



**AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DE EMENDAS  
PRÉ-FORMADAS PARA CABOS CONDUTORES  
SOB VIBRAÇÃO**

**ANA CAROLINA SPÍNDOLA CUTRIM DE SENA**

**PROJETO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DE EMENDAS  
PRÉ-FORMADAS PARA CABOS CONDUTORES SOB  
VIBRAÇÃO**

**ANA CAROLINA SPÍNDOLA CUTRIM DE SENA**

**Orientador: PROF. DR. José Alexander Araújo**

**PROJETO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**PUBLICAÇÃO ENM.PG**

**BRASÍLIA-DF, 06 DE OUTUBRO DE 2022.**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DE EMENDAS  
PRÉ-FORMADAS PARA CABOS CONDUTORES SOB  
VIBRAÇÃO**

**ANA CAROLINA SPÍNDOLA CUTRIM DE SENA**

**PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO  
MECÂNICO.**

**APROVADO POR:**

**PROF. DR. José Alexander Araújo  
Orientador**

**PROF. DR. Jorge Luiz de Almeida Ferreira  
Examinador**

**DR. Remy Badibanga Kalombo  
Examinador**

**BRASÍLIA-DF, 06 DE OUTUBRO DE 2022.**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

ANA CAROLINA SPÍNDOLA CUTRIM DE SENA

**AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DE EMENDAS PRÉ-FORMADAS PARA CABOS CONDUTORES SOB VIBRAÇÃO**

**2022, 61p., 201x297 mm**

(ENM/FT/UnB, Engenheiro Mecânico, Engenharia Mecânica, 2022)

Projeto de Graduação - Universidade de Brasília

Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

SENA, A. C. S. C. (2022). AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DE EMENDAS PRÉ-FORMADAS PARA CABOS CONDUTORES SOB VIBRAÇÃO. Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 61p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

AUTOR: ANA CAROLINA SPÍNDOLA CUTRIM DE SENA

TÍTULO: AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DE EMENDAS PRÉ-FORMADAS PARA CABOS CONDUTORES SOB VIBRAÇÃO.

GRAU: Engenheiro Mecânico      ANO: 2022

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste projeto de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor se reserva a outros direitos de publicação e nenhuma parte deste projeto de graduação pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

ANA CAROLINA SPÍNDOLA CUTRIM DE SENA

acspindolacs@gmail.com

# AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a Deus por ter me concedido ingressar neste curso na Universidade de Brasília e por estar finalmente concluindo-o. Desde o início foram muitos desafios e Ele sempre me sustentou e capacitou. Sou muito grata pela realização deste grande sonho que é tornar-me bacharela em engenharia mecânica. A Ele seja a Honra e Glória!

Aos meus pais, Valman e Patrícia, que desde sempre acreditaram na minha capacidade de alcançar esta conquista. Sem dúvidas, se não fosse pelo incentivo e investimento deles, jamais estaria aqui. Não tenho palavras pra expressar minha gratidão e amor a eles! Espero um dia conseguir retribuir todo amor e dedicação que recebi.

Ao meu esposo, Vinicius, por todo suporte, paciência e incentivo durante estes quase dez anos de relacionamento, sendo vários deles na Universidade. Em todos os momentos ele acreditou em mim e isso fez toda a diferença. Meu maior motivador. Obrigada!

Agradeço ao Dr. Remy e ao Me. Ricardo por todos os ensinamentos e por tanta ajuda no Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores. Sem eles, com certeza, a realização deste trabalho não teria sido possível. Sou muito grata por tudo!

Ao Prof. D. Phil Alex pela orientação, ensinamentos e todo o suporte durante os dois últimos semestres. Antes deste Projeto já tinha uma grande admiração por ele. Conhecendo mais de perto seu trabalho, o admiro ainda mais. Desejo todo sucesso! Muito obrigada.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho é analisar a integridade de emendas pré-formadas usadas na união de cabos condutores sob regime de vibração eólica. Por meio de ensaios de vibração será verificado, em diferentes níveis do regime de vibração eólica, se ocorrerá a falha por escorregamento na interface condutor/emenda. Além disso, pretende-se determinar qual o espaçamento (*gap*) existente entre as varetas da emenda considerando suas tolerâncias dimensionais, uma vez que, espaçamentos demasiadamente pequenos podem contribuir para a falha por deslizamento em emendas. Sendo assim, este Projeto de Graduação contribuirá para o melhor entendimento dos fatores mecânicos que podem levar a este tipo de falha em emendas pré-formadas.

**Palavras-chaves:** Cabo condutor. Vibração eólica. Emenda pré-formada. Escorregamento de emenda.

## ABSTRACT

This work's objective is to analyze the integrity of preformed splices joining conductor cables in aeolian vibration regime. By means of vibration tests, it will be verified, at different levels of the aeolian vibration regime, if there is a failure of the preformed splice due to slipping at the splice/cable interface. Furthermore, it is intended to determine the spacing (*gap*) between the splice rods considering their dimensional tolerances, being that, too small spacings can contribute to failure due to slippage in splices. Therefore, this Graduation Project will contribute to a better understanding of the mechanical factors that can lead to this type of failure in preformed splices.

**Keywords:** Overhead conductor. Aeolian vibration. Preformed splice. Slippage of splices.

# LISTA DE FIGURAS

1.1	Regime de ventos no território brasileiro (CEPEL, 2017). . . . .	2
1.2	Manutenção em linha de transmissão energizada (MEDRAL, 2022). . . . .	3
2.1	Esteira de vórtices de Von Karman (OLIVEIRA, 2013). . . . .	6
2.2	Perfis aerodinâmicos típicos de condutores congelados (FAN; JIANG, 2018). . . . .	7
2.3	Oscilações de subvão em feixe duplo (OLIVEIRA, 2013). . . . .	8
2.4	Exemplo construção cabo condutor (VWCABLE; CABLE, 2022). . . . .	9
2.5	Modos de vibração em corda tensionada (EPRI, 2006) . . . . .	11
2.6	Emendas pré-formadas não instaladas (AFL, 2022). . . . .	12
2.7	Exemplos de instalação de emenda: a) Folgas igualmente espaçadas entre as varetas; b) Folga concentrada apenas em um local do conjunto; c) Sobreposição de varetas; d) Todas as varetas em contato entre si (EPRI (2006) - modificado). . . . .	12
2.8	Esquema de montagem do grampo de suspensão junto ao condutor com exemplificação do local de medição do $Y_b$ (Oliveira, 2013). . . . .	14
2.9	Montagem grampo e condutor, com quebras nos fios, em linha de transmissão (HORTÊNCIO, 2009) - com modificações. . . . .	15
2.10	Pontos de contato entre os fios e grampo (VIEIRA, 2019). . . . .	16
2.11	Marcas desenvolvidas devido ao <i>fretting</i> (GOMES, 2015). . . . .	16
2.12	Cabo condutor com quebras por fadiga e grampo de suspensão após desmontagem com pó gerado devido ao <i>fretting</i> (BADIBANGA, 2017). . . . .	17
3.1	Modos de vibração do condutor. . . . .	20
3.2	Representação esquemática da bancada de ensaio com o condutor e emenda instalados. . . . .	22
3.3	Grampos de ancoragem utilizados nos ensaios. . . . .	23
3.4	Grampo de ancoragem utilizado nos ensaios. . . . .	23
3.5	Célula de carga. . . . .	24
3.6	Dispositivos do mecanismo excitador. . . . .	24
3.7	Emenda pré-formada antes da instalação. . . . .	25
3.8	Acelerômetros utilizados durante os experimentos. . . . .	26
3.9	Extensômetro e aquisitor. . . . .	27
3.10	Lasers utilizados para detecção das quebras e contagem de ciclos. . . . .	28
3.11	Polias de sustentação do condutor e bobina. . . . .	28
3.12	Distância entre as pontas do condutor dentro da emenda. . . . .	29
3.13	Extremidade da emenda pintada em tinta <i>spray</i> preta. . . . .	30



3.14	Comparação da superfície lixada com a não lixada para colagem de extensômetro. . . . .	31
3.15	Compressão do extensômetro contra a superfície do cabo para colagem do dispositivo. . . . .	32
3.16	Extensômetros colados na ponta da emenda e no fio do condutor. . . . .	32
4.1	Tinta marcadora para monitoramento de deslizamentos no Ensaio 1 onde a) representa o início do ensaio e b) o fim, após 27 milhões de ciclos. . . . .	36
4.2	Espaço entre os condutores dentro das varetas para Ensaio 1. . . . .	36
4.3	Tinta marcadora para monitoramento de deslizamentos no Ensaio 2 onde a) representa o início do ensaio e b) o fim, com 6 milhões de ciclos. . . . .	38
4.4	Espaço entre os condutores dentro das varetas para Ensaio 2. . . . .	38
4.5	Posicionamento dos anti-nós do Ensaio 3. . . . .	39
4.6	Acelerômetros do Ensaio 3. . . . .	40
4.7	Marcação das pontas da emenda para Ensaio 3. . . . .	41
4.8	Posicionamento do nó e anti-nó do Ensaio 4. . . . .	42
4.9	Condutor com quebras após desmontagem do grampo - Ensaio 4. . . . .	43
4.10	Pontas da emenda após o Ensaio 4. . . . .	44
4.11	Posicionamento do nó e anti-nó no Ensaio 5 . . . . .	45
4.12	Acelerômetros do Ensaio 5. . . . .	45
4.13	Evidências das quebras dos fios do condutor do Ensaio 5. . . . .	46
4.14	Marcação das pontas da emenda do Ensaio 5. . . . .	47
4.15	Espaço entre os condutores dentro da emenda para Ensaio 5. . . . .	47
4.16	Gráfico Amplitude de Deslocamento x Frequência - Ensaio Tipo C . . . . .	49
4.17	Pontas da emenda após ensaio de varredura de frequência. . . . .	49
4.18	Modelagem no SolidWorks da emenda instalada em cabo CAL 823 MCM - dimensões em milímetros. . . . .	51
4.19	Modelagem no Catia da emenda instalada em cabo CAL 823 MCM - dimensões em milímetros. . . . .	52
4.20	Modelagem no SolidWorks da emenda instalada em cabo CAL 838 MCM - dimensões em milímetros. . . . .	53
4.21	Modelagem no Catia da emenda instalada em cabo CAL 838 MCM - dimensões em milímetros. . . . .	53

# LISTA DE TABELAS

2.1	Comparação das características dos tipos de excitação eólica (EPRI, 2006).	5
3.1	Dados das fichas técnicas dos condutores. . . . .	25
4.1	Deslocamento e velocidade no centro da emenda para Ensaio 1. . . . .	34
4.2	Deformações medidas e tensões calculadas na boca da emenda para o Ensaio 1.	35
4.3	Quebras nos fios do condutor e número de ciclos para Ensaio 1. . . . .	35
4.4	Deslocamento e velocidade no centro da emenda para Ensaio 2. . . . .	37
4.5	Deformações medidas e tensões calculadas na boca da emenda para os Ensaio 2. . . . .	37
4.6	Quebras nos fios do condutor e número de ciclos para Ensaio 2. . . . .	37
4.7	Deslocamento e velocidade nas extremidades da emenda para o Ensaio 3. . .	40
4.8	Comprimento de onda ( $\lambda$ ) para o Ensaio 3. . . . .	40
4.9	Deslocamento no centro e na ponta da emenda para Ensaio 4. . . . .	42
4.10	Quebras nos fios do condutor e número de ciclos para Ensaio 4. . . . .	43
4.11	Deslocamento e velocidade no centro e na ponta da emenda para o Ensaio 5.	45
4.12	Comprimento de onda ( $\lambda$ ) para o Ensaio 5. . . . .	46
4.13	Quebras nos fios do condutor e número de ciclos para Ensaio 3. . . . .	46
4.14	Parâmetros Utilizados no Ensaio Tipo C . . . . .	48
4.15	Especificações das medidas utilizadas na modelagem 3D do conjunto cabo/emenda. . . . .	50
4.16	<i>Gap</i> entre das varetas da emenda pré-formada instalada no cabo CAL 823 MCM. . . . .	51
4.17	<i>Gap</i> entre das varetas da emenda pré-formada instalada no cabo CAL 838 MCM. . . . .	52
5.1	Dados calculados para determinação da frequência e do comprimento de onda em função do modo $n$ para o condutor 823 MCM liga 1120 . . . . .	58

# LISTA DE SÍMBOLOS

$Re$	Número de Reynolds
$S$	Número de Strouhal
$V$	Velocidade de escoamento do fluido
$d$	Diâmetro do cilindro
$\nu$	Viscosidade cinemática do fluido
$f_s$	Frequência de formação de vórtices
$f_n$	Frequência natural
$n$	Número do modo de vibração
$L$	Comprimento do vão
$\lambda_n$	Comprimento de onda
$T$	Carga de tração do condutor
$m_L$	Massa do condutor por unidade de comprimento
$A_n$	Amplitude de vibração no anti-nó
$\sigma_a$	Amplitude de tensão dinâmica
$K$	Coefficiente de Poffenberger
$Y_b$	Amplitude de deslocamento no ponto 89
$E_a$	Módulo de elasticidade do material dos fios da camada externa do condutor
$d_f$	Diâmetro dos fios de alumínio da camada mais externa do condutor
$p$	Parâmetro de rigidez
$H$	Carga de tração do condutor
$EI$	Rigidez a flexão do condutor
$EI_{máx}$	Máxima rigidez a flexão do condutor
$EI_{mín}$	Mínima rigidez a flexão do condutor
$n_a$	Número de fios de alumínio do condutor
$n_s$	Número de fios de aço do condutor
$E_a$	Módulo de elasticidade dos fios de alumínio
$E_s$	Módulo de elasticidade dos fios de aço
$d_a$	Diâmetro dos fios de alumínio

$d_s$	Diâmetro dos fios de aço
$\epsilon_a$	Deformação devido a flexão
$Y_{CE}$	Deslocamento pico a pico no centro da emenda
$y_{CE}$	Deslocamento pico a vale no centro da emenda
$fY_{CE}$	Velocidade no centro da emenda
$Y_{PEE}$	Deslocamento pico a pico na ponta esquerda da emenda
$y_{PEE}$	Deslocamento pico a vale na ponta esquerda da emenda
$Y_{PED}$	Deslocamento pico a pico na ponta direita da emenda
$y_{PED}$	Deslocamento pico a vale na ponta direita da emenda

# SUMÁRIO

1	Introdução . . . . .	1
1.1	Contexto e Motivação . . . . .	1
1.2	Objetivo e Justificativa . . . . .	3
2	Revisão Teórica . . . . .	5
2.1	Excitações Eólicas em Cabos Condutores de Energia Elétrica . . . . .	5
2.1.1	Vibrações Eólicas . . . . .	5
2.1.2	Galope . . . . .	7
2.1.3	Oscilação de Subvão . . . . .	8
2.2	Tipos de Cabos Condutores . . . . .	8
2.3	Teoria de Cordas Vibrantes . . . . .	10
2.4	Emendas Pré-Formadas . . . . .	11
2.5	Cálculos dos Esforços Dinâmicos nos Condutores . . . . .	13
2.6	Fadiga em Cabos Condutores . . . . .	14
2.7	Estimativa de Vida em Fadiga para Cabos em Linhas de Transmissão . . . . .	17
3	Metodologia e Programa Experimental . . . . .	19
3.1	Hipótese do Efeito das Vibrações no Deslizamento Entre o Condutor e as Emendas Pré-Formadas . . . . .	19
3.2	Planejamento dos Ensaios . . . . .	19
3.3	Bancada de Ensaios . . . . .	21
3.3.1	Mecanismo de Fixação e Tracionamento do Condutor . . . . .	22
3.3.2	Mecanismo Excitador ( <i>Shaker</i> ) . . . . .	24
3.4	Cabos Condutores e Emenda Pré-Formada . . . . .	24
3.5	Dispositivos de Instrumentação . . . . .	25
3.5.1	Acelerômetros . . . . .	25
3.5.2	Extensômetros . . . . .	26
3.5.3	Laser para Detecção de Quebra dos Fios . . . . .	27
3.6	Procedimentos . . . . .	28
3.6.1	Montagem do Cabo na Bancada . . . . .	28
3.6.2	Instrumentação . . . . .	30
3.6.2.1	Extensometria . . . . .	31
3.6.3	Execução dos Ensaios . . . . .	33
4	Resultados . . . . .	34
4.1	Ensaios Tipo A: Centro do Vão em um Antinó . . . . .	34
4.1.1	Ensaio 1: CAL 838 MCM com centro da emenda em um antinó e $Y_b = 0,6mm$ (pk-pk) . . . . .	34

4.1.2	Ensaio 2: CAL 838 MCM com centro da emenda em um anti-nó e $Y_b = 0,8mm$ (pk-pk) . . . . .	36
4.1.3	Ensaio 3: CAL 823 MCM com extremidades da emenda em anti-nós e $Y_b = 0,6mm$ . . . . .	39
4.1.4	Ensaio 4: CAL 838 MCM com extremidade esquerda da emenda (centro do vão) em um anti-nó e $Y_b = 1,0mm$ (pk-pk) . . . . .	42
4.2	Ensaio Tipo B: Centro do Vão em um Nó . . . . .	44
4.2.1	Ensaio 5: CAL 823 MCM com centro da emenda em um nó, uma das extremidades da emenda em anti-nó e $Y_b = 0,8mm$ (pk-pk) . . . . .	44
4.3	Ensaio Tipo C: Varredura de Frequência . . . . .	47
4.4	Cálculo do <i>Gap</i> Entre as Varetas da Emenda Pré-Formada . . . . .	50
4.4.1	Emenda Pré-formada de 13 Varetas Instalada no Cabo CAL 823 MCM Liga 1120 . . . . .	51
4.4.2	Emenda Pré-formada de 13 Varetas Instalada no Cabo CAL 838 MCM Liga 1120 . . . . .	52
5	Conclusões e Discussões . . . . .	54
5.1	Trabalhos Futuros . . . . .	55
	Referências Bibliográficas . . . . .	56

# 1 Introdução

## 1.1 Contexto e Motivação

O crescimento econômico de um país está intimamente ligado à sua demanda energética e à sua capacidade de abastecer o seu território com energia elétrica. De acordo com Finkler et al. (2016), um importante indicador de desenvolvimento de uma nação é o consumo de energia elétrica, que indica, além do crescimento econômico, melhoria na qualidade de vida da população.

Segundo a Nota Técnica 001/2017 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), dados colhidos desde 2016 demonstram que o crescimento da demanda energética tem sido de aproximadamente 3,5% ao ano. Essa mesma estimativa de crescimento se estende até o ano de 2026. Tal expectativa de aumento de demanda aponta para a necessidade da constante evolução dos meios de transmissão de energia elétrica a fim de acompanhar a necessidade da indústria e população brasileira.

A importância dos esforços científicos no estudo das linhas de transmissão é evidenciado também devido a magnitude do desafio da transmissão de energia em um país de território tão extenso como o Brasil. Para transpor as grandes distâncias entre as usinas e os consumidores o país possui o chamado Sistema Interligado Nacional (SIN). O SIN é constituído de grandes linhas de transmissão que permitem que a capacidade energética do país seja distribuída para todas as localidades, mesmo nas regiões mais distantes de usinas. O Sistema possui cerca de 135 mil quilômetros de extensão, sendo que apenas 1,7% da energia gerada no Brasil não é atendida pelo SIN e apenas o estado de Roraima não está integrado a ele.

Outra perspectiva possível que enfatiza a relevância do estudo da engenharia empregada em linhas de transmissão, é abordar seus aspectos a partir da ótica de empresas que realizam a gestão e construção das linhas de transmissão no Brasil. Atualmente, a concessão para a prestação do serviço de transmissão de energia se dá através de leilões realizados pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). A remuneração das concessionárias de transmissão, empresas que adquirem a concessão de determinada linha de transmissão, segue a Receita Anual Permitida (RAP). A RAP remunera os investimentos realizados pela concessionária de acordo com os equipamentos, principais e complementares, utilizados no sistema, incluindo a cobertura de custos de operação e manutenção durante a vigência da concessão. Por outro lado, a ANEEL criou formas de penalizar as empresas caso haja a falha na entrega dos serviços propostos, estabelecendo relação econômica associada ao desempenho operacional das concessionárias. A chamada Parcela Variável (PV) penaliza a receita da empresa em função da indisponibilidade dos serviços, a fim de garantir que seja mantida a qualidade e constância da transmissão de ener-

gia elétrica. Existem diferentes tipos de PVs e de multiplicadores de PVs, que são classificados de acordo com a natureza e grau da indisponibilidade do serviço. Indisponibilidades devido a causas programadas ou não programadas, redução de capacidade produtiva, ou a utilização de equipamentos reserva, por exemplo, possuem diferentes penalidades.

Desta maneira, quaisquer episódios de falha nos mecanismos ou diminuição de produtividade, impactam fortemente a receita das empresas que detêm concessões do Governo. Sendo assim, é de fundamental valor que estas companhias realizem investimentos relevantes em estudos e tecnologias relacionados à plena operação das linhas de transmissão.

Em relação a integridade estrutural de cabos condutores em linhas de transmissão, segundo EPRI (2006) a principal causa de falhas mecânicas nestes componentes é a fadiga devido à vibrações induzidas pela incidência de ventos. Quando se trata do território brasileiro, dentre os possíveis tipos de vibrações nos condutores, a que possui maior ocorrência são os fenômenos de vibração eólica, que acontecem em situações onde a velocidade do vento está entre 0,5 a 9,7 m/s e em vãos extensos, como em travessias de rios. De acordo com o mapa eólico produzido pela CEPEL (2017), representado na Figura 1.1, todo o território brasileiro está incluído na faixa de velocidade do vento onde é possível sobrevir fenômenos de vibração eólica.

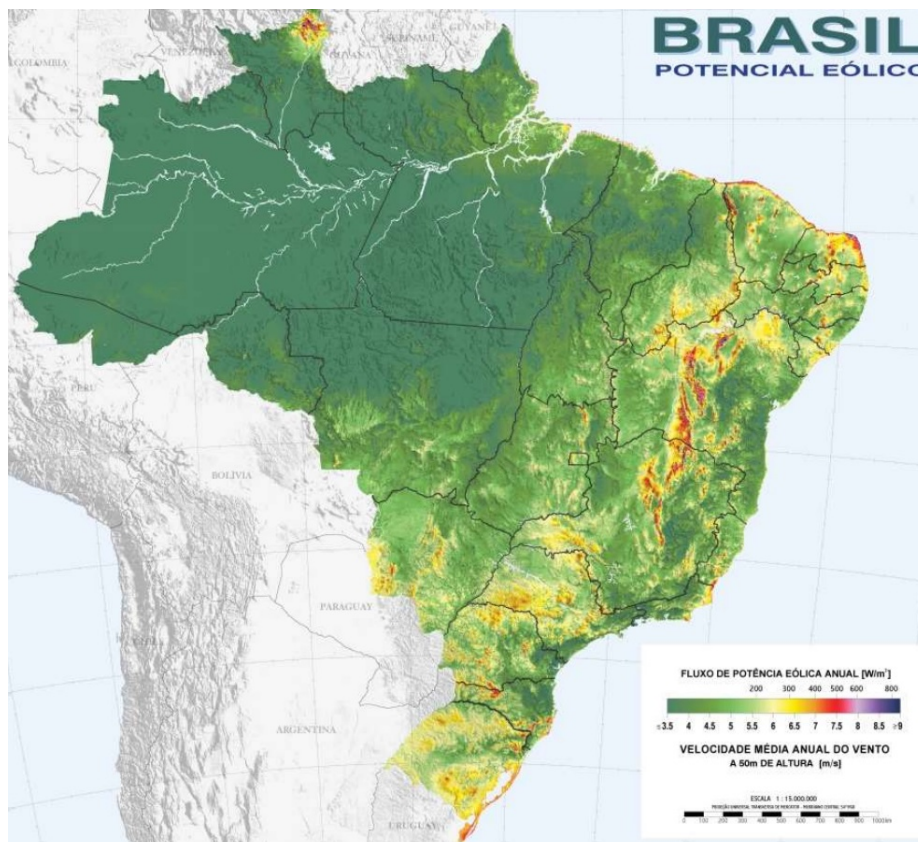


Figura 1.1 – Regime de ventos no território brasileiro (CEPEL, 2017).

Cabos condutores devem suportar esforços mecânicos e elétricos nas mais diversas condições ambientais durante todo o tempo de sua operação, que pode superar 50 anos. No conjunto



mecânico de uma linha de transmissão estão as emendas pré-formadas, que são responsáveis por unir um lance de condutor a outro. Usualmente, cada lance de condutor possui cerca de 3 quilômetros de comprimento e existem no mercado diferentes tipos de emendas.

As emendas de cabos condutores devem possuir características que garantam segurança e confiabilidade para que elas não escorreguem quando o condutor eventualmente experimentar vibrações intensas, intempéries ou fluência que provoquem variações no diâmetro do conjunto condutor/ emenda. Escorregamentos de emendas podem causar gastos excessivos não previstos ou até mesmo acidentes fatais nas linhas de transmissão. Ademais, a substituição de emendas é um procedimento oneroso e também complexo para as empresas envolvidas na construção e gestão da linha de transmissão. Falhas em condutores aéreos e emendas pré-formadas podem resultar em mortes de trabalhadores atuantes na construção da linha ou de habitantes locais, além do risco de danos à propriedades públicas e privadas e a morte de animais.



*Figura 1.2 – Manutenção em linha de transmissão energizada (MEDRAL, 2022).*

## **1.2 Objetivo e Justificativa**

Recentemente, linhas de transmissão localizadas na região Sudeste do Brasil experimentaram sucessivos escorregamentos de emendas pré-formadas utilizadas para unir cabos condutores. Como mencionado, incidentes como estes provocam gastos excessivos, com multas e punições para as empresas envolvidas, e diversos danos a população e indústria.

A fim de contribuir para o melhor entendimento dos fatores mecânicos que levaram a estes escorregamentos de emendas pré-formadas na região Sudeste, este trabalho possui o objetivo de avaliar a integridade de emendas pré-formadas, em relação a eventuais falhas por escorregamento, na união de cabos condutores sob regime de vibração eólica. Para isto, por

meio de ensaios de vibração forçada em diferentes níveis de vibração eólica, será verificado o escorregamento na interface emenda/ cabo.

Pretende-se também concluir se o espaçamento existente no conjunto de varetas da emenda pré-formada é adequado para evitar escorregamentos nas linhas de transmissão. Assim, será calculado o *gap* existente entre as varetas considerando sua tolerância dimensional.

## 2 Revisão Teórica

### 2.1 Excitações Eólicas em Cabos Condutores de Energia Elétrica

Em linhas de transmissão aérea, a ação do vento induz forças aerodinâmicas nos condutores. Os movimentos oscilatórios induzidos nos condutores, ocasionados pelo vento, provocam três principais tipos de vibração: a vibração eólica, o galope e a oscilação de subvão (LABE-GALINI et al., 1992). Em cada um desses tipos de vibração, diferentes comportamentos são observados no cabo condutor, à depender de fatores como: velocidade do vento, tamanho do vão, carga de tração, massa do cabo e o ângulo de incidência do vento no condutor (VIEIRA, 2019).

Tabela 2.1 – Comparação das características dos tipos de excitação eólica (EPRI, 2006).

Parâmetro	Tipo de Vibração		
	Eólica	Galope	Subvão
Tipo LT afetada	Todas	Todas	Feixe de condutores
Faixa de frequência (Hz)	3 - 150	0,08 - 3	0,15 - 10
Amplitude pico a pico (em relação ao diâmetro do cabo)	0,01 - 1	5 - 300	0,5 - 80
Tipo de vento	Laminar	Laminar	Laminar
Velocidade do vento (m/s)	1 a 8	7 a 18	4 a 18
Superfície do condutor	Nua ou depósito de gelo simétrico	Com depósito de gelo assimétrico	Nua, seca

#### 2.1.1 Vibrações Eólicas

As vibrações eólicas são o principal tipo de excitação que ocasiona a falha por fadiga em cabos de condução de energia de alta tensão e também é o tipo de vibração com maior ocorrência no território brasileiro. Na Tabela 2.1 é possível observar que vibrações eólicas acontecem quando há a incidência de ventos de 1 m/s à 8 m/s, com oscilações em alta frequência e baixas amplitudes (EPRI, 2006).

Segundo EPRI (2006), o fenômeno da excitação eólica ocorre devido ao deslocamento do vento que passa, em condições determinadas, pelo cabo condutor e se movimenta para as

zonas de menor pressão, criando assim os chamados vórtices de Von Karman. Os vórtices se movimentam alternadamente no sentido horário e anti-horário, escoando em torno do cabo de forma regular. Essa afirmação pode ser visualizada na Figura 2.1. A vibração eólica no condutor é originada do desprendimento dos vórtices, que causa um diferencial de pressão, movimentando o cabo em ângulo reto em relação à direção do vento.

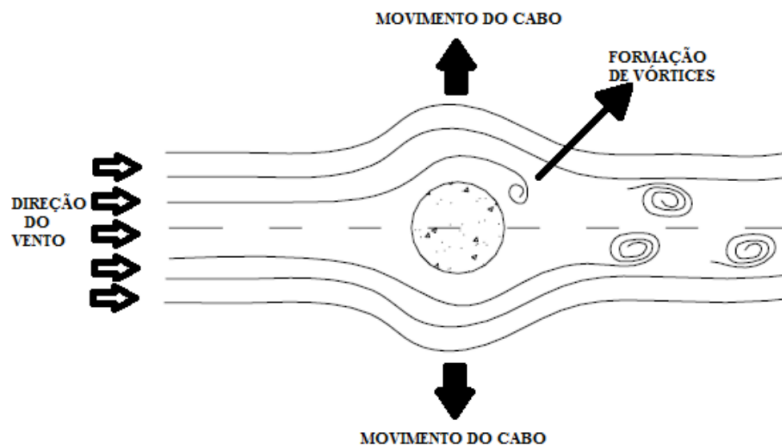


Figura 2.1 – Esteira de vórtices de Von Karman (OLIVEIRA, 2013).

Dois parâmetros adimensionais são utilizados para a análise dos fenômenos da vibração eólica, o número de Reynolds ( $Re$ ) e o número de Strouhal ( $S$ ). O número de Reynolds determina o tipo de escoamento vigente, relacionando a velocidade do fluido, suas propriedades e a geometria do corpo onde o fluido incide. Já o número de Strouhal associa a frequência de desprendimento dos vórtices com a velocidade de escoamento e a geometria do corpo.

A Equação 1 descreve a formulação matemática para o número de Reynolds, onde  $V$  é a velocidade do escoamento,  $d$  é o diâmetro do cilindro, em analogia ao cabo condutor, e  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido ( $1,51 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  para o ar a  $20^\circ\text{C}$ ).

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad (1)$$

A vibração eólica só acontece em situações onde o número de Reynolds está entre 40 e 150. Quando o número de Reynolds é menor que 40, o escoamento possui simetria em relação ao centro do cilindro, e para condições onde o número de Reynolds é maior ou igual à 150, o escoamento está em transição para o regime turbulento ou já se encontra em regime turbulento. Ademais, na faixa intermediária, o regime do escoamento é laminar, a simetria é progressivamente perdida e os vórtices passam a se desprender de forma alternada, tendo então a formação de esteiras de vórtices.

Quanto ao número de Strouhal, seu equacionamento é dado pela Equação 2, onde  $f_s$  é a frequência de formação de vórtices,  $V$  é a velocidade do fluido e  $d$  é o diâmetro do cilindro.

$$S = \frac{f_s d}{V} \quad (2)$$

O número de Strouhal ( $S$ ) para o caso de cabos condutores compostos por fios de seção circular é 0,185. Note portanto que para velocidades de vento que provocam vibração eólica (1 a 8 m/s) é possível utilizar a Equação 2 para calcular, para um determinado diâmetro  $d$  de cabo, a frequência de excitação do condutor.

O cabo condutor entrará em movimento vibratório quando a velocidade do vento for capaz de excitar o condutor em frequências de desprendimento dos vórtices que se equiparam às frequências naturais do cabo.

O número de Reynolds e o número de Strouhal podem ser associados de acordo com a Equação 3.

$$\frac{Re}{S} = \frac{V^2}{\nu f_s} \quad (3)$$

### 2.1.2 Galope

A excitação eólica de tipo galope é caracterizada por ocorrer em baixas frequências e em grandes amplitudes, este fenômeno acontece devido ao acúmulo de gelo nas linhas de transmissão e à incidência de ventos entre 7 e 18 m/s (EPRI, 2006).

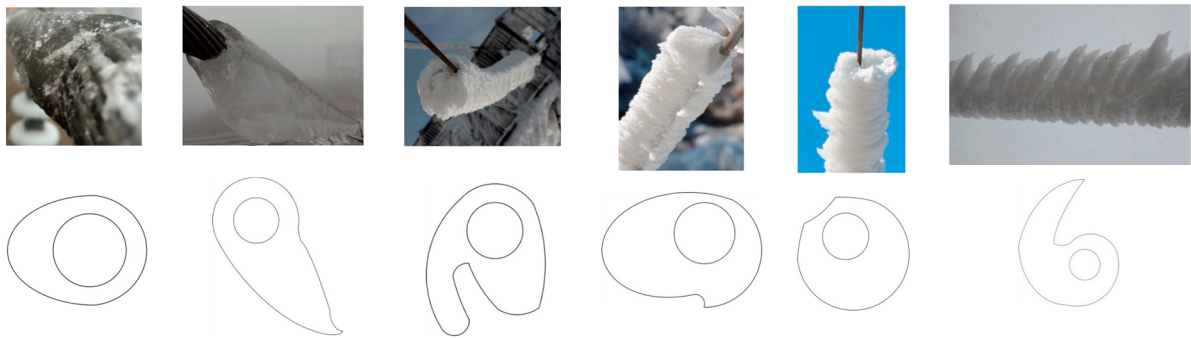


Figura 2.2 – Perfis aerodinâmicos típicos de condutores congelados (FAN; JIANG, 2018).

Os diferentes perfis aerodinâmicos que são adquiridos nas situações de acúmulo de gelo causam grandes deslocamentos nos condutores e elevam as cargas dinâmicas no sistema, podendo ocorrer falhas mesmo que em períodos curtos de operação. Além disso, o efeito da excitação de galope pode provocar choques mecânicos entre os condutores da linha de transmissão, comprometendo a segurança das linhas de transmissão devido à possíveis curtos-circuitos (VI-EIRA, 2019).

### 2.1.3 Oscilação de Subvão

Segundo Oliveira (2013) oscilações de subvão acontecem quando há grandes amplitudes, que podem atingir até vinte vezes o diâmetro do condutor, baixas frequências e ventos moderados e fortes. Este fenômeno, também denominado vibrações de esteiras, ocorre em linhas de transmissão onde os feixes condutores são paralelos e em direção perpendicular ao vento incidente.

Quando o vento atinge um dos condutores do feixe, a corrente de ar é perturbada a ponto de provocar movimentos no condutor seguinte. Os movimentos aerodinâmicos que induzem o cabo resultam em deslocamentos elípticos irregulares, podendo causar a falha por fadiga nos condutores em poucos ciclos ou, devido ao possível choque mecânico entre os condutores, levar a ocorrência de curto-circuito (OLIVEIRA, 1996).

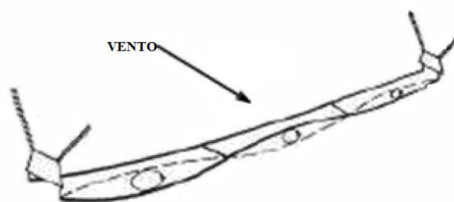


Figura 2.3 – Oscilações de subvão em feixe duplo (OLIVEIRA, 2013).

## 2.2 Tipos de Cabos Condutores

Os cabos condutores são os componentes mais importantes de uma linha de transmissão. Além de serem os responsáveis por transmitir a energia, eles representam cerca de 40% do valor total do investimento necessário para a construção de uma linha de transmissão (EPRI, 2006).

Quanto à construção de um cabo condutor de energia, a configuração mais comum utilizada é a de fios com perfil circular arranjados em várias camadas em volta de um fio central. Este fio central é também chamado de alma, e pode ser do mesmo material que os fios da camada externa ou de um material diferente. As camadas de fios do condutor são posicionadas em direção oposta às camadas adjacentes, para que se mantenha a integridade do condutor. É comum que a camada mais externa de fios tenha sentido voltado para a direita. Esta forma construtiva do condutor é mostrada na Figura 2.4.

Para que as camadas de fios de mesmo diâmetro se acomodem e formem um condutor circular, cada camada mais interna possui seis fios a menos que a camada externa superior. Por outro lado, existem condutores que possuem fios de diferentes diâmetros, a depender da necessidade para cada aplicação (MIRANDA, 2017).

Por se tratar de um componente de grande relevância nas linhas de transmissão, é essencial a correta seleção do cabo condutor. Em geral os requisitos para seleção e projeto de



*Figura 2.4* – Exemplo construção cabo condutor (VWCABLE; CABLE, 2022).

um condutor são suas propriedades mecânicas e elétricas. Assim, o principal material utilizado na composição deste componente é o alumínio, que, além de possuir uma boa associação entre características mecânicas e elétricas, possui um bom custo-benefício em relação a outros metais (VIEIRA, 2019). De acordo com as necessidades de cada projeto são empregadas diferentes composições para os fios e diferentes configurações. Existem alguns grupos mais comuns de condutores utilizados em linhas de transmissão, que são:

*i)* Condutores de Alumínio (CA): Neste tipo de cabo todos os fios são de alumínio, normalmente o alumínio 1350. Condutores de alumínio possuem alta condutividade, porém a sua aplicação é recomendada para linhas de transmissão com vãos pequenos e pouca incidência de ventos, devido a sua baixa relação resistência por peso.

*ii)* Condutores de Alumínio com Alma de Aço (CAA): Se diferenciam dos cabos CA por possuir fios de aço nas camadas mais internas. A alma de aço é capaz de aumentar a resistência mecânica do cabo, possibilitando aplicações mais abrangentes. Este é o tipo de condutor mais utilizado nas linhas de transmissão do Brasil.

*iii)* Condutores de Alumínio Liga (CAL): São cabos constituídos por fios de liga de alumínio, em que sua composição pode ter elementos como silício, ferro e magnésio. Este tipo de condutor possui resistência mecânica superior aos cabos CA, contudo sua condutividade elétrica é inferior. Em algumas situações cabos CAL podem substituir o uso de cabos com alma de aço.

*iv)* Condutores de Alumínio com Alma de Liga Alumínio (CALA): Possuem fios de alumínio nas camadas mais externas e fios de liga de alumínio nas camadas mais internas. Assim, obtém-se um condutor com boa condutividade, relacionada aos fios de alumínio, e com a resistência mecânica relativamente superior dos fios de liga de alumínio.

## 2.3 Teoria de Cordas Vibrantes

Para o estudo do movimento de vibração eólica em cabos condutores, segundo EPRI (2006) usualmente o condutor é modelado como uma corda tensionada. Sendo assim, conceitos da teoria de cordas vibrantes podem ser aplicados para a análise do comportamento mecânico dos condutores em situação de vibração eólica.

Baseando-se na teoria de cordas vibrantes, a frequência natural  $f_n$  do cabo condutor pode ser determinada por meio da Equação 4. Onde  $n$  representa o número do modo de vibração ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ),  $L$  é comprimento do vão,  $T$  é a carga de tração do condutor e  $m_L$  é a massa do cabo por unidade de comprimento.

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{m_L}} \quad (4)$$

O termo  $\sqrt{\frac{T}{m_L}}$  da Equação 4 representa a velocidade da propagação da onda na corda. Os modos de vibração são funções senoidais, representadas pela Equação 5, onde  $A_n$  é a amplitude de vibração do antinodo.

$$y_n = A_n \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_n} x\right) \quad (5)$$

Associando a Equação 2, que determina a frequência de oscilação de acordo com a velocidade do vento, à Equação 4, é possível determinar em qual modo de vibração aproximado o cabo está operando, a depender da velocidade do vento incidente.

Além disso, cabos condutores possuem infinitas frequências harmônicas. Portanto, quando a velocidade do vento se encontra dentro da faixa viável para vibração eólica, há grande probabilidade da frequência de formação das esteiras de vórtices de Von Karman se aproximar de frequências naturais do cabo.

A Figura 2.5 representa os diferentes modos de vibração em um vão. É possível notar que à medida que o modo de vibração  $n$  aumenta em uma unidade, há também um nó a mais no vão.



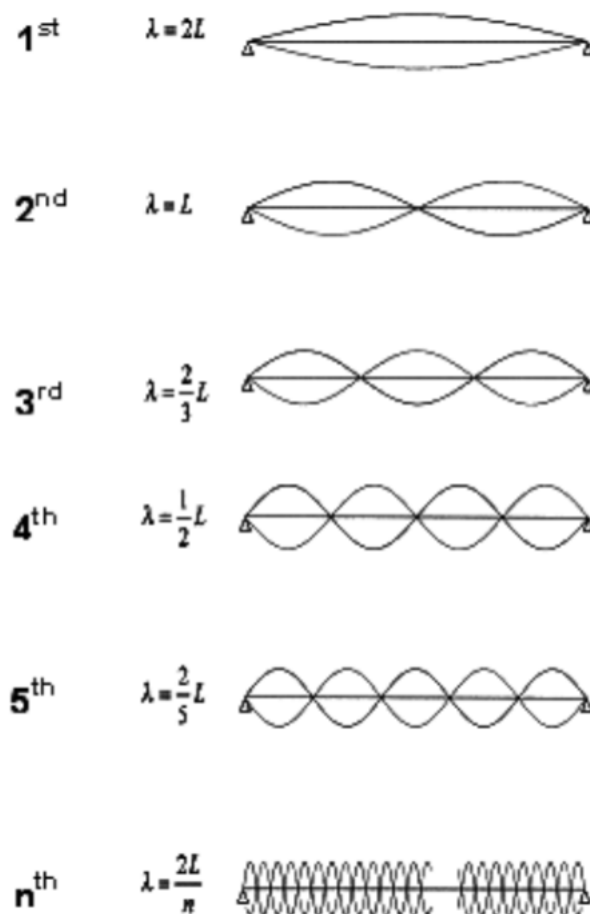


Figura 2.5 – Modos de vibração em corda tensionada (EPRI, 2006)

## 2.4 Emendas Pré-Formadas

A utilização de emendas pré-formadas em cabos condutores desempenha a função de unir dois condutores em linhas de transmissão aéreas. Trata-se de um componente mecânico composto de varetas helicoidais. Devido ao formato helicoidal das armaduras, quando o cabo condutor é tracionado na linha, as varetas da emenda comprimem o condutor, induzindo o aumento de pressão de contato. Este aumento de pressão confere, de forma proporcional, uma maior capacidade das varetas de resistir ao escorregamento.

Emendas do tipo pré-formadas diferenciam-se em sua concepção pois são moldadas em fábrica e embaladas em subconjuntos para instalação simplificada, dispensando o uso de abraçadeiras em suas extremidades, por exemplo. São componentes destinados a uma única utilização, pois pode ocorrer que durante sua aplicação aconteçam deformações permanentes. Fabricantes de emendas pré-formadas possuem instruções específicas para instalação das hastes, a depender de fatores, como, o número de varetas e os seus diâmetros em relação ao diâmetro total do condutor.



Figura 2.6 – Emendas pré-formadas não instaladas (AFL, 2022).

Em geral, os materiais utilizados na fabricação das emendas são a liga de alumínio e o aço galvanizado. E, para que o conjunto de hastes tenha aderência adequada na superfície externa dos condutores, as partes internas das varetas, que entrarão em contato com o cabo, são revestidas por fragmentos de óxido de alumínio. Outro aspecto importante no projeto e aplicação de emendas é a direção de torção das hastes, que deve seguir a mesma orientação de torção da camada externa do condutor utilizado, a fim de que se obtenha a máxima eficiência do componente.

O desempenho de uma emenda pré-formada em conjunto com o cabo condutor depende diretamente da transferência das forças de contato das varetas da emenda para o condutor. Sendo assim, é necessário que haja uma folga lateral entre as hastes após a instalação deste componente mecânico. Caso ocorra uma redução no diâmetro do condutor, por fatores diversos, como alterações de temperatura, a folga existente entre as varetas irá garantir que a emenda ainda assim permaneça realizando a pressão de contato necessária para evitar o escorregamento dos condutores.

A folga entre a emenda pré-formada e o condutor deve ser preferencialmente distribuída de forma uniforme entre as varetas. Entretanto, também é cabível que a folga esteja concentrada entre a primeira e a última haste da emenda.

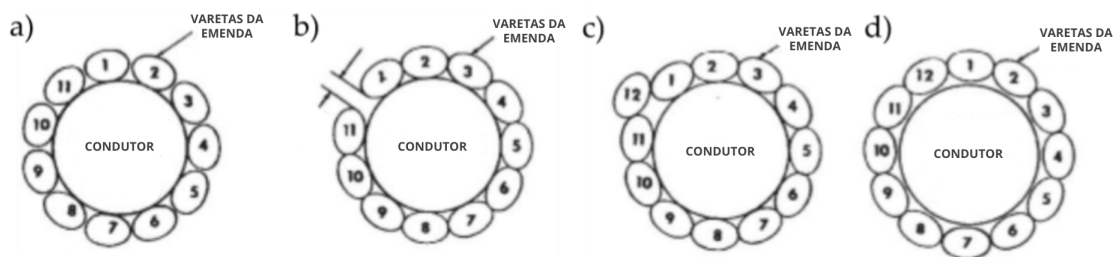


Figura 2.7 – Exemplos de instalação de emenda: a) Folgas igualmente espaçadas entre as varetas; b) Folga concentrada apenas em um local do conjunto; c) Sobreposição de varetas; d) Todas as varetas em contato entre si (EPRI (2006) - modificado).

A Figura 2.7 exemplifica diferentes configurações possíveis para a montagem de emendas em condutores. Na Figura 2.7 a) tem-se a configuração preferível, onde há folgas igualmente distribuídas entre as varetas. A configuração apresentada na Figura 2.7 b) também pode ser aceita, pois, ainda há folga suficiente entre um par de varetas. Já para as Figura 2.7 c) e Figura 2.7 d) é possível observar configurações não desejadas, uma vez que há a impossibilidade de que ocorra pressão de contato adequada entre a emenda e o condutor.

## 2.5 Cálculos dos Esforços Dinâmicos nos Condutores

Em 1966 a IEEE definiu uma metodologia para o cálculo da tensão dinâmica em cabos condutores de energia em condição de vibração. Nele é utilizado o modelo proposto por Poffenberger e Swart (1965) que relaciona a amplitude de tensão com o deslocamento pico a pico. Existe uma grande complexidade envolvida no cálculo de tensões dinâmicas de condutores, pois em sua estrutura eles são constituídos de fios enrolados em diferentes camadas, e a cada camada os fios são enrolados em uma direção diferente. Sendo assim, Poffenberger e Swart (1965) desenvolveram um modelo simplificado.

O modelo estuda a região do cabo próximo ao grampo de suspensão por meio da relação entre a amplitude de deslocamento vertical pico a pico do condutor, denominada  $Y_b$ , associada ao grampo de suspensão. Nesta região do cabo próximo ao grampo, há restrições de movimento. Assim, assume-se que o condutor se comporta como uma viga de Bernoulli-Euler.

Usualmente o deslocamento  $Y_b$  é calculado à 89 mm (ou 3,5 polegadas) do último ponto de contato entre o grampo de suspensão e o condutor, abreviado como UPC. A tensão calculada pela fórmula de Poffenberger-Swart é a do último ponto de contato e é dada pela Equação 6.

$$\sigma_a = KY_b \quad (6)$$

onde  $\sigma_a$  é a amplitude de tensão dinâmica (zero a pico), calculada considerando a rigidez a flexão do condutor como uma viga de Euler. O coeficiente de Poffenberger  $K(MPa/mm)$  é um fator de conversão, determinado pela Equação 7.

$$K = \frac{E_a d_f p^2}{4(e^{-px} - 1 + px)} \quad (7)$$

sendo que  $E_a(MPa)$  é o módulo de elasticidade do material dos fios da camada externa do condutor,  $d_f(mm)$  é o diâmetro dos fios de alumínio da camada mais externa do cabo,  $x(mm)$  é a distância entre, o último ponto de contato entre cabo e o grampo de suspensão, e o ponto onde a amplitude de deslocamento  $Y_b$  está sendo medida, em geral  $x = 89mm$ .

Já o parâmetro de rigidez  $p$  é dado pela Equação 8.

$$p = \sqrt{\frac{H}{EI}} \quad (8)$$

$H(N)$  representa a carga de tração do condutor, que gera uma tensão estática no condutor chamada também de *Every Day Stress* (EDS), e  $EI(N \cdot mm^2)$  é a rigidez a flexão do condutor.

O nível da amplitude de flexão  $Y_b$  determinará se os fios do condutor se movimentarão de forma mais conjunta ou mais independente. Em situações onde a amplitude de flexão é baixa os fios do condutor irão agir em conjunto, como um único elemento, nesse caso a rigidez à flexão assume seu máximo valor  $EI_{\text{máx}}$ . Por outro lado, quando a amplitude de flexão é alta os fios do condutor agem de forma mais independente, o que leva a assumir a rigidez à flexão em seu valor mínimo  $EI_{\text{mín}}$ , que é a situação adotada na modelagem de Poffenberger e Swart (1965) por ser o caso mais crítico. A Equação 9 apresenta a rigidez à flexão mínima para o cálculo de  $p$ , onde considera-se os fios do condutor como fios paralelos, utilizando assim o Teorema de Eixos Paralelos para sua modelagem.

$$EI_{\text{mín}} = n_a E_a \frac{\pi d_a^4}{64} + n_s E_s \frac{\pi d_s^4}{64} \quad (9)$$

onde  $n$ ,  $d$  e  $E$  são respectivamente o número de fios do condutor, seus diâmetros individuais e o módulo de elasticidade dos fios. O subíndice  $a$  diz respeito a fios de alumínio e o subíndice  $s$  se refere a fios de aço (do inglês *steel*).

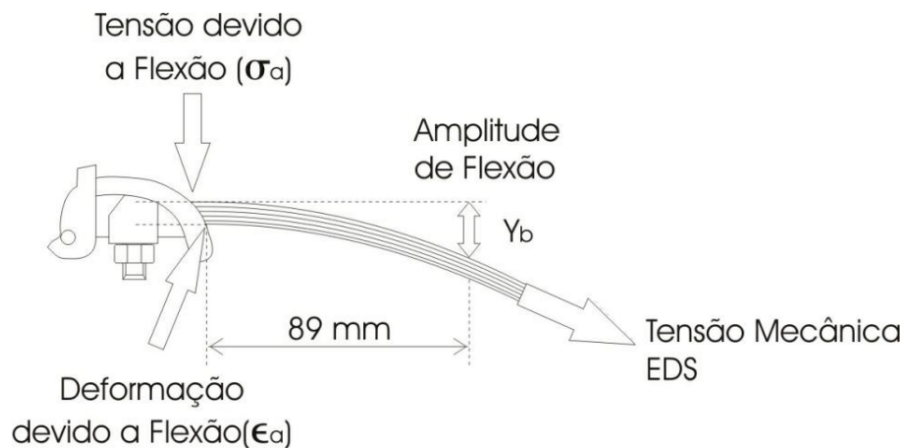


Figura 2.8 – Esquema de montagem do grampo de suspensão junto ao condutor com exemplificação do local de medição do  $Y_b$  (Oliveira, 2013).

## 2.6 Fadiga em Cabos Condutores

Segundo ASTM (1996), a fadiga se trata de um processo de degradação, progressivo e permanente, que ocorre em um material que está submetido a variações de tensão e deformação,

onde, após um número suficiente de ciclos, é capaz de gerar nucleação de trincas ou até a fratura do componente.

Quando se trata da fadiga em cabos condutores, a maior causa de falhas mecânicas é devido à vibração induzida pela ação do vento nas linhas de transmissão, assim como mencionado na subseção 2.1.

Nos condutores, quando a frequência de formação dos vórtices de Von Karman é igual a uma frequência natural do cabo condutor, o sistema trabalha em condições de ressonância. Assim, haverá absorção de energia do movimento oscilatório de forma progressiva. A amplitude de vibração nesta situação poderá induzir falha por fadiga.

A situação mais comum é que as falhas ocorram nas regiões do condutor próximas à grampos e espaçadores, que são pontos de restrição dos movimentos da vibração no condutor na linha de transmissão. Na Figura 2.9 é possível observar a montagem de um grampo junto ao cabo condutor em uma linha de transmissão. Nesta imagem ilustrada ocorreu a quebra de alguns fios do condutor próximo ao grampo, onde o componente impede o curso do movimento vibratório do cabo.

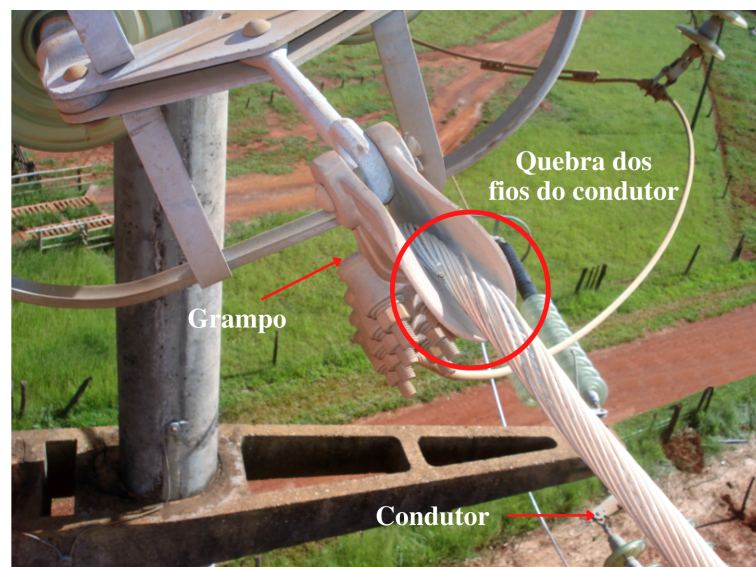


Figura 2.9 – Montagem grampo e condutor, com quebras nos fios, em linha de transmissão (HORTÊNCIO, 2009) - com modificações.

Quando há a restrição do movimento oscilatório do condutor, os seus fios escorregam entre si, esse movimento relativo associado às forças de fricção causam o chamado *fretting* tanto entre os fios do condutor quanto entre o condutor e os grampos de suspensão ou espaçadores. A Figura 2.4 é capaz de exemplificar a construção de um cabo condutor mostrando as camadas de fios que se sobrepõem. Entre essas camadas estão as superfícies de contato entre cada fio e, além disso, o contato entre a camada externa do condutor e o grampo de suspensão, como dado na Figura 2.10.

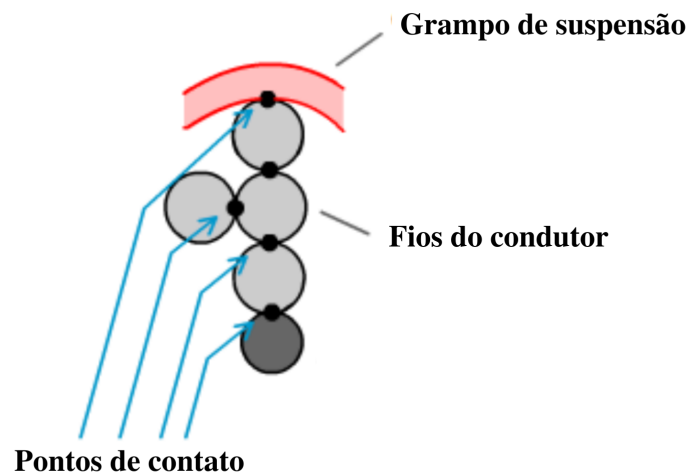


Figura 2.10 – Pontos de contato entre os fios e grampo (VIEIRA, 2019).

Nos cabos condutores, as superfícies de contato são pressionadas umas contra as outras naturalmente devido ao entrelaçamento dos fios do condutor e à compressão existente do grampo sobre o cabo condutor para sua devida fixação na linha. Adicionado a isso, o movimento vibratório potencializa as forças de fricção com forças tangenciais oscilatórias.

Quando as forças tangenciais são maiores ou iguais ao coeficiente de atrito multiplicado pela força normal ocorre então o regime de escorregamento total, caso contrário é estabelecido um regime de escorregamento parcial. Em ambos os regimes de escorregamento, concentração de tensão é gerada propiciando a nucleação de trincas e danificando a superfície do material. Entretanto, no regime de escorregamento total o desgaste superficial remove material a uma taxa que reduz o tamanho da trilha, evitando sua propagação. Por outro lado, o regime de escorregamento parcial é capaz de danificar a superfície do material em um padrão de geometria elíptica, onde são estabelecidas zonas distintas de contato: a zona de adesão e a zona de escorregamento. Na zona de escorregamento, quando o condutor é submetido a cargas cíclicas, há a nucleação e propagação de trincas que causam a falha do cabo, esse é o processo de fadiga por *fretting*.

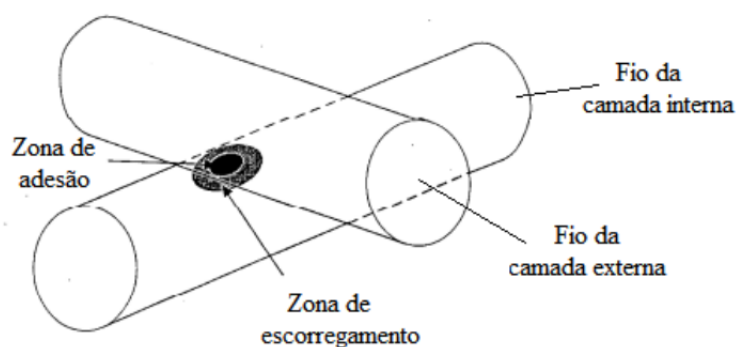


Figura 2.11 – Marcas desenvolvidas devido ao *fretting* (GOMES, 2015).

É possível observar em casos de ruptura de fios devido a fadiga por *fretting* o surgimento de um pó escuro de alta dureza. Esse pó se trata de resíduos do desgaste dos fios de alumínio, que se oxida quando em contato com o oxigênio do ar. Marcas de desgaste e o pó de elevada dureza são capazes de diminuir a resistência do material do condutor, acelerando o desgaste e favorecendo a fadiga.

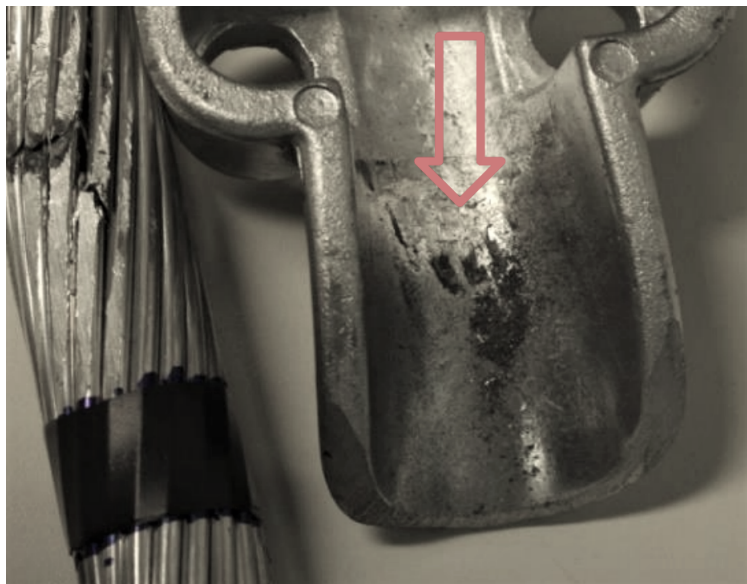


Figura 2.12 – Cabo condutor com quebras por fadiga e grampo de suspensão após desmontagem com pó gerado devido ao *fretting* (BADIBANGA, 2017).

## 2.7 Estimativa de Vida em Fadiga para Cabos em Linhas de Transmissão

A fadiga em cabos condutores é um problema complexo por envolver, além das tensões cíclicas que levam normalmente à fadiga, também as complicações do *fretting* por contato. Por esse motivo não há um método analítico que descreva completamente este fenômeno em linhas de transmissão. Portanto, para estabelecer critérios que determinem a vida em fadiga de um condutor é necessário quantificar a vibração ocorrida e estabelecer parâmetros para a medida da resistência do condutor no grampo.

As metodologias utilizadas atualmente se tratam de determinar um limite para a tensão, ou deformação, do cabo. Dessa forma, caso o cabo permaneça dentro destes limites estabelecidos não haverá fadiga decorrente de vibração eólica.

A IEEE (1966) define um método baseado na formulação de Poffenberger e Swart (1965) para determinar a durabilidade do condutor em função da deformação em flexão máxima sofrida durante a vibração. Este limite admissível é dado em unidades de  $\mu inch/inch$  ou microstrains ( $\mu\varepsilon$ ) pico a pico. Trata-se de um critério conservativo, porém ainda utilizado para avaliar vida residual em linhas de transmissão.

Já a EPRI (2006), apresenta metodologia que define valores limites de amplitude de tensão e de máxima amplitude de vibração que poderiam ocorrer durante a vida de um condutor para que não houvesse a sua falha por fadiga. Esta metodologia também baseia-se na formulação de Poffenberger e Swart (1965).

Outro método de estimativa de vida em fadiga de cabos é o de CIGRE (1986), que considera que o processo de fadiga aumenta gradativamente a cada ciclo de vibração, até que aconteça a ruptura de fios do condutor. A vantagem dessa metodologia é a determinação da vida residual do condutor em anos, a partir de medições realizadas por vibrógrafo durante um certo tempo de serviço do condutor.



# 3 Metodologia e Programa Experimental

## 3.1 Hipótese do Efeito das Vibrações no Deslizamento Entre o Condutor e as Emendas Pré-Formadas

Neste trabalho pretende-se avaliar se a vibração do cabo condutor em regime de vibração eólica, ou seja, com frequência elevada e baixa amplitude, poderia ou não gerar algum tipo de deslizamento na interface entre a emenda pré-formada e o condutor, de tal forma a produzir a falha do conjunto por escorregamento.

O mecanismo da ocorrência de deslizamentos se originaria da condição de que a pressão entre as varetas da emenda e o condutor seria menor nas extremidades da emenda e aumenta em direção ao seu centro. Onde a pressão apresenta seu valor mínimo, nas extremidades da emenda, em situações de incidência de vibrações eólicas com altas amplitudes, no contexto deste regime (altas frequências de vibração e baixas amplitudes), haveria o deslizamento entre as varetas da emenda e o condutor. Quando a amplitude da vibração permanece elevada, esta condição de escorregamento se propagaria para as regiões mais ao centro da emenda. Sendo mantida a carga de tração nos condutores, a força de atrito existente, associada a pressão aplicada em uma parte reduzida da emenda, eventualmente não seria capaz de manter os condutores unidos.

## 3.2 Planejamento dos Ensaios

Foram planejados diferentes ensaios a fim de avaliar a integridade de emendas pré-formadas unindo cabos condutores sobre vibração. Preferiu-se por determinar duas posições para a instalação da emenda. A primeira opção foi o posicionamento da emenda no centro do vão da bancada de ensaios. Já a segunda opção determinada foi instalar a emenda com uma de suas extremidades localizadas no centro do vão.

A posição do centro do vão possui a particularidade de sempre estar localizada em um nó ou um anti-nó, a depender do modo de vibração do condutor. Nos casos onde o modo de vibração for par, no centro do vão haverá um nó, já quando o modo de vibração for ímpar, o centro do vão haverá um anti-nó, como demonstrado na Figura 3.1.

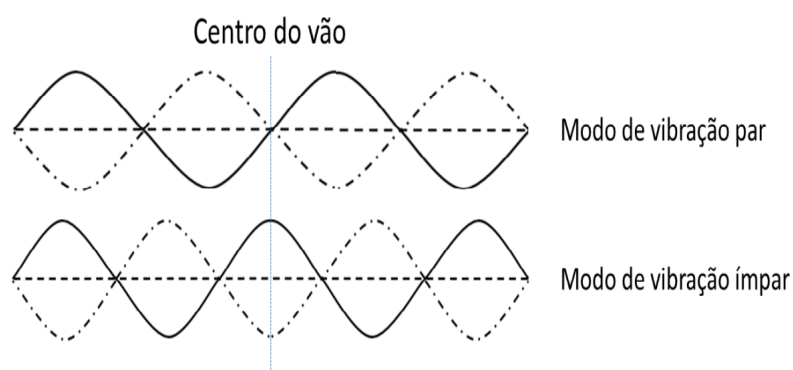


Figura 3.1 – Modos de vibração do condutor.

Segundo a EPRI (2006), ao longo de um vão, a máxima tensão de flexão existente ocorre no anti-nó, por este motivo, dos três tipos de ensaios planejados, em dois deles deseja-se posicionar o anti-nó no centro da emenda ou nas extremidades da emenda. Estes ensaios serão classificados como Tipo A e B.

- **Ensaio Tipo A: Modo de Vibração Ímpar**

Pretende-se realizar dois ensaios com o modo de vibração ímpar, ou seja, em que o centro do vão esteja localizado em um anti-nó.

- **Ensaio Tipo B: Modo de Vibração Par**

De forma semelhante aos ensaios com modo de vibração ímpar, para o modo de vibração par, também tem-se o intuito de realizar dois ensaios com o centro do vão localizado em um nó. Pretende-se que nestes ensaios anti-nós estejam localizados em ambas as extremidades da emenda ou em ao menos uma das extremidades da emenda.

No terceiro tipo de ensaio planejado tem-se o intuito de realizar a constante varredura de frequência dentro dos valores em que há a incidência do regime de vibração eólica. Assim, é pretendido que o conjunto emenda/ cabo seja submetido a vibração eólica em diferentes níveis. Estes ensaios possuirão a classificação de Tipo C e deseja-se realizar ao menos dois ensaios deste tipo.

- **Ensaio Tipo C: Varredura de Frequência**

Para execução destes ensaios, primeiramente será determinado qual a faixa de frequência onde há a ocorrência do regime de vibração eólica. Sabendo que vibrações eólicas acontecem com a incidência de ventos entre 1 a 8 m/s, por meio da Equação 10 será possível determinar a frequência máxima e mínima da varredura de frequência do ensaio.

$$S = \frac{f_s d}{V} \quad (10)$$

Como mencionado na subseção 2.1.1, sabemos que o número de Strouhal ( $S$ ) para o caso de cabos condutores é  $0,185 \cdot V$  e a velocidade do vento e  $d$  é o diâmetro do condutor.

Para todos os ensaios, espera-se que o princípio de interrupção siga o critério de CIGRE (1986), que sugere que seja atingida a ruptura de 10% do número total de fios de alumínio do condutor.

Além disso, de acordo com a capacidade dos equipamentos utilizados, será determinada a frequência de operação dos experimentos que mais se adéqua ao critério principal desejado.

### **3.3 Bancada de Ensaios**

A Figura 3.2 apresenta um desenho esquemático das configurações da bancada utilizada para a execução dos ensaios deste trabalho. Na Configuração I tem-se a representação do condutor unido no centro do vão por emenda pré-formada. Já na Configuração II, a ponta esquerda da emenda está posicionada no centro do vão, assim, o condutor está unido de forma deslocada à direita, onde está o centro da emenda.

A bancada apresenta 46,8 metros de vão, que é dividido entre vão ativo e vão passivo. O vão ativo determina o comprimento do condutor ensaiado e é delimitado pela distância entre o grampo de suspensão e a roldana na extremidade oposta. Este vão ativo possui o comprimento de 39,2 metros. O vão passivo, posicionado nas extremidades do vão ativo, possui a finalidade de possibilitar a fixação e tração do cabo para a execução dos ensaios.

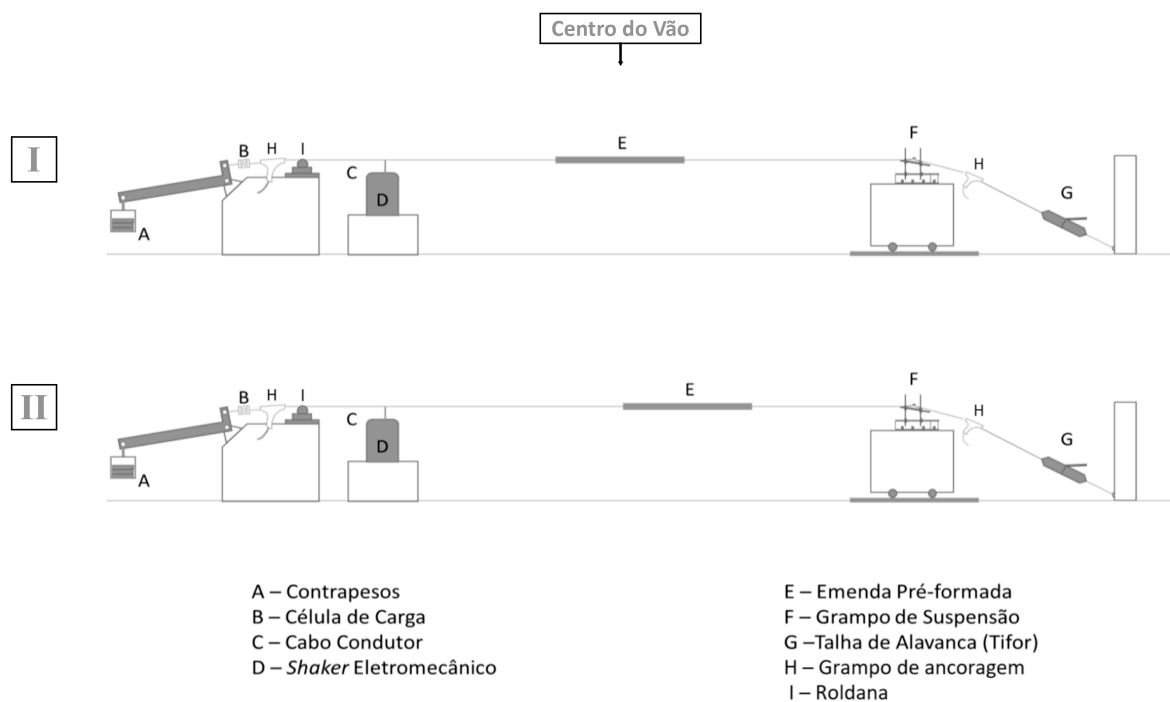


Figura 3.2 – Representação esquemática da bancada de ensaio com o condutor e emenda instalados.

Esta bancada de ensaios está localizada no Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia da Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro. O laboratório é equipado com sistema de refrigeração e isolamento térmico. A variação de temperatura do ambiente do ensaio possui grande influência no comportamento do condutor e na estabilidade do experimento. Sendo assim, o teto do local é revestido por material isolante e existem saídas de ar condicionado ao longo de todo o laboratório, a fim de que seja mantida a temperatura do ambiente em  $20^{\circ}\text{C}$ .

### 3.3.1 Mecanismo de Fixação e Tracionamento do Condutor

Como exemplificado na Figura 3.2, em ambas as extremidades do vão o condutor é fixo em grampos de ancoragem, que permitem a conexão do cabo com a talha de alavanca e com a célula de carga para o tracionamento do cabo. Na Figura 3.3 são representados os grampos de ancoragem utilizados durante os ensaios. Um grampo de suspensão também é utilizado para fixar o condutor logo após o grampo de ancoragem em uma das extremidades do vão.



(a) Grampo de ancoragem próximo à célula de carga.



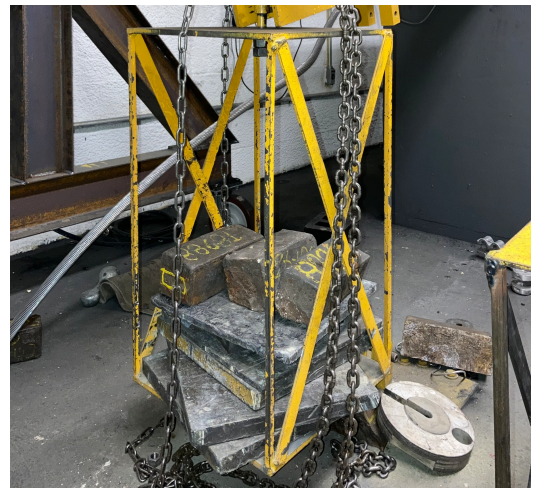
(b) Grampo de ancoragem próximo à talha de alavanca.

*Figura 3.3 – Grampos de ancoragem utilizados nos ensaios.*

Assim como representado na Figura 3.2, para realizar a tração do condutor, à direita do grampo de ancoragem localiza-se a talha de alavanca, que será a responsável por aplicar a pré-carga de esticamento do condutor. Do lado oposto do vão a carga de tração sobressalente será dada pelos pesos, representados na Figura 3.4. O valor do carregamento empregado no condutor pode ser aferido pela célula de carga posicionada entre o grampo de ancoragem e os pesos, conforme Figura 3.5.

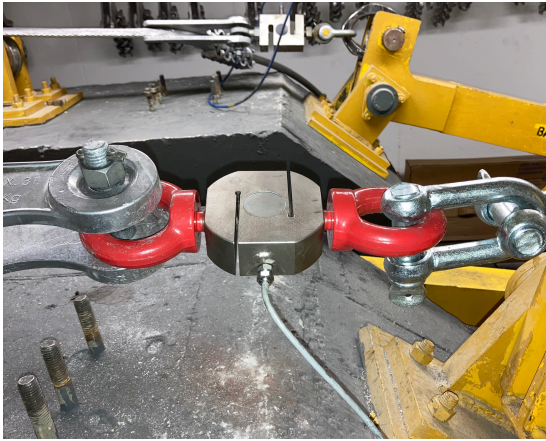


(a) Talha de alavanca para pré-carga.



(b) Pesos para realizar a carga de tração.

*Figura 3.4 – Grampo de ancoragem utilizado nos ensaios.*



(a) Dispositivo.



(b) Display.

Figura 3.5 – Célula de carga.

### 3.3.2 Mecanismo Excitador (*Shaker*)

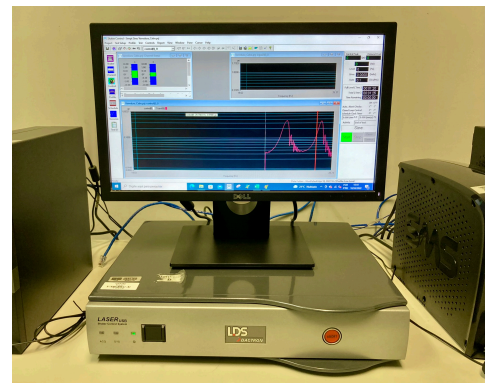
A excitação forçada do cabo é realizada por um excitador eletromecânico (*shaker*), capaz de transformar a energia elétrica recebida por um amplificador, em movimento necessário para vibrar o condutor no vão. O amplificador é capaz de interromper o funcionamento do *shaker* caso identifique anomalias no sistema. O controle dos sinais enviados ao excitador é feito por um controlador (Laser USB LDS) e *software* próprio (*Shaker Controler*), estes componentes associados têm a função de garantir que os mesmos *inputs* inseridos na interface do *software* estejam sendo enviados para o sistema do *shaker*.



(a) Shaker.



(b) Amplificador.



(c) Controlador e *software*.

Figura 3.6 – Dispositivos do mecanismo excitador.

## 3.4 Cabos Condutores e Emenda Pré-Formada

Serão submetidos dois condutores a ensaio, o Cabo Alumínio Liga 1120 - 838 MCM e o Cabo Alumínio Liga 1120 - 823 MCM. Suas especificações encontram-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Dados das fichas técnicas dos condutores.

<b>Condutores CAL 1120</b>		
	<b>Bitola 838 MCM</b>	<b>Bitola 823 MCM</b>
Diâmetro Nominal do Cabo (mm)	26,78	26,53
Nº de Fios	37	37
Diâmetro dos Fios (mm)	3,835	3,79
Massa Linear (kg/km)	1170,9	1150,84
Carga de Ruptura (kN)	92,90	87,37

Para unir o condutor, serão utilizadas emendas pré-formadas constituídas por 13 varetas helicoidais, cada vareta com diâmetro de 7,34 milímetros. Seu comprimento total é de 3,5 metros e o passo das varetas de 244 milímetros.



Figura 3.7 – Emenda pré-formada antes da instalação.

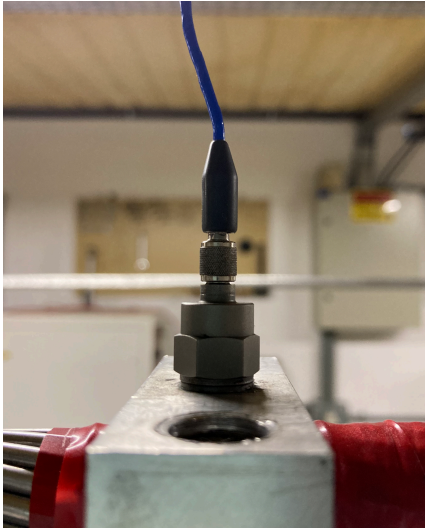
## 3.5 Dispositivos de Instrumentação

### 3.5.1 Acelerômetros

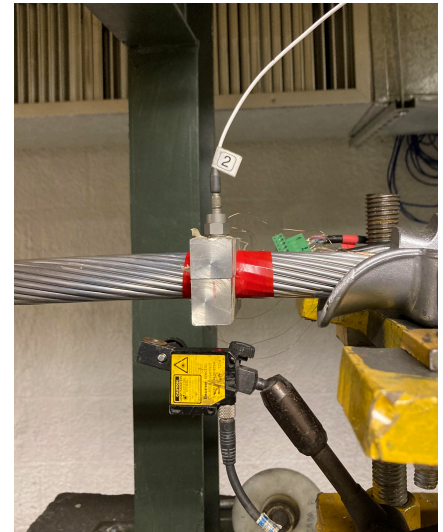
Ao longo do vão são instalados acelerômetros, dispositivos capazes de detectar o movimento do objeto ao qual ele está acoplado por meio de um sinal elétrico proporcional ao movimento. Foram utilizados acelerômetros piezoelétricos, a leitura e o controle da vibração detectada pelos acelerômetros foi feita pelo controlador Laser USB LDS. Por meio dos acelerômetros foi possível monitorar a frequência estabelecida no ensaio, obtendo dados sobre o deslocamento, velocidade e aceleração do cabo condutor.

Para todos os ensaios realizados houve a instalação de: *i*) um acelerômetro no ponto distante 89 milímetros do último ponto de contato entre o grampo de suspensão e o condutor, para controlar o deslocamento  $Y_b$ , e *ii*) na abraçadeira acoplada ao *shaker*, para controlar vibração do condutor.

Ademais, a depender do intuito do ensaio realizado, foram acoplados acelerômetros em diferentes locais na emenda, seja em suas extremidades ou no seu centro.



(a) Acelerômetro instalado junto ao *shaker*.



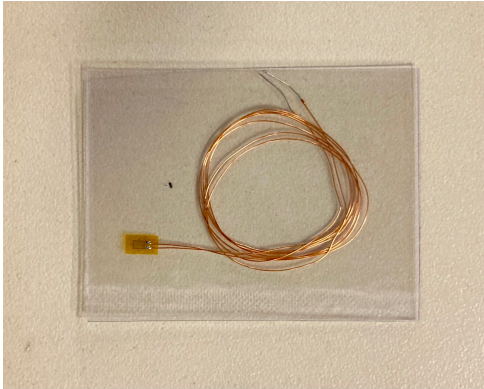
(b) Acelerômetro instalado no ponto 89.

*Figura 3.8* – Acelerômetros utilizados durante os experimentos.

### 3.5.2 Extensômetros

Extensômetros são dispositivos utilizados com a finalidade de calcular a tensão existente em uma dado componente. Esta tensão pode ser calculada por meio da determinação da variação de resistência elétrica existente durante a deformação de um material. Para realizar a medição da deformação em pontos específicos dos fios dos condutores submetidos à ensaio, os extensômetros foram conectados através do sistema de aquisição de dados ADS 2000 (Lynx Technology).





(a) Modelo de extensômetro utilizado.



(b) Aquisitor de dados ADS 2000.

*Figura 3.9 – Extensômetro e aquisitor.*

### 3.5.3 Laser para Detecção de Quebra dos Fios

Para a detecção das quebras dos fios do cabo são utilizadas duas hastes acopladas ao condutor por abraçadeiras. Nestas hastes são posicionados dois lasers que irão detectar o deslocamento da estrutura das hastes durante a vibração do condutor. Este conjunto é instalado no primeiro nó mais próximo do grampo de suspensão.

De forma simultânea, um sensor é posicionado no ponto 89 milímetros distante do último ponto de contato entre o grampo de suspensão e o condutor, para identificar o número de ciclos que o cabo é submetido. Por meio deste laser é possível identificar em qual número de ciclo ocorreu cada quebra de fio do condutor.

Para que este mecanismo seja capaz de detectar quebras dos fios é necessário associar o comportamento dos fios do condutor ao deslocamento observado nas hastes. Em um cabo condutor, a força axial existente no tracionamento produz componentes tangenciais e longitudinais de força. Quando ocorre a quebra de um dos fios do condutor, a carga que era por ele suportada é distribuída entre os demais fios remanescentes. O resultado desta redistribuição de forças entre os fios é a distorção do condutor em relação ao seu eixo longitudinal (HORTÊNCIO, 2009).

Os dados dos deslocamentos detectados nos lasers das hastes e no ponto 89 mm são adquiridos pelo mesmo sistema dos extensômetros, o ADS 2000 (Lynx Technology).

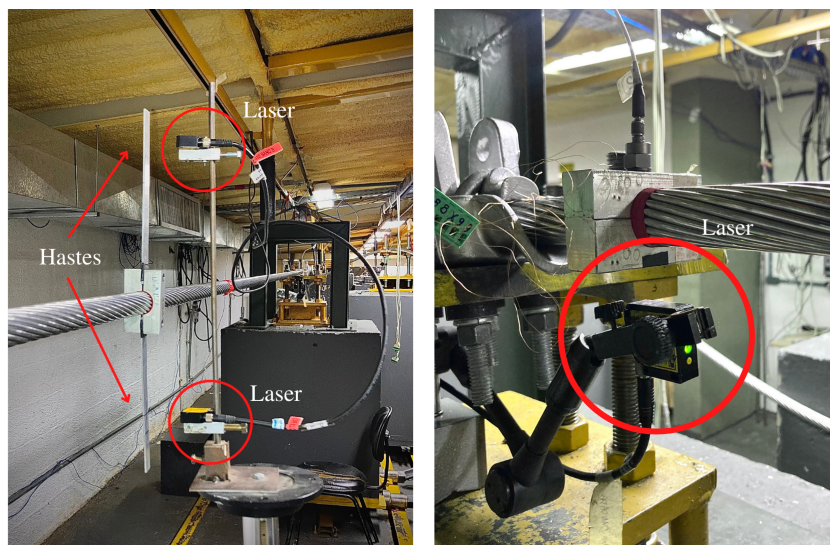
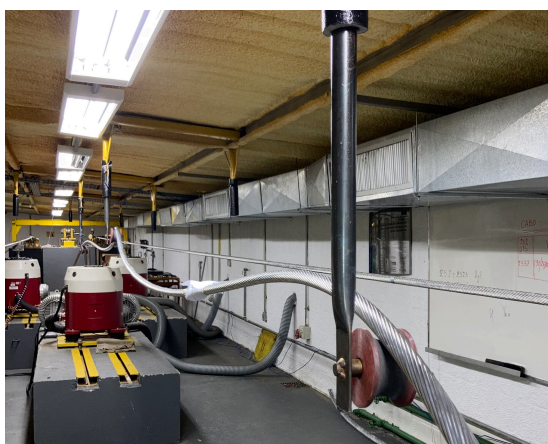


Figura 3.10 – Lasers utilizados para detecção das quebras e contagem de ciclos.

## 3.6 Procedimentos

### 3.6.1 Montagem do Cabo na Bancada

1. O primeiro procedimento para a preparação do experimento é realizar a montagem das polias de sustentação do cabo ao longo do vão, que serão utilizadas para manter o condutor elevado enquanto ele não for tracionado.
2. O cabo é desenrolado das bobinas, esticando-o no vão.



(a) Polias de sustentação.



(b) Bobina do cabo condutor.

Figura 3.11 – Polias de sustentação do condutor e bobina.

3. São instalados os grampos de ancoragem em ambas as extremidades do vão. Posteriormente os grampos são acoplados aos mecanismos de tracionamento do cabo.

4. É aplicada a pré-carga na talha de alavanca até que o condutor seja completamente esticado.
5. Na extremidade oposta, são adicionados pesos até que seja apontada uma carga de tracionamento de 21% da Resistência Mecânica Calculada na célula de carga.
6. São retiradas as polias de sustentação.
7. O cabo esticado é medido a fim de determinar o ponto exato do meio do vão para a instalação da emenda.
8. A carga de tração do cabo é retirada para que seja possível instalar a emenda pré-formada.
9. Para realizar o corte do cabo condutor, o ponto onde o centro da emenda será instalado é envolto por fita isolante. Dessa forma, quando os fios do condutor forem serrados a estrutura original do condutor será preservada. Após esse procedimento o condutor é serrado para a instalação da emenda.
10. É aplicada graxa nas pontas do condutor para facilitar a instalação da emenda.
11. A emenda é instalada no condutor tendo-se cautela para que as pontas do cabo permaneçam o mais próximas possíveis.
12. As hastes são instaladas em sub-conjuntos até que todas as 13 varetas estejam fixadas. Antes do último conjunto de hastes ser colocado é registrada a distância entre as pontas do condutor para posterior conferência de episódios de escorregamento.



*Figura 3.12 – Distância entre as pontas do condutor dentro da emenda.*

13. Instalada a emenda pré-formada, o cabo é tracionado novamente com a carga de 21% da Resistência Mecânica Calculada.

14. É aplicada tinta *spray* nas pontas da emenda para verificação visual da ocorrência de escorregamentos entre a emenda e o condutor.



*Figura 3.13 – Extremidade da emenda pintada em tinta *spray* preta.*

15. O cabo é mantido tracionado, sem intervenções, por cerca de 12 horas para que haja a sua acomodação, possibilitando a distribuição da carga de tração por todos os fios.
16. Transcorrido o tempo de acomodação, é realizada a verificação da carga de tração na célula de carga. Caso necessário são feitos ajustes nos pesos até que seja atingida a tração almejada.
17. Por fim, o grampo de suspensão é fixado no condutor. Cada um de seus parafusos são submetidos a aperto de 50 Nm.

### **3.6.2 Instrumentação**

1. O cabo condutor é fixado por abraçadeira no *shaker* e no topo da abraçadeira é acoplado um acelerômetro.
2. Próximo ao grampo de suspensão, no ponto de medição do  $Y_b$ , é instalada abraçadeira com acelerômetro fixado. Também neste ponto, um laser é adicionado para a contagem de ciclos do ensaio.
3. São instalados acelerômetros na emenda, a depender do ensaio realizado, podendo ser ou nas extremidades da emenda ou em seu centro.
4. É realizada a extensometria, conforme detalhado na subseção 3.6.2.1, em dois pontos: nas varetas na ponta da emenda (a extremidade já próxima ao cabo condutor exposto) e logo ao fim da emenda nos fios do condutor.

5. São executados testes iniciais para determinação da frequência de operação do ensaio, conforme subseção 3.6.3. Uma vez definida a frequência, no primeiro nó após o grampo de suspensão, são instaladas as hastes e o laser para detecção das quebras no condutor.
6. Após o posicionamento dos componentes de instrumentação, é feita a calibragem dos lasers ligados ao aquisitor de dados ADS 2000 (Lynx Technology) por meio do *software* fornecido pela Lynx.

### 3.6.2.1 Extensometria

No procedimento de extensometria o primeiro passo é realizar o preparo da superfície em que serão aplicados os extensômetros. A superfície dos fios é lixada de modo que toda sujeira existente seja retirada e que a rugosidade aumente, possibilitando a aderência dos extensômetros (Figura 3.14). De forma geral, a intenção durante processos de extensometria é que o fio do condutor e o extensômetro tornem-se uma só estrutura, para que as micro deformações do material sejam detectadas pelo dispositivo.

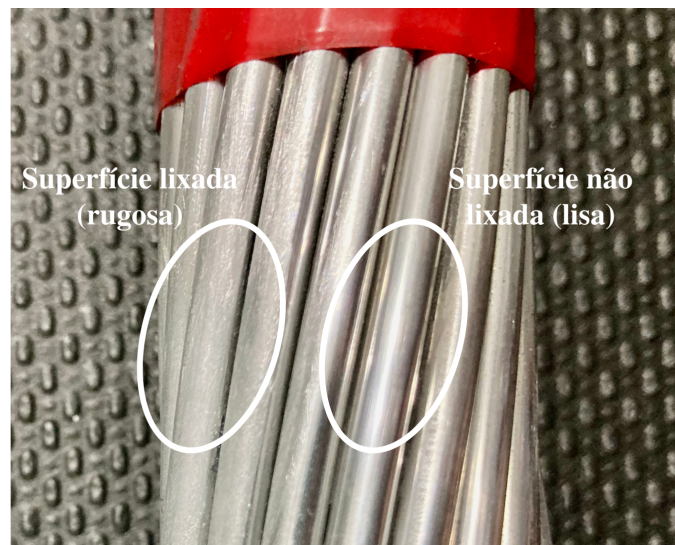
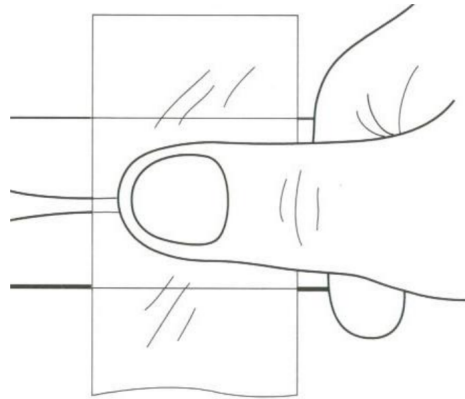


Figura 3.14 – Comparação da superfície lixada com a não lixada para colagem de extensômetro.

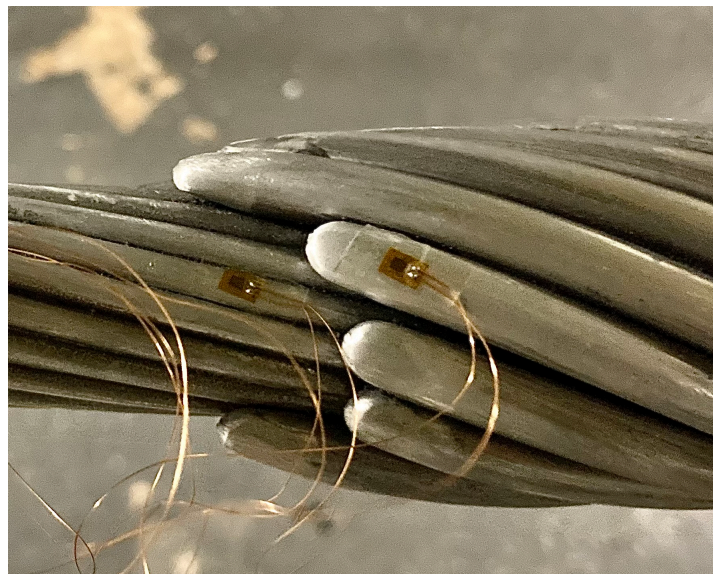
Depois do processo de lixamento os fios são submetidos a limpeza com algodão e álcool isopropílico a fim de que a superfície seja completamente limpa.

É importante que os extensômetros que serão utilizados tenham sua resistência testada em amperímetro antes de serem colados, para garantir seu pleno funcionamento. Após os testes, o extensômetro é colado em fita adesiva, certificando-se que o lado interno do extensômetro fique livre. Nesse momento é aplicada uma pequena quantidade de cola instantânea no fio do condutor. Em seguida o extensômetro com a fita adesiva é colado no fio na posição longitudinal.

É necessário que o dispositivo seja mantido pressionado por alguns minutos até que a cola seque. Nesta etapa é possível a utilização de uma almofada de silicone para auxiliar na compressão (Figura 3.15).



*Figura 3.15* – Compressão do extensômetro contra a superfície do cabo para colagem do dispositivo.



*Figura 3.16* – Extensômetros colados na ponta da emenda e no fio do condutor.

Após a colagem, os terminais dos extensômetros são conectados ao aquisitor de dados ADS 2000 para sua calibragem e medição de deformação. A deformação nos fios do condutor é verificada durante a excitação do cabo. Portanto, durante os primeiros minutos de ensaio é feito o procedimento de medição das deformações existentes.

Ademais, durante a calibragem, caso seja verificado dados não esperados é provável que o procedimento de colagem dos extensômetros não tenha sido feito corretamente. Por se tratar de um processo delicado sujeito a erros de instalação, é comum que sejam fixados vários

extensômetros em um mesmo ponto de medição desejado para que seja assegurada a obtenção dos dados requeridos.

Para os ensaios realizados neste trabalho apenas Ensaio 1 e o Ensaio 2 apresentaram resultados satisfatórios após o procedimento de extensometria. Nos demais ensaios, as tentativas de colagem dos extensômetros não foram bem sucedidas dentro do tempo disponível para a conclusão do Projeto.

### **3.6.3 Execução dos Ensaios**

Para iniciar o ensaio no cabo condutor unido por emenda pré-formada, é necessária a configuração do *software* associado ao controlador do amplificador e *shaker*. São inseridos dados como a amplitude de deslocamento do ensaio e dados sobre os acelerômetros utilizados.

Para os ensaios de Tipo A e B, posteriormente, é realizada uma varredura de frequência no condutor para detectar suas frequências naturais. A partir destas frequências são realizados diversos testes para identificação dos valores de frequência que estabilizam no sistema e que se adequam aos objetivos do ensaio.

Já para os ensaios de Tipo C a segunda etapa seria definir no *software* de controle qual será a faixa de frequência em que o ensaio ocorrerá.

Definidas as frequências de operação, são ativadas as gravações recorrentes no *software* fornecido pela Lynx. Os dados gerados por este *software* poderão ser interpretados para verificar o número de ciclos e a quantidade de quebras ocorridas.

Durante o ensaio é comum que o amplificador interrompa a excitação em caso de instabilidades no sistema. Por este motivo é necessário que seja feita a verificação recorrente dos componentes, como por exemplo, o aperto dos parafusos da abraçadeira do *shaker*. Além disso, para os ensaios de Tipo A e B, a cada momento em que o sistema interromper o ensaio, uma nova varredura de frequência deve ser feita, para garantir que o ensaio seja reiniciado na mesma faixa de frequência natural do cabo.

Pretende-se interromper os ensaios após a quarta quebra de fios do condutor, que representa 10% do total de 37 fios deste modelo de cabo.

## 4 Resultados

### 4.1 Ensaios Tipo A: Centro do Vão em um Antinó

#### 4.1.1 Ensaio 1: CAL 838 MCM com centro da emenda em um anti-nó e $Y_b = 0,6mm$ (pk-pk)

Foi realizado ensaio de vibração no condutor CAL 838 MCM unido no centro do vão por emenda pré-formada de 13 varetas. O intuito do ensaio era que um anti-nó estivesse localizado o mais próximo possível do centro da emenda. O valor da amplitude de deslocamento utilizado foi de  $Y_b = 0,6mm$ . Após a execução de testes com diferentes frequências, a que apresentou a situação mais próxima do objetivo do ensaio de se obter um anti-nó do centro da emenda, foi a frequência de aproximadamente  $f = 25Hz$ .

Um acelerômetro foi posicionado no centro da emenda para verificação da amplitude e da velocidade de deslocamento neste ponto. Os dados obtidos pelo dispositivo encontram-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Deslocamento e velocidade no centro da emenda para Ensaio 1.

<b>Deslocamento no Ponto 89</b>	<b>Frequência</b>	<b>Deslocamento no Centro da Emenda</b>		<b>Velocidade no Centro da Emenda</b>
$Y_b$ (pk-pk) (mm)	(Hz)	$Y_{CE}$ (pk-pk) (mm)	$y_{CE}$ (0-pk) (mm)	$fY_{CE}$ (mm/s)
0,60	25,19	15,09	7,54	380

Por meio das medições obtidas pelos extensômetros colados em três fios do condutor bem próximos à emenda, foi possível relatar na Tabela 4.2 as deformações presentes nos fios e o cálculo da tensão neste ponto durante o ensaio. Como esperado, a tensão calculada para este ponto foi bastante pequena, sendo igual a 2,69 MPa.



Tabela 4.2 – Deformações medidas e tensões calculadas na boca da emenda para o Ensaio 1.

<b>Deslocamento no Ponto 89</b>	<b>Deformação Medida na Boca da Emenda</b>	<b>Tensão na Boca da Emenda</b>
$Y_b$ (pk-pk) (mm)	(0-pk) ( $\mu\text{m/m}$ )	(0-pk) (MPa)
0,60	39	2,69

A quarta quebra de fios do condutor identificada no Ensaio 1 ocorreu após cerca de 27 milhões de ciclos. Cada uma das quatro quebras de fios ocorreram nos números de ciclos especificados pela Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Quebras nos fios do condutor e número de ciclos para Ensaio 1.

$Y_b = 0,6 \text{ mm}$	
<b>Quebra nos Fios do Condutor</b>	<b>Nº de Ciclos</b>
1ª quebra	17.480.789
2ª quebra	23.064.533
3ª quebra	24.005.109
4ª quebra	27.476.099

Como relatado na subseção 3.6, as extremidades das emendas foram pintadas com tinta *spray* para a inspeção visual de possíveis escorregamentos. Após o término do ensaio foi possível verificar a ausência de escorregamentos entre a emenda e o condutor, conforme a Figura 4.1.

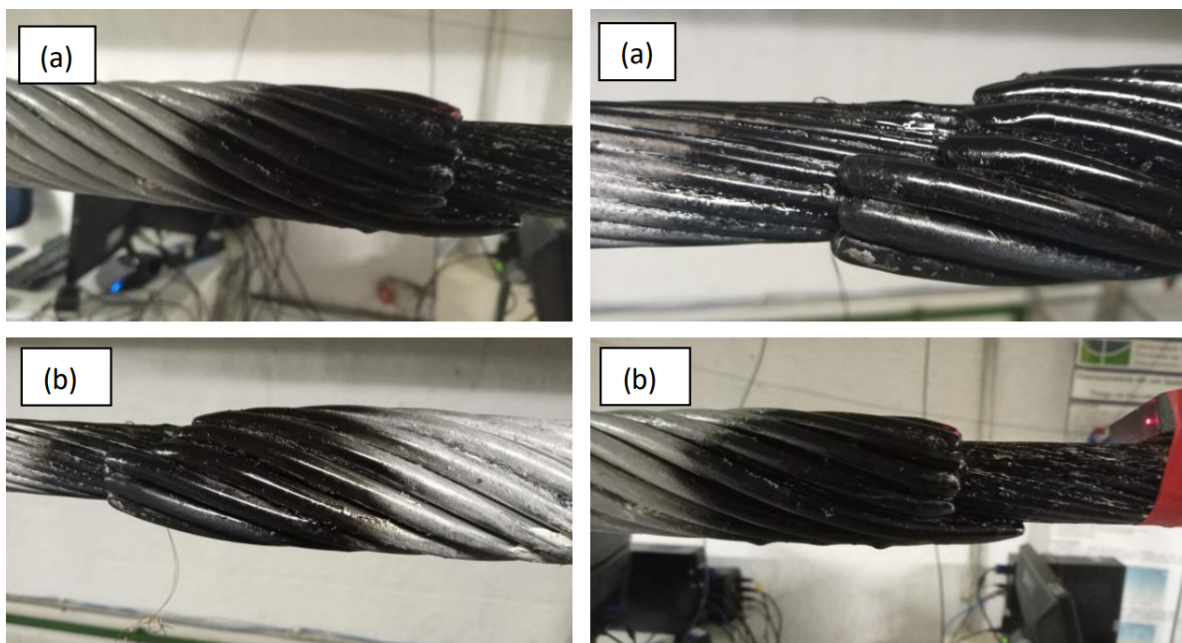


Figura 4.1 – Tinta marcadora para monitoramento de deslizamentos no Ensaio 1 onde a) representa o início do ensaio e b) o fim, após 27 milhões de ciclos.

Ao fim do ensaio foram retiradas duas varetas da emenda pré-formada para a verificação do espaço existente entre as pontas do condutor. Foi medida a distância de aproximadamente 6 milímetros, como apresentado na Figura 4.2.



Figura 4.2 – Espaço entre os condutores dentro das varetas para Ensaio 1.

#### 4.1.2 Ensaio 2: CAL 838 MCM com centro da emenda em um anti-nó e $Y_b = 0,8\text{mm}$ (pk-pk)

O segundo ensaio realizado foi conduzido com a emenda pré-formada instalada no centro do vão unindo as pontas do condutor CAL 838 MCM. Este ensaio também possuía o intuito de

posicionar o centro da emenda (centro do vão) em um anti-nó, porém com  $Y_b = 0,8\text{mm}$ . A frequência de excitação do conjunto foi a de  $f = 21,05\text{Hz}$ . O acelerômetro instalado no centro da emenda gerou os dados da Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Deslocamento e velocidade no centro da emenda para Ensaio 2.

Deslocamento no Ponto 89	Frequência	Deslocamento no Centro da Emenda		Velocidade no Centro da Emenda
		$Y_{CE}$ (pk-pk) (mm)	$y_{CE}$ (0-pk) (mm)	$fY_{CE}$ (mm/s)
0,80	21,05	19,04	9,52	401

Foram instalados extensômetros em fios do condutor próximos à boca da emenda para verificar a tensão presente nestes pontos, que podem ser observados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Deformações medidas e tensões calculadas na boca da emenda para os Ensaio 2.

Deslocamento no Ponto 89	Deformação Medida na Boca da Emenda	Tensão na Boca da Emenda
$Y_b$ (pk-pk) (mm)	(0-pk) ( $\mu\text{m/m}$ )	(0-pk) (MPa)
0,80	54	3,70

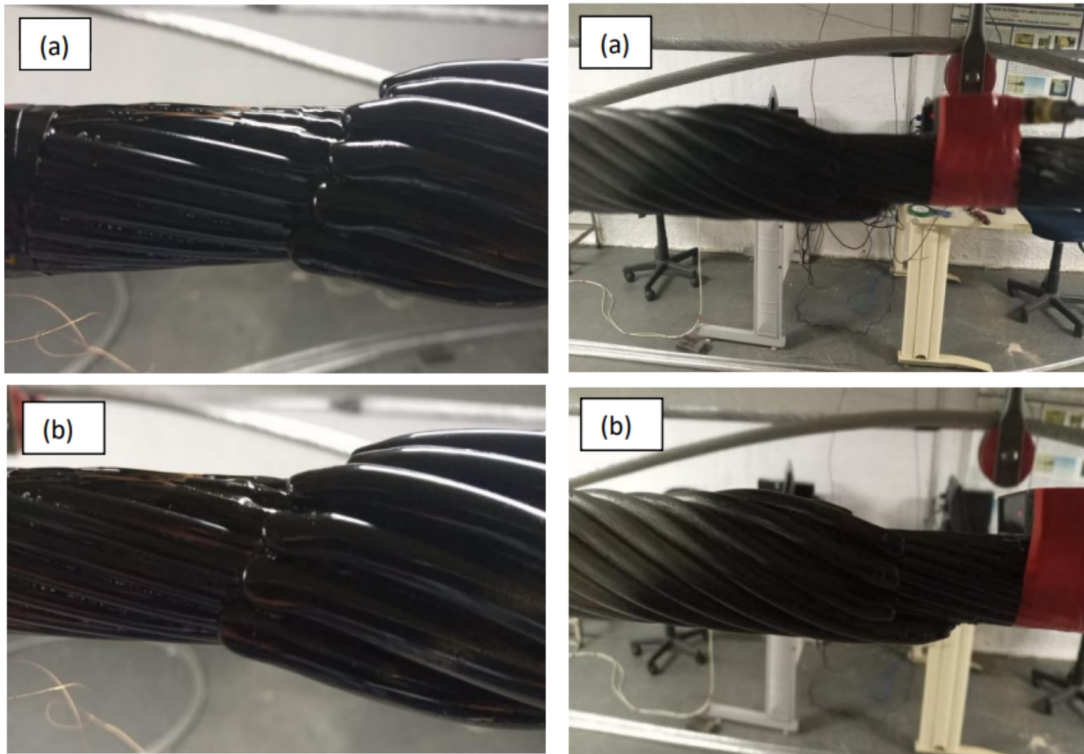
A Tabela 4.6 apresenta o respectivo número de ciclos em que ocorreu cada quebra de fios do condutor, completando assim a falha de quatro fios do condutor. No total, o ensaio foi executado até cerca de 6 milhões de ciclos.

Tabela 4.6 – Quebras nos fios do condutor e número de ciclos para Ensaio 2.

$Y_b = 0,8\text{ mm}$	
Quebra nos Fios do Condutor	Nº de Ciclos
1ª quebra	2.667.110
2ª quebra	3.612.758
3ª quebra	4.243.190
4ª quebra	6.717.290

No final do ensaio, a tinta marcadora aplicada nas extremidades da emenda não apresentou evidências de deslizamentos entre a emenda e o condutor. Quanto ao espaçamento existente

entre os condutores após a retirada de duas varetas da emenda, foi medida a distância de 13 milímetros entre as pontas do condutor.



*Figura 4.3* – Tinta marcadora para monitoramento de deslizamentos no Ensaio 2 onde a) representa o início do ensaio e b) o fim, com 6 milhões de ciclos.



*Figura 4.4* – Espaço entre os condutores dentro das varetas para Ensaio 2.

### 4.1.3 Ensaio 3: CAL 823 MCM com extremidades da emenda em anti-nós e $Y_b = 0,6mm$

Neste ensaio, a emenda pré-formada foi instalada no centro do vão unindo pontas do condutor CAL 823 MCM. Inicialmente, o intuito do Ensaio 3 era que sua execução fosse com frequência em que as extremidades da emenda estivessem em anti-nós e o centro da emenda estivesse em um nó (modo de vibração par – ensaio Tipo B). Contudo, o objetivo principal do experimento se tratava de posicionar as extremidades da emenda o mais próximo possível de anti-nós, onde segundo a EPRI (2006) seriam encontrados os maiores valores de tensão de flexão. Quanto a localização do centro da emenda em um nó, este seria um objetivo secundário para o ensaio.

No geral, a frequência que apresentou características mais próximas às do intuito do ensaio foi a de  $f = 24Hz$ . Todavia, este valor de frequência apresentou grande instabilidade no sistema. Foi necessário então determinar uma nova frequência de execução do experimento. A segunda melhor opção encontrada foi a de  $f = 28Hz$ , onde o centro da emenda estava localizado próximo a um anti-nó. Esta localização do anti-nó no centro do vão tornou este um ensaio do Tipo A.

Além disso, foi necessário que o valor da amplitude de deslocamento fosse de  $Y_b = 0,6mm$ , pois 28 Hz trata-se de um frequência elevada para o sistema de excitação da bancada. Para valores de  $Y_b$  superiores a este não houve estabilização suficiente.

O posicionamento dos nós e anti-nós ao longo da emenda para esta frequência estão representados na Figura 4.5. Foram instalados acelerômetros nas duas extremidades da emenda e também em seu centro para a conferência do deslocamento existente nestas posições. As leituras obtidas encontram-se na Tabela 4.7.

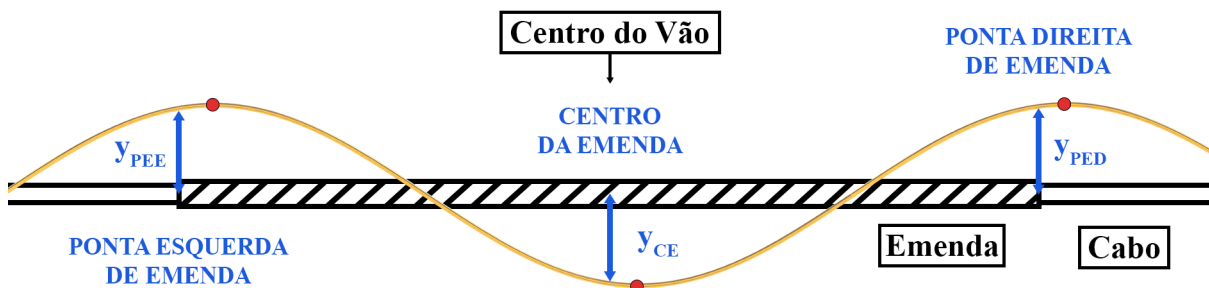
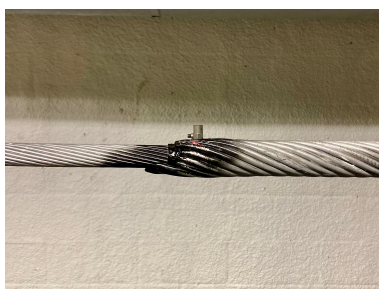
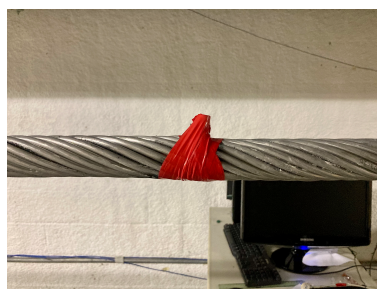


Figura 4.5 – Posicionamento dos anti-nós do Ensaio 3.



(a) Acelerômetro da ponta esquerda - Ensaio 3.



(b) Acelerômetro do centro da emenda - Ensaio 3.



(c) Acelerômetro da ponta direita da emenda - Ensaio 3.

Figura 4.6 – Acelerômetros do Ensaio 3.

Tabela 4.7 – Deslocamento e velocidade nas extremidades da emenda para o Ensaio 3.

Deslocamento no Ponto 89 $Y_b$ (pk-pk) (mm)	Frequência (Hz)	Deslocamento na Ponta Esquerda da Emenda		Deslocamento na Ponta Direita da Emenda	
		$Y_{PEE}$ (pk-pk) (mm)	$y_{PEE}$ (0-pk) (mm)	$Y_{PED}$ (pk-pk) (mm)	$y_{PED}$ (0-pk) (mm)
0,60	28,79	10,16	5,08	12,55	6,28
		<b>Deslocamento no Centro da Emenda</b>			
		$Y_{CE}$ (pk-pk) (mm)		$y_{CE}$ (0-pk) (mm)	
		11,30		5,65	

Tabela 4.8 – Comprimento de onda ( $\lambda$ ) para o Ensaio 3.

Frequência (Hz)		Comprimento de Onda $\lambda$ (m)	
28,79		Experimental ( $\lambda_{exp}$ )	4,64
Modo n = 17	27,38	Teórico ( $\lambda_{teo}$ )	4,61

Por meio da Equação 11 foi calculado o comprimento de onda teórico para o Ensaio 3. Utilizando a frequência teórica de  $f = 27,38$  Hz correspondente ao modo de vibrar  $n = 17$ , conforme Tabela 5.1, foi possível obter o valor de  $\lambda_{exp} = 4,61m$ .

Por outro lado, durante a execução do ensaio na bancada experimental foi medido de forma aproximada o comprimento da onda formada, obteve-se então  $\lambda_{teo} = 4,64m$ .

$$f_n = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{T}{m_L}} \quad (11)$$

De forma distinta aos demais ensaios realizados, o critério utilizado para interrupção das vibrações do Ensaio 3 não foi a ocorrência da quarta quebra dos fios do condutor, pois, não havia tempo hábil para executar o ensaio por um longo período de tempo até que fosse atingido o número de ciclos necessários para as quebras. Desta maneira, este ensaio foi interrompido quando atingiu-se 10 milhões de ciclos.

As marcações das pontas das emendas em tinta após o ensaio demonstraram que não existiram evidências de escorregamentos na interface cabo/ emenda, como pode ser observado na Figura 4.7



(a) Ponta esquerda da emenda marcada por tinta antes - Ensaio 3.



(b) Ponta direita da emenda marcada por tinta antes - Ensaio 3.



(c) Ponta esquerda da emenda marcada por tinta depois - Ensaio 3.



(d) Ponta direita da emenda marcada por tinta depois - Ensaio 3.

Figura 4.7 – Marcação das pontas da emenda para Ensaio 3.

#### 4.1.4 Ensaio 4: CAL 838 MCM com extremidade esquerda da emenda (centro do vão) em um anti-nó e $Y_b = 1,0mm$ (pk-pk)

O Ensaio 4 foi realizado com o condutor CAL 838 MCM e a emenda pré-formada foi instalada com sua extremidade esquerda localizada no centro do vão. Portanto, o intuito deste ensaio era excitar o condutor com frequência em que a extremidade esquerda da emenda estivesse em um anti-nó.

A amplitude de deslocamento no ponto 89 utilizada foi de  $Y_b = 1,0mm$ . De acordo com objetivo do ensaio, a frequência que mais se adequou a esta situação foi a de  $f = 20,95Hz$ . Nesta situação havia um nó posicionado próximo ao centro da emenda e um antinó próximo a extremidade esquerda da emenda. A representação aproximada da localização do nó e anti-nó na emenda encontra-se na Figura 4.8.

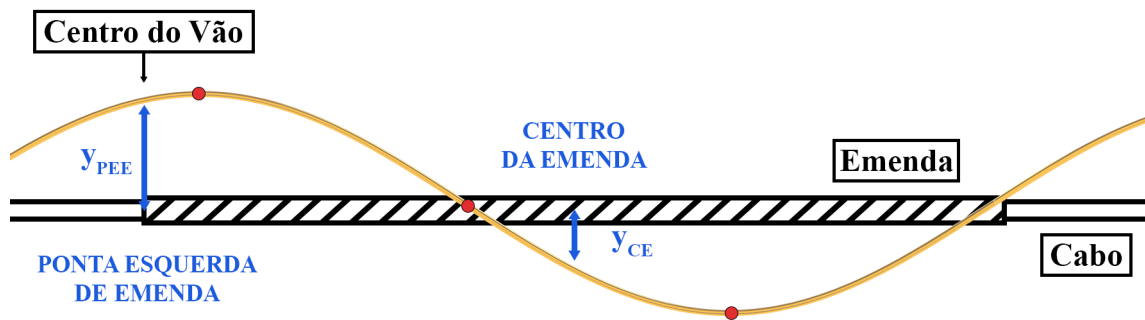


Figura 4.8 – Posicionamento do nó e anti-nó do Ensaio 4.

Além do acelerômetro instalado no ponto 89, foram instalados outros dois na emenda pré-formada, um no centro da emenda e outro na extremidade esquerda da emenda, para que seja verificada amplitude de deslocamento nestes dois pontos. A Tabela 4.9 apresenta os dados coletados durante o ensaio.

Tabela 4.9 – Deslocamento no centro e na ponta da emenda para Ensaio 4.

Deslocamento no Ponto 89	Frequência	Deslocamento no Centro da Emenda		Deslocamento na Ponta Esquerda da Emenda	
		$Y_{CE}$ (pk-pk) (mm)	$y_{CE}$ (pk-pk) (mm)	$Y_{PEE}$ (pk-pk) (mm)	$y_{PEE}$ (0-pk) (mm)
$Y_b$ (pk-pk) (mm)	(Hz)	$Y_{CE}$ (pk-pk) (mm)	$y_{CE}$ (pk-pk) (mm)	$Y_{PEE}$ (pk-pk) (mm)	$y_{PEE}$ (0-pk) (mm)
1,0	20,95	7,94	3,97	15,72	7,86



O conjunto condutor/emenda foi ensaiado até serem atingidos 1.696.878 de ciclos. Após a desmontagem do grampo de suspensão, foi observado que ocorreram três quebras nos fios do condutor durante o ensaio, sendo uma das quebras na camada externa de fios e outras duas quebras em camadas internas de fios. Na Tabela 4.10 encontram-se os respectivos valores onde estima-se que ocorreu cada quebra.

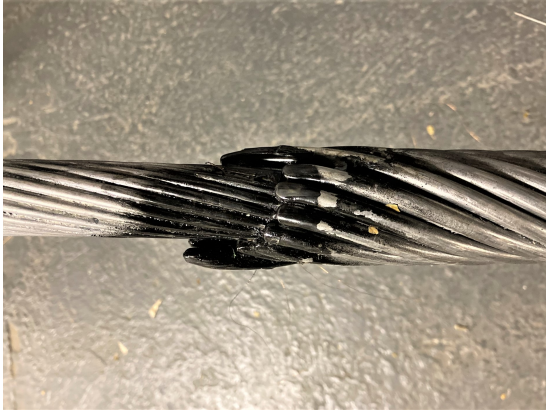


Figura 4.9 – Condutor com quebras após desmontagem do grampo - Ensaio 4.

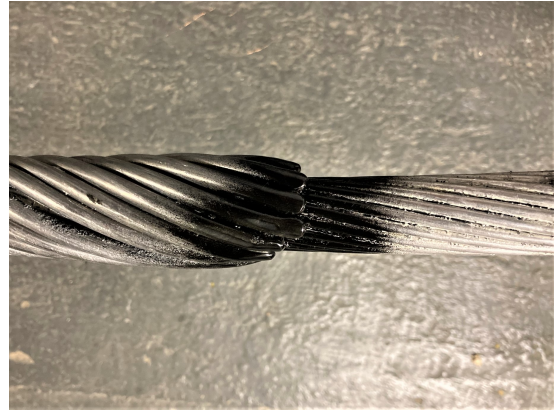
Tabela 4.10 – Quebras nos fios do condutor e número de ciclos para Ensaio 4.

$Y_b = 1,0 \text{ mm}$	
Quebra nos Fios do Condutor	Nº de Ciclos
1ª quebra	567.198
2ª quebra	1.320.318
3ª quebra	1.433.286

Na Figura 4.10 é possível notar que no fim do Ensaio 4 não houve evidências de deslizamentos na interface cabo/ emenda provenientes do ensaio de fadiga.



(a) Ponta esquerda da emenda após o Ensaio 4.



(b) Ponta direita da emenda após o Ensaio 4.

*Figura 4.10 – Pontas da emenda após o Ensaio 4.*

Ademais, é importante destacar que a amostra do conjunto condutor e emenda utilizado neste ensaio foi submetido à passagem por tambor para simular a prática que é eventualmente empregada em construções de linhas de transmissão no Brasil.

## **4.2 Ensaio Tipo B: Centro do Vão em um Nó**

### **4.2.1 Ensaio 5: CAL 823 MCM com centro da emenda em um nó, uma das extremidades da emenda em anti-nó e $Y_b = 0,8mm$ (pk-pk)**

Este ensaio visava excitar o cabo condutor de forma que o centro da emenda (também o centro do vão) estivesse posicionado em um nó e, ao menos uma das extremidades da emenda, estivesse em um anti-nó.

Após procedimento de varredura e testes de diferentes picos, a frequência mais adequada, de acordo com o intuito estabelecido, foi a da aproximadamente  $f = 17Hz$ . Nesta situação havia um nó no centro de emenda e um anti-nó na extremidade esquerda da emenda. Para este ensaio a amplitude de deslocamento foi de  $Y_b = 0,8mm$ . O posicionamento aproximado do nó e do anti-nó na emenda pré-formada está representado na Figura 4.11.

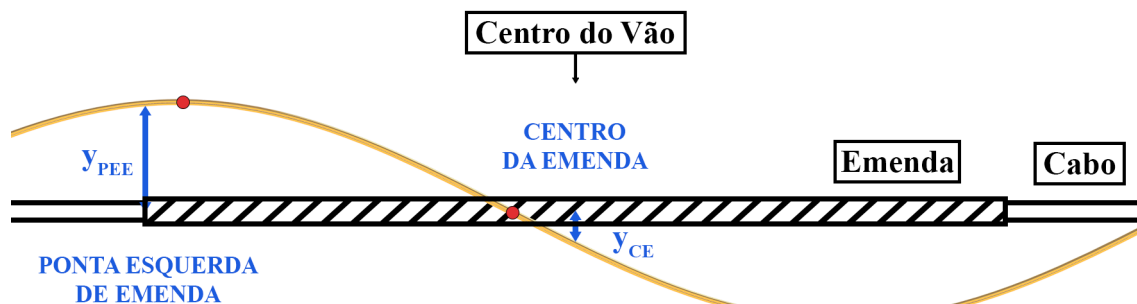


Figura 4.11 – Posicionamento do nó e anti-nó no Ensaio 5

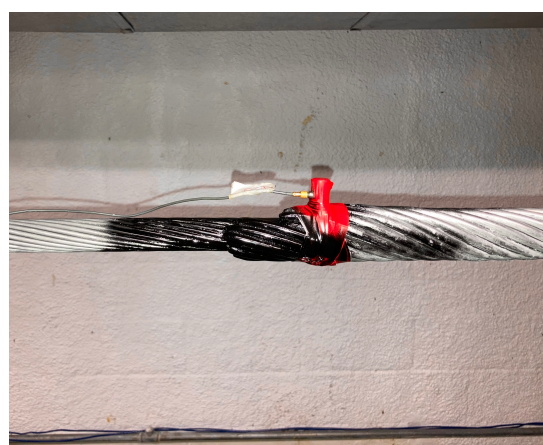
Foram posicionados dois acelerômetros para a verificação da amplitude de deslocamento durante o ensaio, um no centro da emenda e outro na extremidade esquerda da emenda onde encontrava-se um anti-nó. Os dados obtidos por estes dispositivos foram relatados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Deslocamento e velocidade no centro e na ponta da emenda para o Ensaio 5.

Deslocamento no Ponto 89	Frequência	Deslocamento na Ponta Esquerda da Emenda		Deslocamento no Centro da Emenda	
		$Y_{PEE}$ (pk-pk) (mm)	$y_{PEE}$ (0-pk) (mm)	$Y_{CE}$ (pk-pk) (mm)	$y_{CE}$ (0-pk) (mm)
0,80	17,29	22,22	11,11	10,07	5,04



(a) Acelerômetro no centro da emenda - Ensaio 3.



(b) Acelerômetro na ponta da emenda - Ensaio 5.

Figura 4.12 – Acelerômetros do Ensaio 5.

Durante o ensaio foi medido o comprimento estimado da onda formada ao longo do vão. Conforme a Equação 11, foi calculado o comprimento de onda teórico para este ensaio a partir da frequência teórica de  $f = 16,46\text{Hz}$  correspondente ao modo de vibrar  $n = 10$ . Os valores do comprimento de onda teórico e experimental do Ensaio 5 encontram-se na Tabela 4.12

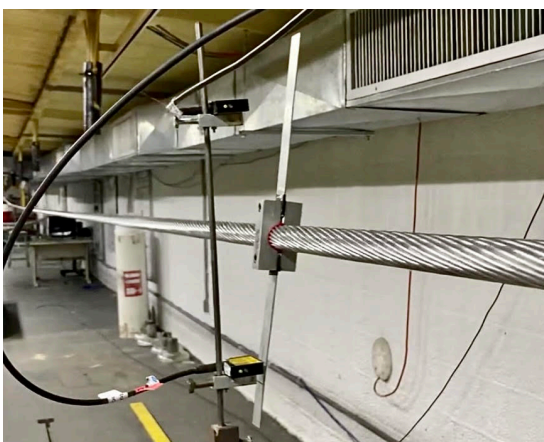
Tabela 4.12 – Comprimento de onda ( $\lambda$ ) para o Ensaio 5.

Frequência (Hz)		Comprimento de Onda $\lambda$ (m)	
17,29		Experimental ( $\lambda_{exp}$ )	7,18
Modo n = 10	16,46	Teórico ( $\lambda_{teo}$ )	7,84

O ensaio foi interrompido após a observação da quarta quebra de fios do condutor. Na Tabela 4.13 foram descritos os respectivos números de ciclos estimados em que ocorreram as quebras dos fios.

Tabela 4.13 – Quebras nos fios do condutor e número de ciclos para Ensaio 3.

$Y_b = 0,8 \text{ mm}$	
Quebra nos Fios do Condutor	Nº de Ciclos
1ª quebra	1.146.628
2ª quebra	2.871.640
3ª quebra	3.826.630
4ª quebra	3.989.980



(a) Laser deslocado demonstrando quebras no condutor.



(b) Quebras dos fios após a desmontagem do grampo.

Figura 4.13 – Evidências das quebras dos fios do condutor do Ensaio 5.

A extremidade pintada para a verificação de escorregamentos, ao fim do ensaio, não apresentou nenhuma evidência de deslizamento entre o condutor e a emenda. Foram retiradas duas varetas da emenda para verificação do espaçamento entre as pontas do cabo e mediu-se cerca de 10 milímetros, conforme Figura 4.15.



(a) Ponta da emenda marcada por tinta antes do Ensaio 5.



(b) Ponta da emenda marcada por tinta depois do Ensaio 5.

*Figura 4.14 – Marcação das pontas da emenda do Ensaio 5.*



*Figura 4.15 – Espaço entre os condutores dentro da emenda para Ensaio 5.*

### **4.3 Ensaio Tipo C: Varredura de Frequência**

O terceiro tipo de ensaio realizado no conjunto cabo-emenda foi o ensaio de varredura de frequência. Este ensaio consiste em submeter a emenda pré-formada a todas as frequências de excitação onde é possível que ocorra o fenômeno da vibração eólica. Para isto, estes valores de frequência foram calculados de acordo com a Equação 12.

$$f_s = S \frac{V}{d} \quad (12)$$

De acordo com EPRI (2006) o fenômeno da vibração eólica ocorre na incidência de ventos entre 1 a 8 m/s. Assim, para um determinado diâmetro do condutor que está submetido a vibração e considerando o Número de Strouhal  $S$  sendo igual a 0,185 para cabos condutores compostos por fios de seção circular, se adotarmos o limite máximo e mínimo da velocidade do vento, é possível então obter a frequência máxima e a frequência mínima em que ocorre a vibração eólica em um determinado cabo condutor.

O ensaio de varredura de frequência executado neste trabalho consiste em excitar o condutor continuamente com frequência variante, de forma crescente e decrescente, dentro dos limites máximos e mínimos onde ocorre a vibração eólica.

Este ensaio considerou os parâmetros da Tabela 4.14 para sua execução.

Tabela 4.14 – Parâmetros Utilizados no Ensaio Tipo C

<b>Parâmetros Ensaio Tipo C</b>			
Número de Strouhal	0,185	Frequência Mínima	6,98 Hz
Diâmetro do Condutor	26,78 mm		
Velocidade Mínima	1 m/s	Frequência Máxima	55,00 Hz
Velocidade Máxima	8 m/s		

Para a instrumentação deste ensaio, o parâmetro de controle da vibração foi atribuído ao acelerômetro instalado no *shaker*. Neste ponto estabeleceu-se a amplitude de deslocamento  $Y_{shaker} = 0,60mm$  pico a pico. Sendo assim, durante o ensaio, a amplitude de deslocamento no ponto 89 ( $Y_b$ ) variou de acordo com  $Y_{shaker}$  em associação à frequência em cada instante da varredura.

A emenda pré-formada foi instalada no condutor CAL 838 MCM com sua extremidade esquerda posicionada no centro do vão, para que durante o ensaio, conforme descrito na subseção 3.2, esta extremidade da emenda estivesse sempre posicionada em um nó ou em um anti-nó.

Foram instalados dois acelerômetros no vão, um no centro do vão – a extremidade esquerda da emenda – e outro no centro da emenda. No gráfico da Figura 4.16 foram plotadas a amplitude de deslocamento pico a pico dos acelerômetros instalados no vão em função da frequência em cada instante do ensaio.

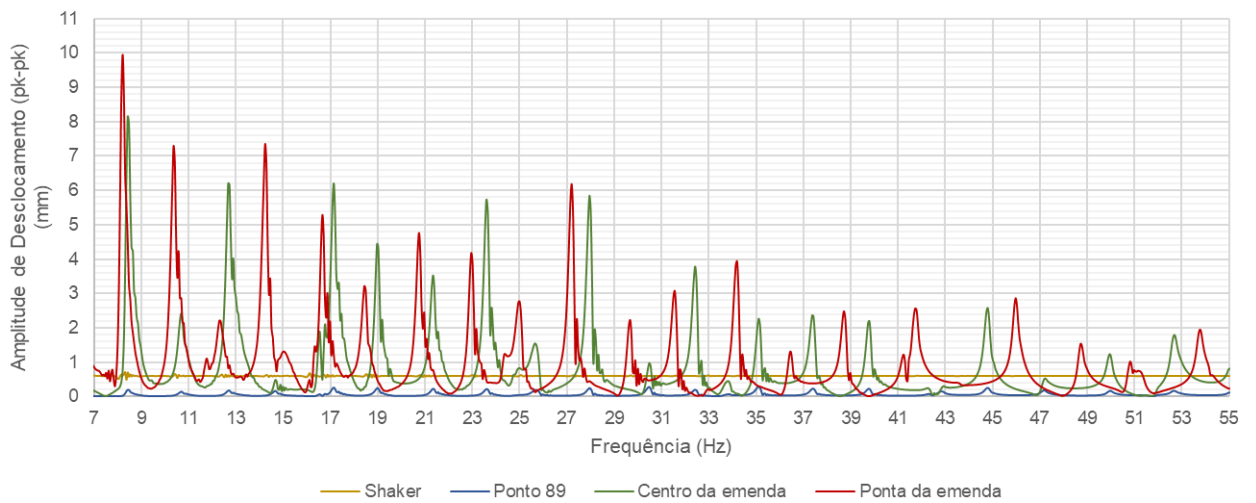
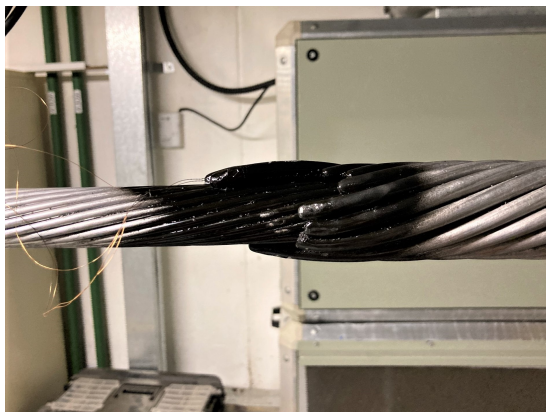


Figura 4.16 – Gráfico Amplitude de Deslocamento x Frequência - Ensaio Tipo C

Devido a baixa amplitude de deslocamento  $Y_b$  em que foi viável a realização deste ensaio, não foi possível executá-lo até ocorrência da quarta quebra de fios do condutor. Sendo assim, o Ensaio Tipo C foi interrompido após a execução de 10 milhões de ciclos.

Ao término do experimento observou-se que não houve evidências de escorregamento entre a emenda pré-formada e o condutor, conforme Figura 4.17.



(a) Ponta esquerda da emenda após ensaio de varredura de frequência.



(b) Ponta direita da emenda após ensaio de varredura de frequência.

Figura 4.17 – Pontas da emenda após ensaio de varredura de frequência.

Neste ensaio, de forma semelhante ao Ensaio 5, a amostra utilizada do conjunto condutor e emenda teve passagem por tambor para que houvesse uma simulação da prática eventualmente adotada em construções de linhas de transmissão.

## 4.4 Cálculo do *Gap* Entre as Varetas da Emenda Pré-Formada

Conforme descrito na subseção 2.4, segundo a EPRI (2006), para a utilização de emendas pré-formadas em cabos condutores, é adequado que entre as varetas da emenda exista espaçamento suficiente para garantir o contante contato entre a emenda e o condutor, mesmo em casos de variação do diâmetro do cabo.

Para medir este espaçamento, denominado *gap*, foi feita modelagem computacional 3D do modelo da emenda de 13 varetas, especificada na subseção 3.4, instalada em dois condutores liga 1120, o CAL 838 MCM e o CAL 823 MCM. A modelagem foi reproduzida em dois *softwares* distintos – SolidWorks e Catia – para que seja possível uma comparação entre o resultado encontrado em ambos.

As dimensões utilizadas para a modelagem do condutor foram adotadas conforme a NBR 16686 (ABNT, 2018), a qual indica que a variação da seção do cabo não pode ser superior a 2%. Portanto, foi adotada a tolerância de 1% para variação do diâmetro do condutor, pois, esta tolerância para dimensão do diâmetro resulta numa variação de 2% na área.

Já para a modelagem da emenda pré-formada, foi feita uma aproximação quanto a geometria da seção das varetas. Assim, para o modelo 3D foi considerado que as varetas possuem seção elíptica. As dimensões do eixo menor e do eixo maior correspondentes à seção da vareta foram adotadas de acordo com medições realizadas em amostras da emenda utilizada.

A fim de determinar o *gap* existente entre as varetas da emenda pré-formada em diferentes hipóteses, foram modelados os seguintes conjuntos: **(i)** emenda e condutor com dimensões nominais; **(ii)** limite superior do diâmetro do condutor e limite interior das dimensões da emenda e **(iii)** limite inferior do diâmetro do condutor e limite superior das dimensões da emenda.

As especificações das dimensões adotadas para cada configuração podem ser observadas na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Especificações das medidas utilizadas na modelagem 3D do conjunto cabo/emenda.

<b>Configuração</b>	<b>(i)</b>	<b>(ii)</b>	<b>(iii)</b>
<b>Diâmetro do condutor 823 MCM (mm)</b>	26,53	26,80	26,26
<b>Diâmetro do condutor 838 MCM (mm)</b>	26,78	27,05	26,51
<b>Passo da emenda (mm)</b>	244	264	224
<b>Diâmetro maior da vareta (mm)</b>	8,03	7,82	8,24
<b>Diâmetro menor da vareta (mm)</b>	7,34	7,24	7,44



Na modelagem, o posicionamento das varetas da emenda foi realizado de tal forma que o espaçamento total entre as 13 varetas estivesse localizado apenas em um par do conjunto, como exemplificado na Figura 2.7 b).

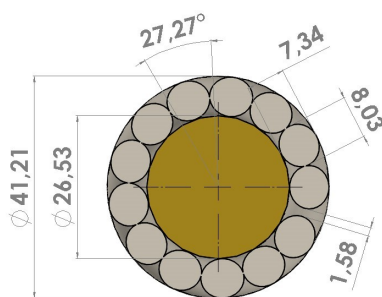
#### 4.4.1 Emenda Pré-formada de 13 Varetas Instalada no Cabo CAL 823 MCM Liga 1120

Para o caso da emenda instalada no cabo CAL 823 MCM, os resultados obtidos do espaçamento entre as varetas da emenda nas configurações (i), (ii) e (iii), podem ser observados na Tabela 4.16.

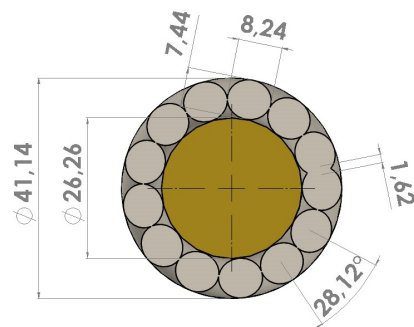
Tabela 4.16 – *Gap* entre das varetas da emenda pré-formada instalada no cabo CAL 823 MCM.

Configuração	Gap entre as varetas (mm)	
	SolidWorks	Catia
(i)	1,58	1,55
(ii)	4,77	4,70
(iii)	-1,62	-1,65

Para fins comparativos, na Figura 4.18 e Figura 4.19, estão representadas as modelagens realizadas para as configurações (i) e (iii). É possível observar que para a configuração (iii), onde o condutor possui suas dimensões mínimas e a emenda possui suas dimensões máximas, obteve-se interferência entre as varetas da emenda.

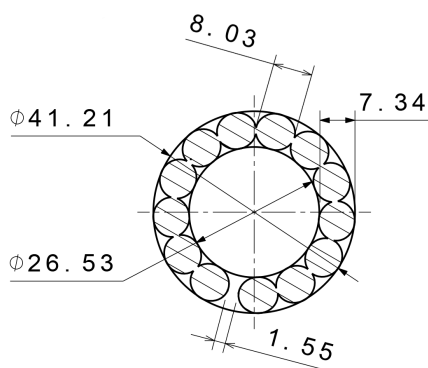


(a) Configuração (i) para emenda instalada em cabo CAL 823 MCM - SolidWorks.

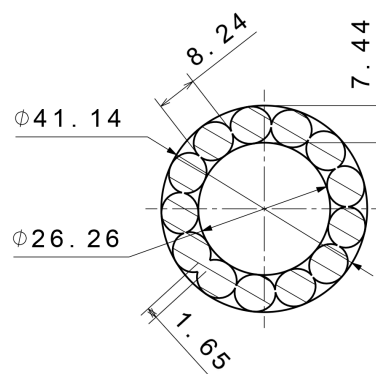


(b) Configuração (iii) para emenda instalada em cabo CAL 823 MCM - SolidWorks.

Figura 4.18 – Modelagem no SolidWorks da emenda instalada em cabo CAL 823 MCM - dimensões em milímetros.



(a) Configuração (i) para emenda instalada em cabo CAL 823 MCM - Catia.



(b) Configuração (iii) para emenda instalada em cabo CAL 823 MCM - Catia.

Figura 4.19 – Modelagem no Catia da emenda instalada em cabo CAL 823 MCM - dimensões em milímetros.

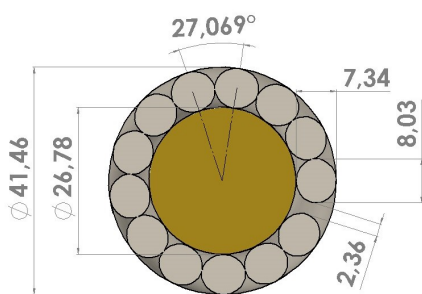
#### 4.4.2 Emenda Pré-formada de 13 Varetas Instalada no Cabo CAL 838 MCM Liga 1120

Para a modelagem do condutor CAL 838 MCM unido pela emenda pré-formada de 13 varetas, os valores do *gap* calculado entre as varetas para as configurações (i), (ii) e (iii) encontram-se na Tabela 4.17.

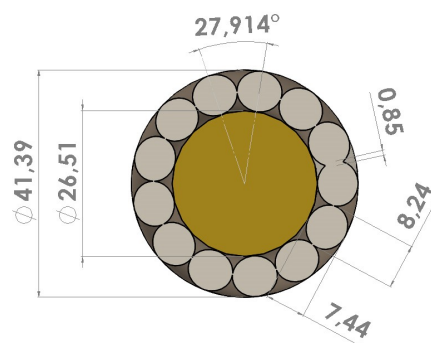
Tabela 4.17 – *Gap* entre das varetas da emenda pré-formada instalada no cabo CAL 838 MCM.

Configuração	Gap entre as varetas (mm)	
	SolidWorks	Catia
i)	2,36	2,31
ii)	5,51	5,46
iii)	-0,85	-0,90

Na Figura 4.20 e na Figura 4.21 é possível observar de forma comparativa as modelagens realizadas para as configurações (i) e (iii). De forma semelhante à modelagem feita para o cabo 823 MCM, na configuração (iii) foi encontrada interferência entre as varetas da emenda.

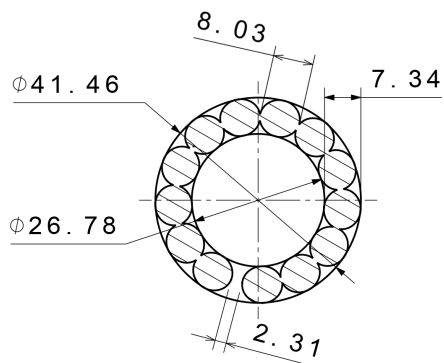


(a) Configuração (i) para emenda instalada em cabo CAL 838 MCM - SolidWorks.

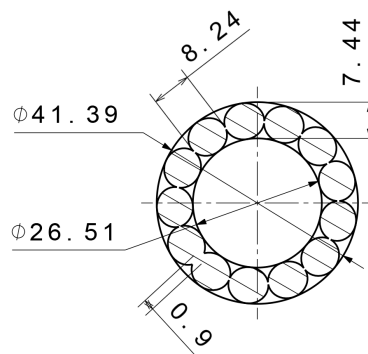


(b) Configuração (iii) para emenda instalada em cabo CAL 838 MCM - SolidWorks.

Figura 4.20 – Modelagem no SolidWorks da emenda instalada em cabo CAL 838 MCM - dimensões em milímetros.



(a) Configuração (i) para emenda instalada em cabo CAL 838 MCM - Catia.



(b) Configuração (iii) para emenda instalada em cabo CAL 838 MCM - Catia.

Figura 4.21 – Modelagem no Catia da emenda instalada em cabo CAL 838 MCM - dimensões em milímetros.

## 5 Conclusões e Discussões

Ao todo foram realizados seis ensaios de vibração em emenda pré-formada de 13 varetas helicoidais unindo cabos condutores de alumínio liga, sendo que ocorreram quatro ensaios do Tipo A (com modo de vibração ímpar), um do Tipo B (com modo de vibração par) e um do Tipo C (varredura de frequência). Além disso, foram submetidos dois modelos de condutores à ensaios, o CAL 823 MCM liga 1120 e o CAL 838 MCM liga 1120.

Para os ensaios do Tipo A e Tipo B, quanto a amplitude de deslocamento, dois dos ensaios executados neste Projeto de Graduação foram com  $Y_b = 0,6mm$  (506  $\mu$ deformações), outros dois ensaios com  $Y_b = 0,8mm$  e um ensaio com  $Y_b = 1,0mm$ . Nota-se que estes níveis de deslocamento por flexão pico a pico provocam deformações de flexão maiores do que os limites de fadiga estabelecidos pela EPRI (165  $\mu$ deformações para cabos de alumínio liga) e pela IEEE (150  $\mu$ deformações). Ainda para estes dois tipos de ensaio, três deles foram interrompidos após a quarta quebra por fadiga de fios do condutor, um após a terceira quebra por fadiga de fios do condutor e apenas um foi interrompido quando atingiu-se 10 milhões de ciclos.

Sendo assim, para os experimentos executados do Tipo A e B há evidências de fadiga do condutor. Isto leva a conclusão de que, assim como relatado na literatura exposta neste trabalho, vibrações eólicas intensas culminam na falha por fadiga do cabo condutor.

Quanto ao ensaio do Tipo C, o conjunto condutor/ emenda foi submetido a varredura de frequência dentro do limite máximo e mínimo na qual ocorre o fenômeno da vibração eólica. O ensaio foi interrompido após atingir-se o total de 10 milhões de ciclos.

Em todos os experimentos executados houve o monitoramento das extremidades das emendas e a conferência da distância entre os condutores dentro das varetas da emenda para verificar a ocorrência de escorregamentos. Nenhum dos ensaios apresentou evidência de escorregamento entre a emenda e o condutor.

Portanto, os ensaios conduzidos neste trabalho não demonstram qualquer falha por deslizamento causado por vibrações excessivas no contexto do regime de vibração eólica no conjunto condutor e emenda.

Nas modelagens feitas para a medição do *gap* existente entre as varetas da emenda pré-formada instalada nos condutores de 823 MCM e 838 MCM liga 1120, foi verificado que, a depender das dimensões dos componentes, considerando suas tolerâncias dimensionais, é possível que haja interferência entre as varetas da emenda. Para o caso mais crítico do condutor 838 MCM, por exemplo, temos que, se o cabo possuir seu diâmetro mínimo de 26,51 mm e as varetas da emenda possuírem dimensão máxima de 7,44 mm, haveria então interferência de 0,90 mm. Na comparação entre as modelagens dos *softwares* Catia a Solidworks, não foram observadas divergências significativas entre os resultados adquiridos.

A partir da identificação desta interferência entre as varetas da emenda, é possível concluir que, uma possível razão para a ocorrência de falhas por escorregamento de emendas em linhas de transmissão, poderia ser o dimensionamento inadequado das emendas pré-formadas quanto a suas tolerâncias dimensionais considerando a utilização em condutores de bitola 838 MCM e 823 MCM.

## 5.1 Trabalhos Futuros

O desenvolvimento deste presente trabalho apontou novos caminhos para futuras pesquisas, que incluem:

- Para obter maiores evidências a cerca do *gap* existente entre as varetas da emenda pré-formada, sugere-se que os valores sejam calculados também numericamente. Assim, estes valores poderão ser comparados com os resultados obtidos nas modelagens 3D.
- Propõe-se que os experimentos Tipo A, Tipo B e Tipo C conduzidos neste trabalho sejam reproduzidos em simulação numérica, a fim de comparar os resultados coletados em laboratório e ainda adquirir conhecimento sobre o comportamento dos componentes submetidos à ensaio.
- É sugerido que sejam realizados estudos, de forma teórica e experimental, sobre as forças atuantes na interface emenda pré-formada e cabo condutor quando submetidos à vibração eólica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFL. *AFL Armor Rods*. 2022. Disponível em: <<https://www.aflglobal.com/en/Products/Conductor-Accessories/Formed-Wire/Armor-Rods>>. Acesso em: 28 abr. 2022. Citado 2 vezes nas páginas e 12.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 16686:2018*: Cabos de alumínio-liga 1120 para linhas aéreas - especificação. Rio de Janeiro, 2018. 18 p. Citado na página 50.
- ASTM, S. E. Standard terminology relating to fatigue and fracture testing definitions of terms relating to fatigue. *Annual Book of Standards, ASTM, Philadelphia, PA*, v. 3, p. 740–49, 1996. Citado na página 14.
- BADIBANGA, R. K. Evaluation of the fatigue resistance of power line conductors function of the h/w parameter. 2017. Citado 2 vezes nas páginas e 17.
- CEPEL, C. d. P. d. E. E. *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro: Simulações 2013*. [S.l.]: CEPEL, 2017. Citado 2 vezes nas páginas e 2.
- CIGRE, S.-W. Guide for endurance tests of conductors inside clamps. *Electra*, n. 100, p. 77–86, 1986. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 21.
- EPRI. *EPRI Transmission Line Reference Book: Wind-Induced Conductor Motion*. [S.l.]: Palo Alto, CA, 2006. Citado 13 vezes nas páginas , 2, 5, 7, 8, 10, 11, 12, 18, 20, 39, 48 e 50.
- FAN, C.; JIANG, X. Analysis of the icing accretion performance of conductors and its normalized characterization method of icing degree for various ice types in natural environments. *Energies*, MDPI, v. 11, n. 10, p. 2678, 2018. Citado 2 vezes nas páginas e 7.
- FINKLER, A. et al. Relação do crescimento econômico e consumo de energia elétrica. *Salão do Conhecimento*, 2016. Citado na página 1.
- GOMES, F. B. Análise comparativa de aparelhos para medição de vibração em cabos condutores de energia e cálculo da vida remanescente em cabos. 2015. Citado 2 vezes nas páginas e 16.
- HORTÊNCIO, T. M. d. O. S. Ensaio de fadiga sob condições de fretting com o cabo caa 397, 5 mcm-ibis. 2009. Citado 3 vezes nas páginas , 15 e 27.
- IEEE, C. R. Standardization of conductor vibration measurements. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 1, p. 10–22, 1966. Citado na página 17.
- LABEGALINI, P. R. et al. *Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão*. [S.l.]: Editora Blucher, 1992. Citado na página 5.
- MEDRAL. *Medral troca espaçadores em Linhas de Transmissão de SP*. 2022. Disponível em: <<https://www.medral.com.br/medral-troca-espacadores-em-linhas-de-transmissao-de-sp/>>. Acesso em: 11 abr. 2022. Citado 2 vezes nas páginas e 3.
- MIRANDA, T. B. d. Influência do parâmetro h/w sobre o auto amortecimento de cabos condutores de energia. 2017. Citado na página 8.

OLIVEIRA, A. Vibrações em linha de transmissão: Aspectos de projetos de manutenção. *SEMINÁRIO AVANÇADO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA*, 1996. Citado na página 8.

OLIVEIRA, M. C. d. Desenvolvimento de um vibrógrafo para medir e armazenar dados de vibração de cabos de transmissão de energia elétrica. 2013. Citado 3 vezes nas páginas , 6 e 8.

POFFENBERGER, J.; SWART, R. Differential displacement and dynamic conductor strain. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, v. 84, n. 4, p. 281–289, 1965. Citado 4 vezes nas páginas 13, 14, 17 e 18.

VIEIRA, R. E. R. Avaliação das áreas de contato e dos níveis de tensão média e alternada em fios de cabos condutores de energia. 2019. Citado 5 vezes nas páginas , 5, 7, 9 e 16.

VWCABLE, W.; CABLE. *Overhead Aluminium Alloy Cable Electrical Stranded Bare Conductor AAAC*. 2022. Disponível em: <<https://www.vwcable.com/overhead-aluminium-alloy-cable-electrical-stranded-bare-conductor-aaac/>>. Acesso em: 28 abr. 2022. Citado 2 vezes nas páginas e 9.

## ANEXOS

Tabela 5.1 – Dados calculados para determinação da frequência e do comprimento de onda em função do modo  $n$  para o condutor 823 MCM liga 1120

<b>Modo <math>n</math></b>	<b>Frequência (Hz)</b>	<b>Comprimento de onda (m)</b>
5	8,05	15,68
6	9,66	13,07
4	6,44	19,60
7	11,27	11,20
8	12,89	9,80
9	14,50	8,71
10	16,11	7,84
11	17,72	7,13
12	19,33	6,53
13	20,94	6,03
14	22,55	5,60
15	24,16	5,23
16	25,77	4,90
17	27,38	4,61
18	28,99	4,36
19	30,60	4,13
20	32,21	3,92
21	33,82	3,73
22	35,44	3,56
23	37,05	3,41
Continua na próxima página		



**Tabela 5.1 – Continuação da página anterior**

<b>Modo <math>n</math></b>	<b>Frequência (Hz)</b>	<b>Comprimento de onda (m)</b>
24	38,66	3,27
25	40,27	3,14
26	41,88	3,02
27	43,49	2,90
28	45,10	2,80
29	46,71	2,70
30	48,32	2,61
31	49,93	2,53
32	51,54	2,45
33	53,15	2,38
34	54,76	2,31
35	56,37	2,24
36	57,99	2,18
37	59,60	2,12
38	61,21	2,06
39	62,82	2,01
40	64,43	1,96
41	66,04	1,91
42	67,65	1,87
43	69,26	1,82
44	70,87	1,78
45	72,48	1,74
Continua na próxima página		

**Tabela 5.1 – Continuação da página anterior**

<b>Modo <math>n</math></b>	<b>Frequência (Hz)</b>	<b>Comprimento de onda (m)</b>
46	74,09	1,70