da nucleação e propagação de trincas. Com base nisso, foi proposto a teoria do dano acumulativo, também conhecida como regra de Palmgren-Miner, que afirma que os danos causados pela fadiga se acumulam linearmente até que ocorra a falha do componente, conforme a Equação (2.9) (GARCIA *et al.*, 2012):

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (2.9)$$

em que D é o dano acumulado, n_i é o número de ciclos aplicados ao componente sob uma tensão σ_i e N_i é o número de ciclos que provocaria a falha no nível de tensão σ_i , que pode ser observado na curva S-N do material. Dessa forma, para um caso de carregamento com somente um nível de tensão, a falha ocorrerá quando $n_i = N_i$ (GARCIA *et al.*, 2012). A Figura 2.5 apresenta um esquema do método de Palmgren-Miner.

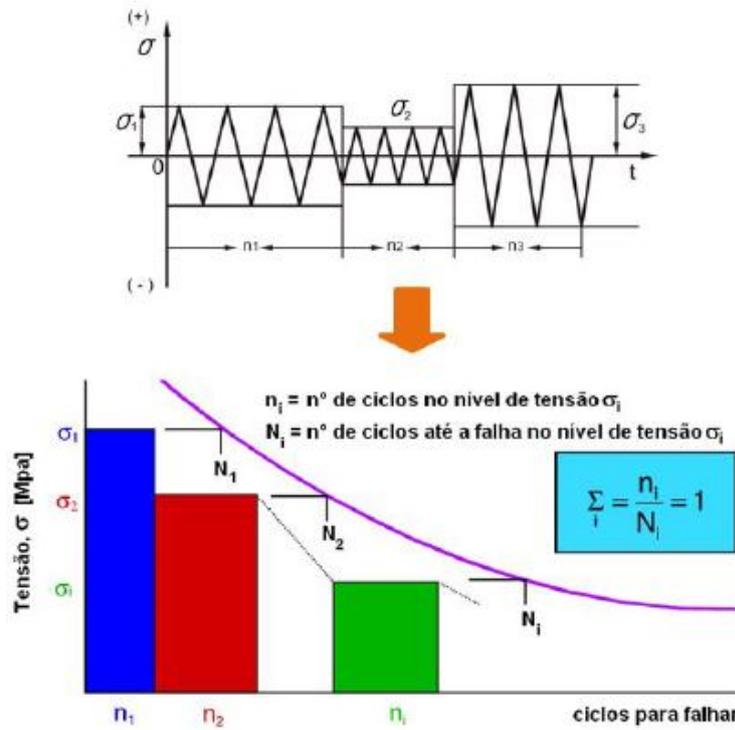


Figura 2.5: Regra de Palmgren-Miner (retirado de Fadel (2010)).

Gomes (2015) enfatiza que um dano acumulado nulo ($D = 0$) indica que o componente está com sua integridade completa, que não foi afetado pela fadiga, enquanto que um valor igual à unidade ($D = 1$) demonstra que o dano atingiu o nível de falha total do componente.

Também é possível determinar o tempo de vida do componente, dado por:

$$V = \frac{1}{D} \quad (2.10)$$

sendo V [anos] o tempo de vida que o componente suportará os danos causados pela fadiga, com um tempo de análise do sinal igual a 1 ano. Para valores de V maiores que 1, o elemento já falhou. Porém, para $V \leq 1$, ainda há uma vida remanescente, calculada por meio de:

$$V_R = \frac{1}{D} - V_0 \quad (2.11)$$

em que V_R [anos] é o tempo de vida remanescente e V_0 [anos] é o tempo de operação do elemento até o momento das medições.

É importante destacar que a teoria de Palmgren-Miner pode apresentar-se imprecisa, visto que esse método não considera alguns aspectos importantes, como o nível de carga, a sequência de carregamento e a interação das cargas, desprezando o atraso ou a aceleração da velocidade de propagação da trinca (GARCIA *et al.*, 2012).

2.3 Fadiga em cabos condutores

A principal causa da fadiga em cabos condutores é a vibração eólica, conforme apresentado na Seção 2.1. De acordo com Alencar (2013), a corrente de ar que passa pelos cabos gera vibrações que, conseqüentemente, causam flexão cíclica, responsável pela fadiga. Os locais com maiores chances de falhar se encontram nos pontos com restrição de movimento, como grampos e espaçadores. Isso ocorre devido ao fato de que, nessas áreas, a restrição do deslocamento provoca um movimento relativo entre os corpos, como a fricção entre os fios de um cabo ou no contato entre o cabo e o grampo, causando o *fretting*.

2.3.1 Tipos de cabos condutores

No estudo da transmissão de energia, o cabo condutor é o elemento mais importante, responsável pelo transporte da energia elétrica. Esse componente é formado por camadas de fios metálicos, que são enrolados de forma helicoidal e dispostos de forma concêntrica com relação a um fio ou a um grupo central de fios (alma) (NOGUEIRA, 2017).



Figura 2.6: Exemplo da construção de um cabo condutor (retirado de Gomes (2015)).

Gomes (2015) ressalta que os cabos condutores podem ser formados por somente um material, como os fios de alumínio, ou por mais elementos, como ligas de alumínio com fios de aço para aumentar a resistência. A Tabela 2.1 indica os principais tipos de condutores:

Tabela 2.1: Tipos de cabos condutores (retirado de Fadel (2010)).

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 Allor Reinforced</i>)
TW	Fios Trapezoidais (<i>Trapezoidal Wires</i>)

2.3.2 Fórmula de Poffenberger-Swart

O estudo da tensão mecânica na região de falha de um condutor é muito complexo, impossibilitando uma medida exata desse valor. Visando facilitar esse processo, foi desenvolvido um modelo simplificado que considera a parcela do cabo na vizinhança do ponto de restrição como uma viga de Euler (WATANABE, 2014). Nesse método, houve o estudo da teoria elástica e de princípios da mecânica, e foi considerado o caso de cabos fixados a grampos de suspensão tradicionais, em que há o contato metal-metal, uma vez que as hastes de armadura preformada (*armor rods*) adicionam complexidades para a solução analítica (POFFENBERGER; SWART, 1965).

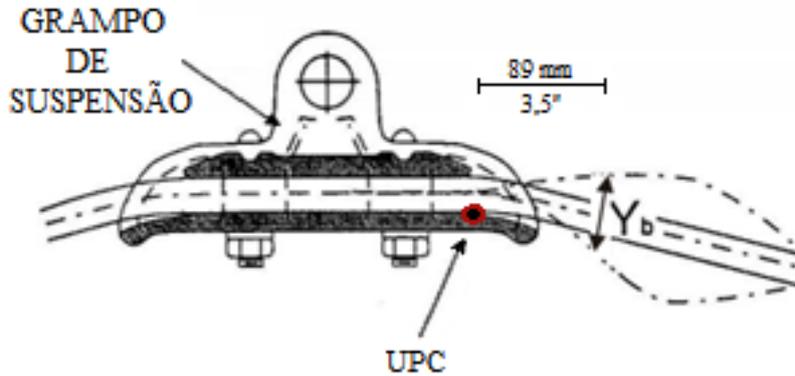


Figura 2.7: Esquema da montagem do cabo com o grampo de suspensão (modificado de Gomes (2015)).

O método, representado pela Fórmula de Poffenberger-Swart (Equação (2.12)), calcula a faixa de tensão experimentada por um fio de alumínio localizado na camada mais externa do cabo e na boca do grampo, relacionando-o com o deslocamento vertical pico a pico (Y_B) medido a 89 mm do último ponto de contato (UPC) entre o cabo e o grampo de suspensão (HENRIQUES, 2006). Nesse ponto, a tensão de flexão é dada por:

$$\sigma_f = K \cdot Y_B \quad (2.12)$$

em que σ_f é a tensão dinâmica de flexão (zero a pico), Y_B é a amplitude de deslocamento (pico a pico) medida a 89 mm do UPC e K [N/mm³] é uma constante calculada por meio da Equação (2.13):

$$K = \frac{E \cdot d \cdot p^2}{4(e^{-p \cdot x} - 1 + p \cdot x)} \quad (2.13)$$

no qual E [MPa] é o módulo de elasticidade (Módulo de Young) do material, d [mm] é o diâmetro do fio de alumínio da camada externa do cabo, x [mm] é a distância entre o ponto de medição e o UPC, normalmente igual a 89 mm, e p é um parâmetro determinado por:

$$p = \sqrt{\frac{T}{E \cdot I}} \quad (2.14)$$

sendo T [N] a carga de esticamento (EDS - *Every Day Stress*) para a temperatura média durante a medição e I [mm⁴] o momento de inércia. O produto $E \cdot I$ resulta na rigidez a flexão do cabo, expressa por:

$$E \cdot I = n_{al} \cdot E_{al} \cdot \frac{\pi \cdot d_{al}^4}{64} + n_{aço} \cdot E_{aço} \cdot \frac{\pi \cdot d_{aço}^4}{64} \quad (2.15)$$

em que n_{al} , E_{al} e d_{al} representam o número, o diâmetro e o módulo de elasticidade dos fios de alumínio, enquanto que $n_{aço}$, $E_{aço}$ e $d_{aço}$ referem-se aos fios de aço.

Analisando a Equação (2.15), pode-se inferir que os fios do cabo se comportam de maneira independente, uma vez que existem marcas de *fretting* entre os fios. O *fretting* indica que há um movimento relativo entre os corpos em contato, porém esse deslocamento depende da pressão entre as superfícies, resultante da carga de tração (T) aplicada e do nível de amplitude de flexão (Y_B) imposto. Para baixos valores de amplitude, os fios do cabo passam a agir em conjunto, se comportando como um elemento único e fazendo com que a rigidez à flexão assumira seu valor máximo. Porém, para valores altos de Y_B , os fios agem de forma mais independente e a rigidez à flexão assume seu valor mínimo (GOMES, 2015).

Poffenberger e Swart (1965) destacam que a comparação entre a teoria e os dados experimentais foi satisfatória, concluindo que a relação quantitativa entre a tensão dinâmica e o deslocamento relativo depende de fatores como a carga de esticamento e a rigidez à flexão.

Também é importante ressaltar que, durante a formulação da Equação de Poffenberger-Swart (Equação (2.12)), utilizou-se um grampo rígido, formado basicamente por duas chapas segurando um cabo. Também foi adotada a hipótese de que o acoplamento cabo-grampo funciona como um engaste e, para derivar a fórmula, utilizou-se o valor de x (distância entre o ponto de medição e o UPC) igual a 89 mm. Em grampos do tipo AGS, que são forrados com um elastômero e envoltos por hastes helicoidais, a medição nessa distância de 89 mm não é possível, devendo-se adotar uma distância maior. Nesse caso, pode-se utilizar dois métodos para corrigir os valores da Equação de Poffenberger-Swart. O primeiro método consiste em converter as amplitudes medidas para seus valores correspondentes de amplitude de flexão ou de tensão de flexão (medidos a 89 mm do UPC), considerando o distanciamento real. Para realizar essa conversão, multiplica-se todas as amplitudes medidas pelo termo (EPRI, 2006):

$$\left(\frac{89}{x}\right)^2 \quad (2.16)$$

em que x [mm] é a distância entre o UPC e o local de medição.

Já o segundo método consiste na utilização de um UPC "virtual" localizado no centro do grampo AGS (CIGRÉ SC22-WG11, 1995). Dessa forma, utiliza-se o x da Equação (2.13) como sendo a

distância entre o ponto de medição e o centro do grampo AGS.

Por fim, é possível reescrever a Equação de Poffenberger-Swart (Equação (2.12)) de outras formas, estimando a tensão dinâmica alternada por meio de outros parâmetros (EPRI, 2006):

$$\sigma_f = \frac{d \cdot E}{2} \cdot \sqrt{\frac{T}{E \cdot I}} \beta \quad (2.17)$$

$$\sigma_f = \pi \cdot d \cdot E \cdot \sqrt{\frac{W}{E \cdot I}} \cdot f \cdot y_{\text{máx}} \quad (2.18)$$

em que β é o ângulo de curvatura, W é a densidade linear do condutor, f [Hz] é a frequência e $y_{\text{máx}}$ é a amplitude de vibração (0 a pico).

2.3.3 Metodologias de projeto contra fadiga em cabos condutores

Visando proteger os cabos condutores das linhas de transmissão contra o processo de falha por fadiga, os seguintes métodos foram propostos para avaliar a severidade dos danos causados pela fadiga através das medições de amplitude de flexão (GOMES, 2015).

- Método IEEE;
- Método EPRI;
- Método CIGRÉ WG 22-04.

2.3.3.1 Método IEEE

A metodologia elaborada pelo IEEE baseia-se na máxima deformação em flexão admissível (FADEL, 2010). Segundo essa técnica, foi estabelecido um valor de segurança igual a 150 microdeformações para a deformação dinâmica (pico a pico), no qual não houve danos por fadiga nos cabos condutores após 30 anos de serviço. Porém, esse valor foi classificado como muito conservador e deve ser utilizado apenas como um guia, visto que deformações na faixa de 200 *microstrains* também são consideradas seguras (REPORT, 1966).

Os dados utilizados nesse método foram obtidos a partir de testes com cabos do tipo ACSR, em que as medições foram realizadas com base no ponto padrão, distante 89 mm do UPC (GOMES, 2015).

2.3.3.2 Método EPRI

A metodologia EPRI baseia-se em um conjunto de dados resultante de ensaios de fadiga com diversos tipos de condutores (majoritariamente cabos ACSR), montados em grampos convencionais de metal e com perfil suave (GOMES, 2015). Esse método considera que a tensão dinâmica tende

ao limite de resistência à fadiga, garantindo uma vida longa ao cabo, uma vez que o número de ciclos até a falha é elevado. Para cabos ACSR com várias camadas, adota-se um limite de 8,5 MPa (FADEL, 2010). Outros valores para essa grandeza podem ser vistos na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Limites de resistência à fadiga da metodologia EPRI (modificado de Gomes (2015))

Tipo de condutor (material)	Número de camadas	Limite de resistência à fadiga [MPa]
ACSR Alumínio 1350 ou liga de alumínio 5005	1 camada	22,5
	Multicamadas	8,5
Ligas de alumínio 6201 e similares	1 camada	15
	Multicamadas	5,7

Para transcrever os valores da Tabela 2.2 em termos da amplitude de flexão, é necessário utilizar a Equação (2.12), isolando e colocando Y_B em função do parâmetro K (Equação (2.13)) e do limite de resistência à fadiga do EPRI (GOMES, 2015).

É importante destacar que os limites de segurança estabelecidos na Tabela 2.2 podem ser excedidos até um determinado nível ou por um número limitado de vezes sem prejudicar a integridade do condutor. Essa extrapolação deve seguir os seguintes critérios (EPRI, 2006):

- Os níveis de amplitude de flexão podem exceder o limite de resistência em até 5% do número total de ciclos;
- O número de ciclos que ultrapassam 1,5 vezes o limite de resistência não pode ser maior que 1%;
- Nenhum ciclo pode ultrapassar 2 vezes o limite de resistência.

2.3.3.3 Método CIGRÉ WG 22-04

O método CIGRÉ para avaliação da vida remanescente em cabos condutores considera o efeito acumulativo de todos os ciclos de vibração registrados. Nessa técnica, os dados de amplitude de flexão são convertidos em amplitudes de tensão e depois extrapolados para o período de um ano. Em seguida, esses dados são apresentados em um gráfico (denominado de "curva de tensão acumulada") que relaciona, para cada valor de tensão (σ_i), o número de ciclos (n_i) previstos para um ano. Depois, utilizando a teoria de Miner sobre dano acumulado (Seção 2.2.4), essa curva é comparada com a curva S-N (ou curva de Wöhler) feita por CIGRÉ WG 22-04 (denominada de *safe border line*). A curva S-N, feita com base em vários ensaios laboratoriais de fadiga em condutores, mostra, para cada nível de tensão (σ_i), o número máximo de ciclos (N_i) suportados pelo condutor. Por fim, com os dados obtidos, é possível calcular o dano acumulado (Equação (2.9)), o tempo de vida do condutor (Equação (2.10)) e o tempo de vida remanescente (Equação (2.11)) (EPRI, 2006).

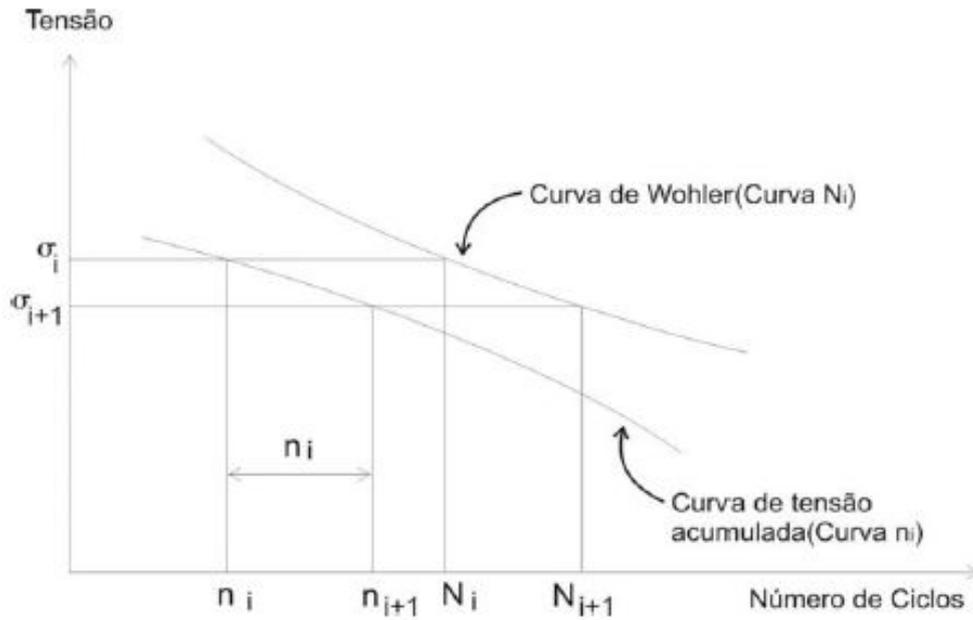


Figura 2.8: Metodologia CIGRÉ WG 22-04 para determinar a vida em condutores (retirado de Henriques (2006)).

É importante ressaltar que, ao final do cálculo da vida remanescente (Equação (2.11)), há uma avaliação acerca da viabilidade econômica do resultado, verificando se o cabo condutor é capaz de atingir uma vida economicamente satisfatória, cujo valor é de aproximadamente 30 anos. Caso a vida residual seja baixa, pode-se adotar atividades de manutenção e inspeção na linha para reduzir a chance de ocorrência de falhas (GOMES, 2015).

2.3.4 Influência dos grampos

Tendo em vista que aproximadamente 99% das falhas devido à vibração eólica em linhas de transmissão ocorrem muito perto ou em grampos de suspensão, sua configuração é muito importante para a integridade mecânica do cabo e para a segurança da linha (EPRI, 2006). A Figura 2.9 destaca os tipos de grampos de suspensão:

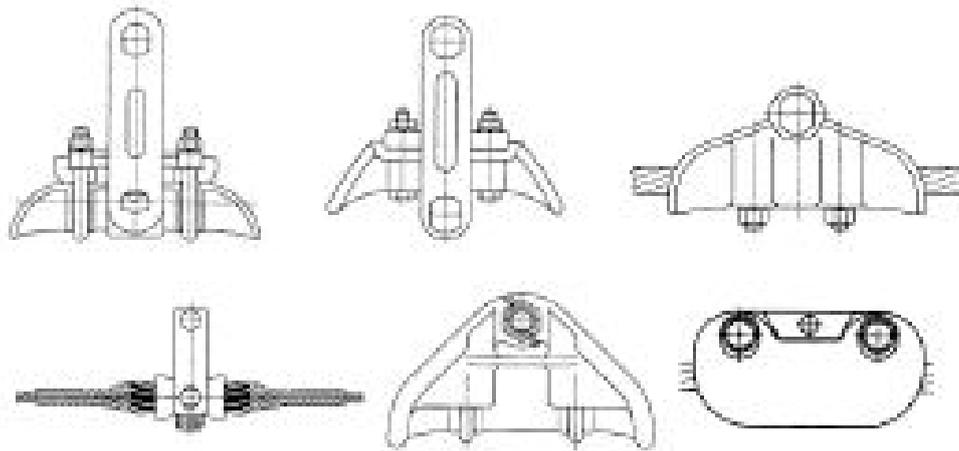


Figura 2.9: Tipos de grampos de suspensão (retirado de EPRI (2006)).

É importante destacar que o efeito da fadiga nos cabos condutores pode variar de acordo com o tipo de grampo utilizado.

2.3.4.1 Grampo monoarticulado fixado diretamente no condutor

Os grampos de suspensão monoarticulados fixados diretamente no condutor oferecem a menor proteção contra o processo de fadiga devido à vibração eólica. Isso ocorre porque esses equipamentos geram altas cargas compressivas que podem danificar os cabos condutores. Além disso, a amplitude de flexão devido ao movimento dos cabos também é elevada, já que o condutor não é envolto por armadura. A elevada curvatura propicia o aparecimento de pequenas trincas, que podem propagar-se até a falha do componente (CIGRE, 2017).

É importante ressaltar que esse tipo de grampo é usado mais em áreas com baixos níveis de vibração eólica e onde não há a ocorrência do galope. Esses dispositivos costumam ser usados em conjunto com amortecedores, visando reduzir a vibração nos cabos (CIGRE, 2017).



Figura 2.10: Grampo de suspensão monoarticulado (retirado de FORJASUL (2012)).

2.3.4.2 Grampo monoarticulado fixado no condutor com armadura preformada

O grampo de suspensão monoarticulado com armadura de hastes preformadas oferece maior proteção contra o processo de fadiga e, por isso, utiliza-se esse dispositivo em áreas com maiores

níveis de vibração do cabo. As hastes preformadas são enroladas ao condutor, enrijecendo o cabo na região do grampo. O acréscimo dessas varetas acrescenta uma camada extra de material ao cabo, distribuindo a carga compressiva do grampo sobre uma área maior. Além disso, também percebe-se que o enrijecimento provocado pelas hastes ajuda a reduzir o ângulo de curvatura durante o movimento do cabo. Por fim, destaca-se que o uso da armadura também adiciona um pouco de amortecimento através da fricção entre as varetas e o condutor (CIGRE, 2017).



Figura 2.11: Grampo de suspensão monoarticulado (retirado de CIGRE (2017)).

2.3.4.3 Grampo AGS

Os grampos AGS (Figura 2.12), quando comparados com os outros tipos de grampos de suspensão, oferecem a maior proteção contra a fadiga, uma vez que possuem coxins elastoméricos em seu interior e são envoltos por hastes preformadas. Os elastômeros permitem que o cabo se curve sobre uma maior área acolchoada, reduzindo, assim, a tensão dinâmica (CIGRE, 2017). Já o uso de hastes de armadura preformada (*armor rods*) tem o objetivo de reforçar os condutores nas áreas de maior curvatura, provocando o aumento da rigidez à flexão dos cabos e reduzindo a tensão de flexão, mesmo em casos que não há a redução da amplitude de vibração. Além disso, essa armadura também contribui para o amortecimento da vibração dos cabos, em que há a diminuição da energia vibratória por meio do deslizamento entre a armadura e o condutor (EPRI, 2006). Porém, apesar de serem o tipo mais seguro de grampo, o grampo AGS é o menos utilizados, visto que seu custo é muito elevado e sua instalação é muito complexa (CIGRE, 2017).



Figura 2.12: Grampo AGS (retirado de PLP Brasil (2019)).

É importante ressaltar que, para os grampos AGS, o comportamento do condutor dentro do grampo é desconhecido, visto que o elastômero pode deformar e permitir o movimento interno do cabo. Com isso, a tarefa de determinar o ponto de máxima tensão de flexão torna-se muito difícil (MIRANDA *et al.*, 2021).

Miranda *et al.* (2021) desenvolveram um estudo acerca das tensões na região interna do grampo, no qual foram realizados ensaios laboratoriais visando medir as tensões de flexão dinâmicas nos fios superiores de um condutor inserido em diferentes tipos de grampos de suspensão. Para verificar o comportamento das tensões na área interna do grampo AGS, foram fixados diversos extensômetros nos fios superiores do condutor, conforme a Figura 2.13.

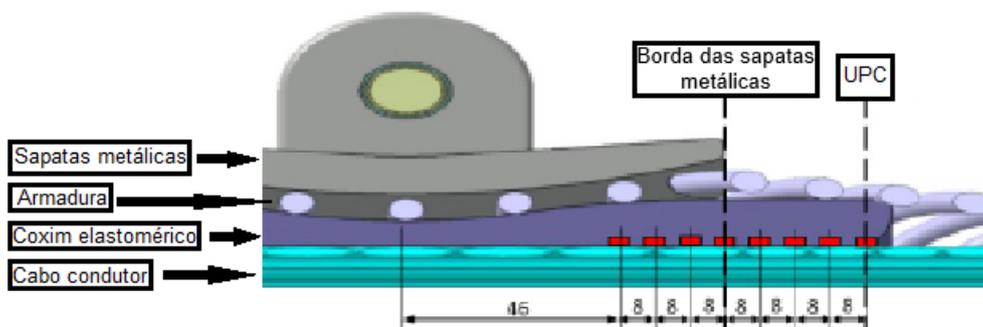


Figura 2.13: Elementos e posição dos extensômetros no grampo AGS (adaptado de Miranda *et al.* (2021)).

Os ensaios foram feitos com base em diferentes valores de amplitude de flexão Y_c , medida no primeiro ponto de contato entre o cabo e as hastes preformadas (MIRANDA *et al.*, 2021). Os resultados são mostrados na Figura 2.14.

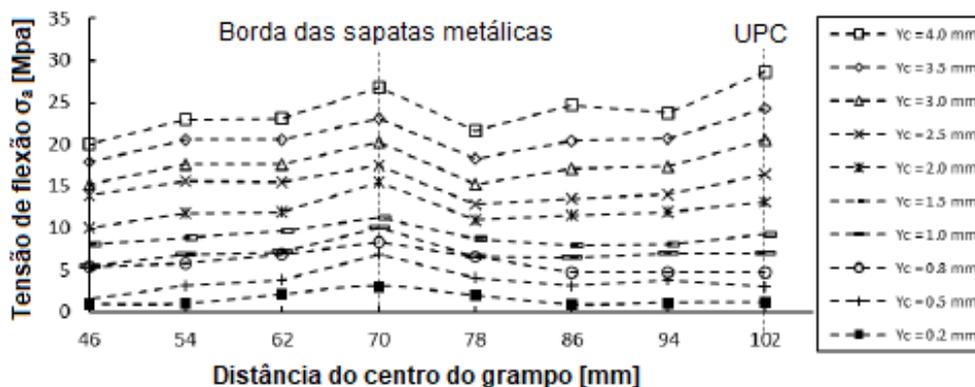


Figura 2.14: Elementos e posição dos extensômetros no grampo AGS (adaptado de Miranda *et al.* (2021)).

Com base nos resultados obtidos (Figura 2.14), Miranda *et al.* (2021) concluíram que os maiores valores de tensão, independentemente do Y_c adotado, se encontram a aproximadamente 70 mm e 102 mm do centro do grampo. Essas medidas correspondem ao final das sapatas metálicas e ao último ponto de contato entre o cabo e os coxins elastoméricos do grampo, respectivamente. Isso fortalece o argumento considerado pelos autores de que as sapatas metálicas são responsáveis pela tensão dinâmica observada nessa primeira região.

Além disso, Miranda *et al.* (2021) também concluíram, por meio da comparação entre os dados obtidos para os diversos tipos de grampo, que o grampo AGS possui o menor nível de tensão de flexão, assegurando maior proteção ao condutor contra o processo de fadiga devido à vibração eólica.

2.4 Vibrógrafos

Os vibrógrafos são equipamentos utilizados nas áreas de projeto e manutenção de linhas de transmissão de energia elétrica para coletar dados como a amplitude de flexão (Y_B) e a frequência de movimento dos cabos (OLIVEIRA, 2013). Os principais objetivos desses dispositivos são os de determinar o risco de futuros danos por fadiga e estipular a probabilidade de algum dano já ter ocorrido (IEEE, 2006). Os vibrógrafos medem a vibração do cabo e retornam a frequência de ocorrência das tensões atuantes durante um determinado período de tempo.

Os primeiros vibrógrafos criados eram analógicos e registravam os dados de amplitude de flexão em rolos de filme. Porém, com o passar do tempo, os aparelhos passaram a ser digitais, registrando os dados em uma matriz, tipificando cada ciclo de vibração em classes de amplitude de flexão e de frequência. Atualmente, os principais vibrógrafos utilizados são o Vibrec 500 (Figura 2.15(a)), da empresa PFISTERER, e o Pavica (Figura 2.15(b)), da empresa ROCTEST. O modelo Pavica teve sua fabricação interrompida recentemente, enquanto que o Vibrec ainda continua em produção (GOMES, 2015). A Tabela 2.3 apresenta um comparativo entre os dois vibrógrafos e a Figura 2.15 ilustra os equipamentos.

Tabela 2.3: Comparativo entre os vibrógrafos Pavica e Vibrec (retirado de Gomes (2015), EPRI (2006), Nogueira (2017), PFISTERER (2020), ROCTEST (2005)).

Especificações	Pavica	Vibrec 500
Tipo		Digital
Tempo ativo das medições [s]	12	10
Intervalo entre as leituras [min]	10	15
Máxima amplitude de flexão pico a pico [mm]	1,3	2
Faixa de leitura de frequência [Hz]	0 - 127	0,2 - 200
Autonomia das baterias [meses]	3	12
Tamanho da matriz de dados	64 x 64	32 x 32
Peso aproximado [kg]	0,5	0,7



Figura 2.15: Principais tipos de vibrógrafos utilizados: (a) Vibrec 500 e (b) Pavica (adaptado de Cosmai (2009)).

Com base na Figura 2.15, pode-se observar que as instalações dos modelos de vibrógrafo são diferentes. O Vibrec é instalado no grampo de suspensão e seu sensor de medição deve ficar na posição padrão, distante 89 mm do último ponto de contato entre o cabo e o grampo (UPC). Para o Pavica, que é montado diretamente no cabo condutor, recomenda-se que o seu sensor fique na posição referente ao UPC e que a braçadeira do vibrógrafo esteja 89 mm distante, conforme a figura a seguir (EPRI, 2006):

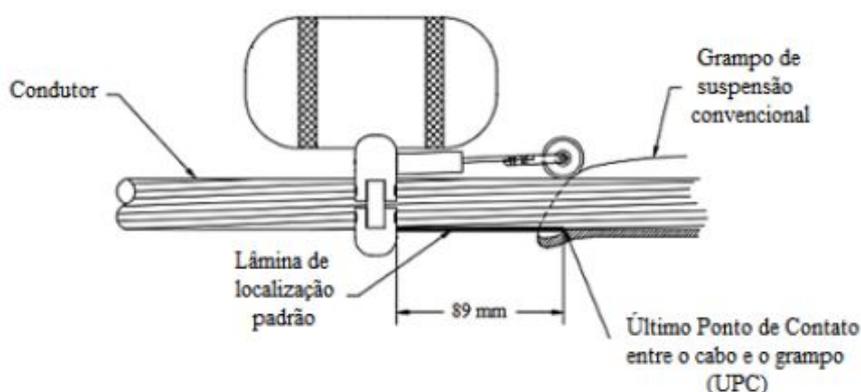


Figura 2.16: Instalação padrão do Pavica (retirado de Gomes (2015)).

Para os casos em que não é possível realizar a instalação padrão, pode-se utilizar um *offset*, permitindo que o sensor movimente-se sem nenhuma restrição (GOMES, 2015). Isso ocorre, por exemplo, com o uso de um grampo rígido de face reta, mostrado na Figura 2.17.

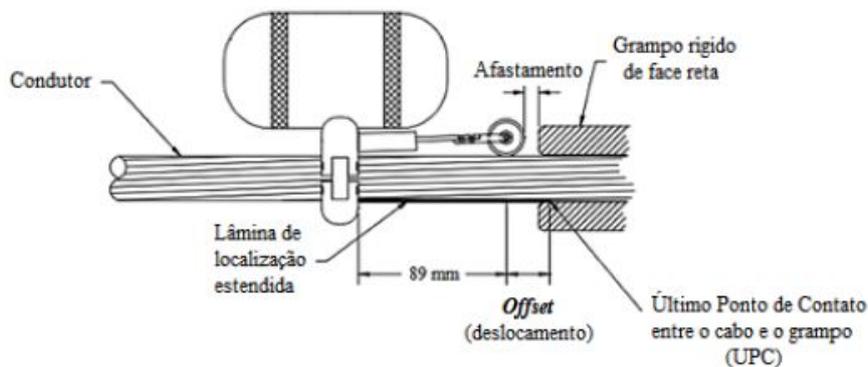


Figura 2.17: Instalação com *offset* do Pavica (retirado de Gomes (2015)).

Outra diferença entre os dois modelos de vibrógrafos pode ser vista no método de medição. Oliveira (2013) destaca as duas diferentes técnicas utilizadas:

- Método de medição direta: medições com base na amplitude de flexão;
- Método de medição inversa: medições com base na amplitude reversa de flexão.

O Vibrec utiliza o método de medição direta, enquanto que o Pavica adota a técnica de medição inversa. Essa diferença ocorre devido ao fato do Vibrec ser instalado no grampo de suspensão, enquanto que o Pavica é fixado diretamente no condutor. Para permitir que os dados dos vibrógrafos sejam utilizados em conjunto com as metodologias de projeto contra fadiga (Seção 2.3.4), é necessário que ambas as medidas obtidas estejam na forma de amplitude de flexão padrão (Y_B) (GOMES, 2015). Para converter a amplitude de flexão inversa em amplitude padrão, deve-se utilizar a razão (HARDY; BRUNELLE, 1991):

$$R' = \frac{p \cdot a - 1 + e^{-p \cdot a}}{e^{-p \cdot b} [1 - (1 + p \cdot a) \cdot e^{-p \cdot a}]} = \frac{Y_B}{Y_I} \quad (2.19)$$

em que p é dado pela Equação (2.14), a [mm] é a distância padrão de instalação do Pavica (igual a 89 mm), c [mm] é a distância entre o sensor do Pavica e o UPC (caso haja o emprego do *offset*) e Y_I é a amplitude de flexão inversa.

Além disso, IEEE (2006) também ressalta alguns fatores que podem influenciar o funcionamento correto dos vibrógrafos:

- Erros de calibração;
- Mau posicionamento do equipamento;
- Ruído elétrico;

- Variações de temperatura.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

3.1 Bancada de ensaio dos cabos condutores

Os ensaios efetuados com os cabos condutores foram realizados em ambiente controlado no Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia do Departamento de Engenharia Mecânica (ENM) da Universidade de Brasília (UnB). A Figura 3.1 mostra um esquema dos componentes presentes na bancada de ensaio, enquanto que a Figura 3.2 destaca as distâncias entre os equipamentos.

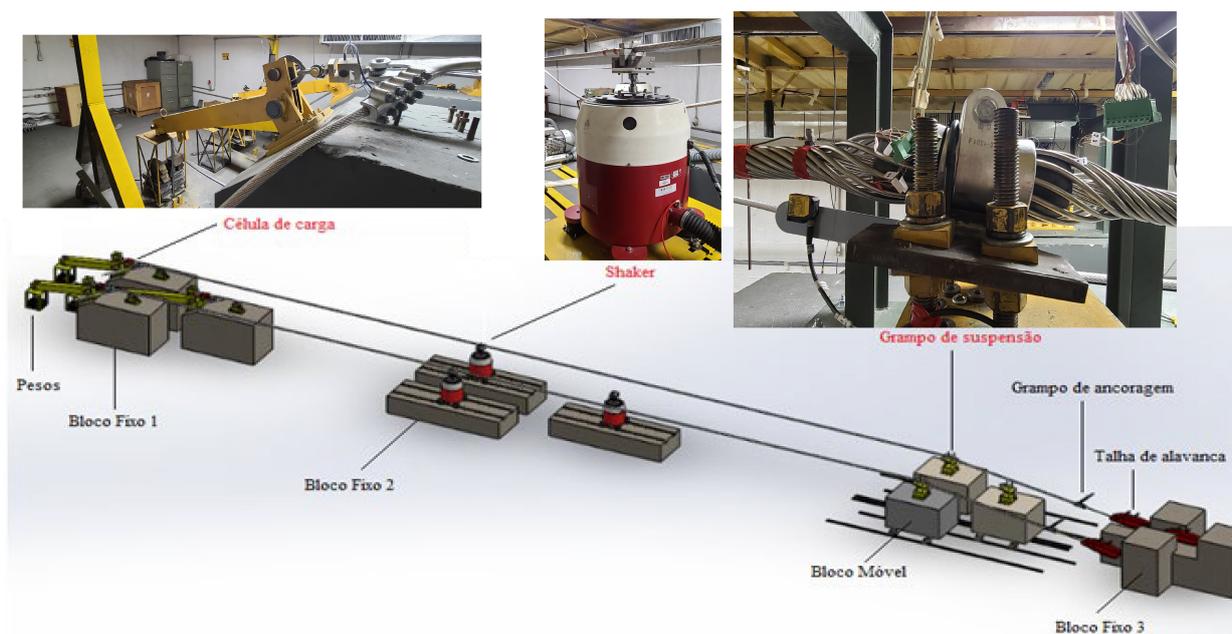


Figura 3.1: Componentes presentes na bancada de ensaio (modificado de GFFM (2020)).

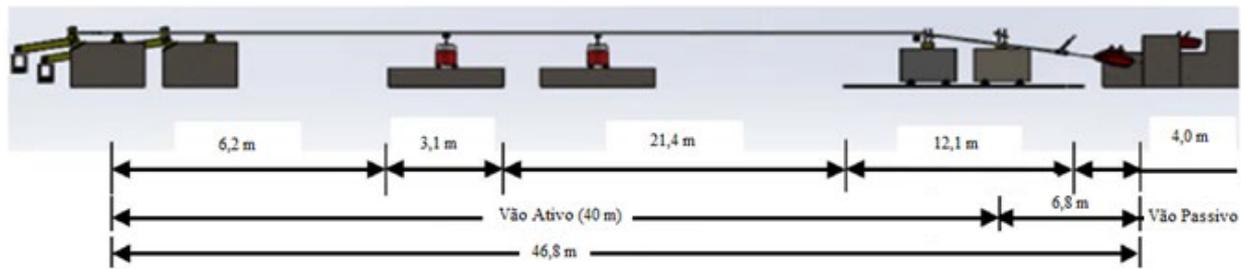


Figura 3.2: Distâncias entre os equipamentos da bancada de ensaio (modificado de GFFM (2020)).

Conforme a Figura 3.2, pode-se observar que o vão possui um comprimento total igual a 46,8 m e divide-se em dois sub-vãos, o ativo e o passivo. O ativo, cujo comprimento é de 40 m, é responsável por gerar o valor de Y_B pré-definido. Já o vão passivo, com comprimento de 6,8 m, é utilizado apenas para fixação do cabo (FADEL, 2010).

A fixação do condutor é realizada nas extremidades da bancada de ensaio. Em um dos lados, o cabo é preso ao grampo de suspensão, que é montado em uma base sobre o bloco móvel, e ligado ao grampo de ancoragem que, por sua vez, é preso a uma talha de alavanca, conectada ao bloco fixo 3. No lado oposto, o condutor passa por uma roldana e depois é ligado a outro grampo de ancoragem, preso a uma célula de carga. Essa célula, juntamente com o braço de alavanca, é responsável por controlar a carga de tração aplicada no cabo, que é realizada por meio da adição de contrapesos a uma gaiola fixada ao braço.

O cabo é disposto sobre o grampo de suspensão e a roldana, que funcionam como pontos de articulação. Com o deslocamento do bloco móvel, no qual localiza-se o grampo de suspensão, é possível variar o comprimento do vão ativo.

Na região do grampo de suspensão, localiza-se a grande maioria dos sensores de monitoramento e aquisição de dados, como acelerômetros, extensômetros e medidores a *laser*. Isso ocorre porque é nessa região que ocorre a restrição de movimento e, conseqüentemente, a maioria das falhas por fadiga.

Situado na seção do vão ativo, o *shaker* é montado sobre trilhos no bloco fixo 2, que permitem sua movimentação em relação ao nó, ou anti-nó, em dada frequência de excitação, melhorando a estabilidade do ensaio (FADEL, 2010). O excitador tem a função de aplicar a vibração no cabo de maneira controlada, com base nos dados de amplitude, frequência, velocidade e aceleração predeterminados (VILELA, 2013).

3.2 Materiais

As características e informações importantes acerca dos principais materiais utilizados nos ensaios são apresentadas a seguir.

3.2.1 Cabo condutor

Nos ensaios, foi utilizado o condutor AAAC 900MCM. Esse cabo é do tipo CAL (AAAC), composto somente por fios de alumínio liga 6201, conforme a Tabela 3.1. Suas principais características são apresentadas a seguir.

Tabela 3.1: Dados do cabo condutor (retirado de ALUBAR METAIS E CABOS S.A. (2013)).

Modelo	900 MCM
Tipo do cabo	Cabo Alumínio Liga 6201 (CAL)
Carga de ruptura nominal	13404,85 kgf
Módulo de elasticidade do alumínio	69 GPa
Diâmetro do cabo	27,72 mm
Número de fios	37 fios de alumínio
Diâmetro dos fios	3,96 mm

No cálculo da rigidez a flexão do cabo, dada pela Equação 2.15, utiliza-se somente as variáveis relacionadas aos fios de alumínio, visto que o cabo escolhido não possui fios de aço. Dessa forma, a equação torna-se:

$$E \cdot I = n_{al} \cdot E_{al} \cdot \frac{\pi \cdot d_{al}^4}{64} \quad (3.1)$$

Substituindo os valores na Equação 3.1, tem-se que $E \cdot I = 30817787,6 \text{ kN} \cdot \text{mm}^4$. Também é importante ressaltar que, no cálculo da rigidez a flexão do cabo, não foi considerada a presença das varetas preformadas, visto que, segundo Miranda *et al.* (2021), o resultado calculado por meio da Equação de Poffenberger-Swart que mais se aproximou dos dados experimentais foi obtido sem considerar a rigidez das varetas.

Além disso, de acordo com Bellorío (2009), a tração mecânica a qual os condutores são submetidos costuma variar entre 18,5 a 20% do valor da resistência à tração do cabo. Com base nisso e visando abordar diferentes situações a qual os cabos são submetidos, adotaram-se dois valores diferentes para a força de tração: 18% e 15%. O primeiro valor foi adotado visando simular uma situação de uso normal do cabo. Já o segundo foi escolhido visando analisar o comportamento em uma situação com carga inferior ao padrão utilizado.

3.2.2 Grampo de suspensão

O grampo AGS (Grampo de Suspensão Armado) é projetado para distribuir os esforços mecânicos atuantes no ponto de suspensão. Além disso, esse equipamento também fornece uma maior proteção ao cabo contra os efeitos de fadiga e abrasão, proporcionados pela presença do coxim elastomérico e do conjunto de varetas preformadas (PLP BRASIL, 2019). A Figura 2.12 mostra um exemplo de grampo AGS. Para os ensaios, utilizou-se o modelo F4024-31 da marca FORJASUL, cujas características são mostradas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Dados do grampo AGS (retirado de FORJASUL (2017)).

Modelo		F4024-31
Número de varetas		12
Carga de ruptura		60% da carga de ruptura do cabo
Carga de escorregamento		25% da carga de ruptura do cabo
Diâmetro do cabo	Mínimo	27,71 mm
	Máximo	28,41 mm
Materiais	Sapata, cinta e varetas	Liga de alumínio
	Coxim	Elastômero
	Parafusos e arruelas	Aço galvanizado
	Porca	Aço inox

Comparando o diâmetro do cabo condutor escolhido (Tabela 3.1) com os diâmetros máximo e mínimo do grampo de suspensão adotado (Tabela 3.2), verifica-se que o valor do cabo está dentro do intervalo e, portanto, o grampo selecionado está correto.

Além disso, deve-se destacar que o grampo AGS é formado pelos seguintes elementos:

- Conjunto de varetas preformadas;
- Sapatas metálicas;
- Coxins elastoméricos;
- Abraçadeira ou cinta metálica;
- Parafuso;
- Arruela;
- Porca.



Figura 3.3: Elementos do grampo AGS (retirado de PLP Brasil (2019)).

3.2.3 Medidor a *laser*

Para simular o sensor de um vibrógrafo real e obter os dados necessários, optou-se pelo uso de sensores de distância a *laser* da marca Baumer. A Tabela 3.3 e a Figura 3.4 apresentam

características dos sensores utilizados.

Tabela 3.3: Características do sensor de distância a *laser* (retirado de Baumer (2020))

Modelo	OADM 12U6430/S35A
Distância de medição	16 - 26 mm
Diâmetro do feixe	0,2 - 0,5 mm
Tipo de feixe	Ponto
Resolução	<0,9 μm

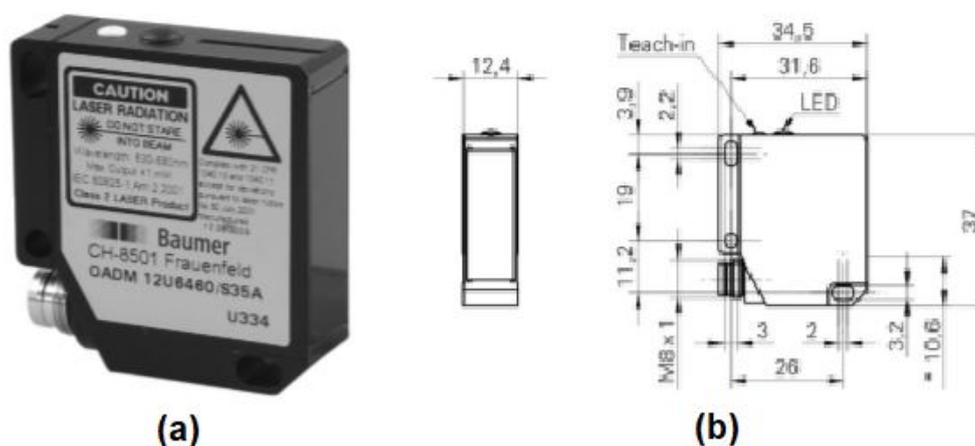


Figura 3.4: Informações acerca do sensor: (a) ilustração e (b) dimensões (modificado de Baumer (2020)).

3.2.4 Vibrógrafo

Os vibrógrafos são dispositivos utilizados para realizar medições de níveis de vibração em campo. Os primeiros aparelhos eram analógicos e registravam seus dados em rolos de filmes por meio da ampliação mecânica das vibrações. Porém, atualmente, esses equipamentos são digitais e registram a amplitude de flexão em uma matriz de dados. Os principais modelos utilizados no presente são o Pavica e o Vibrec, mostrados na Figura 2.15 (GOMES, 2015). Esses dispositivos são formados basicamente por uma bateria, por um sistema de aquisição de dados e por uma estrutura com o formato de um cilindro, que é presa ao grampo de suspensão ou ao cabo, dependendo do tipo de vibrógrafo.

Visando simular a utilização dos vibrógrafos nos ensaios laboratoriais, foi necessário alterar alguns dos principais elementos por componentes semelhantes. Para substituir o sistema de aquisição de dados e realizar a medição dos dados, optou-se pelo uso de sensores a *laser* (Seção 3.2.3). No caso da estrutura cilíndrica, foram projetadas armações parecidas, mostradas na Figura 3.5. O protótipo foi projetado para se parecer com um vibrógrafo real, por isso sua estrutura apresenta uma forma cilíndrica e arredondada. Já a base quadrada reta foi adotada visando uma melhor fixação do protótipo no suporte que comporta o grampo AGS na bancada.

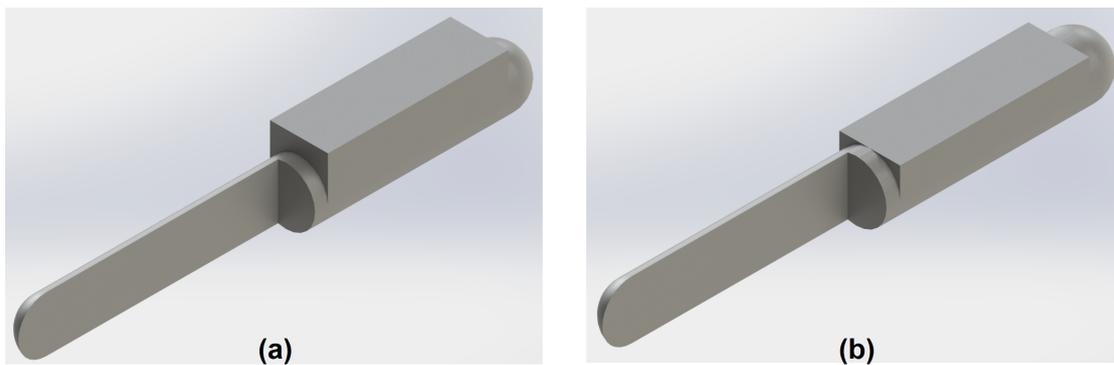


Figura 3.5: Protótipos do vibrógrafo Vibrec.

Com base na Figura 3.5, pode-se observar dois protótipos da estrutura do vibrógrafo Vibrec. Os dois são muito semelhantes entre si, diferenciando-se apenas na altura da base retangular com relação ao corpo cilíndrico. O segundo (Figura 3.5(b)) possui uma base rente ao cilindro, enquanto que o primeiro (Figura 3.5(a)) apresenta uma altura maior. Isso influencia no momento da aquisição dos dados com o medidor a *laser*, visto que o sensor possui um alcance limitado de medição. Uma base mais alta pode aumentar a distância entre o medidor e o cabo condutor.

Além disso, é importante destacar que a armação pode ser dividida em duas partes. A primeira (Figura 3.6(a)) consiste em um corpo cilíndrico com uma base retangular achatada, onde realiza-se a fixação da estrutura no suporte do grampo de suspensão. Já a segunda parte (Figura 3.6(b)), que tem o formato semelhante à metade de um cilindro, é o local onde o medidor a *laser* fica preso.

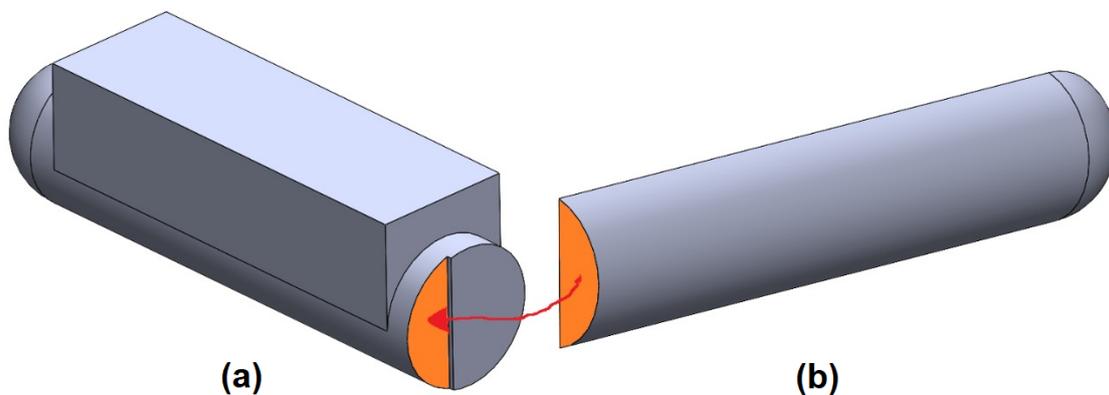


Figura 3.6: Partes da estrutura do protótipo de vibrógrafo.

Também destaca-se que ambos os protótipos foram projetados por meio do programa SolidWorks e impressos em uma impressora 3D, cujo resultado final é mostrado a seguir:



Figura 3.7: Protótipo impresso do vibrógrafo.

Por fim, é importante ressaltar o processo de montagem do protótipo de vibrógrafo no grampo AGS. Para prender a base do protótipo (Figura 3.6(a)) ao suporte que segura o grampo, foram utilizadas abraçadeiras de nylon, que devem ser bem apertadas para evitar possíveis movimentos do vibrógrafo. No caso do medidor a *laser*, foi utilizado uma fita adesiva dupla face para fixar o medidor na ponta do protótipo (Figura 3.6(a)). O protótipo de vibrógrafo montado junto ao suporte do grampo é mostrado na Figura 3.8.



Figura 3.8: Montagem do protótipo de vibrógrafo no suporte do grampo AGS.

3.2.5 Extensômetros

Para realizar as medições nos fios superiores dentro do grampo de suspensão, foram utilizados extensômetros coláveis de resistência elétrica da marca EXCEL. O modelo escolhido é do tipo unidirecional estreito, identificado pelo código PA-13-060BG-350-LL

Tabela 3.4: Dados dos extensômetros (retirado de EXCEL (2021)).

Modelo		PA-13-060BG-350-LL
Resistência elétrica		350 Ohms
Espaço da grelha	Comprimento	2 mm
	Largura	1,5 mm
Espaço da base	Comprimento	7 mm
	Largura	5 mm

Os pontos de fixação dos extensômetros para realizar as medições foram escolhidos com base no estudo de Miranda *et al.* (2021), no qual conclui-se que as regiões de maior tensão localizam-se na borda das sapatas metálicas e no último ponto de contato entre o cabo e o grampo (UPC),

conforme a Figura 2.14. Além disso, também optou-se pela instalação dos transdutores no ponto médio do grampo, para observar o comportamento das tensões ao longo do grampo. Para cada ponto de medição, utilizou-se 3 extensômetros, resultando, portanto, em 9 sensores no total. A relação entre as regiões escolhidas e as distâncias entre essas regiões são apresentadas na Figura 3.9 e 3.10 e na Tabela 3.5.

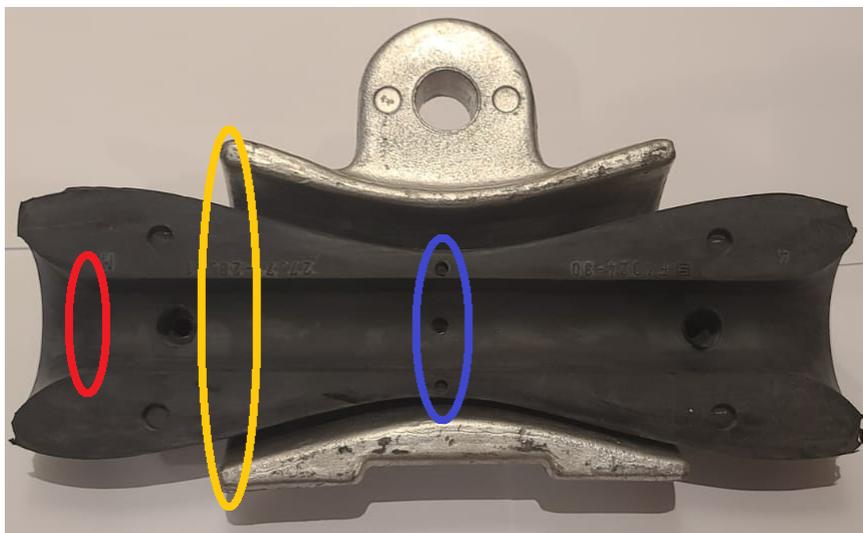


Figura 3.9: Posicionamento dos extensômetros no interior do grampo.

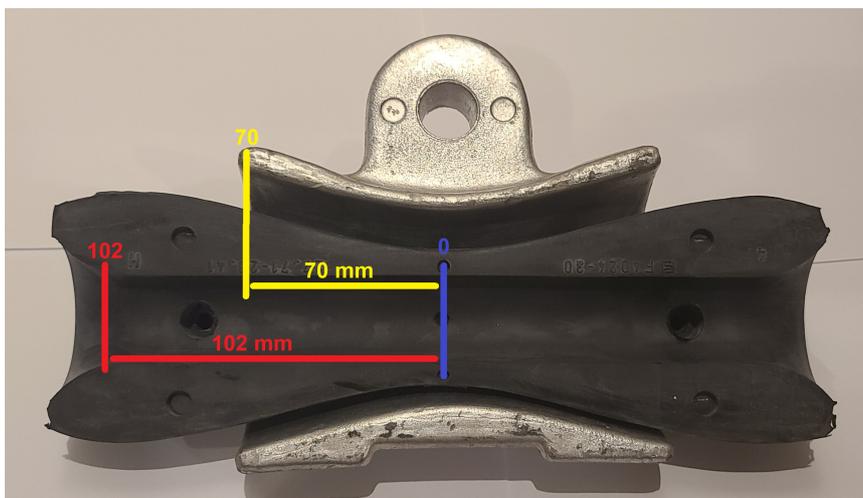


Figura 3.10: Distâncias entre as posições dos extensômetros no interior do grampo.

Tabela 3.5: Relação entre as posições e cores, conforme Figura 3.13

Posição	Descrição	Cor
1	Local referente ao meio do elastômero	Amarelo
2	Local referente ao final das sapatas metálicas	Verde
3	Local referente ao último ponto de contato entre o cabo e o grampo	Vermelho

3.2.6 Acelerômetros

Nos ensaios laboratoriais, utilizam-se dois acelerômetros. O primeiro é posicionado junto com o *shaker*, com o objetivo de controlar a excitação imposta sobre o cabo. Já o segundo tem a função de controlar a amplitude de flexão do condutor. Em grampos que não possuem armadura de hastes preformadas, o segundo acelerômetro é fixado a 89 mm do UPC. Porém, no caso do grampo AGS, adota-se, como local de fixação, o primeiro ponto de contato entre o condutor e o conjunto de hastes preformadas (Figura 3.11), conforme proposto por Miranda *et al.* (2021).



Figura 3.11: Posicionamento do acelerômetro no grampo AGS (modificado de Miranda *et al.* (2021)).

Para os acelerômetros, optou-se pelo uso de modelos da marca PCB Piezotronics.

3.3 Procedimento experimental

O procedimento experimental se inicia com a montagem do grampo AGS no cabo condutor. Essa etapa é muito importante, visto que o grampo é o local de restrição de movimento, concentrando as tensões mais altas. O grampo também é o lugar onde localizam-se os extensômetros, responsáveis pela aferição dos dados obtidos pelos protótipos de vibrógrafos.

O primeiro passo da montagem do grampo de suspensão no condutor é o levantamento do cabo de sua posição original até um ponto mais elevado, conforme Figura 3.12. Essa etapa é fundamental, pois adiciona um vão entre o cabo e a base montada sobre o bloco móvel, permitindo a instalação do grampo.

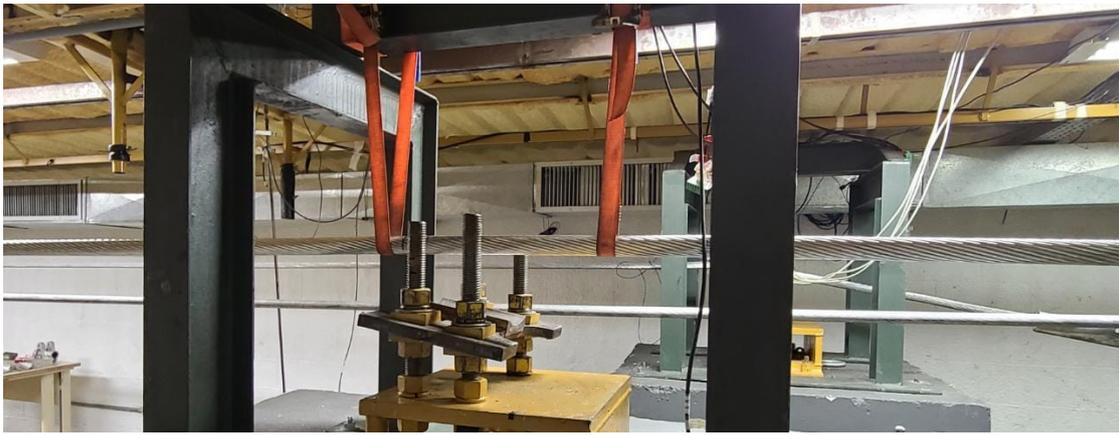


Figura 3.12: Levantamento do cabo.

Em seguida, deve-se marcar a posição dos extensômetros no grampo, conforme a Figura 3.13 e a Tabela 3.5. Depois, inicia-se a preparação do cabo para a colagem dos extensômetros. Esse processo consiste, primeiro, no lixamento da parte superior do cabo, local em que os transdutores serão fixados. Seguidamente, deve-se limpar a região com álcool, retirando quaisquer impurezas que possam interferir na etapa de colagem. Com o cabo limpo, realiza-se a fase de fixação dos extensômetros. Ao todo, foram utilizados 9 extensômetros (3 em cada posição). Para a colagem, utiliza-se uma cola instantânea a base de cianoacrilato. Após a colagem, aplica-se uma resina sobre os dispositivos, visando protegê-los contra possíveis danos durante a montagem do grampo e os ensaios. O resultado final é mostrado na Figura 3.13.

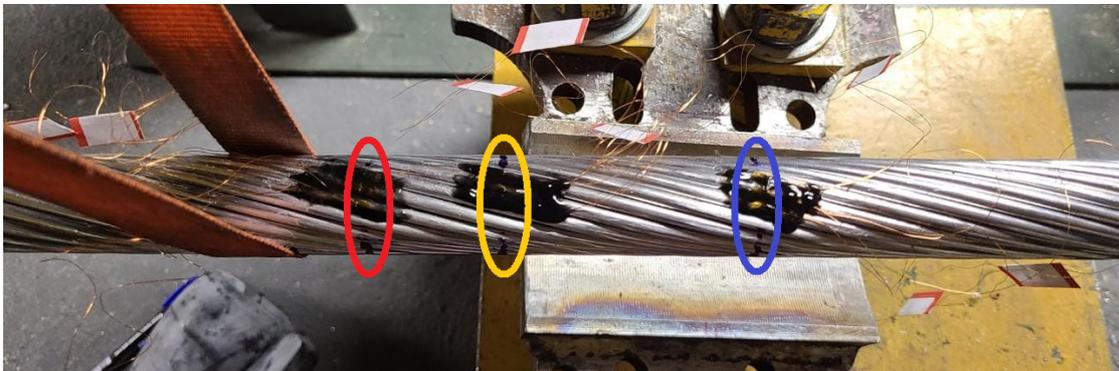


Figura 3.13: Fixação e posicionamento dos extensômetros, conforme a Tabela 3.5

Após a fixação dos extensômetros, inicia-se o processo de montagem do grampo AGS, dado pelas seguintes etapas:

1. Posicionamento e fixação dos coxins elastoméricos no cabo condutor. A união desses elementos é feita por meio de uma fina camada de fita adesiva. Na Figura 3.14, é possível observar a posição relativa dos extensômetros com relação ao coxim elastomérico, conforme a relação proposta na Tabela 3.5;



Figura 3.14: Início do posicionamento dos coxins elastoméricos com fixação dos extensômetros, conforme a Tabela 3.5.

2. Fixação das varetas preformadas no cabo. Nessa etapa, deve-se atentar ao posicionamento correto desses elementos, que devem estar paralelos ao condutor. Em seguida, a instalação é feita por meio do giro de uma das extremidades em torno do cabo. O término ocorre quando há o fechamento total de todo o conjunto;

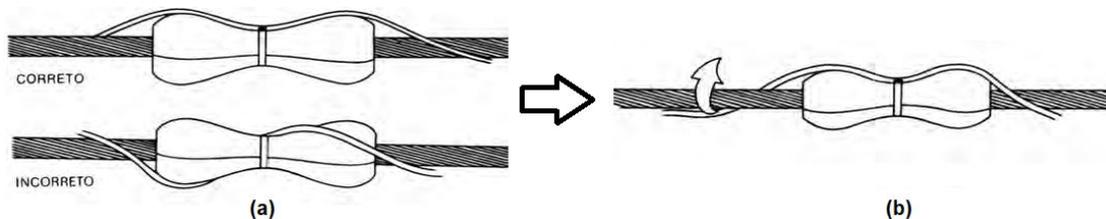


Figura 3.15: Montagem das hastes preformadas no cabo (adaptado de PLP Brasil (2016)).

3. Disposição das duas sapatas metálicas ao redor das varetas preformadas, alinhadas com o centro dos coxins elastoméricos;
4. Acomodação da abraçadeira, envolvendo todo o conjunto;
5. Posicionamento do parafuso, arruela e porca;
6. Aperto da porca até que a arruela de pressão fique plana.

Ao final da montagem do grampo de suspensão AGS, é necessário que as pontas dos fios dos extensômetros estejam na parte externa do grampo, visto que, para utilizar esses medidores, é necessário conectá-los ao sistema de aquisição de dados.

Com o grampo montado no cabo, foi possível fixar o protótipo de vibrógrafo no conjunto. A fixação desses elementos foi realizada por meio de abraçadeiras de nylon presas no final e no meio da estrutura.

Em seguida, foi necessário calibrar o medidor a *laser* para a correta obtenção dos dados. Para a calibração, optou-se pelo método de regressão linear, realizado com o auxílio de um suporte e de um micrômetro. Nesse procedimento, quantidades de deslocamento conhecidas são correlacionadas com a tensão elétrica. Inicialmente, é observada a faixa de medição do laser a fim de se determinar

o meio do curso. O meio do curso é definido como ponto "0", que corresponde a metade da faixa de medição. Em seguida, o micrômetro é utilizado para aplicar deslocamentos positivos e negativos em relação ao ponto "0", correlacionando-se esses valores de deslocamento com a respectiva tensão elétrica. Dessa forma, obtém-se a curva de calibração do laser.



Figura 3.16: Calibração do medidor a *laser*

Com o medidor a *laser* calibrado, foi possível montá-lo no protótipo de vibrógrafo. O dispositivo foi posicionado perto da extremidade do protótipo, permitindo que o feixe de *laser* ficasse marcando a posição referente ao primeiro ponto de contato entre o cabo e as varetas preformadas. Nessa posição, também foi fixado um acelerômetro na parte superior do cabo, responsável por medir o deslocamento pico a pico naquela região.



Figura 3.17: Montagem do medidor a *laser* e do acelerômetro.

Com o grampo montado e os medidores devidamente posicionados, é possível iniciar os ensaios. A Figura 3.18 mostra a bancada pronta.



Figura 3.18: Vista frontal e traseira da bancada de ensaio.

Depois, iniciou-se a fase de realização dos ensaios laboratoriais para testar o vibrógrafo. Nos ensaios, o cabo foi vibrado em 5 níveis de amplitude de flexão (Y_c) diferentes e foi tracionado com 2 cargas distintas de esticamento, resultando em um total de 10 testes:

Tabela 3.6: Condições aplicadas nos ensaios laboratoriais.

Condições dos ensaios	
Amplitude de flexão [μm]	Carga de tração [% da CRT]
0,2	18
0,4	
0,6	
0,8	
1,0	
	15

No início dos ensaios, foi necessário colocar o cabo para vibrar, realizando uma varredura para encontrar a frequência de excitação ideal, de acordo com a amplitude de flexão escolhida. Com essa frequência encontrada, foi possível, então, iniciar os ensaios e as medições dos dados. Para cada ensaio realizado, foram medidas as deformações, por meio dos extensômetros, e os deslocamentos, através do acelerômetro e do sensor a *laser* fixado no protótipo. Para cada deslocamento, foram feitas 3 aquisições de dados, cada uma com 30 s de duração. Depois, com os resultados obtidos, utilizou-se a Fórmula de Poffenberger-Swart (Equação (2.12)) para calcular as tensões. Com isso, foram realizadas comparações entre os deslocamentos medidos pelo acelerômetro e pelo medidor a *laser* instalado no vibrógrafo. Também foram analisadas as deformações medidas pelos extensômetros fixados no interior do grampo de suspensão.

Capítulo 4

Resultados

Nesta seção, serão apresentados os resultados provenientes dos dados coletados de deformação, obtidos por meio dos extensômetros fixados no interior do grampo, e de amplitude de flexão, medidos através do medidor a *laser* e do acelerômetro.

Inicialmente, aplicou-se uma carga de 2414 kgf, equivalente a 18% da carga de ruptura do cabo. As frequências utilizadas nesses ensaios são mostradas na Tabela 4.1. É importante destacar que a taxa de amostragem utilizada no sistema de aquisição foi de 500 Hz, para todos os ensaios.

Tabela 4.1: Frequências utilizadas nos ensaios com 18% da CRT.

Amplitude de flexão [mm]	Frequência [Hz]
0,2	20,83
0,4	20,83
0,6	20,83
0,8	20,87
1	20,87

Após a execução dos testes com essa carga, foi realizado o tratamento dos dados com a finalidade de "zerar" os valores obtidos pelos sensores. Inicialmente, os dados são obtidos da forma mostrada na Figura 4.1.

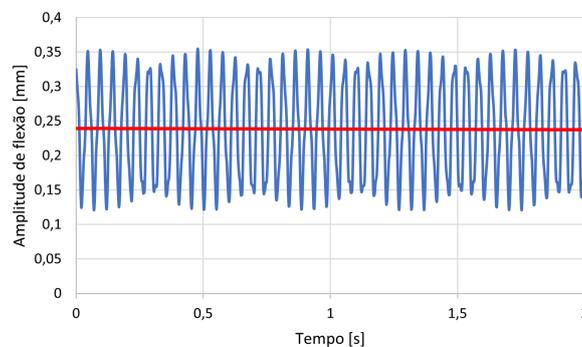


Figura 4.1: Amplitude de flexão medida pelo medidor a *laser*.

Visualizando a Figura 4.1, pode-se notar que os dados estão deslocados (não estão centrados no '0'), já que a linha de tendência, em vermelho, está próxima de 0,25 mm. Para corrigir isso, é necessário calcular a média dos dados e subtrair essa média de cada valor medido. Com isso, obtém-se:

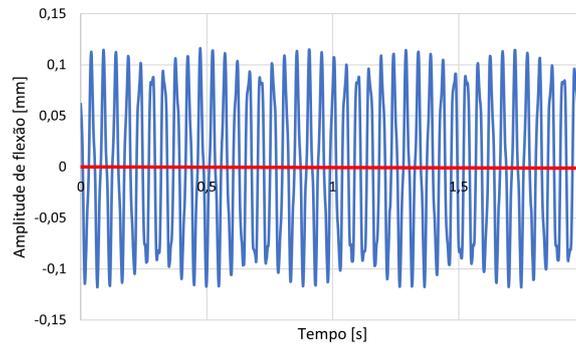


Figura 4.2: Amplitude de flexão corrigida medida pelo medidor a *laser*.

Com os dados corrigidos e centralizados, conforme a Figura 4.2, deve-se calcular o RMS (*Root Mean Square*, em inglês, ou Valor Quadrático Médio, em português). Para um conjunto de n valores $\{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n\}$, o Valor Quadrático Médio é dado pela Equação (4.1).

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + \dots + x_n^2)} \quad (4.1)$$

Para ondas senoidais, como são os casos das ondas obtidas a partir dos deslocamentos e das deformações medidas, a relação entre o RMS e essas grandezas é dada por:

$$\begin{aligned} \text{Amplitude de tensão (pico a pico)} &= 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \text{RMS} \text{ [mm]} \\ \text{Deformação (0 a pico)} &= \sqrt{2} \cdot \text{RMS} \text{ [\mu m/m]} \end{aligned}$$

Com o RMS da amplitude de tensão e da deformação calculados, é possível iniciar a análise dos dados obtidos. Uma primeira comparação entre as amplitudes medidas pelo acelerômetro e pelo medidor a *laser* é mostrada na Figura 4.3.

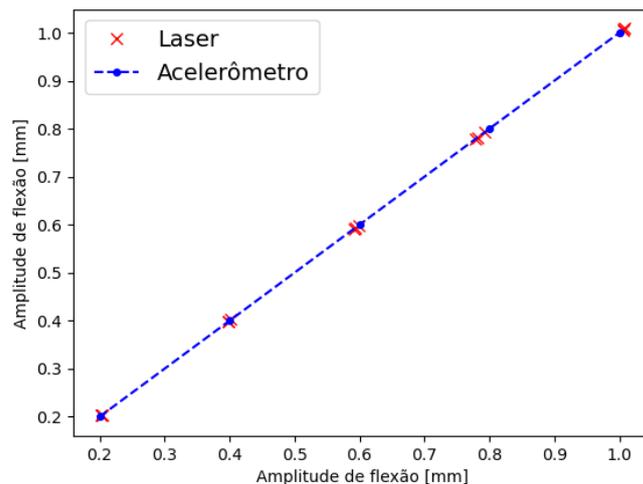


Figura 4.3: Amplitude de flexão medida pelo medidor a *laser* e pelo acelerômetro para a carga de 2414 kgf (18% da carga de ruptura).

Analisando o gráfico mostrado na Figura 4.3, pode-se perceber que os dados obtidos pelo *laser* estão bem próximos aos medidos pelo acelerômetro. Por meio da Tabela 4.2 é possível ter uma perspectiva melhor acerca do erro percentual entre as duas medições.

Tabela 4.2: Dados das amplitudes de flexão medidas pelo laser e pelo acelerômetro para a carga de 2414 kgf (18% da carga de ruptura).

Amplitude - Acelerômetro (A) [mm]	Amplitude - Laser (L) [mm]	Erro Percentual $\left(\left \frac{A-L}{L} \cdot 100 \right \right)$ [%]
0,2	0,204	1,9
	0,203	1,7
	0,202	1,1
0,4	0,402	0,6
	0,399	0,3
	0,398	0,4
0,6	0,592	1,4
	0,594	1,0
	0,598	0,3
0,8	0,778	2,8
	0,781	2,4
	0,793	0,8
1,0	1,006	0,6
	1,007	0,7
	1,009	0,9

Por meio da Tabela 4.2 conclui-se que o erro percentual entre as duas medições é muito pequeno, menor que 3%. Isso mostra que o vibrógrafo pode ser utilizado para a medição dos deslocamentos sofridos pelo cabo.

Em seguida, foi necessário analisar as deformações medidas pelos extensômetros. Foram utilizados 9 extensômetros no total, 3 localizados no centro do grampo, 3 no fim das sapatas metálicas (distantes 70 mm do centro do grampo) e 3 no último ponto de contato (UPC) entre o cabo e os elastômeros (distantes 102 mm do centro do grampo), conforme a Figura 3.10. Devido a isso, foram realizadas duas análises. A primeira foi feita utilizando, dentre cada conjunto de 3 extensômetros, o valor máximo medido. Já a segunda considera a média de cada conjunto. Além disso, foi preciso transformar os dados de deformação (ε) em tensão de flexão (σ_f), por meio da Equação (4.2).

$$\sigma_f = E_{al} \cdot \varepsilon \cdot 10^{-6} \quad (4.2)$$

Com as tensões de flexão calculadas, obteve-se o seguinte resultado:

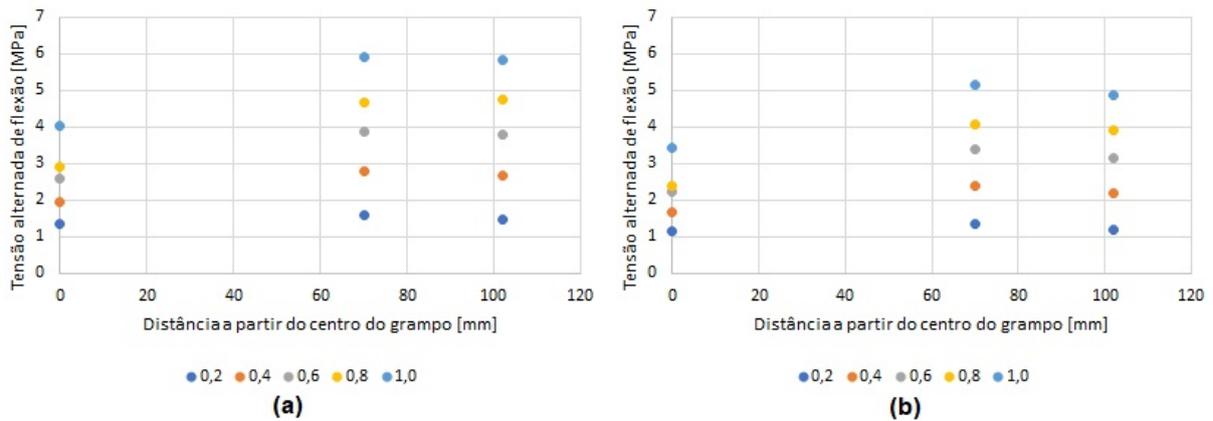


Figura 4.4: Tensões de flexão medidas pelos acelerômetros nos ensaios com carga de 18% da CRT. Dados obtidos dos valores máximos **(a)** e das médias **(b)**.

Por meio da análise da Figura 4.4, percebe-se que as tensões de flexão, no interior do grampo, aumentam conforme se distanciam do centro do grampo e atingem o ápice no ponto referente ao fim das sapatas metálicas. Ao atingirem o último ponto de contato entre o cabo e o grampo, no fim dos elastômeros, porém, essas tensões reduzem um pouco, mas ainda mantêm-se elevadas. Esse comportamento também foi observado por Miranda *et al.* (2021), que afirma que a máxima tensão de flexão, para amplitudes de flexão menores que 3 mm, foi medida na borda das sapatas metálicas.

Posteriormente, utilizou-se a Equação de Poffenberger-Swart (Equação (2.12)) para um novo cálculo da tensão alternada de flexão. Nesse cálculo, foram utilizados 3 valores diferentes para o x . O primeiro ($x = 234$ mm) refere-se à distância entre o ponto de medição (localizado no primeiro ponto de contato entre o cabo e as varetas preformadas) e o centro do grampo. Já no segundo valor ($x = 164$ mm) utiliza-se o fim das sapatas metálicas como ponto de referência. Por fim, no último valor ($x = 132$ mm), adota-se a distância entre o ponto de medição e o último ponto de contato entre o cabo e o grampo. A Figura 4.5 apresenta um esquema dessas distâncias. É importante ressaltar que o acelerômetro, que é mostrado na figura, realiza a medição no mesmo

ponto do medidor a *laser*.

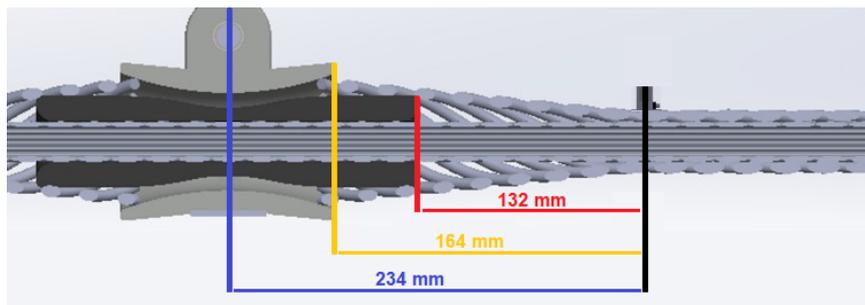


Figura 4.5: Distâncias utilizadas no cálculo da Equação de Poffenberger-Swart (Equação 2.12) (modificado de Miranda *et al.* (2021)).

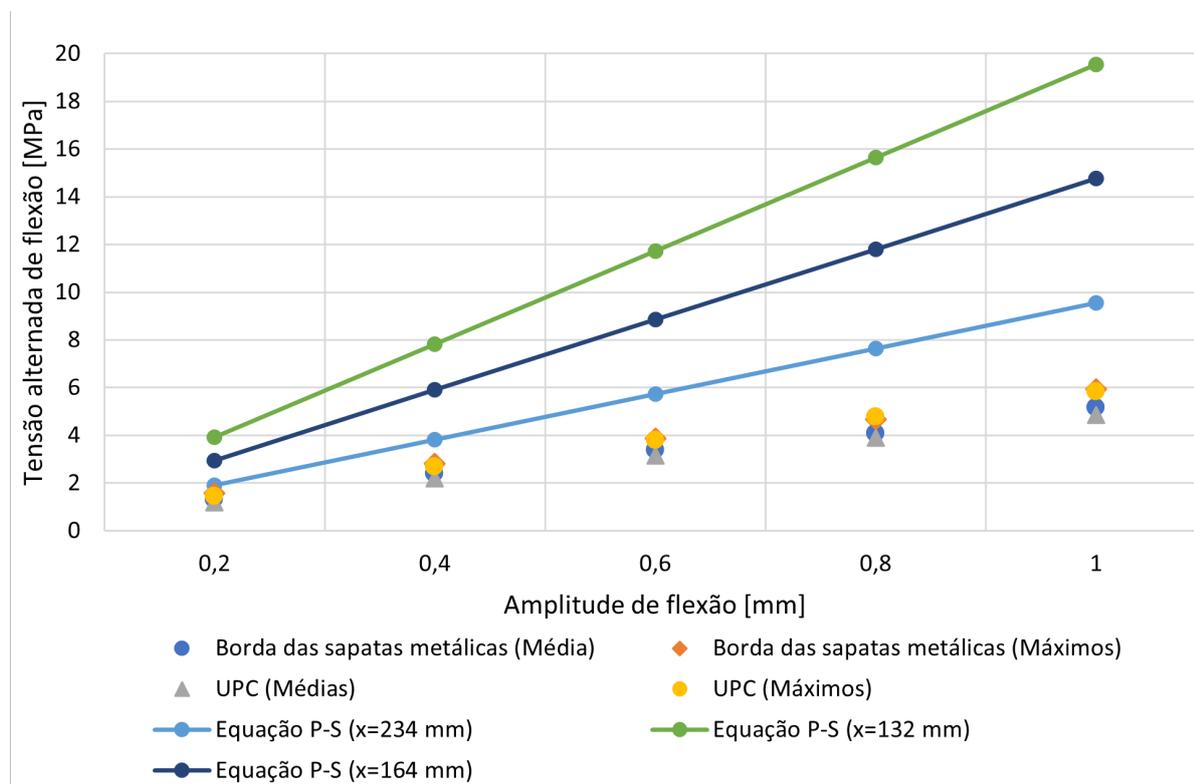


Figura 4.6: Comparação entre as tensões de flexão medidas pelos extensômetros com as calculadas pela Equação de Poffenberger-Swart nos ensaios com carga de 18% da CRT.

Analisando a Figura 4.6 e comparando os valores obtidos através da Equação de Poffenberger-Swart com os adquiridos pelos extensômetros, constata-se que os dados calculados com $x = 234$ mm (distância entre o ponto de medição do *laser* e o centro do grampo) na Equação P-S são os que apresentam a maior proximidade com os valores máximos medidos pelos extensômetros na borda das sapatas metálicas. A Tabela 4.3 apresenta a diferença percentual entre essas medidas.

Tabela 4.3: Comparação entre as tensões alternadas de flexão medidas pelos extensômetros na borda das sapatas metálicas com as calculadas pela Equação de Poffenberger-Swart com $x = 234$ mm nos ensaios com carga de 18% da CRT.

Amplitude de flexão [mm]	Tensão alternada de flexão Equação P-S (P) [MPa]	Tensão alternada de flexão Borda - Máximos (M) [MPa]	Diferença Percentual $\left(\left \frac{P-M}{M}\right \cdot 100\right)$ [%]
0,2	1,913	1,570	21,8
0,4	3,826	2,803	36,5
0,6	5,739	3,883	47,8
0,8	7,652	4,684	63,4
1,0	9,565	5,929	61,3

Por meio da Tabela 4.3, verifica-se que os resultados da Equação P-S e dos extensômetros na borda da sapata metálica, apesar de serem os mais próximos, possuem uma primeira diferença percentual considerável. E, conforme a amplitude de flexão aumenta, a diferença percentual tende a crescer também. Para esse caso, a diferença percentual média é de 46,2%.

Utilizando esses dois conjuntos de resultados, pode-se fazer uma nova comparação, adicionando os dados medidos pela Equação de Poffenberger-Swart (Equação (2.12)) com o uso do método de correção dado pela Equação (2.16). Nesse método, empregou-se $x = 132$ (distância entre o UPC e o ponto de medição, conforme a Figura 4.5) na Equação (2.16) e multiplicou-se todas as amplitudes de flexão por esse termo. Os dados são mostrados na Figura 4.7.

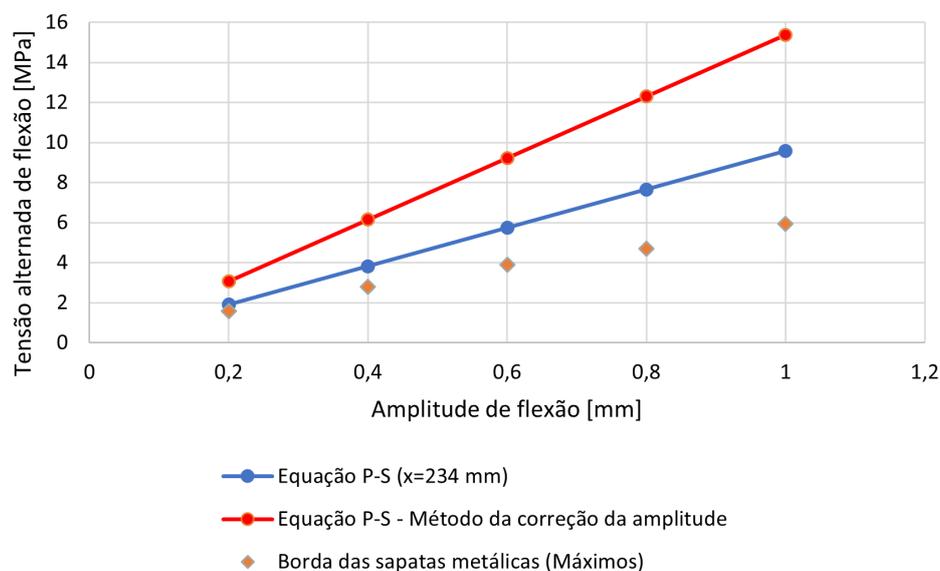


Figura 4.7: Comparação entre as tensões de flexão calculadas pela Equação de Poffenberger-Swart com a medida pelo extensômetro na borda das sapatas metálicas nos ensaios com carga de 18% da CRT.

Com base na Figura 4.7, verifica-se que os resultados da Equação de Poffenberger-Swart calculados com base no método da correção da amplitude ficaram bem distantes dos demais valores. Isso evidencia que o método baseado na criação de um UPC "virtual" no centro do grampo apresenta resultados melhores, uma vez que seus valores estão mais próximos dos dados obtidos pelos

extensômetros.

Após o estudo dos dados provenientes dos ensaios com a carga de 2414 kgf (equivalente a 18% da carga de ruptura do cabo), realizou-se uma nova etapa de ensaios, aplicando uma carga de 2022 kgf, aproximadamente igual a 15% da carga de ruptura. As frequências utilizadas nesses ensaios são mostradas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Frequências utilizadas nos ensaios com 15% da CRT.

Amplitude de flexão [mm]	Frequência [Hz]
0,2	21,53
0,4	21,53
0,6	21,53
0,8	21,41
1	21,8

A comparação entre as amplitudes medidas pelo acelerômetro e pelo medidor a *laser* para essa nova carga é mostrada na Figura 4.8.

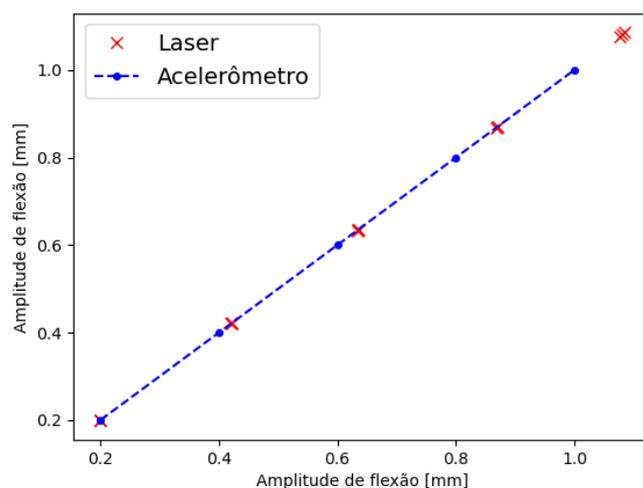


Figura 4.8: Amplitude de flexão medida pelo medidor a *laser* e pelo acelerômetro para a carga de 15% da CRT.

Por meio da análise da Figura 4.8, percebe-se que, para a amplitude de tensão de 0,2 mm, os dados medidos pelo *laser* e pelo acelerômetro continuam muito próximos. Porém, conforme a amplitude aumenta, a diferença entre as duas medições também aumenta. A Tabela 4.5 apresenta o erro percentual entre essas medições.

Tabela 4.5: Dados das amplitudes de flexão medidas pelo laser e pelo acelerômetro para a carga de 15% da CRT.

Amplitude - Acelerômetro (A) [mm]	Amplitude - Laser (L) [mm]	Erro Percentual $\left(\left \frac{A-L}{L}\right \cdot 100\right)$ [%]
0,2	0,199	0,6
	0,199	0,6
	0,199	0,7
0,4	0,421	4,9
	0,422	5,1
	0,422	5,3
0,6	0,635	5,6
	0,634	5,4
	0,633	5,3
0,8	0,868	7,9
	0,870	8,0
	0,871	8,1
1,0	1,077	7,2
	1,081	7,5
	1,085	7,9

Conforme mostrado na Figura 4.8 e na Tabela 4.5, a diferença entre os dados medidos pelo *laser* e pelo acelerômetro para a amplitude de 0,2 mm é muito pequena (menos de 1%). Porém, nas amplitudes maiores, o erro percentual aumenta. Para os deslocamentos de 0,4 mm e 0,6 mm, esse erro aumenta para aproximadamente 5% e chega a atingir 8,5% nas amplitudes de 0,8 mm e 1,0 mm. Comparando esses dados com os valores dos ensaios realizados com 18% da carga de ruptura (Tabela 4.2), constata-se que, para as amplitudes de 0,4 mm a 1 mm, o erro percentual também é maior. Acredita-se que a diminuição da carga de esticamento do cabo tenha gerado maior dificuldade do sistema de aquisição de malha fechada em manter a estabilização no nível de amplitude de flexão pré-estabelecido, aumentando o erro entre a amplitude de flexão pré-estabelecida medida pelo acelerômetro e a medida pelo *laser*. Isso foi observado pelos maiores períodos de tempo necessários para a estabilização dos ensaios.

Em seguida, utilizando os dados de deformação medidos pelos extensômetros, obtém-se os resultados mostrados na Figura 4.9.

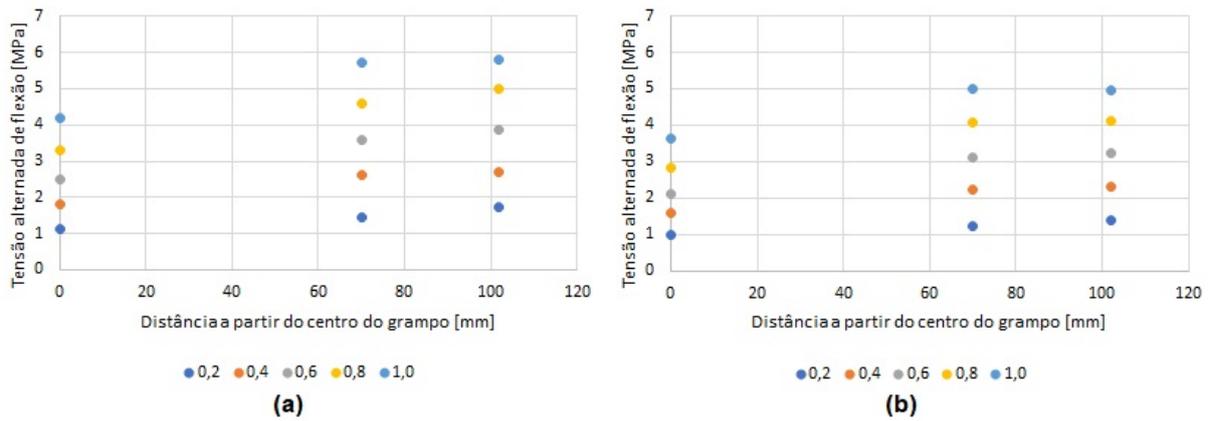


Figura 4.9: Tensões de flexão medidas pelos acelerômetros nos ensaios com carga de 15% da CRT. Dados obtidos dos valores máximos (a) e das médias (b).

Analisando a Figura 4.9, nota-se um comportamento das tensões alternadas de flexão diferente do que foi visto nos ensaios com a carga de 18% da CRT. Verifica-se que as tensões máximas observadas não ocorreram no ponto referente ao fim das sapatas metálicas, como visto no primeiro conjunto de ensaios, mas sim no último ponto de contato entre o cabo e o grampo. Portanto, nesse conjunto de ensaios com a carga de 15% da CRT, o ponto mais crítico é o UPC. Acredita-se que essa discrepância possa ter sido causada pelo fato de que os extensômetros não foram reinstalados durante o retensionamento do cabo, podendo ter ocasionado uma alteração no posicionamento dos mesmos em relação à posição do grampo.

Utilizando a Equação de Poffenberger-Swart (Equação (2.12)) nesse novo conjunto de ensaios com carga de 15% da CRT, obteve-se o resultado mostrado na Figura 4.10.

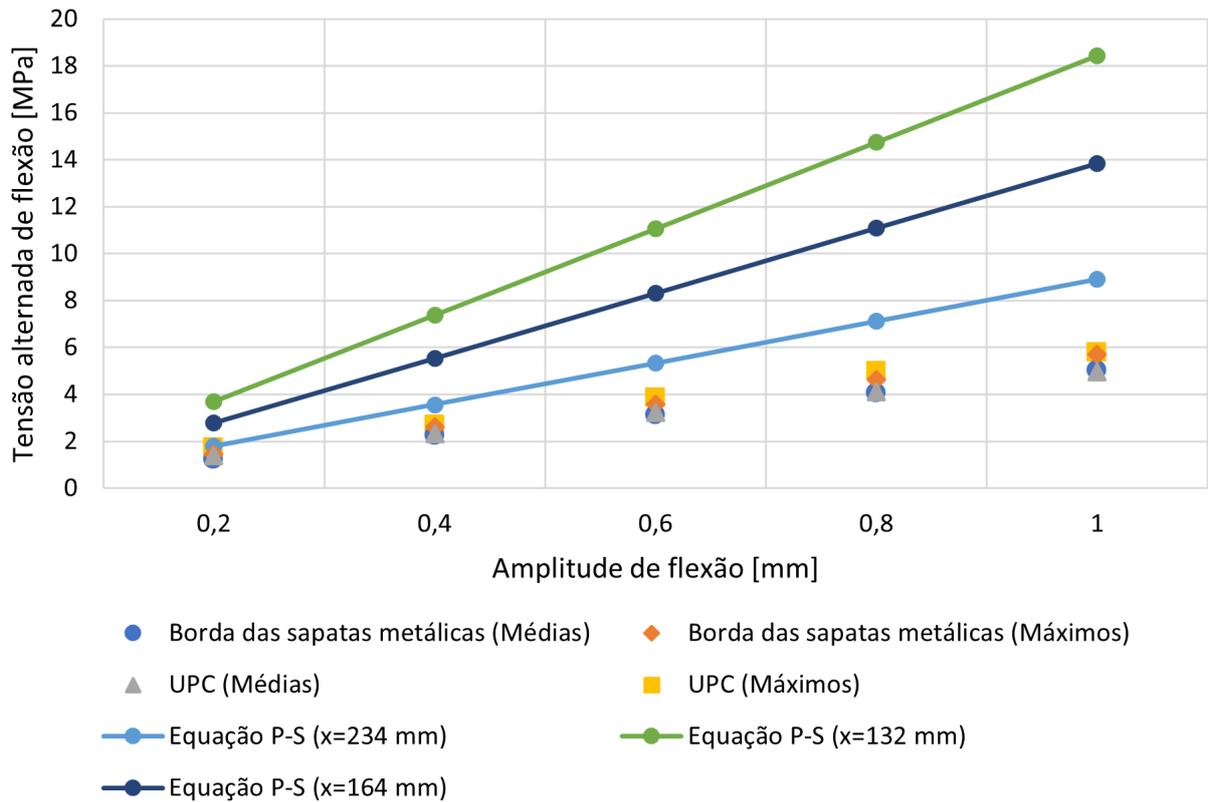


Figura 4.10: Comparação entre as tensões alternadas de flexão medidas pelos extensômetros com as calculadas pela Equação de Poffenberger-Swart nos ensaios com carga de 15% da CRT.

Com base na Figura 4.10, percebe-se que os dados calculados com $x = 234$ mm (distância do ponto de medição ao centro do grampo) na Equação P-S são os que apresentam a maior proximidade com os maiores valores medidos pelos extensômetros no UPC. A Tabela 4.6 apresenta a diferença percentual entre essas medidas.

Tabela 4.6: Comparação entre as tensões alternadas de flexão medidas pelos extensômetros no UPC com as calculadas pela Equação de Poffenberger-Swart com $x = 234$ mm nos ensaios com carga de 15% da CRT.

Amplitude de flexão [mm]	Tensão alternada de flexão Equação P-S (P) [MPa]	Tensão alternada de flexão Borda - Máximos (M) [MPa]	Diferença Percentual $\left(\left \frac{P-M}{M} \right \cdot 100 \right)$ [%]
0,2	1,780	1,725	3,2
0,4	3,561	2,693	32,2
0,6	5,341	3,865	38,2
0,8	7,121	5,003	42,3
1,0	8,902	5,793	53,7

Com o auxílio da Tabela 4.6, constata-se que a comparação entre os resultados da Equação P-S e os dos extensômetros no UPC começa com uma diferença percentual pequena, para a amplitude de flexão de 0,2 mm. Porém, conforme a amplitude aumenta, a diferença percentual também

aumenta, apresentando a mesma tendência observada nos testes realizados com 18% da carga de ruptura, cujos resultados são mostrados na Tabela 4.3. Nesse caso, a diferença percentual média é de 33,9%, um pouco menor da média calculada no primeiro conjunto de ensaios.

Por fim, realizou-se uma comparação entre as tensões de flexão obtidas pelos extensômetros nos 2 ensaios, de acordo com a amplitude de tensão.

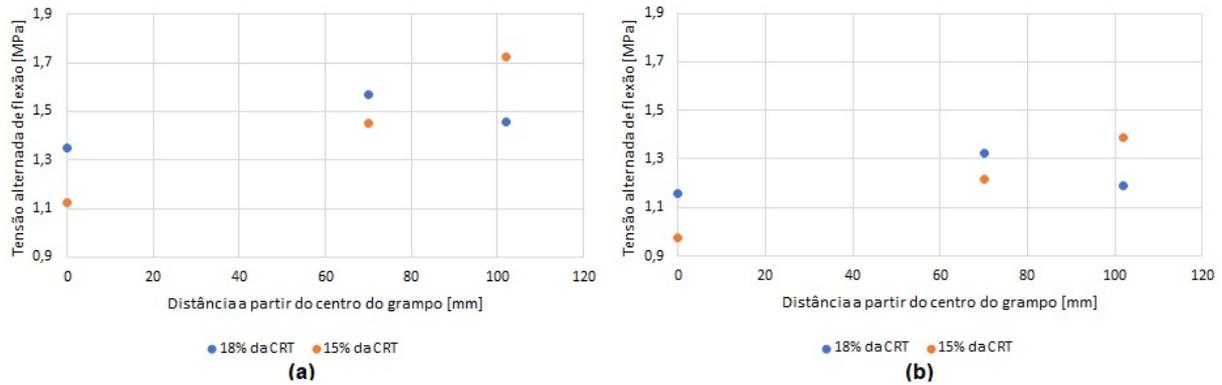


Figura 4.11: Tensões de flexão medidas pelos extensômetros nos ensaios com amplitude de flexão de 0,2 mm e com cargas de 18% e 15% da CRT, respectivamente. Dados obtidos dos valores máximos (a) e das médias (b).

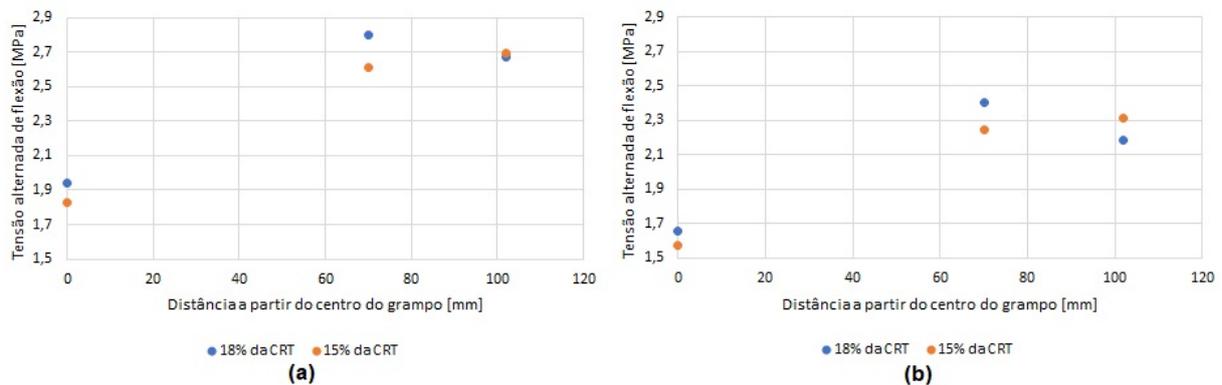


Figura 4.12: Tensões de flexão medidas pelos extensômetros nos ensaios com amplitude de flexão de 0,4 mm e com cargas de 18% e 15% da CRT, respectivamente. Dados obtidos dos valores máximos (a) e das médias (b).

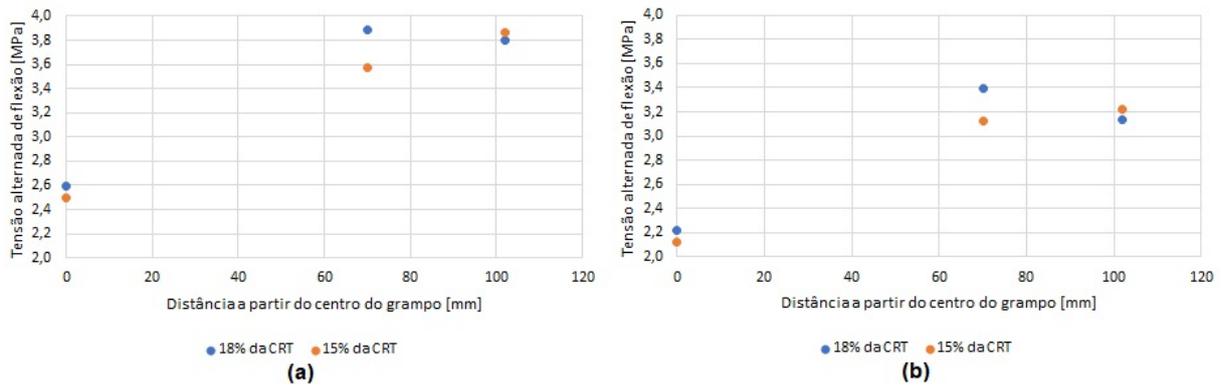


Figura 4.13: Tensões de flexão medidas pelos extensômetros nos ensaios com amplitude de flexão de 0,6 mm e com cargas de 18% e 15% da CRT, respectivamente. Dados obtidos dos valores máximos (a) e das médias (b).

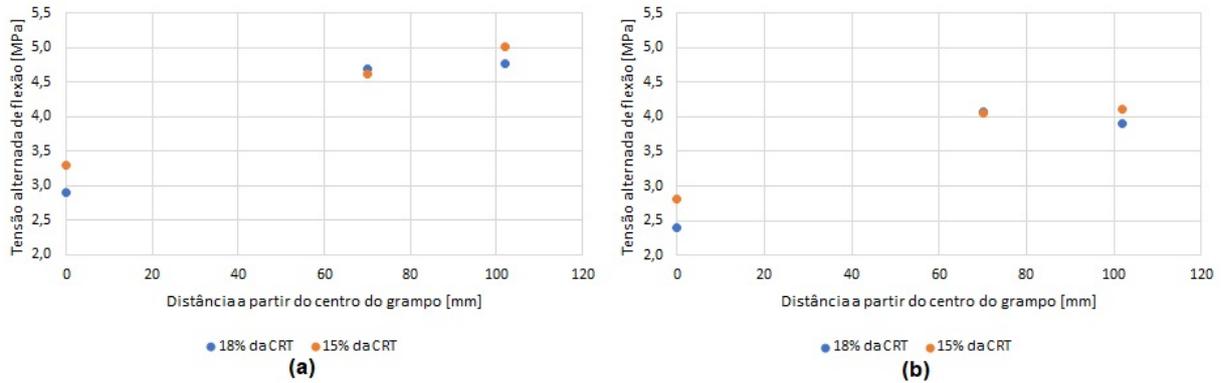


Figura 4.14: Tensões de flexão medidas pelos extensômetros nos ensaios com amplitude de flexão de 0,8 mm e com cargas de 18% e 15% da CRT, respectivamente. Dados obtidos dos valores máximos (a) e das médias (b).

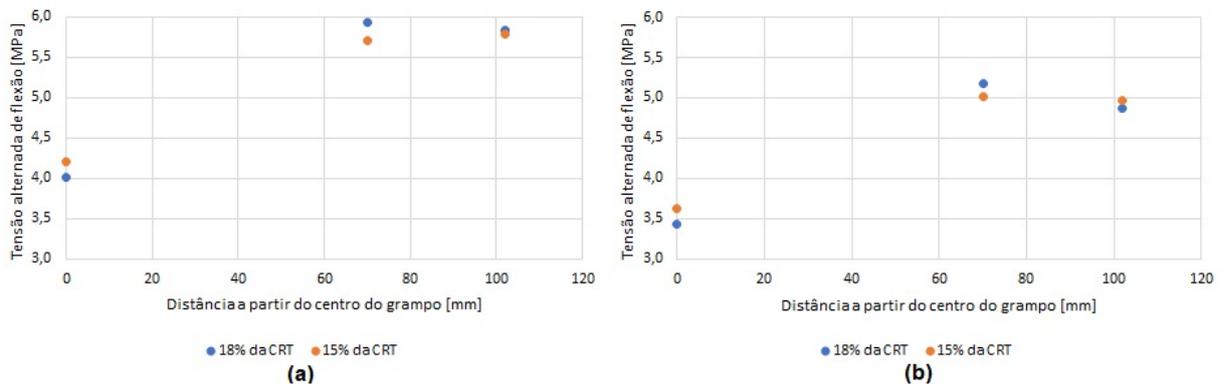


Figura 4.15: Tensões de flexão medidas pelos extensômetros nos ensaios com amplitude de flexão de 1,0 mm e com cargas de 18% e 15% da CRT, respectivamente. Dados obtidos dos valores máximos (a) e das médias (b).

Por meio dessas comparações, percebe-se nitidamente uma diferença no comportamento das tensões de flexão medidas nos dois conjuntos de ensaios. Nos ensaios com a carga de 18% da CRT, nota-se que as tensões são pequenas no centro do grampo, atingem o ápice no fim das sapatas metálicas e depois reduzem um pouco no último ponto de contato. Já nos ensaios com a carga de 15% da CRT, a tensão continua baixa no centro do grampo, aumenta ao atingir o fim das sapatas metálicas e aumenta novamente no UPC, atingindo o ápice. Portanto, para a carga de 18%, o ponto mais crítico é no fim das sapatas metálicas, enquanto que, para a de 15%, é o último ponto de contato entre o cabo e o grampo. A Tabela 4.7 apresenta os dados desses ensaios e as diferenças percentuais entre eles.

Tabela 4.7: Tensões alternadas de flexão [MPa] medidas pelos extensômetros nos ensaios com carga de 18% e 15% da CRT.

Amplitude de tensão de 0,2 mm						
Tensão alternada de flexão [MPa]	Distância do centro do grampo [mm]					
	Máximos			Médias		
Carga [kgf]	0	70	102	0	70	102
2414 (18% da carga de ruptura)	1,347	1,570	1,455	1,156	1,326	1,190
2022 (15% da carga de ruptura)	1,126	1,454	1,725	0,975	1,215	1,389
Diferença Percentual [%]	19,6	8	-15,6	18,6	9,2	-14,3
Amplitude de tensão de 0,4 mm						
Tensão alternada de flexão [MPa]	Distância do centro do grampo [mm]					
	Máximos			Médias		
Carga [kgf]	0	70	102	0	70	102
2414 (18% da carga de ruptura)	1,942	2,803	2,672	1,658	2,404	2,184
2022 (15% da carga de ruptura)	1,830	2,611	2,693	1,570	2,244	2,315
Diferença Percentual [%]	6,1	7,3	-0,8	5,6	7,1	-5,7
Amplitude de tensão de 0,6 mm						
Tensão alternada de flexão [MPa]	Distância do centro do grampo [mm]					
	Máximos			Médias		
Carga [kgf]	0	70	102	0	70	102
2414 (18% da carga de ruptura)	2,599	3,883	3,803	2,215	3,392	3,135
2022 (15% da carga de ruptura)	2,501	3,576	3,865	2,124	3,129	3,222
Diferença Percentual [%]	3,9	8,6	-1,6	4,3	8,4	-2,7
Amplitude de tensão de 0,8 mm						
Tensão alternada de flexão [MPa]	Distância do centro do grampo [mm]					
	Máximos			Médias		
Carga [kgf]	0	70	102	0	70	102
2414 (18% da carga de ruptura)	2,905	4,684	4,768	2,393	4,077	3,909
2022 (15% da carga de ruptura)	3,299	4,611	5,003	2,821	4,062	4,119
Diferença Percentual [%]	-12,0	1,6	-4,7	-15,2	0,4	-5,1
Amplitude de tensão de 1,0 mm						
Tensão alternada de flexão [MPa]	Distância do centro do grampo [mm]					
	Máximos			Médias		
Carga [kgf]	0	70	102	0	70	102
2414 (18% da carga de ruptura)	4,012	5,929	5,843	3,437	5,170	4,865
2022 (15% da carga de ruptura)	4,209	5,707	5,793	3,627	5,008	4,974
Diferença Percentual [%]	-4,7	3,9	0,9	-5,2	3,2	-2,2

Com base na Tabela 4.7, confirma-se a diferença no comportamento das tensões obtidas nos dois conjuntos de ensaios. Os ensaios com 18% da carga de ruptura apresentam, como ponto crítico, a borda das sapatas metálicas, enquanto que, nos ensaios com 15% da carga de ruptura, esse ponto crítico é o UPC. Também constata-se que, para todos os testes, as maiores tensões na borda das sapatas metálicas foram medidas com a carga de 18% da CRT. Já no UPC, os maiores valores foram obtidos com a carga de 15% da CRT. A diferença percentual ajuda a visualizar essas afirmações, uma vez que um valor positivo dessa grandeza indica que a tensão medida com 18% da CRT é maior que a obtida com 15%. Um valor negativo da diferença percentual aponta, portanto, o contrário. Além disso, nota-se que, para a amplitude de flexão de 0,2 mm, a diferença percentual está um pouco elevada e que, para amplitudes maiores, a partir de 0,4 mm, essa diferença diminui.

Capítulo 5

Conclusão

As principais conclusões desse trabalho são as seguintes:

- Os deslocamentos medidos pelo vibrógrafo para a carga de esticamento de 18% da CRT ficaram muito próximos dos deslocamentos medidos pelo acelerômetro, no qual a diferença máxima observada foi de 2,8%, demonstrando que o protótipo de vibrógrafo apresentou acurácia satisfatória para a medição das amplitudes de flexão do condutor. Porém, para o nível de 15% da CRT, as diferenças encontradas foram da ordem de 8% nas amplitudes de flexão de 0,4 a 1,0 mm. Esse fato pode ser justificado pela dificuldade de estabilização dos ensaios para uma menor carga de esticamento, uma vez que o tempo de estabilização foi bem maior que nos demais testes realizados.
- A distribuição de tensões no interior do grampo apresentou comportamento distinto para as duas cargas de esticamento estudadas. Para a carga de esticamento de 18% da CRT, as tensões máximas observadas localizaram-se na posição correspondente a borda das sapatas metálicas, resultado semelhante ao encontrado por Miranda *et al.* (2021). Por sua vez, para a carga de esticamento de 15% da CRT, a localização das máximas tensões no grampo ocorreu no último ponto de contato entre o cabo e o grampo (UPC). No entanto, essa diferença pode ter sido provocada pelo fato de que os extensômetros não foram reinstalados após o retensionamento do condutor, o que pode ter causado a mudança da posição dos extensômetros em relação ao grampo.
- Com relação a utilização da Equação de Poffenberger-Swart, duas estratégias foram utilizadas para aproximar as tensões calculadas pela equação e as tensões medidas por meio dos extensômetros: a primeira considera corrigir as amplitudes medidas para a medida padrão de 89 mm e a segunda utiliza um UPC "virtual", cuja distância corresponde a distância entre o ponto de medição e o centro do grampo, no caso em questão $x = 234$ mm. A segunda estratégia apresentou melhores resultados, onde os erros médios encontrados foram de 46% e 34%, para 18% e 15% da CRT, respectivamente. Verificou-se, também, que esses erros são menores para pequenas amplitudes de flexão e crescem para maiores níveis de amplitudes de flexão. Para a carga de esticamento de 18% da CRT, os erros iniciam-se em cerca de 20%

para menores níveis, atingindo cerca de 60% para as maiores amplitudes. Por sua vez, para a carga de esticamento de 15% da CRT, os erros iniciam-se em cerca de 3% para as menores amplitudes, atingindo cerca de 53% para as maiores amplitudes.

Por fim, é importante destacar que o desenvolvimento do presente trabalho apontou novos caminhos para pesquisas futuras. Nesse sentido, recomenda-se investigar, através de modelagens numéricas, as tensões máximas no condutor montado em grampo tipo AGS no sentido de encontrar alternativas para a diminuição dos erros entre as tensões medidas experimentalmente e aquelas encontradas a partir da Equação de Poffenberger-Swart, de modo a melhorar as estimativas de vida à fadiga feitas a partir de vibrógrafos. Além disso, estudos podem ser conduzidos para o desenvolvimento de vibrógrafos baseados na medição da amplitude de flexão invertida, princípio de medição semelhante ao utilizado pelos vibrógrafos modelo PAVICA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, R. F. M. *Fadiga em Cabos Condutores Tipo CAL Dispostos em Feixe Duplo Vertical - Um Estudo de Caso para uma Linha de Transmissão de 230 KV*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013.

ALUBAR METAIS E CABOS S.A. *FICHA DE CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS - Cabo Alumínio Liga 6201 (CAL.)*. Brasil, 2013.

AMARANTE, O. A. C.; ZACK, J.; BROWER, M.; Sá, A. L. *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*. Brasília, 2001.

BAUMER. *Distance Sensors OADM 12U6430/S35A*. Switzerland, 2020.

BELLORIO, M. B. *Revisão sobre Critérios de Fadiga para Cabos Condutores de Energia e Uso de Metodologia para Estimativa de sua Vida Remanescente*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2009.

BLEVINS, R. D. *Flow-Induced Vibration*. Second edition. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company, 2001. Original-date: 1990.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2012.

CIGRE. Overhead lines. *International Council on Large Electric Systems (CIGRE) Study Committee B2: Overhead Lines*, Springer Reference, 2017.

CIGRÉ SC22-WG04. *Guide for Endurance Tests of Conductors inside Clamps*. [S.l.], 1985.

CIGRÉ SC22-WG11. *Guide to Vibration Measurements On Overhead Lines*. [S.l.], 1995.

COSMAI, U. *Assessment of Aeolian Vibration Severity*. Bangkok, 2009.

EPRI. *EPRI Transmission Line Reference Book: Wind-Induced Conductor Motion*. 2. ed. Palo Alto, CA, 2006. 1012317.

EXCEL. *EXTENSÔMETROS COLÁVEIS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA - MODELOS UNIDIRECIONAIS ESTREITOS*. São Paulo, Brasil, 2021.

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)*. Tese (Doutorado) — Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.

FORJASUL. *MATERIAIS ELÉTRICOS PROGRAMA 2012/2013*. RS, Brasil, 2012.

FORJASUL. *TRANSMISSÃO DISTRIBUIÇÃO REDES*. RS, Brasil, 2017.

- GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A.; ..., . *Ensaio dos Materiais*. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2012.
- GFFM. *DETERMINAÇÃO DA CURVA DE WÖHLER (S-N) DO CABO DE ALUMÍNIO LIGA 1120 DO TIPO SILICON*. Universidade de Brasília - UnB, Brasília, DF, 2020.
- GOMES, F. B. *Análise Comparativa de Aparelhos para Medição de Vibração em Cabos Condutores de Energia e Cálculo da Vida Remanescente em Cabos*. Monografia (Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2015.
- HARDY, C.; BRUNELLE, J. *Principles of Measurement and Analysis with the New PAVICA Conductor Vibration Recorder*. Toronto, 1991.
- HENRIQUES, A. M. D. *Bancada de Ensaios Mecânicos à Fadiga de Cabos Condutores de Energia*. Tese (Doutorado) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006.
- IEEE Guide for Aeolian Vibration Field Measurement of Overhead Conductors. *IEEE Std 1368-2006*, p. 1–35, 2006.
- MIRANDA, T.; BADIBANGA, R.; ARAUJO, J. A.; SILVA, C.; VELOSO, L. A.; FERREIRA, J. Effect of suspension clamp types on the dynamic bending stress of all aluminium 1120 overhead conductors. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Brasília, Brasil, 2021.
- NASCIMENTO, W. R.; Bú, M. T.; MIOTTO, F.; REZENDE, K. E.; PELEGRINI, G. A. A produção da energia elétrica e a impotência das usinas hidrelétricas. *Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC*, Palmas, Tocantins, Brasil, 2019.
- NOGUEIRA, C. T. *Previsão de Vida de Fadiga de Cabos Condutores Submetidos a Vibrações Eólicas Utilizando a Ferramenta Espectral*. Monografia (Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2017.
- OLIVEIRA, M. C. *Desenvolvimento de um Vibrógrafo para Medir e Armazenar Dados de Vibração de Cabos de Transmissão de Energia Elétrica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013.
- PFISTERER. *VIBREC500 Recorders*. Switzerland, 2020.
- PLP BRASIL. *Grampo de Suspensão Armado*. Brasil, 2016.
- PLP BRASIL. *Produtos e Soluções para Linhas de Transmissão de Energia Elétrica de Alta e Extra-Alta Tensão*. Brasil, 2019.
- POFFENBERGER, J. C.; SWART, R. L. Differential displacement and dynamic conductor strain. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 84, n. 4, p. 281–289, 1965.
- REPORT, I. C. Standardization of conductor vibration measurements. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-85, n. 1, p. 10–22, 1966.
- ROCTEST. *Transmission Line Vibration Recorder and Analyser Model PAVICA*. Australia, 2005.
- SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G.; MEN, m. *Projeto de Engenharia Mecânica*. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.
- VILELA, T. S. V. *Avaliação Comparativa da Validade da Fórmula de Poffenberger-Swart na Determinação de Tensões Flexurais para Diferentes Condutores de Energia*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013.

WATANABE, L. *Análise da Vida à Fadiga de Cabos Condutores de Energia Submetidos à Carregamentos Aleatórios*. Tese (Doutorado) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2014.