

AVALIAÇÃO DE FALHAS POR ESCORREGAMENTO DE EMENDAS PREFORMADAS

Douglas Guimarães Braga

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas



**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓSGRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS**

**AVALIAÇÃO DE FALHAS POR ESCORREGAMENTO DE
EMENDAS PREFORMADAS**

Douglas Guimarães Braga

Orientador(a): José Alexander Araújo, D. Phil

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
BRASÍLIA/DF: 12/12/2023**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓSGRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS
**AVALIAÇÃO DE FALHAS DE ESCORREGAMENTO POR
EMENDAS PREFORMADAS**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS MECÂNICAS.

APROVADA POR:

Prof. José Alexander Araújo, D. Phil, (ENM-FT-UnB)
(Orientador)

Prof. André Luis Pinto, DSc (IFB-Campus Estrutural)
(Examinador Externo à UnB)

Prof. Luis Augusto Mendes Veloso, DSc (ENM-FT-UnB)
(Examinador Externo ao Programa)

Prof. Cosme Moreira da Silva, PhD (ENM-FT-UnB)
(Examinador Interno)

BRASÍLIA/DF, 12/12/23.

FICHA CATALOGRÁFICA

BRAGA, DOUGLAS GUIMARÃES

Avaliação de falhas de escorregamento por emendas preformadas [Distrito Federal] 2023. xvi, 76p.210x297mm (PPGCM/FT/Unb, Mestre, Ciências Mecânicas, 2023).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas.

1.Emendas preformadas

2.Linhas de transmissão

3.Espaçamento entre varetas

4.Vibração eólica

I. ENM/FT/UnB

II. Título (ENM.DM-213A/2023)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BRAGA, D. G. (2023), Avaliação de falhas por escorregamento de emendas preformadas. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas. Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas, Universidade de Brasília – Faculdade de Tecnologia, Brasília, DF, 62p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Douglas Guimarães Braga

TÍTULO: Avaliação de falhas por escorregamento de emendas preformadas

GRAU: Mestre ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação/tese de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

DOUGLAS GUIMARÃES BRAGA

engdouglasbraga@outlook.com

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao professor José Alexander Araújo, D. Phil, pelas orientações neste projeto/trabalho de grande importância para legado do setor elétrico brasileiro e internacional, onde conseguimos gerar juntos, valor agregado do ponto de vista da ciência, tecnologia e inclusive principalmente redução de acidentes graves e custos, evitando diversos colapsos de emendas preformadas por falhas mecânicas em Linhas de Transmissão, o que poderíamos ter no Brasil diversos desligamentos, apagões e etc.

Aos amigos do “trecho”, sem citar nomes, agradeço de modo geral a todos pelo compartilhamento do raro conhecimento que pudemos absorver juntos em diversos projetos e construção de Linhas de Transmissão em nosso país, atuando em diversos estados, países e acreditando inclusive no meu potencial e me apoiando no meu crescimento.

Aos meus pais pelo direcionamento, amor, apoio e confiança.

Aos meus avós, que são referência e exemplos de vida.

Em especial, agradeço a minha futura esposa Marcela Gomes Nunes, pela parceria que me incentivou nos momentos de fraqueza me dando todo apoio e amor, me fortalecendo durante toda a minha caminhada.

*Dedico esse trabalho
aos meus pais, e ao Prof. José
Alexander Araújo, D. Phil. que
me deram total apoio durante
todo o curso e em especial
nesta pesquisa/ dissertação,
compartilhando experiências,
conhecimento e lições de vida.*

RESUMO

AVALIAÇÃO DE FALHAS POR ESCORREGAMENTOS DE EMENDAS PREFORMADAS

Autor(a): Douglas Guimarães Braga

Orientador(a): Prof. José Alexander Araújo, D. Phil.

Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas

Brasília, 2023.

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo detalhado e sistemático para avaliar as causas das falhas por escorregamentos de dezenas de emendas preformadas utilizadas em diversas linhas de transmissão de 500 kV ocorridas em diferentes regiões do Brasil. Todos os escorregamentos sempre envolveram um mesmo modelo de emenda preformada (constituída por 13 varetas, com o diâmetro de 7,34 mm cada, com o comprimento de 3,5 m e passo de 244 mm) montada sobre um cabo de alumínio liga (CAL) 1120, com bitola 838 MCM (diâmetro 26,78 mm). Para avaliar os motivos dos escorregamentos investigou-se o material utilizado na fabricação das emendas e dos cabos, suas propriedades mecânicas, as dimensões, assim como o projeto da emenda.

O estudo concluiu que os motivos que levaram ao escorregamento dessas emendas foram desde erros associados ao processo de lançamento do cabo e montagem das emendas até a concepção do projeto da emenda que permitiu a possibilidade de haver GAP total nulo ou negativo para diversas combinações geométricas. Por último, mas não menos importante, conduziu-se neste trabalho ensaios de vibração eólica do conjunto cabo-emenda com níveis de deslocamentos considerados severos. Os resultados destes ensaios descartaram a possibilidade de que a vibração eólica pudesse ser a causa principal do escorregamento das emendas.

Palavras-chave:

Emendas preformadas, cabos condutores aéreos, análise de falha, linhas de transmissão.

ABSTRACT

ASSESSMENT OF FAILURES DUE TO SLIPPING OF PREFORMED SPLICES

Author: Douglas Guimarães Braga

Advisor: Prof. José Alexander Araújo, D. Phil.

PhD in Mechanical Sciences

Brasília, 2023.

The aim of this work is to carry out a detailed and systematic study to evaluate the causes of failures due to slippage of several preformed joints used in various 500 kV transmission lines in different regions of Brazil. All slippages always involved the same model of preformed joint (made of 13 rods, each with a diameter of 7.34 mm, a length of 3.5 m, and a pitch of 244 mm) mounted on a 838 MCM (diameter 26.78 mm) aluminum alloy conductor (AAAC-1120). To assess the reasons for slippage, one investigated the material composition, the mechanical properties and dimensions of both, the conductor and the preformed splice. Also the mechanical design of the splices was investigated. This study concluded that the reasons which led to the slippage of these joints are associated with bad installing and mounting practices and to the design concept of the joint, which could lead the assembly to have a null or even a negative total gap between the rods of the preformed splice. Last, but not least, wind vibration tests of the assembly were conducted in this work with severe levels of displacement. The results of these tests ruled out the possibility that wind vibration could be the primary cause of joint slippage.

Keywords:

Preformed splices, overhead conductors, failure analysis, transmission lines.

LISTA DE TABELAS

- 2.1 – Limites de resistência para cabos (ACSR) com uma e duas ou mais camadas de fios de alumínio para o método da IEEE.
- 3.1 – Características geométricas, mecânicas e elétricas do cabo de alumínio liga (CAL) 838 MCM.
- 4.1 – Valores dos limites de resistência para os ensaios com os fios retirados de amostra do cabo condutor CAL (1120) 838 MCM e com as varetas obtidas da emenda A (amostras de emenda e cabo que escorregaram em campo).
- 4.2 – Valores de dureza HV1 dos testes conduzidos sobre os fios retirados de amostra do cabo condutor AAAC 1120 MCM e com as varetas da emenda LS-20150R-LBRFT.
- 4.3 – Tensionadores (bullwheels) utilizados pelas empreiteiras.
- 4.4 – Deformações medidas e tensões presentes na extremidade das emendas e no UPC.
- 4.5 – Ocorrência das quebras dos fios nos ensaios realizados com deslocamento $Y_b=0.6\text{mm}$ e $Y_b=0.8\text{mm}$.

Lista de Figuras

- 1.1 – Mapa do sistema elétrico interligado nacional.
- 1.2 – Foto de ocorrências em obras de construção de Linhas de Transmissão no Brasil.
- 2.1 – Exemplos de silhuetas de estruturas estaiadas.
- 2.2 – Exemplos de silhuetas de estruturas autoportantes.
- 2.3 – (a) Modelo de emenda preformada aplicada. (b) Desenho esquemático de emenda a compressão.
- 2.4 – CAA – Cabo de alumínio com alma de aço.
- 2.5 – Cabo de alumínio CA.
- 2.6 – Cabo ACCC.
- 2.7 – Exemplos de ferragens de linhas de transmissão: grampo de suspensão (esquerda) e amortecedor *stockbridge* (direita).
- 2.8 – Exemplos de ferragens e acessórios de linhas de transmissão: espaçador amortecedor (esquerda) e esfera de sinalização (direita)
- 2.9 – Tipos de isoladores: Vidro, porcelana e poliméricos.
- 2.10 – Representação da distância de arco e distância de escoamento dos isoladores.
- 2.11 – Modelo de emenda preformada não aplicada.
- 2.12 – Modelo de instrução de montagem de emenda preformada.
- 2.13 – Modelo de instrução de montagem de emenda preformada.
- 2.14 – Exemplos de aplicação de emendas. (a) Instalação preferível com folgas igualmente espaçadas entre as varetas. (b) Varetas instaladas com folga em apenas um local do conjunto. (c) Emenda com encavalamento de uma das varetas devido ao número excessivo de varetas. (d) Montagem com contato lateral entre todas as varetas impossibilitando o agarramento das varetas ao cabo
- 2.15 – Ponto padrão para medição da amplitude de deslocamento Y_b do cabo provocado pela vibração eólica.
- 3.1 – Desenho com as dimensões relevantes da emenda preformada.
- 3.2 – Foto de um conjunto cabo-emenda fornecida para estudo e medida do diâmetro do cabo.
- 3.3 – Foto das varetas da emenda em estudo no laboratório de Fadiga de Cabos da UnB.
- 3.4 – Esquema da bancada de ensaio com o condutor emendado.

3.5 – Modos de vibração do cabo condutor.

4.1 – Foto mostrando o fio de alumínio do cabo condutor CAL 1120 838 MCM montado entre as garras da máquina MTS (a) para realização de ensaio de tração e (b) depois a realização de ensaio de tração.

4.2 – Ilustração esquemática do conjunto cabo-emenda com definição da folga total.

4.3 – Ilustração esquemática do Software SpliceGap contendo os inputs para o cálculo do “GAP”, folga total entre as varetas.

4.4 – Cálculo do GAP total para emenda A montada no cabo CAL 1120 838 MCM considerando todas as tolerâncias geométricas envolvidas.

4.5 – Foto obtida com microscópio confocal laser da seção transversal de um dos conjuntos cabo-emenda retirado de um vão próximo ao que falhou. As medidas indicam uma folga total entre varetas de apenas 3.28 mm.

4.6 – Radiografia digital da montagem cabo-emenda em trecho da linha em outro trecho, mostrando folga visível de apenas 2 mm entre as varetas.

4.7 – Foto de fio do cabo condutor que escorregou: (a) parte do fio que estava dentro da emenda, em contato com as varetas e (b) parte do mesmo fio fora da emenda.

4.8 – Foto da parte interior da vareta de uma emenda que escorregou: (a) com marca de escorregamento e (b) sem marca e em região mais próxima extremidade da emenda.

4.9 – Foto do MEV da parte interior da vareta: (a) com arrancamento do grit mas sem marcas severas de escorregamento superficial na vareta e (b) com grit preservado.

4.10 – Foto com evidência da passagem das emendas pelo tensionador.

4.11 – Dimensões recomendadas para a roda guia do tensionador.

4.12 – Fotos aéreas das emendas instaladas em campo.

4.13 – Foto de emendas instaladas em campo demonstrando claros erros de instalação.

4.14 – Radiografias de conjuntos cabo-emenda de linhas instaladas. (a) Detecção de distância de 43 mm entre as extremidades das camadas externas dos condutores (possivelmente causada por montagem inadequada ou por deslizamento do condutor) e deslizamento de suas camadas internas (80 mm). (b) Ausência de contato entre a emenda e o condutor. (c) Evidência de erros de instalação e distância de 52 mm entre as extremidades dos condutores.

4.15 – Radiografia digital do conjunto cabo-emenda.

4.16 – Extremidade da emenda pintada para auxiliar a inspeção visual.

4.17 – Monitoramento das extremidades da emenda usando a tinta marcadora para o teste com $Y_b=0.6$ mm: fotos de ambas as extremidades da emenda no (a) no início do ensaio e (b) após a conclusão do ensaio

4.18 – Monitoramento das extremidades da emenda usando a tinta marcadora para o teste com $Y_b=0.8$ mm: fotos de ambas as extremidades da emenda no (a) no início do ensaio e (b) após a conclusão do ensaio

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

EDS - Every Day Stress

N - Número de ciclos

σ_a - Amplitude de tensão

Nf - Vida em fadiga

σ'_f - Coeficiente de resistência a fadiga

b - Expoente de resistência a fadiga ou expoente de Basquim

Su - Limite de resistência à tração (kN)

S1000 - Tensão alternada para uma vida de 103 ciclos

Se - Limite de fadiga

$\Delta\sigma$ - Diferença entre os valores máximos e mínimos de tensão

σ_m - Tensão média

$\sigma_{m\acute{a}x}$ - Tensão máxima

$\sigma_{m\acute{i}n}$ - Tensão mínima

R - Razão entre a tensão mínima e máxima

$\tilde{\sigma}_{fB}$ - Tensão verdadeira de resistência a fratura (Morrow)

σ_{ar} - Resistência a fadiga equivalente ao material testado

σ_u - Limite de resistência (MPa)

T - Temperatura

ΔT - Diferença de temperatura

α - Coeficiente de expansão térmica

E - Módulo de elasticidade

σ_t - Tensão térmica

D - Soma dos danos referente a cada nível de carregamento

n_i - Número de ciclos aplicados para cada σ_i

N_i - Número de ciclos para falha

σ_i - Nível de tensão do carregamento

Re - Número de Reynolds

Ve - Velocidade do escoamento (vento)
d - diâmetro do condutor
dcil - diâmetro do cilindro
v - viscosidade cinemática do ar
fs - Frequência de desprendimento dos vórtices
S - Número de Strouhal
Xb - Distância de medição
 f_{ext} - Fator de extrapolação
 t_m - Tempo real de medição do vibrógrafo
 i - Taxa de amostragem por hora
 t_c - Período total de permanência do coletor de dados na linha
Yb - Amplitude de deslocamento do condutor (pico a pico)
 EI_{min} - Rigidez mínima do condutor
EI_{max} - Rigidez máxima do condutor
K - Fator de Poffenberger-Swart
p - Fator de Poffenberger-Swart
Eal - Módulo de elasticidade do alumínio
dal - Diâmetro dos fios de alumínio
nal - Número de fios de alumínio
Es - Módulo de elasticidade de aço
ds - Diâmetro dos fios de aço
ns - Número de fios de aço
T - Carga de tração do cabo
CRT - Carga de ruptura a tração do cabo
FN - Força normal
f - Frequência de vibração
fEI - Frequência de vibração considerando o efeito do EI
a - Comprimento do vão livre
mc - Massa específica do condutor
m - Modo de vibração
V - Vida remanescente
 $V_{CIGRÉ}$ - Vida remanescente calculada pela curva da Cigré

VUnB - Vida remanescente calculada pela curva da UnB
Vútil - Vida remanescente útil do cabo (anos)
Vútil - UnB - Vida remanescente útil calculada pela curva da UnB
DUnB - Acúmulo de dano calculado para o cabo Grosbeak da UnB
DCigré - Acúmulo de dano calculado através da curva limite de segurança da Cigré
VÚtil-UnB - Vida remanescente útil calculada para o cabo Grosbeak da UnB
VÚtil-Cigré - Vida remanescente útil calculado através da curva S-N da Cigré
ACSR - Aluminum Conductor Steel Reinforced
CAA - Cabo de Alumínio com Alma de Aço
LVDT - Linear Variable Differential Transformer
Nnucle - Número de ciclos para nucleação da trinca
Nprop - Número de ciclos para propagação da trinca
Nrup - Número de ciclos para ruptura do material
Al₂O₃ - Óxido de alumínio
SIN - Sistema Interligado Nacional
ONS - Operador Nacional do Sistema

Sumário

Capítulo 1	1
Introdução.....	1
Capítulo 2	4
Referencial teórico.....	4
2.1 Componentes de uma Linha de Transmissão	4
2.2 Princípios de funcionamento de emendas preformadas.....	12
2.2 Princípio de funcionamento de emendas preformadas	15
2.3 Vibração eólica e fadiga de cabos condutores	17
2.4 Fórmula de Poffenberger-Swart.....	18
2.5 Metodologia da EPRI.....	20
2.6 Metodologia da IEEE.....	20
Capítulo 3	22
Metodologia.....	22
3.1 Materiais.....	22
3.2 Metodologia para a análise da causa raiz das falhas das emendas preformadas.....	25
Capítulo 4	28
Resultados.....	28
4.1 Análise dimensional, química e mecânica da emenda e do cabo.....	28
4.2 Folga entre varetas.....	30
4.3 Análise microscópica das superfícies de contato da emenda e do cabo.....	35
4.4 Inspeção de montagem cabo-emenda em campo.....	37
4.5 Análises de fotografias e radiografias de emendas instaladas.....	39
4.6 Ensaio preliminares de vibração cabo-emenda.....	42
Capítulo 5	47
Discussões e Conclusões.....	47
5.1 Considerações finais.....	47
Capítulo 6	50
Trabalhos futuros.....	50
Referências bibliográficas	52

Capítulo 1

Introdução

As linhas de transmissões são responsáveis por transportar e transmitir toda a energia gerada nas diversas fontes de geração, chegando em lugares distantes e objetivando atender todos os consumidores. Conforme Ministério de Minas e Energia, MME (2020), tem atualmente 63% da energia gerada no Brasil com origem em usinas hidrelétricas. Vale destacar, alguns centros populosos do país se encontram em áreas mais litorâneas, porém, as bacias hidrográficas se localizam mais ao centro do seu território.

Decorrente disso, pode-se usar como exemplo, a usina de Belo Monte, essa está há quase 3000km de distância da cidade de Paracambi-RJ, diante desses fatores geográficos se torna a maior Linha de Transmissão do Brasil (LT HVDC + - 800kV Xingu – Terminal Rio). Essa linha de transmissão é responsável por transportar da ordem de 4000MW de potência até os centros de carga da região Sudeste do país (MME, 2020).

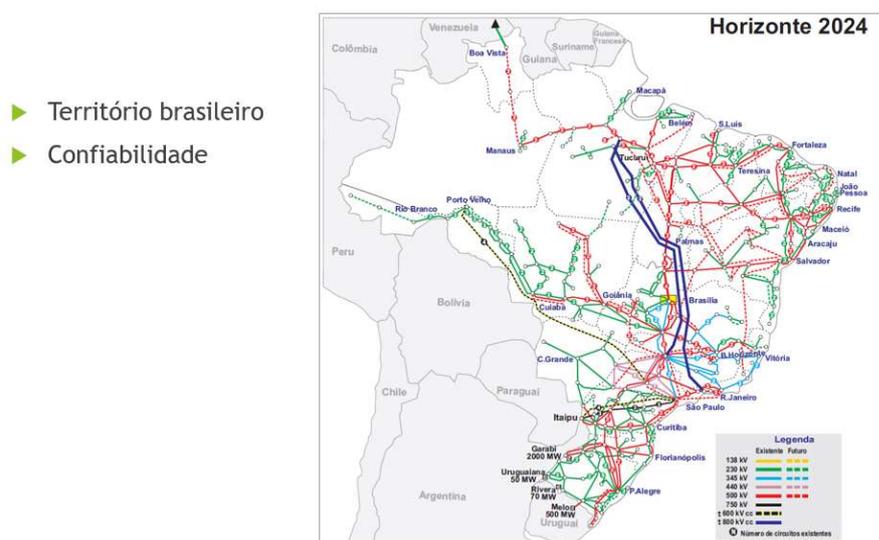


Figura 1.1 – Mapa do sistema elétrico interligado nacional. Janeiro (Fonte: ONS, 2021)

O sistema interligado nacional (SIN) constitui uma das maiores redes básicas de transmissão de energia do mundo. Por óbvio, não precisamos enfatizar aqui a importância da confiabilidade estrutural da rede para a segurança energética do país. Por outro lado,

nos últimos 3-4 anos diversas linhas de transmissão no Brasil de diferentes empresas e em várias regiões tem experimentado a queda de cabos condutores devido ao escorregamento do cabo dentro das emendas preformadas. Durante a fase de construção destes empreendimentos, todos na tensão de 500 kV e usando um mesmo tipo de emenda preformada e a mesma bitola de cabo, houve relatos de mais de 60 escorregamentos neste período. A figura 1.2 mostra fotos do escorregamento deste conjunto cabo-emenda em um destes empreendimentos. Pode-se ver detalhes do cabo condutor lançado e esticado com a tração (EDS) em processo de escorregamento dentro da emenda (fig. 1.2 (a)), foto dos cabos de uma fase completa que escorregaram nas emendas (fig. 1.2 (b)) e uma foto em detalhe da extremidade da emenda sem o cabo (fig. 1.2 (c)), ilustrando claramente que houve o escorregamento.

A queda de cabos condutores de linhas de transmissão de alta tensão constitui uma falha estrutural grave, inclusive com a possibilidade de causar vítimas fatais entre os trabalhadores envolvidos nos empreendimentos de transmissão em construção ou entre moradores da região. Pode ainda provocar danos a patrimônios móveis e imóveis e a morte de animais. Em condição não energizada é o impacto provocado pela queda dos cabos, ferragens e eventualmente de outras estruturas como torres que podem provocar estes danos e fatalidades.

Após a energização da linha de transmissão, a gravidade associada a queda de um cabo de uma linha de 500 kV ganha maiores proporções devido a presença da alta tensão. Do ponto de vista não apenas econômico, mas também social, a queda da linha energizada gera perdas significativas a Transmissora com aplicação da Parcela Variável que é uma penalidade imposta pelo órgão regulador do setor elétrico brasileiro (Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL). Além disso, a paralisação de atividades sociais (como a paralisação de hospitais, escolas, universidades), provocadas pela possível queda de um cabo poderia gerar danos irreparáveis a imagem da proprietária do empreendimento e ao setor elétrico interligado.

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo detalhado e sistemático para avaliar as causas das falhas por escorregamentos de dezenas de emendas preformadas utilizadas em diversas linhas de transmissão de 500 kV ocorridas em diferentes regiões do Brasil. Todos os escorregamentos sempre envolveram um mesmo modelo de emenda preformada (constituída por 13 varetas, com o diâmetro de 7,34 mm cada, com o comprimento de 3,5 m e passo de 244 mm) montada sobre um cabo de alumínio liga (CAL) 1120, com bitola 838 MCM (diâmetro 26,78 mm).

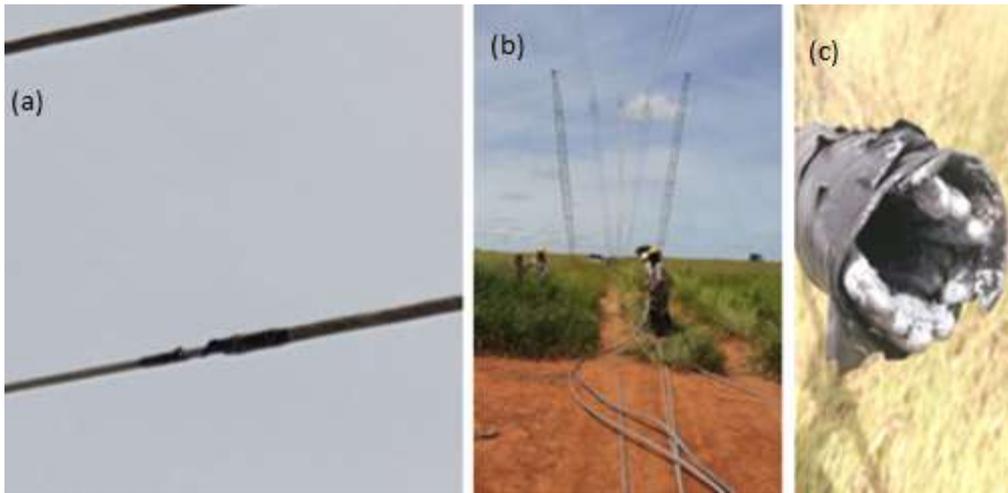


Figura 1.2 - Foto de ocorrências em obras de construção de Linhas de Transmissão no Brasil (Fonte: Autoria Própria, 2021)

Capítulo 2

Referencial teórico

2.1 Componentes de uma Linha de Transmissão

Uma linha de transmissão (LT) é projetada em diversos níveis de tensões, sendo os mais comuns: 69, 138, 230, 500 e 525 kV. Normalmente, elas são as pontes de ligação entre uma usina geradora e uma subestação ou entre duas subestações. A estrutura característica de uma linha de transmissão (LT) aérea é composta por cabos condutores quilométricos, normalmente compostos de alumínio, sustentados por torres de aço, sendo estes classificados em dois tipos: autoportante e estaiada.

De acordo com Pereira *et al.* (2018), os cabos condutores são responsáveis diretos pela transmissão da energia. Ainda, deve-se observar que, a corrente elétrica ao passar pelo condutor, esquentam o material e ocasionam perdas por efeito Joule. O método utilizado para reduzir tal efeito é a adoção de subcondutores por fase, diminuindo a quantidade total de cabo, influenciando diretamente no peso da estrutura e no dimensionamento das fundações.

Assim, é importante destacar também que a adoção desse método é um artifício para reduzir o surgimento de efeito corona, minimizando assim, os impactos negativos que o acompanham. Para suportar os cabos condutores, para-raios, ventos e todos os demais acessórios e montadores, abaixo listamos exemplos de série de estruturas do tipo estaiadas e autoportantes (PEREIRA *et al.*, 2018)

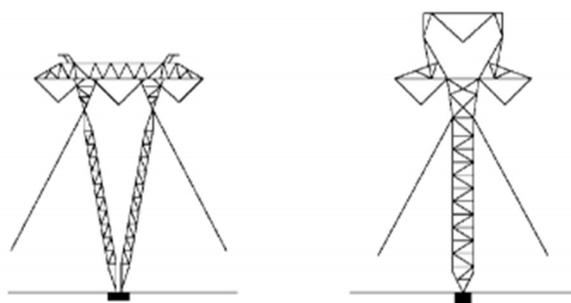


Figura 2.1 - Exemplos de silhuetas de estruturas estaiadas [17]

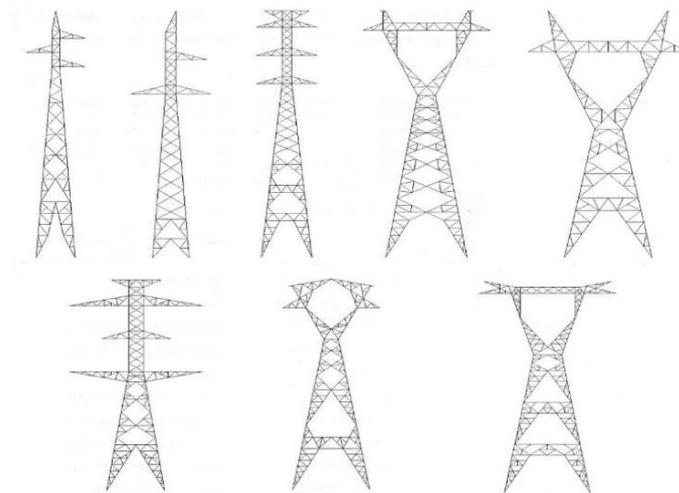


Figura 2.2 - Exemplos de silhuetas de estruturas autoportantes (Fonte: Autoria própria, 2016)

Além disso, o estudo de Fuchs (2015) indica que potência natural da linha (SIL), potência entregue por uma linha ideal (sem perdas) a uma carga resistiva de valor igual à sua impedância característica, está diretamente ligada à geometria do feixe dos cabos. Normalmente, são dispostos 2 cabos para raios no topo da LT, sendo um deles Cabo de Aço, este é responsável pela proteção de descargas elétricas.

Conforme estudos daquele pesquisador citado, o outro cabo é o *Optical Ground Wire* (OPGW): composto por fibras óticas envoltas pelo cabo de aço. Além de ter a mesma função que um para raio comum, tem o importante papel na comunicação, através da transferência de dados.

Considerando todo esse cenário, destaca-se então uma enorme preocupação com relação ao desempenho de ferragens eletromecânicas (emendas pré-formadas de cabos condutores e cadeias de isoladores) aplicadas em projetos de Linhas de Transmissão. Ponto salutar que irá se aprofundar este estudo, tendo em vista, os potenciais impactos sistêmicos devido a toda importância que tem uma Linha de Transmissão dentro do Brasil. Também, suas respectivas ferragens eletromecânicas associadas e instaladas nos projetos. Se caso não estiverem dimensionadas adequadamente, podem causar acidentes graves e problemas no SIN (FUCHS, 2015).

A partir disso, será observado que as Emendas pré-formadas aplicadas nos cabos condutores desses projetos, são elementos de linhas de transmissão utilizados para unir duas extremidades de cabos condutores. Este tipo de emenda é composto por varetas em forma de hélice e são enroladas sobre as duas extremidades dos cabos para conectá-los.

O princípio de funcionamento deste tipo de emenda se dá por atrito. Desta forma, à medida que o nível de tracionamento dos cabos aumenta, ocorre um aumento das forças de contato entre as varetas e os cabos (CASTILHO, 2019).

O aumento destas forças de contato resulta no aumento da capacidade da montagem de suportar níveis mais altos de forças de atrito, assegurando o não escorregamento entre estes componentes. O correto funcionamento das emendas exige que tais forças de contato sejam integralmente transferidas das varetas para os cabos (CASTILHO, 2019). Para isso, não pode haver o contato lateral das varetas de forma a se criar o chamado “efeito tubo”.

As emendas a compressão e as emendas preformadas são duas abordagens diferentes para unir cabos condutores em linhas de transmissão. Aqui estão as principais diferenças entre elas, considerando uma linha de transmissão de 500 kV:

- **Emenda a Compressão:**

Processo: Utiliza conectores de compressão que são instalados nos cabos através de matriz específica de prensagem e apertados para criar uma conexão elétrica.

Instalação: Requer ferramentas específicas para comprimir os conectores de forma adequada.

Vantagens:

- i. Boa condutividade elétrica.
- ii. Menos propensa a danos mecânicos.
- iii. Pode ser mais fácil de instalar em comparação com algumas outras técnicas.

- **Emenda Preformada:**

Processo: Envolve o uso de fio metálicos que são do tipo varetas preformadas juntamente com outros componentes. Esses acessórios são montados no local de instalação de lançamento dos cabos.

Instalação: A instalação no local é geralmente mais rápida, pois muitos componentes já estão pré-montados em conjuntos de varetas.

Vantagens:

- i. Redução do tempo de inatividade, pois parte do trabalho é feito antecipadamente.
- ii. Conformidade com padrões de fabricação pode melhorar a confiabilidade.
- iii. Menor dependência de ferramentas especiais durante a instalação.
- iv. Considerações Específicas para Linhas de 500 kV:

Em linhas de transmissão de 500 kV, a escolha entre emendas a compressão e emendas preformadas pode depender das especificidades do projeto, das condições ambientais e das preferências do operador da linha. Emendas preformadas podem ser particularmente vantajosas para linhas de maior tensão devido à sua eficiência na instalação e à redução do tempo de inatividade.

Emendas a compressão ainda são amplamente utilizadas e podem ser escolhidas com base na preferência do projetista da linha, disponibilidade de ferramentas e outros fatores específicos do projeto. Ambas as técnicas podem ser aplicadas em linhas de transmissão de 500 kV, e a escolha entre elas dependerá das necessidades específicas do projeto, das condições operacionais e das considerações de custo e eficiência. A fig. 2.3 ilustra esquematicamente emendas preformadas e a compressão seguidos de instrução de aplicação e montagem nos cabos nos projetos de linhas de transmissão, contendo cada etapa do processo, senão vejamos:

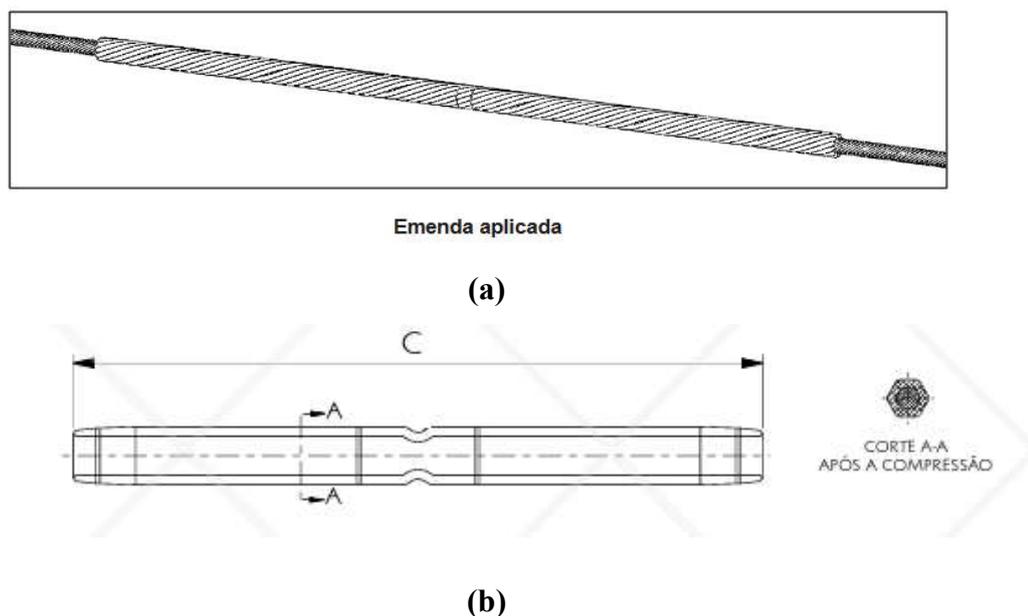


Figura 2.3 - (a) Modelo de emenda preformada aplicada. (b) Desenho esquemático de emenda a compressão [56]

Desta maneira, após a instalação de uma emenda, deve haver folga entre as varetas. Essas folgas devem ser preferencialmente distribuídas entre as varetas, entretanto uma folga concentrada em um local também pode ser considerada aceitável (EPRI, 2006).

Os cabos podem ser classificados de diversas maneiras. Os mais usados em projetos de linhas de transmissão são:

- CAA – Cabo de alumínio com alma de aço

Composto por uma alma de aço formada de um ou mais fios envolvidos por uma ou mais coroas de fios de alumínio 1350.

- CA – Cabo de alumínio

Composto por fios de alumínio 1350 encordoados em coroas concêntricas.

- CAL – Cabo de alumínio liga

Composto por fios de alumínio liga 1350, 6201 ou 1120, encordoados em coroas concêntricas.

- CALA – Cabo de alumínio liga com alma de aço

Composto por uma alma de aço de um ou mais fios, envolvida por uma ou mais coroas de fios de alumínio liga 6201.

- ACAR – Cabo de alumínio reforçado com alumínio liga

Composto por uma alma de alumínio liga 6201 formada de um ou mais fios distribuídos, envolvidos por uma ou mais coroas de fios de alumínio 1350.

- T-CAA – Cabo de alumínio com alma de aço, termorresistente

Composto por uma alma de aço de um ou mais fios, envolvida por uma ou mais coroas de fios de alumínio liga termorresistente.

- ACCC – Cabo de alumínio com alma em fibra híbrida de carbono e vidro

Composto por uma alma híbrida de fibra de carbono e vidro, encapsulados por resina epóxi, envolvida por uma ou mais coroas de fios trapezoidais de alumínio liga termorresistente.



Figura 2.4 - CAA – Cabo de alumínio com alma de aço [26]



Figura 2.5 - Cabo de alumínio CA [19]

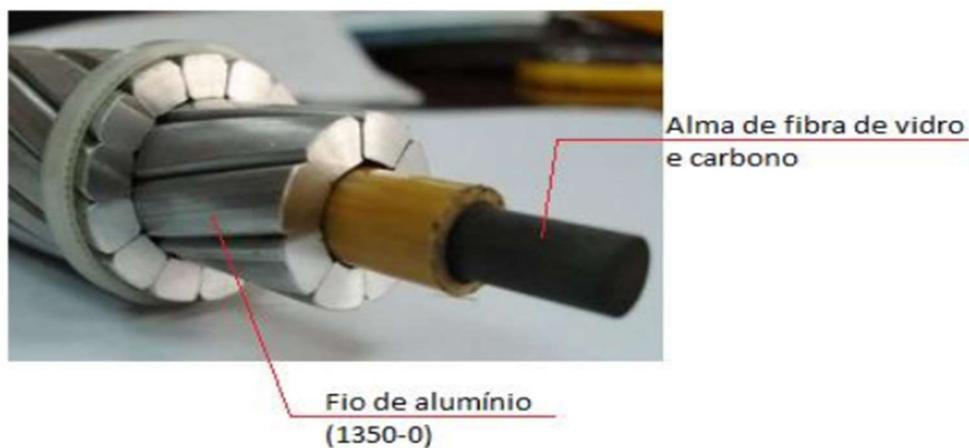


Figura 2.6 - Cabo ACCC [51]

Ferragem eletrotécnica é o denominador comum de componentes, os quais constituem os vínculos fixos ou articulados dos condutores, isoladores e estruturas.

Consoante a norma brasileira NBR-7095/81, estes componentes destinam-se a fixar, emendar, proteger elétrica ou mecanicamente, reparar, separar, amortecer as vibrações, etc., de para-raios.

A divisão básica se dá conforme a utilização correspondente aos seguintes componentes ou conjuntos:

- Ferragem de cadeias
- Ferragem de para-raios
- Acessórios para condutores e cabos
- Ferragens para estruturas elásticas

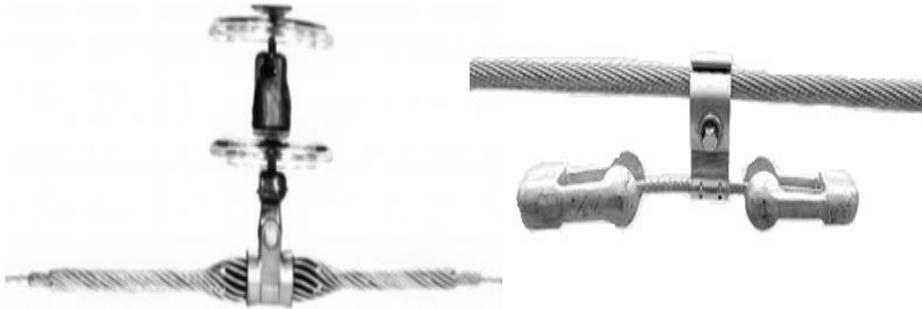


Figura 2.7 - Exemplos de ferragens de linhas de transmissão: grampo de suspensão (esquerda) e amortecedor *stockbridge* (direita) [57]



Figura 2.8 - Exemplos de ferragens e acessórios de linhas de transmissão: espaçador amortecedor (esquerda) e esfera de sinalização (direita). (Fonte: Autoria própria, 2021).

Como as torres são de aço, é necessário um equipamento que seja capaz de isolar o cabo da estrutura. O nome é intuitivo: isolador. Segundo Pavlik (1989), é um conjunto de disco de vidro, porcelana ou material polimérico que tem a função de impedir a passagem de corrente elétrica para a torre.



Figura 2.9 - Tipos de isoladores: Vidro, porcelana e poliméricos (Fonte: Autoria própria, 2021)

As cadeias de isoladores podem ser de suspensão ou ancoragem. O primeiro tipo tem a função única de garantir que os condutores se mantenham nas distâncias de segurança definidas em projeto e norma. Já as cadeias de ancoragem têm como papel o seccionamento do circuito, fazer ângulos na trajetória da linha e amarrar um tramo (TABOSA; LIMA, 2021).

Uma cadeia de isoladores é eletricamente definida em função de suas distâncias de escoamento e arco.

A distância de arco é, basicamente, a distância de ar entre as duas extremidades metálicas da cadeia de isoladores, normalmente limitada aos protetores contra arco, como chifres e raquetes (TABOSA; SILVA, 2021).

A distância de escoamento é a distância percorrida pela superfície isolante de todos os isoladores em série, entre as extremidades metálicas da cadeia.

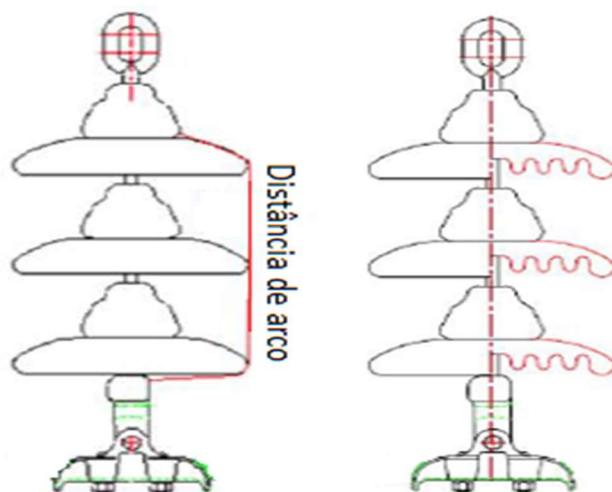


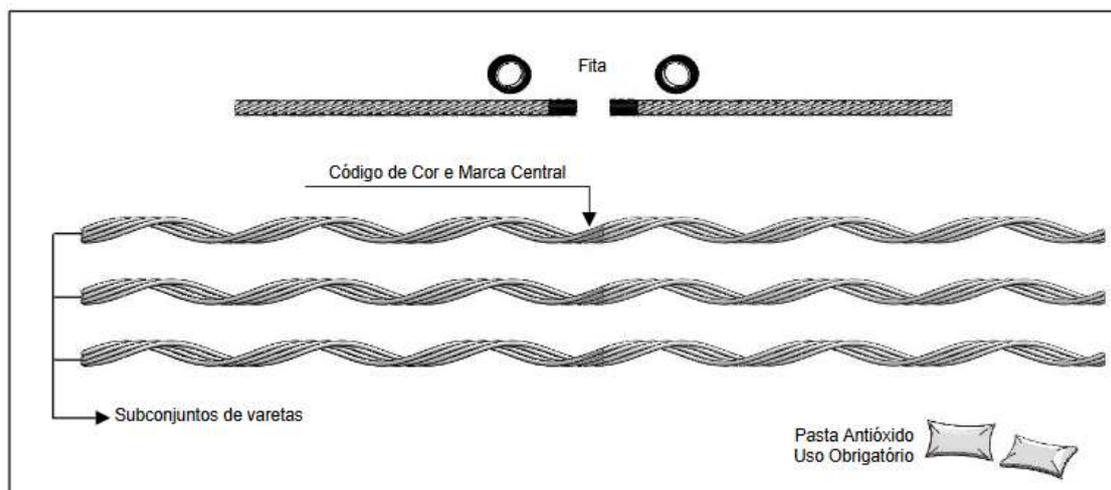
Figura 2.10 - Representação da distância de arco e distância de escoamento dos isoladores. (Fonte: Autoria Própria, 2022)

2.2 Princípios de funcionamento de emendas preformadas

Cabos para linhas de transmissão são fornecidos normalmente acondicionados em carretéis (bobinas) de dimensões padronizadas. Há, portanto, um limite no comprimento dos cabos que podem ser fornecidos, sempre inferior ao comprimento das linhas, exigindo assim a realização das emendas dos mesmos. Essas emendas deverão assegurar continuidade elétrica ao circuito, e também resistir aos esforços de tração a que ficam submetidos os cabos (FUCHS, 1992).

Atualmente, o cabo mais aplicado em projetos de linha de transmissão no Brasil são os cabos de alumínio liga (1120). Para a união destes cabos, a técnica mais utilizada no país envolve o uso de emendas tipo “preformadas” (MILITITSKY, 2019). É importante ressaltar que essa solução de emendas preformadas para cabos de alumínio liga (1120), objeto desse estudo, são recentes no Brasil e merecem uma melhor atenção

As emendas do tipo pré-formadas são constituídas por conjuntos de varetas pré-formadas semelhantes às varetas antivibrantes. Para cabos CA ou CAL constituem-se por um único jogo ou mais de um subconjunto de varetas aplicadas sobre os cabos a serem emendados. A figura 2.11 mostra um conjunto de uma emenda preformada e seus componentes (pasta antióxido e fita isolante), enquanto a figura 2.12 ilustra em detalhes todas as etapas necessárias para o processo de montagem da emenda sobre o cabo, conforme especificações típicas dos fabricantes.

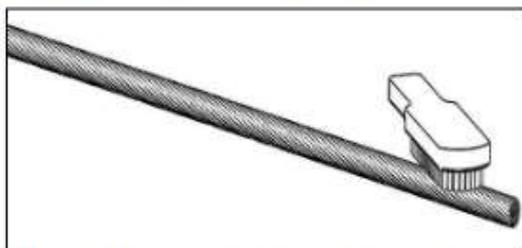


Emenda não aplicada

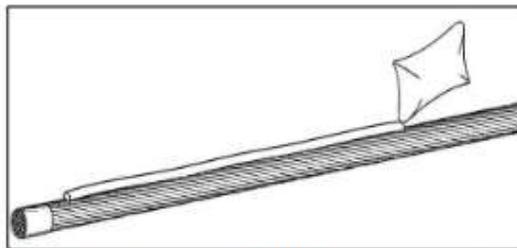
Figura 2.11 - Modelo de emenda preformada não aplicada [56]

Aqui é importante destacar que existem poucos estudos publicados na literatura técnico-científica sobre o impacto da geometria e dos processos de montagem e de lançamento de emendas pré-formadas de cabos condutores sobre a resistência ao escorregamento destes elementos (VIEIRA; FERREIRA; ARAUJO, 2021).

I. LIMPEZA DO CABO CONDUTOR

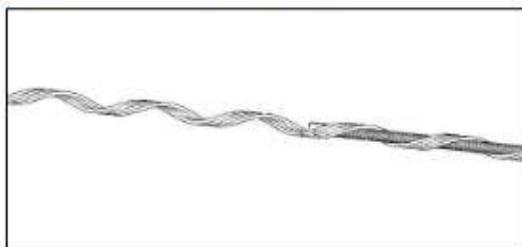


1) Com uma escova de aço tipo V de cabo isolado, limpe toda a extensão do cabo onde será aplicada a Emenda Total.

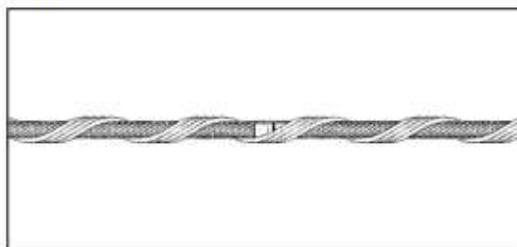


2) Aplique e espalhe a pasta antióxido ao longo da superfície do cabo onde será aplicada a Emenda Total.

II. APLICAÇÃO DA EMENDA TOTAL PREFORMADA

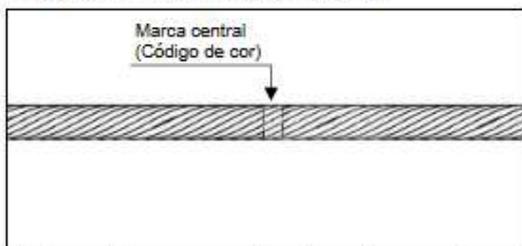


3) Prenda as extremidades do cabo com uma camada de fita plástica isolante. Escolha o subconjunto que contem o maior numero de varetas e aplique metade dele no cabo condutor, iniciando a aplicação a partir da marca central. Certifique-se de que a direção de encordoamento do cabo e do Preformado é a mesma.



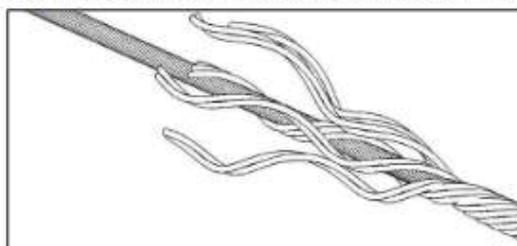
4) Posicione a outra extremidade do cabo colada com a primeira extremidade e aplique a segunda metade do subconjunto da Emenda, conforme indicado.

Nota: Recomendamos não deixar nenhum espaço entre as extremidades, porém é admissível um espaçamento máximo de 5mm.



5) Complete a aplicação dos outros subconjuntos da Emenda, iniciando pela marca central.

Atenção: Aplique os subconjuntos de varetas uniformemente para não ocorrer problemas de espaçamento na aplicação dos demais subconjuntos.



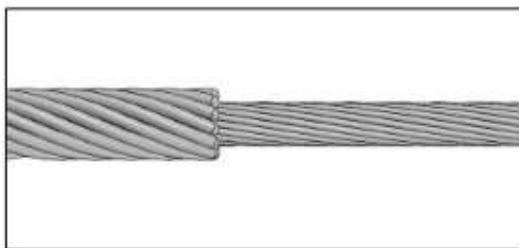
6) Faltando duas voltas para terminar a aplicação é conveniente separar as pontas dos subconjuntos e formar outros com menor número de varetas para, então, terminar com maior facilidade a aplicação.



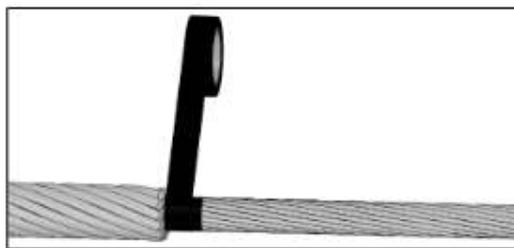
7) Emenda Total Preformada aplicada.

Figura 2.12 - Modelo de instrução de montagem de emenda preformada [56]

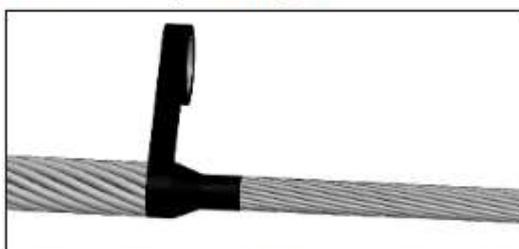
III. APLICAÇÃO DA FITA PARA PROTEÇÃO NO LANÇAMENTO



8) Após aplicar a Emenda Total, verifique se não há resíduos na extremidade da emenda e no cabo, se houver, limpe o local antes de aplicar a Fita para Proteção no Lançamento.



9) Inicie a aplicação da Fita de Proteção sobre o cabo na região próxima à extremidade da Emenda Total.



10) Continue a aplicação da Fita de Proteção, mantendo-a sempre bem esticada, até a superfície da Emenda Total.

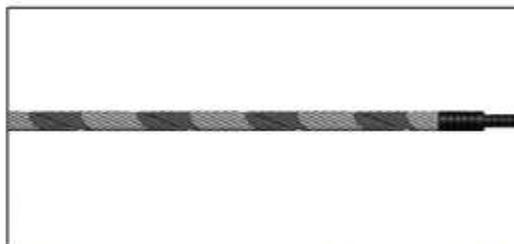


11) Aplique 2 voltas da Fita de Proteção em cada superfície, em um trecho aproximado de 200mm (100mm para cada lado). Finalize aplicando 1 volta de fita plástica isolante em toda a extensão para uma melhor fixação.

IV. MARCAÇÃO PARA MONITORAMENTO DE ESCORREGAMENTO



12) Após a aplicação da Fita de Proteção, localize alguns pequenos vãos que ficaram na aplicação da Emenda Total e faça marcações com tinta acrílica aerosol secagem rápida.



13) Faça a marcação em vários pontos, abrangendo as duas pontas do cabo, pois através delas será possível observar se a Emenda Total sofreu escorregamento após a instalação.

Figura 2.13 - Modelo de instrução de montagem de emenda preformada [56]

2.2 Princípio de funcionamento de emendas preformadas

Como mencionado anteriormente, emendas preformadas são elementos de linhas de transmissão utilizados para unir duas extremidades de cabos condutores. Este tipo de emenda é composto por varetas em forma de hélice que são enroladas sobre as duas extremidades dos cabos para conectá-los.

O princípio de funcionamento deste tipo de emenda se dá por atrito. Desta forma, à medida que o nível de tracionamento dos cabos aumenta, ocorre um aumento das forças de contato entre as varetas e os cabos. O aumento destas forças de contato resulta no aumento da capacidade da montagem de suportar níveis mais altos de forças de atrito, assegurando o não escorregamento entre estes componentes. O correto funcionamento das emendas exige que tais forças de contato sejam integralmente transferidas das varetas para os cabos. Portanto, após a instalação de uma emenda, deve haver folga entre as varetas, conforme ilustra a figura 2.14 que foi retirada e adaptada do celebrado livro “EPRI Transmission Line Reference Book: Wind-Induced Conductor Motion, Palo Alto”. Essas folgas devem ser preferencialmente distribuídas entre as varetas, figura 2.14 (a), entretanto uma folga concentrada em um local também pode ser considerada aceitável, figura 2.14 (b). A instalação de uma emenda inadequada, principalmente devido a um número excessivo de varetas, pode ocasionar montagens em que não haja folga lateral entre as varetas. Como resultado, poderá ocorrer o encavalamento de uma ou mais varetas para fora do arranjo da montagem, figura 2.14 (c). Também é possível haver a formação de um arranjo de varetas que não tocam o condutor, trazendo sérios riscos a capacidade da emenda de “agarrar” ao cabo e, portanto, favorecendo o escorregamento do cabo sobre a emenda, figura 2.14 (d).

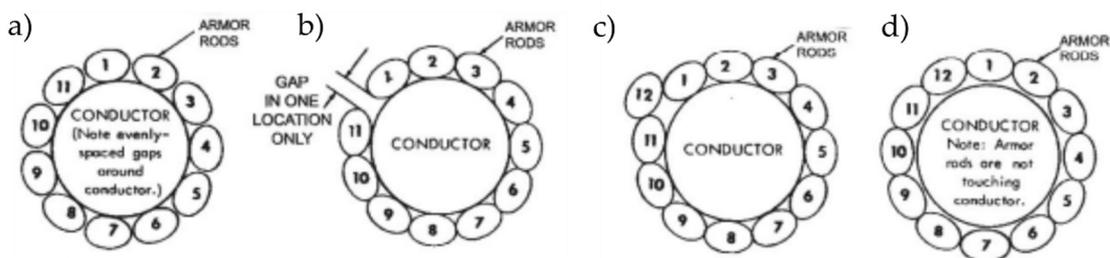


Figura 2.14 - Exemplos de aplicação de emendas. (a) Instalação preferível com folgas igualmente espaçadas entre as varetas. (b) Varetas instaladas com folga em apenas um local do conjunto. (c) Emenda com encavalamento de uma das varetas devido ao número excessivo de varetas. (d) Montagem com contato lateral entre todas as varetas impossibilitando o agarramento das varetas ao cabo. [2]

Outro aspecto importante do funcionamento de emendas pré-formadas concerne o comprimento mínimo de cada cabo que deve estar em contato com a emenda. Emendas bem dimensionadas e bem instaladas distribuem uniformemente a pressão de contato entre as varetas e os condutores. Desta maneira, a força de contato neste caso deve ser proporcional ao comprimento da região de contato entre o cabo e a emenda. Ensaios

laboratoriais feitos pelos fabricantes de emendas devem determinar o comprimento mínimo da região de contato entre os cabos e a emenda. Logo, é essencial que as recomendações dos fabricantes das emendas indiquem centralização das extremidades dos cabos em relação a emenda e o distanciamento máximo entre essas extremidades sejam respeitadas.

2.3 Vibração eólica e fadiga de cabos condutores

Durante a investigação das causas do escorregamento de emendas preformadas vamos considerar a possibilidade da vibração eólica estar associada a este problema. Desta forma, se faz necessário a apresentação de uma breve revisão teórica sobre este assunto.

A vibração nos cabos condutores devido à ação do vento é talvez o maior problema mecânico das linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. A vida útil dos cabos está diretamente relacionada com a ocorrência da vibração e com os níveis da sua amplitude. As dificuldades existentes para, na fase de projeto da linha, se prever o comportamento vibratório dos cabos com precisão, conduzem a limitações de alguns parâmetros do projeto da linha, tais como a carga de tração dos cabos e o comprimento dos vãos entre as torres.

Tendo o vento como fonte de excitação, os condutores das linhas de transmissão estão sujeitos a três tipos de movimentos: vibração eólica, oscilação de sub-vão e galloping do condutor. Estes tipos se distinguem entre si pelos diferentes efeitos sobre os condutores, grampos e outros componentes da linha de transmissão. No Brasil, a grande maioria dos problemas na linha causados pela ação do vento está associada a vibração eólica.

A vibração eólica é caracterizada por movimentos de pequena amplitude (que raramente excedem o diâmetro do condutor) e alta frequência. A faixa de velocidade do vento mais propícia para a geração de vibrações eólicas, em condições normais, é de 1 a 7 m/s. (EPRI, 2006).

Um fator que afeta fortemente a vibração eólica é a tração mecânica dos cabos condutores ou *EDS* - Every day stress. O *EDS* está associado à tensão média diária a qual o cabo será submetido ao longo de sua vida útil e é definido como uma porcentagem da carga de ruptura a tração (*CRT*) ou *UTS* (ultimate tension stress) a que o cabo é

tracionado. O amortecimento próprio do condutor varia inversamente com a carga de tração.

A principal consequência da vibração eólica para linha de transmissão é a falha por fadiga de fios dos condutores aéreos. As falhas geralmente ocorrem perto ou dentro de componentes onde o movimento do condutor é restringido, como grampos de suspensão, amortecedores espaçadores, amortecedores de vibração (Cardou et al., 1992; Zhou et al., 1994; EPRI, 2006; Azevedo et al., 2009; Fadel et al., 2012; Kalombo et al., 2015).

As fissuras iniciam-se em pontos materiais dentro de regiões de contato sujeitas a um complexo campo de histórico de tensão variável no tempo, causado pela combinação de vibração eólica, pressão de fixação, carga de alongamento e peso do vão. Além disso, os fios estão sujeitos a danos superficiais induzidos por minúsculos deslocamentos tangenciais relativos nos pontos de contato entre fios e fios componentes. Observações em campo e em laboratório de fios quebrados indicaram claramente que a fadiga por atrito é a causa da falha do fio (Zhou et al., 1994, 1996; Boniardi et al., 2007; Fadel et al., 2012; Kalombo et al., 2015, 2018).

O projeto e a manutenção de condutores aéreos contra fadiga por atrito têm sido tradicionalmente realizados usando metodologias SN. Para avaliar o risco de falhas por fadiga de condutores, utiliza-se abordagens baseadas nessa amplitude de tensão nominal, como as propostas pelo IEEE e EPRI. (EPRI, 2006).

Uma vez que essas abordagens são baseadas no conceito de tensão nominal de flexão ou limite de fadiga por tensão para cada família de condutores de liga de alumínio, o primeiro passo para entendê-las é fornecer ao leitor os detalhes da fórmula de Poffenberger-Swart (Poffenberger e Swart, 1965), que é usada para calcular a tensão nominal máxima de flexão experimentada por um ponto material da superfície de um condutor (EPRI, 2006).

2.4 Fórmula de Poffenberger-Swart

A fórmula de Poffenberger-Swart (1965) é usualmente utilizada para correlacionar uma amplitude de deslocamento medida em uma posição padronizada a partir do grampo (ou outro tipo de ferragem) com uma amplitude de tensão no ponto mais externo do cabo e na saída (boca) do grampo Y_b , figura 2.15.

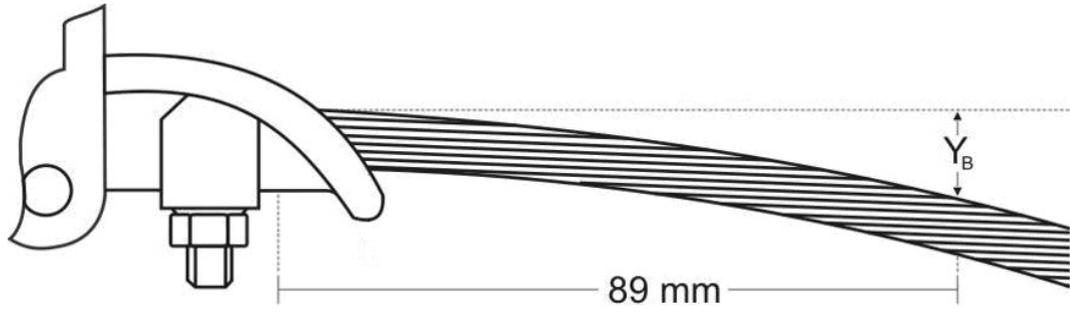


Figura 2.15 – Ponto padrão para medição da amplitude de deslocamento Y_b do cabo provocado pela vibração eólica

A relação entre os esforços dinâmicos e a amplitude de vibração é dada por Poffenberger-Swart através da equação:

$$\sigma_a = KY_b \quad (2.1)$$

onde σ_a é a faixa de tensão dinâmica (pico-a-pico), Y_b é a amplitude de deslocamento pico a pico, medida a partir de um ponto sobre o cabo distante 89 mm do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão, e K determinado por:

$$K = \frac{E_{al} \cdot d_{al} \cdot p^2}{4(e^{-p \cdot X_b} - 1 + p \cdot X_b)} \quad (2.2)$$

para E_{al} (MPa) o módulo de elasticidade do alumínio, d_{al} (mm) o diâmetro dos fios de alumínio do cabo e p determinado por:

$$p = \sqrt{\frac{T}{EI_{min}}} \quad (2.3)$$

onde T é determinado através da equação 2.3 e EI_{min} (MPa) é a rigidez mínima a flexão do cabo, cujo valor é dado por:

$$EI_{min} = n_{al} \cdot E_{al} \cdot \frac{\pi \cdot d_{al}^4}{64} + n_s \cdot E_s \cdot \frac{\pi \cdot d_s^4}{64} \quad (2.4)$$

onde n_s , E_s e d_s , são o número, o diâmetro individual e o módulo de elasticidade dos fios de aço.

2.5 Metodologia da EPRI

A metodologia da EPRI (Orange Book) sugere para vários tipos de condutores valores máximos de amplitude de flexão e de amplitude de tensão definidos como limites de resistência. Conforme essa metodologia, caso estes patamares de amplitudes sejam ultrapassados a integridade do cabo estaria condenada a fadiga. Estes valores são válidos para condutores suspensos por grampos metálicos rígidos com um perfil interno liso sendo definidos principalmente para condutores ACSR.

Para um cabo ACSR com uma camada de fios de alumínio o limite de resistência a fadiga será de 22,5 MPa, enquanto que para duas ou mais camadas esse valor é de 8,5 MPa. Para as ligas 6201 e similares os limites de fadiga sugeridos são de 15 MPa para cabos com uma camada de fios de alumínio e 5,7 MPa para duas ou mais camadas.

2.6 Metodologia da IEEE

A avaliação da vida a fadiga em condutores baseadas estritamente na máxima amplitude de tensão correspondente ao limite de fadiga (Metodologia da EPRI), pode ser considerada excessivamente cautelosa. De fato, esses limites podem ser ultrapassados por um número limitado de vezes sem efeitos práticos na integridade do condutor. O número de vezes que estes limites podem ser ultrapassados propostos pela IEEE são apresentados abaixo e descritos na tabela 2.1:

- A amplitude de flexão não poderá ultrapassar o limite de fadiga do material em mais de 5% do total de ciclos.
- Não mais de 1% do total de ciclos poderá ultrapassar 1,5 vezes o limite de fadiga.
- Em nenhum ciclo a tensão (σ_a) poderá alcançar 2 x o limite de fadiga.

Tabela 2.1- Limites de resistência para cabos (ACSR) com uma e duas ou mais camadas de fios de alumínio para o método da IEEE

Nº de camadas de fios de alumínio	Limites de resistência (MPa) – <i>EDS</i> = 20%		
	1 x limite	1,5 x limite	2 x limite
1	22,5	33,75	45
2 ou mais	8,5	12,75	17

Vale lembrar que inicialmente para IEEE a máxima amplitude de deslocamento suportada por um condutor ACSR sem que este viesse a sofrer danos por fadiga não poderia ser determinada precisamente, era-se especulado que este limite seria de 150 a 200 microstrain (pico a pico). Mais tarde, os mesmos mostraram-se muito conservativos sendo substituídos pelos limites acima descritos.

Capítulo 3

Metodologia

3.1 Materiais

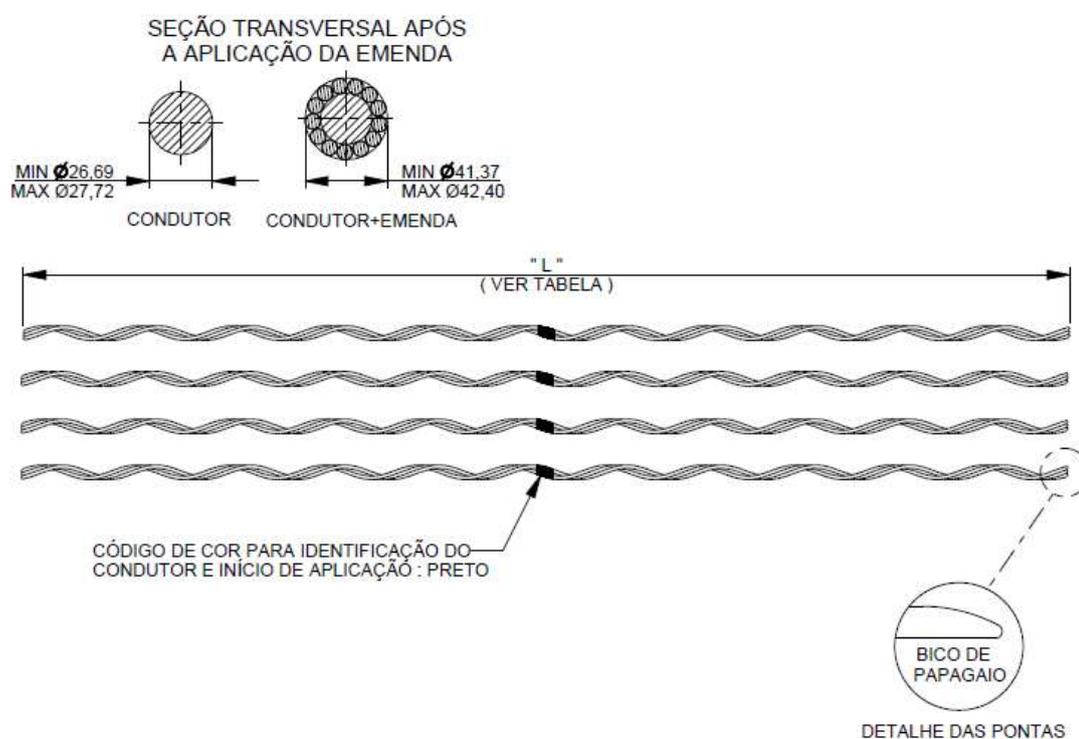
O problema a ser estudado nesta dissertação envolve o escorregamento de cabos condutores dentro de emendas preformadas. Apresenta-se agora a descrição de ambos os componentes. O cabo condutor trata-se de um cabo de alumínio liga (CAL 1120) 838 MCM, cujas características geométricas, mecânicas e elétricas podem ser encontradas na Tabela 3.1 retirada diretamente do catálogo do fornecedor. Um carretel com 200 m deste cabo foi fornecido a UnB para o estudo.

Tabela 3.1 - Características geométricas, mecânicas e elétricas do cabo de alumínio liga (CAL) 838 MCM.

Característica	Condutor
Tipo	CAL-1120 (AAAC)
Número de condutores por fase	6 (variável)
Formação	37 fios Al liga 1120
Bitola nominal	838 MCM
Seção reta total	425,16 mm ²
Diâmetro dos fios de alumínio	3,825 mm
Diâmetro total	26,78 mm
Peso próprio do cabo completo	1,17090 kgf/m
Carga de ruptura mínima	9.475,59 kgf
Lance mínimo por bobina	2.400 m
Encordoamento da camada externa	à direita
Módulo de elasticidade final (kgf/mm ²)	6.298
Módulo de elasticidade inicial (kgf/mm ²)	4.959
Coefficiente de dilatação linear inicial (°C ⁻¹)	23x10 ⁻⁶
Coefficiente de dilatação linear final (°C ⁻¹)	23x10 ⁻⁶
Resistência elétrica CC, a 20° C (Ω/km)	0,0703
Resistência elétrica CA, 60 Hz, a 50° C (Ω/km)	0,07853

A composição química da liga 1120 não foi fornecida pelo fabricante, mas pode ser obtida por meio da “International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys – The Aluminum Association” (Eduard, 2015).

As emendas preformadas possuíam 13 varetas helicoidais da liga 6201. Novamente, o fabricante não forneceu a composição química que também pode ser obtida a partir de (Eduard, 2015). As dimensões relevantes desta emenda são apresentadas no desenho da figura 3.1. A partir deste momento denominaremos esta emenda como emenda preformada “A”. Dez conjuntos deste tipo emenda foram enviados a UnB.



NOTAS :

- 1 - APLICAÇÃO : CABO CAL DE $\varnothing 26,69\text{mm}$ A $27,72\text{mm}$;
- 2 - CARGA DE RUPTURA / ESCORREGAMENTO : 95% DA C.R. DO CONDUTOR;
- 3 - FORNECIDO COM PASTA ANTIÓXIDO: 120g (4 SACHÉS C/ 30g);
- 4 - IDENTIFICAÇÃO E RASTREABILIDADE: GRAVAÇÃO NA SUPERFÍCIE DAS VARETAS PREFORMADAS ;
- 5 - FITA SELANTE PARA PROTEÇÃO NO LANÇAMENTO : 2 PEÇAS.

INTERVALO DE APLICAÇÃO (mm)	NÚMERO DE VARETAS	COMPRIMENTO "L" (mm)	SENTIDO DA HÉLICE	MASSA APROXIMADA (kg)	DIÂMETRO DAS VARETAS (mm)	MATERIAL
26,69 - 27,72	13 (4-3-3-3)	3505 ± 75	DIREITA	5,65	7,34	LIGA DE ALUMÍNIO

Figura 3.1 – Desenho com as dimensões relevantes da emenda preformada (Fonte: Autoria Própria, 2021)

A foto na figura 3.2 mostra um conjunto cabo emenda fornecido por uma transmissora para o estudo do problema, enquanto que a figura 3.3 mostra exemplares das varetas da emenda não instaladas mas disponíveis para estudos.



Figura 3.2 – Foto de um conjunto cabo-emenda fornecida para estudo e medida do diâmetro do cabo (Fonte: Autoria Própria, 2021)

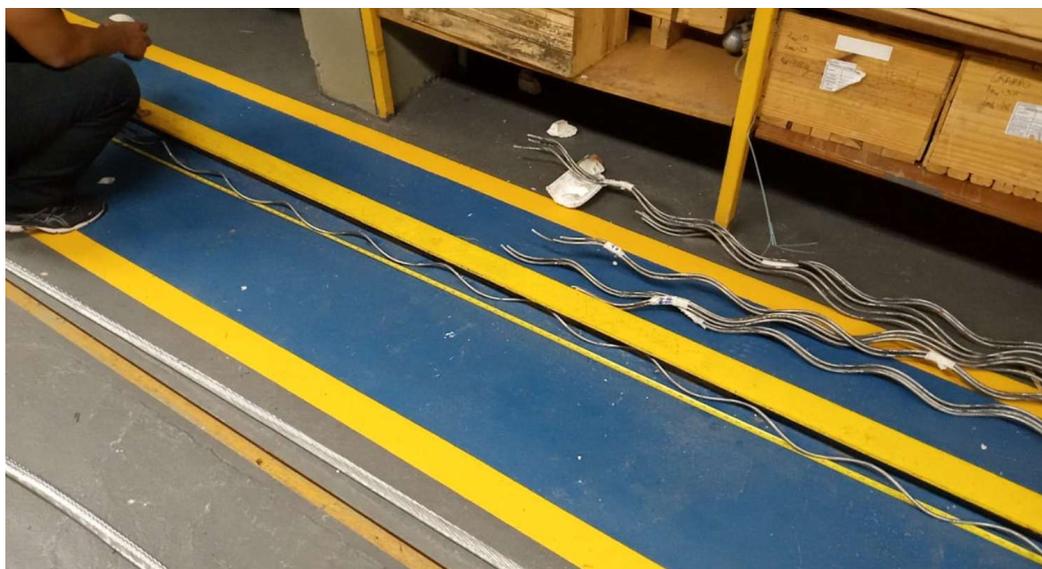


Figura 3.3 – Foto das varetas da emenda em estudo no laboratório de Fadiga de Cabos da UnB (Fonte: Autoria Própria, 2021)

3.2 Metodologia para a análise da causa raiz das falhas das emendas preformadas

Com base nas observações de ocorrência das falhas, a metodologia utilizada para análise do problema nesse trabalho envolve a avaliação: (i) da possibilidade de existência de erro no projeto e ou fabricação da emenda; (ii) de erros de montagem e/ou lançamento das emendas, (iii) erro na fabricação do cabo condutor e (iv) de uma combinação destes fatores.

Para avaliação de aspectos relacionados a possíveis erros na fabricação do cabo e das emendas os testes realizados foram de caráter dimensional. Mais especificamente conduziram-se os seguintes ensaios:

- i. Medição dos diâmetros dos cabos condutores.
- ii. Medição dos diâmetros dos fios dos cabos.
- iii. Medição do comprimento e do diâmetro das varetas das emendas que escorregaram e medição do diâmetro externo da emenda montada ao cabo.
- iv. Medição do comprimento e do diâmetro das varetas de emendas novas (não montadas), retiradas de campo

Análises químicas e ensaios mecânicos foram conduzidos para comprovar que o material dos fios do cabo e das varetas das emendas estava de acordo com a especificação. Em relação a eficácia de funcionamento das emendas, análises microscópicas das superfícies dos elementos que escorregaram foram conduzidas em microscópio eletrônico de varredura e de microscópio confocal laser. Também foram conduzidas inspeções visuais externas e internas as amostras para avaliar a possível presença de marcas, engaiolamento etc. No que tange a especificação e projeto das emendas, foram feitos cálculos das folgas entre varetas quando instaladas nos cabos e o espaço/diâmetro interno produzido pelo conjunto de 13 varetas fornecido pelo projeto. Ensaios e análises estão diretamente relacionados com a avaliação das forças de contato existentes no interior das emendas e, portanto, permitem uma avaliação dos aspectos associados ao dimensionamento quanto escorregamento das emendas de 13 varetas. Em relação a montagem em campo da emenda, foi feita uma averiguação técnica a respeito da passagem do conjunto cabo-emenda pelo tensionador (*bullwheel*). Além disso, imagens

aéreas e de radiografia digital das linhas instaladas foram analisadas para detectar eventuais anormalidades nas montagens cabo-emenda.

Por último, mas não menos importante, conduzimos alguns ensaios de vibração eólica na bancada de fadiga de cabos condutores da UnB com o objetivo de avaliar a possibilidade de que níveis de vibração considerados severos (que levariam a fadiga dos fios de alumínio do cabo) pudessem provocar deslizamentos entre o cabo e a emenda. O esquema da bancada do ensaio com a emenda instalada é apresentado na figura 4.16.



Figura 3.4 – Esquema da bancada de ensaio com o condutor emendado. (Fonte: Autoria Própria, 2021)

Primeiramente o condutor CAL 838 MCM foi tracionado na bancada experimental com a finalidade de localizar e marcar o centro do vão ativo, posição onde cortou-se o condutor e, posteriormente, onde instalou-se a emenda. Optou-se por posicionar a emenda do condutor no centro do vão, pois esta posição possui a característica singular de ser um nó ou um anti-nó, a depender do modo de vibração. Caso o modo de vibração seja par, o centro do vão será um nó e caso o modo seja ímpar, o ponto central do vão será um anti-nó, como exemplificado na figura 4.17. Segundo o Orange Book da EPRI [1], o local onde ocorre a máxima tensão de flexão ao longo do vão é no anti-nó, por conta disso, os ensaios serão realizados no modo de vibração ímpar do condutor.

A emenda foi instalada seguindo-se criteriosamente todas as recomendações. Após, o condutor foi esticado na bancada com uma carga equivalente a 21% da carga de ruptura.

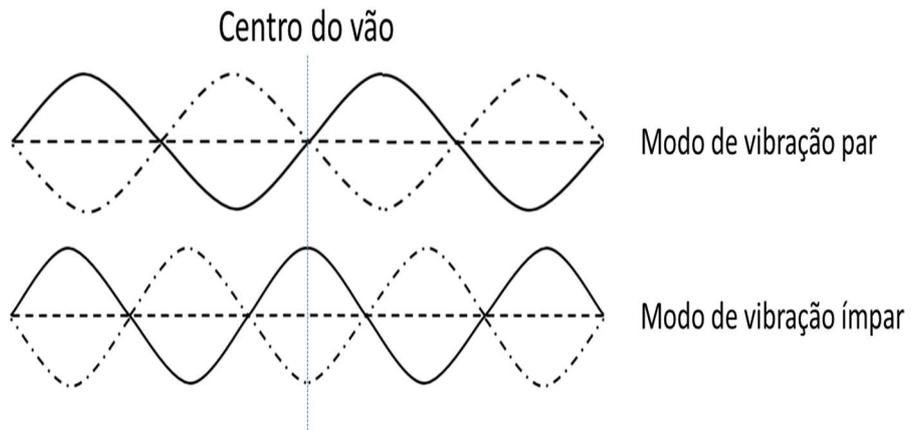


Figura 3.5 – Modos de vibração do cabo condutor.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Análise dimensional, química e mecânica da emenda e do cabo

Os ensaios conduzidos no Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia da UnB, revelaram que todos os aspectos dimensionais avaliados nos itens 1 a 4 da metodologia descrita acima encontravam-se dentro das medidas e tolerâncias especificadas pelos fabricantes do cabo e das emendas.

Realizou-se também ensaios de tração e dureza em fios do cabo CAL 1120 838 MCM e em varetas da emenda A. Estes testes foram realizados em uma máquina Universal de Ensaio MTS modelo MTS 370 do Laboratório de Ensaio dos Materiais do ENM-UnB. A Fig. 4.1 mostra uma foto do fio do cabo montado na máquina durante os ensaios. Foram realizados 4 ensaios de tração com fios retirados diretamente de amostra do cabo condutor que escorregou da emenda. A Tabela 4.1 relata os valores do limite de resistência obtidos para cada ensaio com os fios do cabo e com as varetas da emenda, respectivamente, assim como os valores médios.

Observa-se que o valor médio do limite de resistência do fio de alumínio retirado do cabo que escorregou em campo foi 240 MPa, o que é superior ao mínimo de 230 MPa requerido pela norma ABNT NBR 16637:2017 [1] para fios da liga 1120 com diâmetro nominal entre 3.76 e 4.0 mm. Para as varetas da emenda o valor médio do limite de resistência foi 308 MPa, o que é superior ao mínimo de 305 MPa requerido pela norma ABNT NBR 5285:2010 [2].

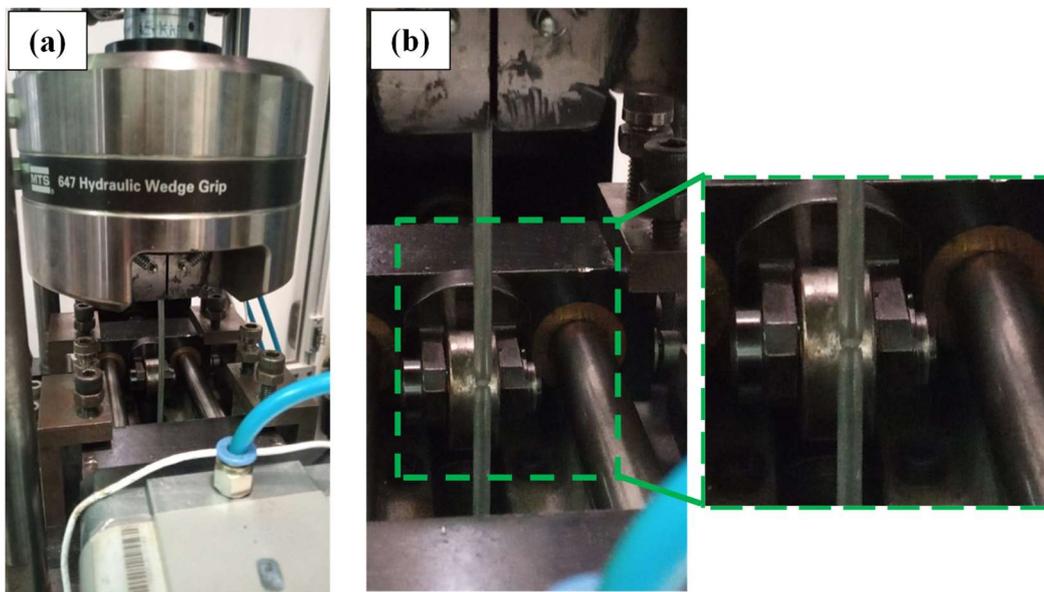


Figura 4.1 - Foto mostrando o fio de alumínio do cabo condutor CAL 1120 838 MCM montado entre as garras da máquina MTS (a) para realização de ensaio de tração e (b) depois a realização de ensaio de tração (Fonte: Autoria Própria, 2021)

Tabela 4.1. Valores dos limites de resistência para os ensaios com os fios retirados de amostra do cabo condutor CAL (1120) 838 MCM e com as varetas obtidas da emenda A (amostras de emenda e cabo que escorregaram em campo).

	Amostra	Limite de resistência (MPa)	Média (MPa)
	1	319	
Vareta	2	293	308
	3	311	
	1	231	
Fio	2	231	240
	3	259	

Testes de dureza foram conduzidos sobre os fios retirados de amostra do cabo condutor CAL 1120 MCM e com as varetas obtidas da emenda “A”. Os testes foram realizados no durômetro modelo EmcoTest DuraScan 20 G5 do Laboratório de Materiais

do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB. A Tabela 4.2 contém os resultados dos ensaios de dureza.

Tabela 4.2 - Valores de dureza HV1 dos testes conduzidos sobre os fios retirados de amostra do cabo condutor AAAC 1120 MCM e com as varetas da emenda LS-20150R-LBRFT.

Amostra		Med. 1	Med. 2	Med. 3	Média	Média das médias
	1	105	97,5	100	101	
Vareta	2	103	101	104	103	101
	3	101	96,6	104	101	
	1	53,5	58,8	60,2	57,5	
Fios	2	70	67,9	72,7	70,2	62,5
	3	59,6	58,5	61,3	60	

Nota-se da Tabela 4.2 que a dureza média medida para o fio do cabo foi de 62.5 HV enquanto para a vareta da emenda foi 101. As normas ABNT NBR 16637:2017 e ABNT NBR 5285:2010 não definem valores mínimos para dureza de fios de cabos da liga 1120 e de fios da liga 6201. Desta forma, não constatou-se evidências de problemas materiais ou de resistência mecânica nas amostras ensaiadas.

4.2 Folga entre varetas

Conforme mencionado anteriormente, a presença de folga lateral adequada entre as varetas de uma emenda pré-formada após sua instalação no cabo é fundamental para o correto funcionamento deste componente. Esta folga garante que as varetas da emenda transfiram integralmente as forças de contato para o cabo sem que se toquem, evitando que se produza o efeito tubo. A folga deve existir para comportar a diminuição do diâmetro do cabo devido a efeitos como: acomodação dos fios, razão de Poisson, fluência geométrica, deformações de contato etc.

Neste estudo, a folga total é calculada na seção transversal do conjunto cabo emenda e é dada pelo comprimento de arco entre a primeira e a última vareta da emenda

na circunferência que passa pelos pontos de contato entre as varetas, conforme ilustrado na figura 4.2.

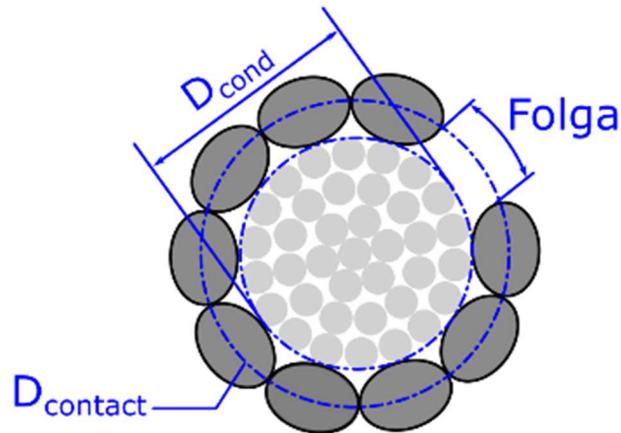


Figura 4.2 - Ilustração esquemática do conjunto cabo-emenda com definição da folga total (Fonte: Autorial Própria, 2021)

Tomando as varetas como uma forma helicoidal e empregando equações que definem as relações geométricas entre varetas justapostas em um cabo, é possível estabelecer um conjunto de equações trigonométricas de segunda ordem cujas derivadas parciais do sistema de equações são definidas e contínuas, o que permite a utilização de métodos numéricos como o de Newton-Raphson para o cálculo das raízes do sistema. A solução deste sistema de equações, permite calcular o ângulo ocupado por cada vareta ao longo do espaço radial ao redor do cabo condutor. Dessa maneira, é possível determinar a folga angular deixada pelas varetas quando instaladas no cabo. Essa folga angular representa a diferença entre o espaço angular disponível (2π) e o espaço angular ocupado pelas varetas.

Posteriormente, a partir das equações paramétricas que descrevem a posição de um ponto na superfície de uma vareta, é possível estabelecer um sistema de equações trigonométricas que descreve a distância entre pontos nas superfícies de varetas justapostas em um plano perpendicular ao eixo do cabo. A resolução desse conjunto adicional de equações trigonométricas por meio de métodos numéricos fornece o raio entre o centro do cabo e o ponto de contato entre as varetas. Com base nesse raio e na folga angular entre as varetas na emenda, torna-se possível calcular a folga geométrica da emenda. Essa folga é definida como um segmento de arco e representa a diferença entre o espaço disponível e o espaço ocupado pelas varetas na montagem cabo-emenda.

O método supracitado para o cálculo da folga foi implementado pelo Professor Araújo e pelo MSc Engo Pedro Rocha em um software denominado SpliceGap (ver fig. 4.3) abaixo. Por motivos de confidencialidade estas equações não serão descritas explicitamente no texto.

Figura 4.3 - Ilustração esquemática do Software SpliceGap contendo os inputs para o cálculo do “GAP”, folga total entre as varetas

Para o cálculo do “gap” total para este conjunto cabo-emenda o SpliceGap precisa como dados de entrada das dimensões nominais e das tolerâncias para os elementos do cabo e da emenda. Mais especificamente, para o cabo CAL 838 MCM liga 1120 as dimensões necessárias são o seu diâmetro nominal e tolerâncias ($\varnothing = 26,78 \text{ mm} \pm 0,27 \text{ mm}$), enquanto que para a emenda “A” as informações e dimensões requeridas são: o número de varetas da emenda (13), o diâmetro nominal e a tolerância da vareta ($\varnothing_v = 7,34 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$), o passo nominal e tolerância da vareta ($p = 244 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$). O gráfico da figura 4.4 apresenta o cálculo da folga total entre varetas para o conjunto cabo-emenda avaliado neste estudo. O eixo horizontal do gráfico apresenta o valor da folga total da emenda dividido pelo diâmetro de uma vareta. Note que, considerando as dimensões nominais do cabo e das varetas da emenda, a emenda “A” montada no cabo CAL 838 MCM possui uma folga nominal de apenas 2.34 mm, o que corresponde a 0.32 vezes o diâmetro de uma vareta desta emenda. No cenário mais desfavorável, que considera nos cálculos a presença das tolerâncias dimensionais para a

emenda e para o cabo, esta razão entre a folga total e o diâmetro de uma vareta cai para -0.14, ou seja, não há folga, mas sim interferência entre as varetas. Nesses casos, a montagem e o funcionamento correto da emenda tornam-se impossíveis, pois haverá não apenas o encavalamento de varetas durante o processo de montagem, mas também uma queda da pressão de contato entre a emenda e o cabo condutor. Variações internas no diâmetro do cabo causadas por fluência geométrica, efeito de Poisson, deformações produzidas por possível passagem do conjunto cabo-emenda por tensionadores etc. agravarão ainda mais o problema.

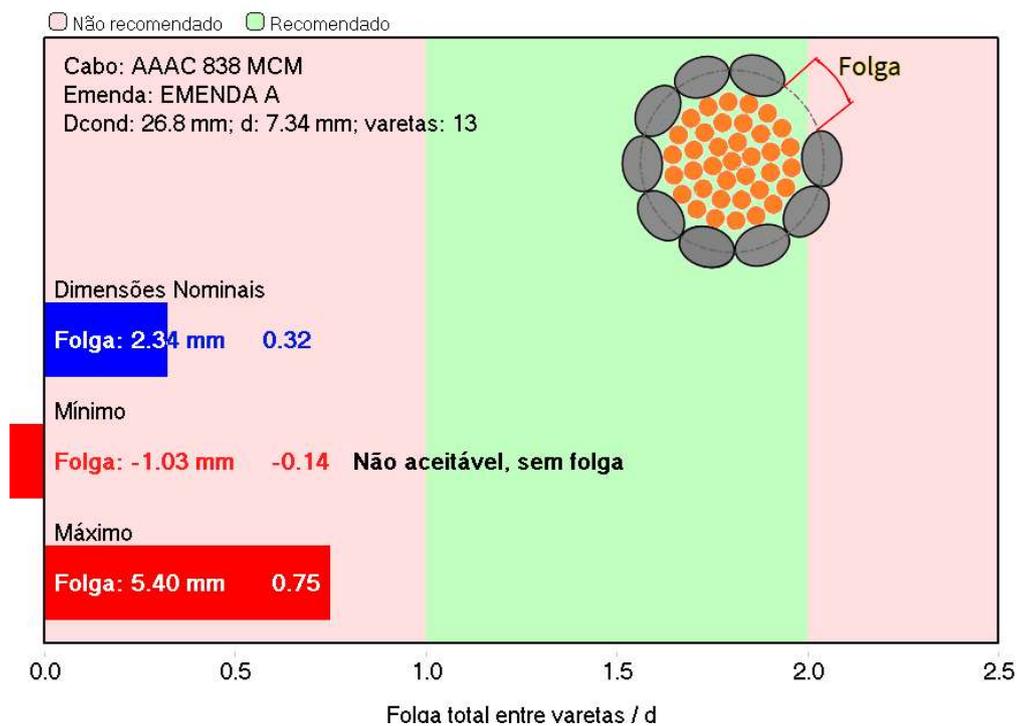


Figura 4.4 – Cálculo do GAP total para emenda A montada no cabo CAL 1120 838 MCM considerando todas as tolerâncias geométricas envolvidas

A figura 4.5 mostra a foto da seção transversal de um conjunto cabo emenda que foi retirado da linha de transmissão onde o escorregamento não havia ocorrido, mas de um vão próximo ao local dos escorregamentos. Esta foto foi obtida por meio do uso do Microscópio Confocal Laser Olympus LEXT OLS5100 do ENM-UnB. A partir desta imagem mediu-se uma folga total para este conjunto específico de 3.28 mm. Portanto, o valor medido está de acordo com a faixa calculada para a folga total. De acordo como Splice Gap esta folga poderia estar entre -1.03 mm e 5.40 mm.

A figura 4.6 contém uma radiografia digital da montagem cabo-emenda em um trecho da linha de transmissão. Note que por esta imagem também foi possível se estimar a folga total visível entre as varetas. O valor medido na imagem foi de 2 mm, o que mais uma vez confirma e sustenta os cálculos apresentados para o gap total.

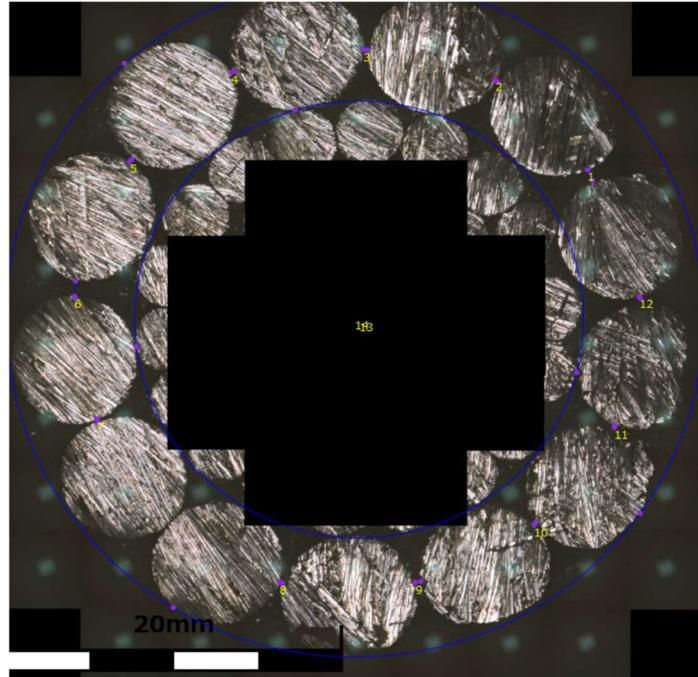


Figura 4.5 – Foto obtida com microscópio confocal laser da seção transversal de um dos conjuntos cabo-emenda retirado de um vão próximo ao que falhou. As medidas indicam uma folga total entre varetas de apenas 3.28 mm

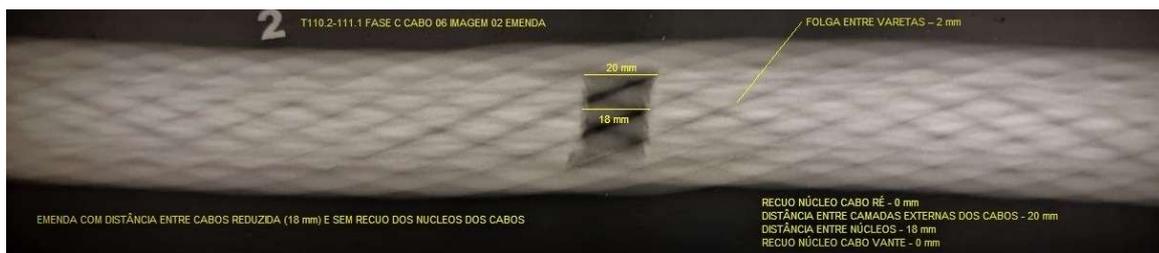


Figura 4.6 - Radiografia digital da montagem cabo-emenda em trecho da linha em outro trecho, mostrando folga visível de apenas 2 mm entre as varetas

4.3 Análise microscópica das superfícies de contato da emenda e do cabo

O efeito do atrito e do desgaste superficial durante o escorregamento dos cabos dentro das emendas foi avaliado e, para isso, foram observadas as marcas de contato nos cabos e nas varetas das emendas usando-se o microscópio eletrônico de varredura (MEV) de tipo JEOL JSM-7100F do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura e Confocal Laser do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB. A figura 4.7 (a) ilustra as marcas deixadas na superfície do fio do cabo condutor após o escorregamento dentro da emenda. A figura 4.7 (b) mostra a superfície deste mesmo fio, porém em região que estava fora da emenda antes do escorregamento. Lembramos que as fotos da figura 4.8 pertencem ao mesmo fio do cabo condutor que escorregou da emenda.

Note que as marcas de escorregamento na parte do fio que estava dentro da emenda não foram profundas e tem aspecto de baixo nível de plastificação. Não há evidências de riscos na direção longitudinal do fio ou de arranque significativo de material superficial. Isso claramente caracteriza um baixo nível de pressão entre as superfícies de contato e/ou um baixo coeficiente de atrito.

As fotos das superfícies internas da vareta da emenda são mostradas nas figuras 4.8 e 4.9. A fig. 4.8 apresenta fotos das superfícies internas de uma mesma vareta da emenda. Na fig. 4.8 (a) a vareta foi analisada em região mais próxima ao centro da emenda. Pode-se observar que, apesar de haver perda de uma parte do material abrasivo ao longo de um pequeno comprimento da vareta, não se consegue observar marcas mais severas na superfície revelada da vareta.

Esta observação poderá ser confirmada após análise das fotos tiradas no MEV. Na fig. 4.8 (b), de parte da mesma vareta, mas cortada mais próxima a extremidade da emenda, pode-se ver que o material abrasivo está preservado apesar do arrancamento do cabo. Novamente, estas são evidências de baixo nível de pressão entre emenda e cabo.

A fig. 4.9 (a) mostra a foto obtida no MEV (tipo JEOL JSM-7100F) da parte interior de amostra da vareta retirada daquela mostrada na fig. 4.7(a). Pode-se notar nesta foto o arrancamento do *grit* (material abrasivo), mas novamente, não há marcas severas de escorregamento superficial na vareta de alumínio liga. Na fig. 4.9 (b) mostra-se foto de uma outra região da mesma vareta da emenda sem perda do *grit*.

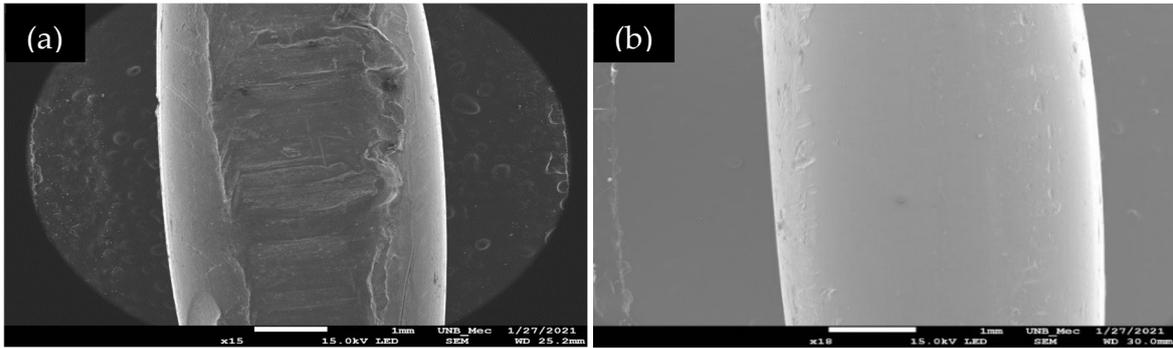


Figura 4.7 - Foto de fio do cabo condutor que escorregou: (a) parte do fio que estava dentro da emenda, em contato com as varetas e (b) parte do mesmo fio fora da emenda

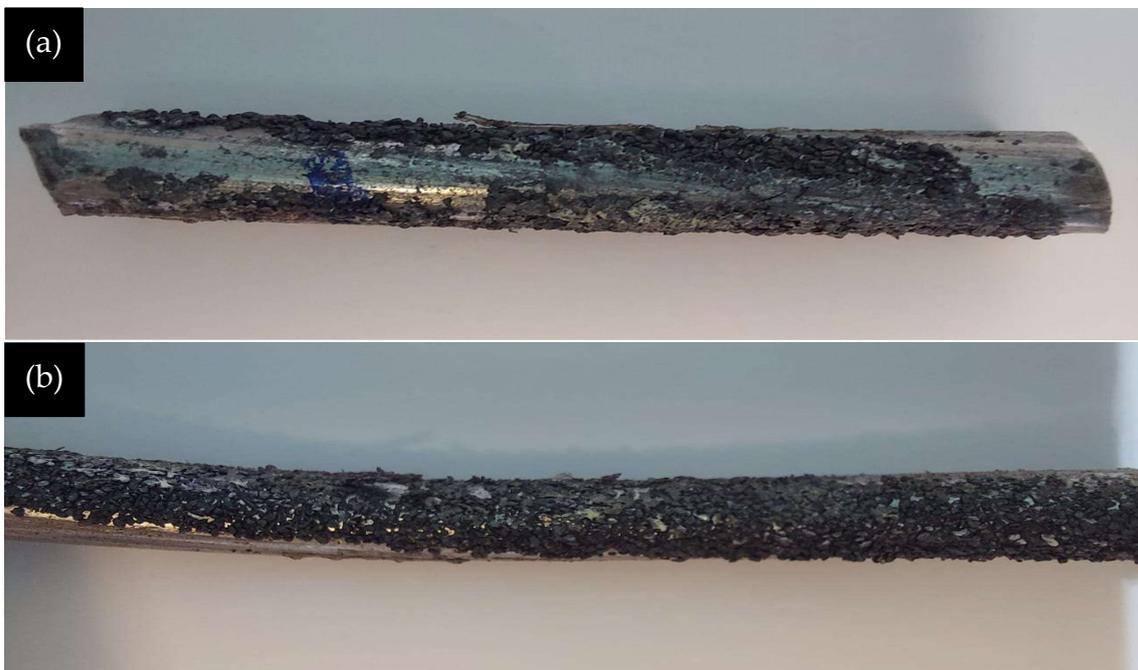


Figura 4.8 - Foto da parte interior da vareta de uma emenda que escorregou: (a) com marca de escorregamento e (b) sem marca e em região mais próxima extremidade da emenda

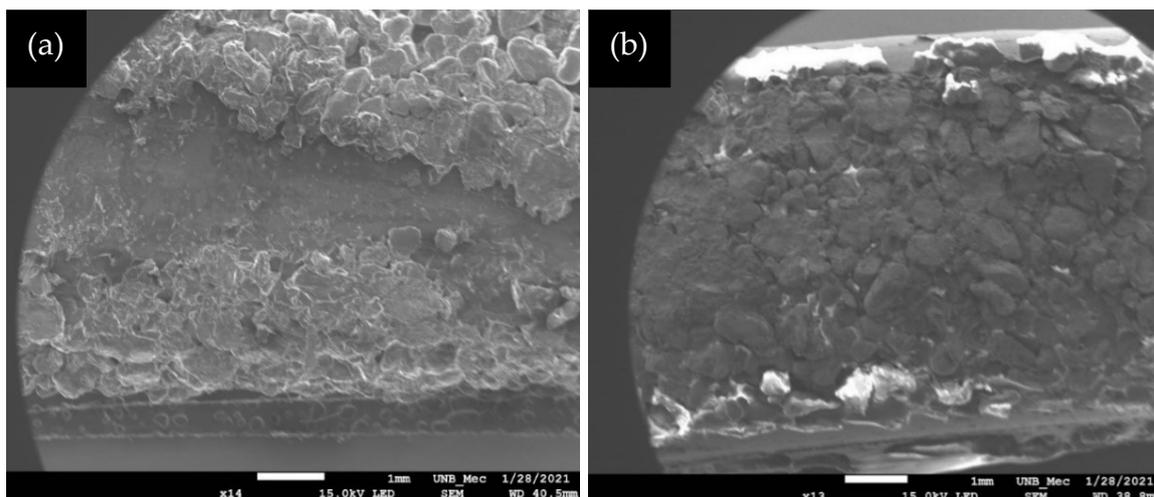


Figura 4.9 - Foto do MEV da parte interior da vareta: (a) com arrancamento do grit mas sem marcas severas de escorregamento superficial na vareta e (b) com grit preservado

4.4 Inspeção de montagem cabo-emenda em campo

Emendas de armaduras pré-formadas são elementos mecânicos projetados para operar sob esforços de tração somente. Uma vez flexionadas em excesso, estas emendas podem ter seu mecanismo de funcionamento prejudicado. Em diversas observações de campo, durante a construção das linhas de transmissão foi constatado pelo autor deste trabalho, a passagem sistemática de emendas pelo freio-tensionador (bullwheel) durante o lançamento de cabos condutores da linha, como evidenciado pela foto da Fig. 4.10. Vale ressaltar, que esta é uma prática não documentada na literatura técnica, não admitida em países ditos desenvolvidos, como EUA, Austrália e Europa em geral, bem como também não prevista na norma IEEE 524-2016.



Figura 4.10 - Foto com evidência da passagem das emendas pelo tensionador
(Fonte: Autoria Própria, 2021)

Além dessa observação, um levantamento foi feito para averiguar as dimensões dos tensionadores utilizados pelas construtoras em campo. A Tabela 4.3 apresenta informações obtidas em campo a respeito dos equipamentos utilizados por cada construtora envolvida na montagem das linhas.

Tabela 4.3 – Tensionadores (*bullwheels*) utilizados pelas empreiteiras.

Trecho /Utilização	Construtora	Modelo equipamento	Diâmetro roda guia, mm	Diâmetro máximo do cabo, mm
Trecho x	X	Tesmec TN-1750	1500	38
Trecho y	Y	Tesmec FRB-600	1500	38
Trecho z	Z	Tesmec FRB-600	1500	38
Trecho w	W ¹	Tesmec FRB-600	1500	38

Segundo especificação do projeto da emenda de 13 varetas, denominada “A” neste estudo, o conjunto cabo emenda deve ter diâmetro de 41.46 mm (sendo o mínimo admitido de 41.37 e o máximo de 42.40 mm). Observe que, se o conjunto cabo-emenda for considerado equivalente a um cabo com diâmetro de 41.46 mm, ou seja, nenhum dos tensionadores listados na Tabela 4.3 poderia ser utilizado, pois o diâmetro máximo de cabo permitido seria de 38 mm. Mais ainda, de acordo com a IEEE 524-2016, o diâmetro

¹ Em alguns tramos a construtora lançou o cabo condutor com dois freios Tesmec FRB-600

máximo da roda guia está no limite admitido para um cabo de diâmetro equivalente de 41.46 mm, conforme ilustrado na Fig. 4.11.

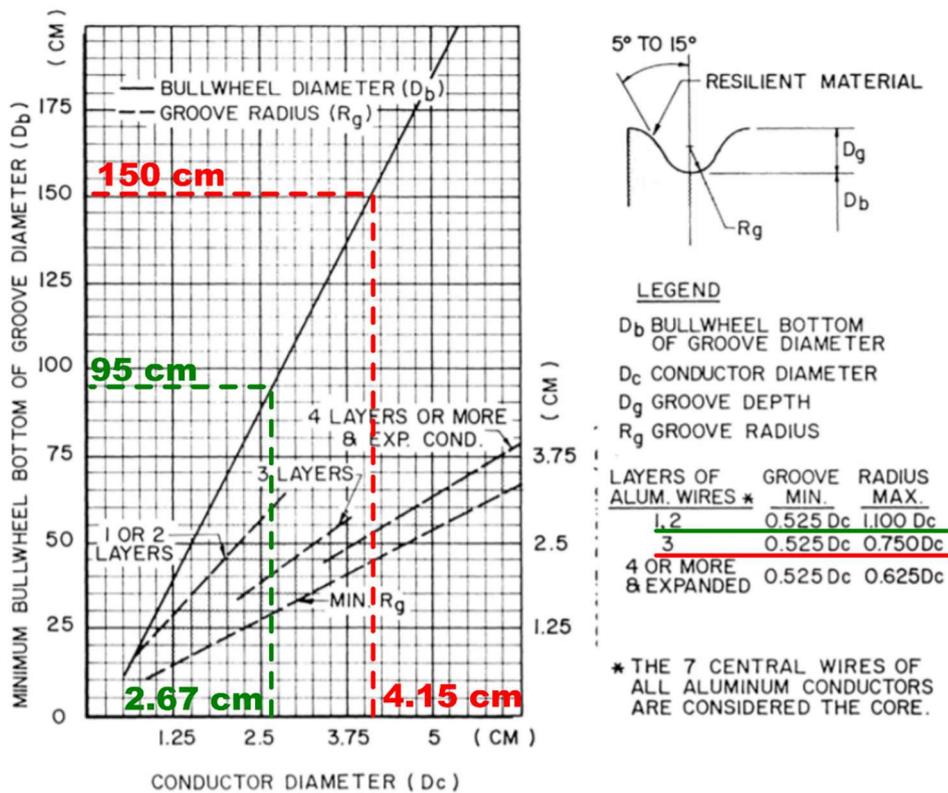


Figura 4.11 - Dimensões recomendadas para a roda guia do tensionador (Fonte: Autoria Própria, 2021)

Note que a passagem do cabo por rodas guias com dimensões inadequadas podem aumentar indevidamente as pressões de contato entre as camadas do cabo (*bearing pressure*), gerando dano aos fios. Além disso, podem gerar deformações plásticas capazes de distorcer a seção transversal do cabo.

4.5 Análises de fotografias e radiografias de emendas instaladas

Imagens aéreas do conjunto cabo-emenda ilustram o aspecto de algumas montagens. Na figura 4.12 (a) é possível notar a presença de folgas concentradas entre as varetas indicando uma montagem aceitável. Enquanto nas figuras 4.12 (b) e (c) aparentemente não há tal folga.

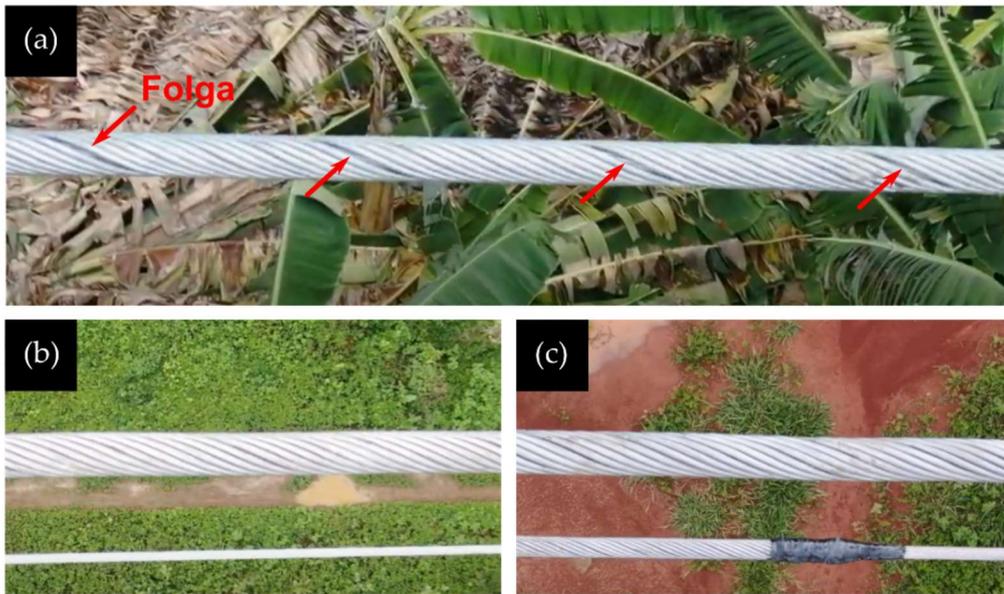


Figura 4.12 - Fotos aéreas das emendas instaladas em campo (Fonte: Autoria Própria, 2021)

Em outros casos é possível notar evidências inequívocas da ocorrência de problemas de montagem com as emendas, conforme pode ser visto na figura 4.13. A emenda instalada em campo apresenta clara extrusão, ilustrando que provavelmente esta vareta não foi completamente instalada, ou pior, que pode ter sido retirada e reinstalada de forma improvisada. Nota-se ainda na mesma figura o encavalamento de varetas da emenda.



Figura 4.13 - Foto de emendas instaladas em campo demonstrando claros erros de instalação (Fonte: Autoria Própria, 2021)

Imagens produzidas por radiografia digital das emendas apontam para mais problemas de instalação. A figura 4.14 (a) mostra a presença de uma distância entre as

extremidades dos cabos de 43 mm, quando o recomendado pelo projeto da emenda de 13 varetas, denominada “A” em seu guia de instalação é zero.

De qualquer forma, a imagem de radiografia digital demonstra que ou houve um erro na montagem da emenda ou que está havendo um progressivo escorregamento dos cabos dentro da emenda. Também é possível observar que as camadas centrais dos cabos estão deslocadas em relação as suas camadas externas, portanto, havendo perda de contato efetivo entre o cabo e a emenda nessas regiões. Na figura 4.14 (b) a radiografia revela claramente (setas vermelhas) que há regiões de comprimento considerável (aproximadamente 150 mm) onde não há contato das varetas com o cabo.

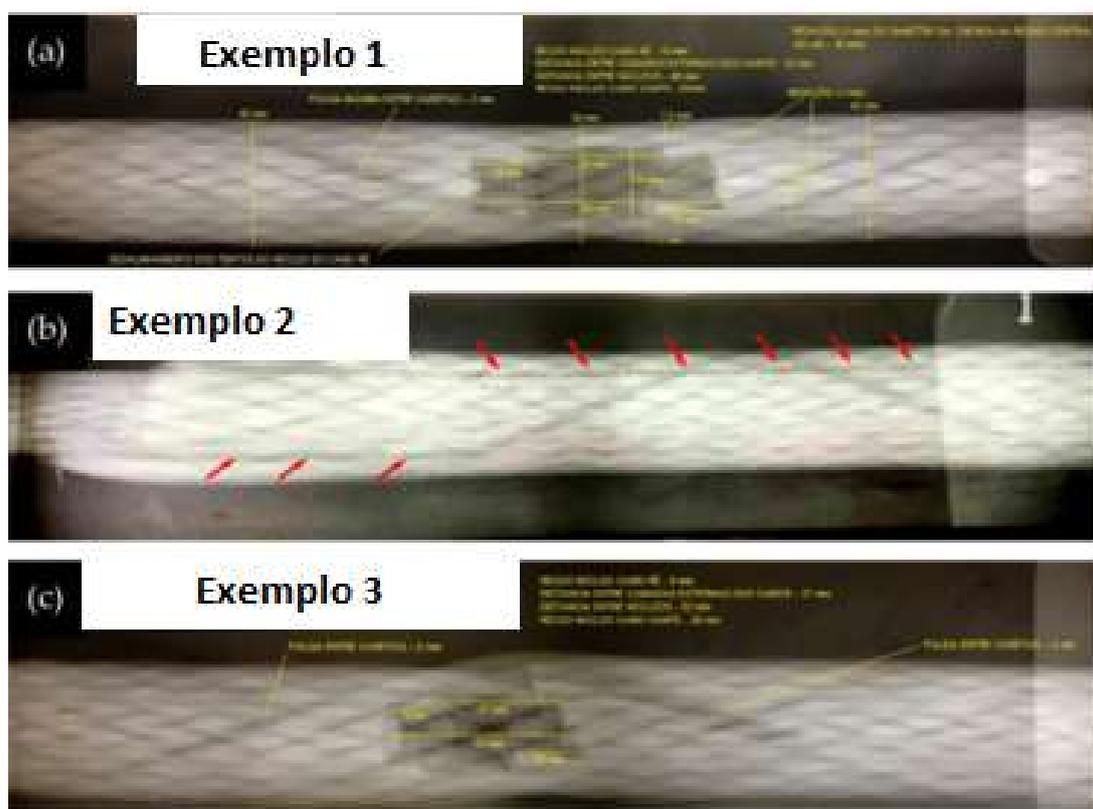


Figura 4.14 - Radiografias de conjuntos cabo-emenda de linhas instaladas. (a) Detecção de distância de 43 mm entre as extremidades das camadas externas dos condutores (possivelmente causada por montagem inadequada ou por deslizamento do condutor) e deslizamento de suas camadas internas (80 mm). (b) Ausência de contato entre a emenda e o condutor. (c) Evidência de erros de instalação e distância de 52 mm entre as extremidades dos condutores.

Dentre as hipóteses para explicar essa ocorrência figuram um possível erro de instalação das varetas ou também a ocorrência de contato lateral entre as varetas não as

permitindo se agarrarem ao cabo. De todo modo, conforme explicado anteriormente, a capacidade da emenda de se fixar ao cabo está vinculada ao comprimento da região de contato entre o cabo e a emenda. A radiografia da figura 4.15 mostra ainda outro exemplo de montagem incorreta da emenda, com claro encavalamento de emendas e escorregamento do cabo em progresso (caracterizado por um distanciamento de 51 mm entre os núcleos do cabo). Enfatiza-se aqui que estes fatores associados a montagem equivocada da emenda como (i) o distanciamento entre as extremidades do cabo maior que 20 mm, (ii) a existência de extensos trechos sem contato entre as superfícies do cabo e da emenda e (iii) a presença de varetas encavaladas uma sobre as outras, contribui inegavelmente para a redução da resistência da emenda ao escorregamento.

A figura 4.15 abaixo, contém imagens radiográficas da montagem cabo-emenda no trecho construído “W4” supracitado. Nestes trechos pôde-se levantar a informação de que estas emendas passaram pelo tensionador FRB 600 TESMEC. As imagens da figura 4.15 revelam claramente que os cabos dentro destas emendas, não apenas encontram-se em processo de escorregamento, mas que as emendas possuem também sinais de encavalamento de varetas/erro de montagem.

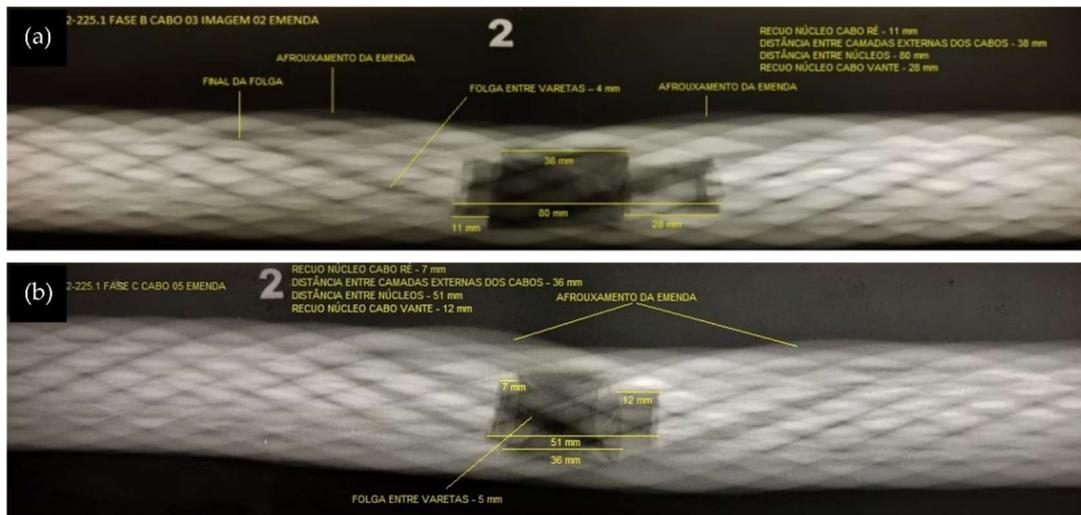


Figura 4.15 - Radiografia digital do conjunto cabo-emenda

4.6 Ensaio preliminares de vibração cabo-emenda

O fabricante da emenda levantou a possibilidade de que a vibração eólica poderia o principal motivo da causa do escorregamento da emenda. Para explorar esta possibilidade se decidiu conduzir alguns ensaios preliminares de vibração do conjunto cabo emenda como mencionamos na metodologia deste trabalho. Os ensaios propostos foram:

1. Ensaio de vibração do conjunto emendado até a falha por fadiga do condutor com deslocamento $Y_b = 0.6$ mm (pk-pk);
2. Ensaio de vibração do conjunto emendado até a falha por fadiga do condutor com deslocamento de $Y_b = 0.8$ mm (pk-pk);

onde é importante recordar que Y_b é a amplitude de deslocamento pico a pico controlada por um acelerômetro instalado a 89 mm do último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão. Como observação geral, a carga de esticamento foi de 21% da resistência mecânica calculada (RMC) do condutor. O intuito dessa avaliação foi de verificarmos algum eventual efeito do movimento do cabo em regime de vibração eólica sobre a integridade da emenda. Além disso também, o foco deste trabalho foi o de avaliar por meio de experimentos se um regime de vibração severo poderia provocar o escorregamento destas emendas preformadas.

Lembra-se aqui que, segundo o EPRI [1] os limites de fadiga em termos de amplitude de tensão de flexão são de 5,7 MPa e 8,5 MPa para cabos multicamadas de alumínio liga e de alumínio puro (com ou sem alma de aço), respectivamente. Estes limites de fadiga também podem ser estabelecidos em termos de deformação de flexão, nestes casos os valores correspondentes segundo a EPRI são de 165 μ deformações para cabos de alumínio liga ou de 246 μ deformações para cabos de alumínio puro. A IEEE [2] por sua vez estabeleceu como limite de fadiga uma deformação de flexão de 150 μ deformações.

O ensaio de vibração foi controlado por deslocamento no ponto do condutor que fica a 89 mm do último ponto de contato entre cabo e grampo de suspensão. A vibração foi mantida constante e em nível considerado severo (bem acima do limite de fadiga para este cabo) durante todo o ensaio. Realizou-se então os dois diferentes ensaios propostos, com amplitude de deslocamento mantido em $Y_b = 0.6$ mm e $Y_b = 0.8$ mm (pk-pk). O critério de parada dos testes é a quarta quebra dos fios de alumínio dentro do grampo de suspensão, conforme prevê a CIGRÉ SC22-WG04 [4], ou a detecção de escorregamento

da emenda. Na transição cabo emenda foi colocada uma tinta de marcação para avaliar este possível escorregamento (Fig. 4.18).



Figura 4.16 – Extremidade da emenda pintada para auxiliar a inspeção visual

Através dos extensômetros colados em três fios de alumínio no último ponto de contato (UPC) entre o condutor e o grampo de suspensão foram avaliadas as deformações dinâmicas e tensões presentes durante os ensaios. Esses resultados estão apresentados na tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Deformações medidas e tensões presentes na extremidade das emendas e no UPC.

Deslocamento no ponto 89 Y_b (pk-pk)[mm]	Deformação medidas (0-pk)		Tensão (0-pk) [MPa]	
	No UPC	No UPC	No UPC	Tensão calculada, P-S (0-pk) [MPa]
0.60	253		17.44	19.31
0.80	387		26.70	25.76

A tabela 4.5 apresenta o instante em que ocorreram as falhas por fadiga dos fios para estas duas amplitudes de deslocamento testadas. Na transição cabo emenda foi colocada tinta de marcação para avaliação de possível escorregamento. Foram realizadas verificações no início e no final do ensaio por meio de identificação visual onde observa-se a ausência de escorregamento já que as marcações permaneceram intactas durante todo o ensaio. As Figuras 4.19 e 4.20 mostram as imagens da marcação com tintas após o término dos ensaios para os testes com $Y_b=0.6$ mm e 0.8 mm, respectivamente.

Tabela 4.5 – Ocorrência das quebras dos fios nos ensaios realizados com deslocamento

$Y_b=0.6$ mm e $Y_b=0,8$ mm.

$Y_b = 0.6$ mm

Quebras dos fios	Número de ciclos
1ª quebra	17.480.789
2ª quebra	23.064.533
3ª quebra	24.005.109
4ª quebra	27.476.099

$Y_b = 0.8$ mm

Quebras dos fios	Número de ciclos
1ª quebra	2.667.110
2ª quebra	3.612.758
3ª quebra	4.243.190
4ª quebra	6.679.400

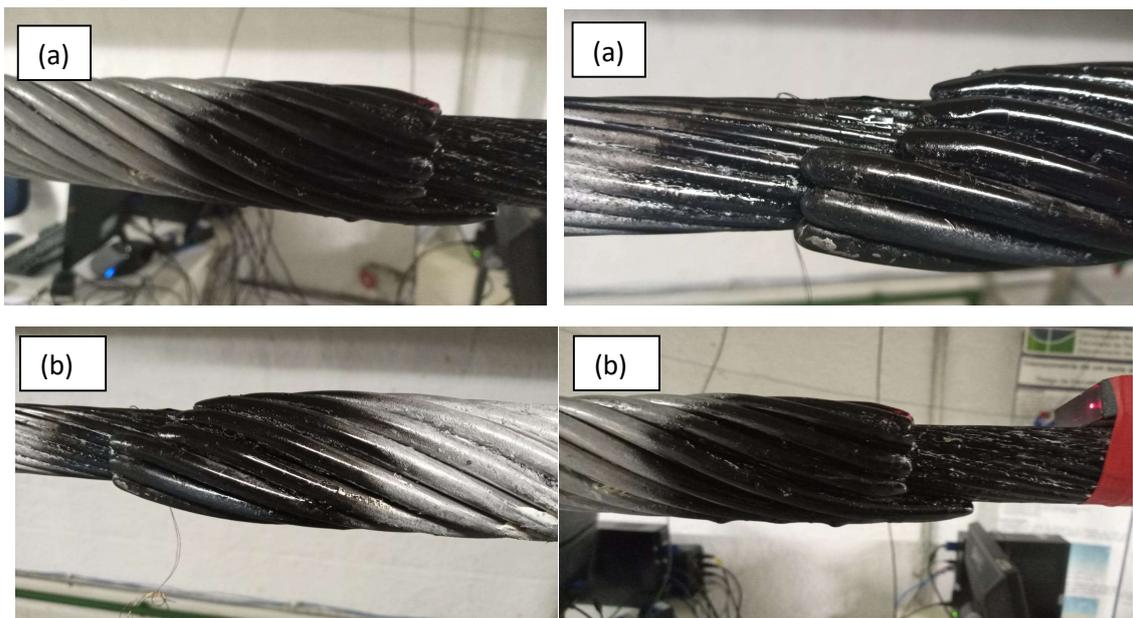


Figura 4.17 - Monitoramento das extremidades da emenda usando a tinta marcadora para o teste com $Y_b=0.6$ mm: fotos de ambas as extremidades da emenda no (a) no início do ensaio e (b) após a conclusão do ensaio

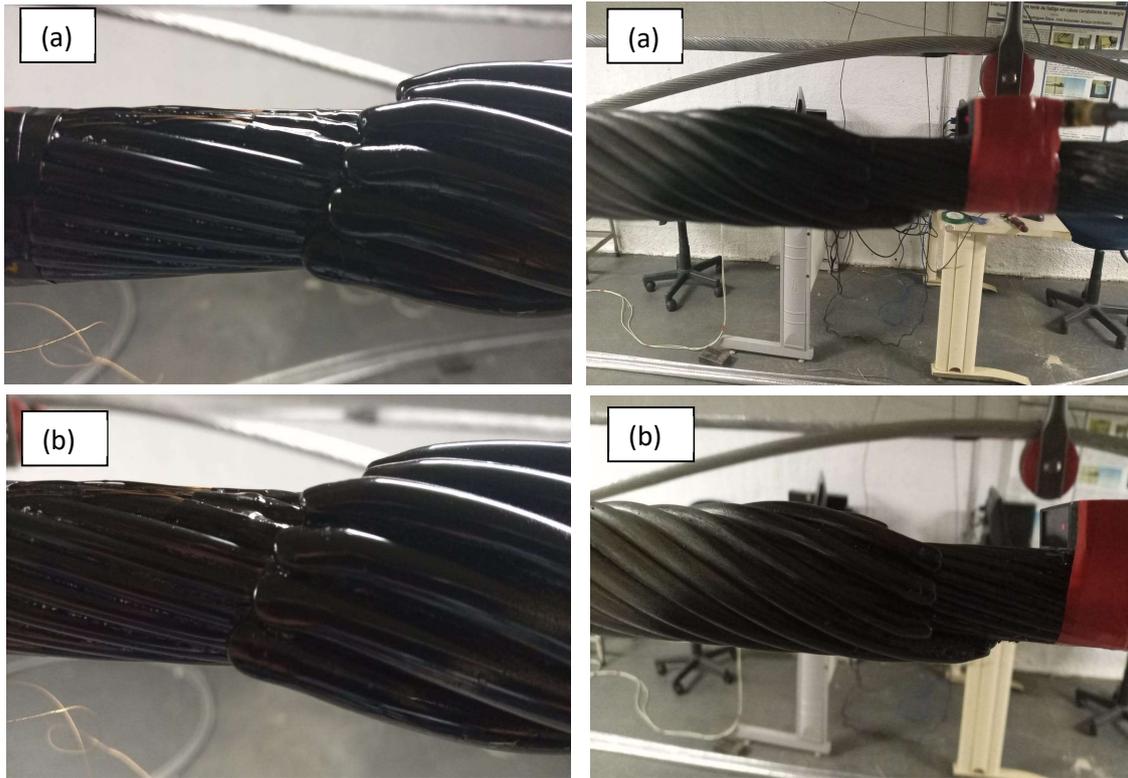


Figura 4.18 - Monitoramento das extremidades da emenda usando a tinta marcadora para o teste com $Y_b=0.8$ mm: fotos de ambas as extremidades da emenda no (a) no início do ensaio e (b) após a conclusão do ensaio

Capítulo 5

Discussões e Conclusões

5.1 Considerações finais

Conforme avaliado ao longo deste estudo, a emenda tipo “A” quando montada sobre o cabo condutor CAL 838 MCM apresenta folga nominal total entre varetas de apenas 2.34 mm, equivalente a 0.32 vezes o diâmetro de uma vareta desta emenda considerando as dimensões nominais do cabo e da emenda. Cenário ainda mais crítico pode ser observado para essa montagem ao se considerar as tolerâncias dimensionais do cabo e da emenda. Tal situação ocorre com o menor diâmetro do cabo, $D_{\text{cond}} = 26.51$ mm, o maior diâmetro da vareta, $d_{\text{vareta}} = 7.44$ mm, e o menor passo, $\text{passo} = 224$ mm, dentro das tolerâncias destes componentes. Neste cenário, a folga entre as varetas passa a ser negativa (-0.14 vezes o diâmetro da vareta), ou seja, não há folga, mas sim interferência entre as varetas. Nesta condição, a correta instalação e o funcionamento apropriado dessa emenda tornam-se impossíveis pois haverá encavalamento das varetas e queda acentuada da pressão de contato entre a emenda e o cabo. Variações internas no diâmetro do cabo causadas por fluência geométrica, efeito de Poisson, deformações produzidas por possível passagem do conjunto cabo-emenda por tensionadores, etc, tornarão o problema ainda mais grave. Além do mais, pode-se mostrar que, nesta condição mais desfavorável de combinações geométricas, o menor diâmetro interno da emenda é 1.5% maior que o diâmetro do cabo condutor, ou seja, neste caso a emenda funciona como um tubo cujas varetas não aderem ao cabo e, portanto, permitem o escorregamento do conjunto cabo-emenda. Tais aspectos geométricos deixam absolutamente claro que a emenda A não está adequadamente especificada para a união de cabos CAL 838 MCM.

Quanto à prática de passar o conjunto cabo-emenda pelos freios tensionadores, ressalta-se que emendas pré-formadas não são projetadas para experimentar esforços de flexão tão severos como os gerados ao passá-las pelo freio tensionador. A passagem destes componentes pelo tensionador pode deformar as varetas das emendas permanentemente prejudicando sua eficiência. Mais ainda, este não é um procedimento previsto ou recomendado em qualquer livro, documento ou norma nacional ou

internacional. Além disso, tal procedimento parece ser uma prática local, não sendo adotada ou permitida em países ditos desenvolvidos.

Imagens radiográficas de conjuntos cabo-emenda revelaram a existência de folgas muito pequenas, ou mesmo inexistentes entre as varetas da emenda, portanto, confirmando a inadequação do uso desta emenda para o cabo CAL 838 MCM.

É importante salientar que o problema observado com as emendas pré-formadas está relacionado ao processo de escorregamento e não ao dano por fadiga. Desta forma, a vibração eólica do condutor em níveis que causam danos por fadiga não está relacionada com o problema de deslizamento das emendas. Para avaliar esta hipótese foram realizados dois ensaios preliminares de vibração com este conjunto cabo-emenda em estudo. Um com $Y_b=0.6$ mm (deformação pico a pico de 506 μ deformações) e outro com $Y_b=0.8$ mm (deformação pico a pico de 774 μ deformações). Estes níveis de deslocamento por flexão pico a pico foram escolhidos por provocarem deformações de flexão substancialmente maiores que os limites de fadiga estabelecidos pela EPRI (seja de 165 μ deformações para cabos de alumínio liga ou de 246 μ deformações para cabos de alumínio puro) e pela IEEE (150 μ deformações). Inspeção detalhada demonstrou que não houve qualquer nível de escorregamento entre cabo e emenda, desta forma, os severos níveis de vibração impostos ao conjunto cabo-emenda não provocaram escorregamento do conjunto cabo emenda, mas sim a fadiga do condutor.

Mais ainda, não há na literatura técnica em nível mundial qualquer dado referente a existência de um limite de vibração para evitar-se o escorregamento de emendas preformadas. Tão pouco existe qualquer registro oficial ou documentado de escorregamento de uma emenda preformada provocada pela existência de vibração excessiva da linha.

Desta forma, a partir das análises, cálculos e medidas conduzidas nesse estudo pode-se concluir que:

- Há um erro na especificação da emenda A quando dimensionada para a união de cabos CAL 838 MCM;
- Os cálculos demonstram que a folga total entre varetas da A montada ao cabo CAL 1120 838 MCM corresponde, no cenário mais crítico, à -0.14 vezes o diâmetro da vareta, ou seja, não há folga alguma e, portanto, torna-se impossível a instalação e o funcionamento correto desta emenda;
- O menor diâmetro interno da emenda no cenário mais desfavorável é 1.5% maior que o diâmetro do cabo condutor, ou seja, neste caso a emenda funciona como um

tubo cujas varetas não aderem ao cabo e, portanto, permitem o escorregamento do conjunto cabo-emenda;

- O dimensionamento geométrico da emenda, mesmo em um cenário de dimensões nominais, que desprezam as tolerâncias geométricas, ocasionará invariavelmente erros de montagem pelos trabalhadores devido a existência de uma folga muito pequena entre as varetas. Mais ainda, variações internas no diâmetro do cabo causadas por fluência geométrica, efeito de Poisson, deformações produzidas por possível passagem do conjunto cabo-emenda por tensionadores, etc., podem levar ao escorregamento do cabo mesmo nestas condições geométricas nominais;
- A passagem de emendas pré-formadas por tensionadores é uma prática de engenharia não recomendada devido a finalidade de operação deste elemento mecânico (projetado para trabalhar em tração). Este é um procedimento não previsto em normas ou na literatura técnica, além de não ser utilizada em países desenvolvidos;
- Os testes executados em condições severas de vibração eólica que levou a fadiga dos cabos não apresentaram qualquer nível de escorregamento das emendas.
- A partir dos estudos feitos, pode-se concluir que o escorregamento das emendas foi ocasionado por um conjunto de fatores, quais sejam, equívoco na especificação da emenda para este tipo de cabo, passagem do conjunto cabo-emenda pelos tensionadores e erros de montagem.

Capítulo 6

Trabalhos futuros

A ruptura de cabos condutores de linhas de transmissão de alta voltagem constitui uma falha estrutural grave, inclusive com a possibilidade de causar vítimas fatais entre os trabalhadores envolvidos no empreendimento ou entre moradores da região. Pode ainda provocar danos a patrimônios móveis e imóveis e a morte de animais. Em condição não energizada é o impacto provocado pela queda dos cabos, ferragens e eventualmente de outras estruturas como torres que podem provocar estes danos e fatalidades. Após a energização da linha, a gravidade associada a queda de um cabo de uma linha de 500 kV, ganha maiores proporções devido a presença da alta tensão. Do ponto de vista não apenas econômico, mas também social, a queda da linha energizada gera perdas significativas a Transmissora com aplicação da Parcela Variável, Multas, etc. A paralisação de atividades sociais (como a paralisação de hospitais, escolas, universidades, etc), seja em nível regional ou nacional, provocadas pela possível queda de um cabo poderia gerar danos irreparáveis a imagem da proprietária do empreendimento.

Tendo em vista a criticidade dos problemas que poderiam eventualmente ser provocados pela queda do cabo um melhor entendimento do funcionamento mecânico e do projeto cabo emenda é de suma importância. Neste sentido propõe-se abaixo alguns temas/ações para a continuidade desta pesquisa:

- Construção de aparato experimental para ensaio em tração do conjunto cabo emenda em temperatura de trabalho da linha de transmissão;
- Realização de novos ensaios na tentativa de quantificar o efeito da passagem das emendas pelo freio-tensionador. Assim poderíamos obter um conjunto de amostras de cabos emendados que passam pelo freio-tensionador e outro não. Ambos os conjuntos seriam submetidos a ensaios de tração para se avaliar o impacto da passagem do conjunto cabo emenda pelo freio sobre a resistência ao escorregamento do conjunto;
- Realização de simulações numéricas capazes de modelar o conjunto cabo emenda;

A partir dos estudos feitos, pode-se concluir que o escorregamento das emendas foi ocasionado por um conjunto de fatores, quais sejam, equívoco no projeto da emenda para este tipo de cabo, passagem do conjunto cabo-emenda pelos tensionadores e erros de montagem.

Referências bibliográficas

- [1] ABNT NBR 7272 – Condutor elétrico de alumínio – Ruptura e característica dimensional.
- [2] EPRI Transmission Line Reference Book: Wind-Induced Conductor Motion, Palo Alto: EPRI, 2006.
- [3] Associação Brasileira de Normas e Técnicas, «NBR 16637: Fios de alumínio-liga, de seção circular, para fins elétricos – Requisitos de desempenho,» ABNT, Rio de Janeiro, 2017
- [4] IEC, «IEC TR 61328:2017 Live working - Guidelines for the installation of transmission and distribution line conductors and earth wires - Stringing equipment and accessory items,» 2017.
- [5] IEEE, «Standard 524-2016 - IEEE Guide for the installation of overhead transmission line conductors,» Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, New York, 2016.
- [6] IEEE Std 1368™ Guide for Aeolian Vibration Field Measurements of Overhead Conductors, 2006.
- [7] CIGRÉ SC22-WG04, "Guide for Endurance Tests of Conductors inside Clamps", Electra, No 100, May 1985.
- [8] ALVA, G. M. S. **Projeto estrutural de sapatas**. 2007. Departamento de Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- [9] ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Anexo 2.2: Características e requisitos técnicos das Instalações de Transmissão**, 2019.
- [10] ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Base de Preços de Referência ANEEL - Ref.06/2020**. Orçamento de Linha de Transmissão: relatório técnico, Brasília, 2020.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5422: Projeto de linhas aéreas transmissão de energia elétrica**. Rio de Janeiro, 1985.

- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8449: Dimensionamento de cabos para-raios para linhas aéreas de transmissão de energia elétrica**. Rio de Janeiro, 1984.
- [13] BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária, Ministério da Saúde. **Resolução de Diretoria Colegiada - RDC Nº 430, de 8 de outubro de 2020**. Dispõe sobre as Boas Práticas de Distribuição, Armazenagem e de Transporte de Medicamentos. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-de-diretoria-colegiada-rdc-n-430-de-8-de-outubro-de-2020-282070593>. Acesso em: 05 de mai. de 2021.
- [14] BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária, Ministério da Saúde. **Resolução-RDC Nº 304, de 17 de setembro de 2019**. Dispõe sobre as Boas Práticas de Distribuição, Armazenagem e de Transporte de Medicamentos. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-rdc-n-304-de-17-de-setembro-de-2019-216803526>. Acesso em: 05 de mai. de 2021.
- [15] BUCK, J. A.; HAYT JR., W. H. **Eletromagnetismo**. 8. ed. Nova York: McGraw Hill, 2012. p. 207.
- [16] CAMARGO, C. **Transmissão de energia elétrica: aspectos fundamentais**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2006.
- [17] CASTILHO, N. **Torres de estrutura de uma Linha de Transmissão**, 2019. Disponível em: < <https://portalmaisenergia.com.br/torres-de-estrutura-de-uma-linha-de-transmissao/> > Acesso em: 21 de março. de 2021.
- [18] CHAVES, Thaís Abraham. Avaliação do impacto nas perdas elétricas do sistema interligado nacional dada a presença de usinas hidrelétricas de pequeno porte nos sistemas de distribuição. 2019. 86 f. **Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia)** – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/2062> Acesso em: 14 de abr. de 2022.
- [19] CORDEIRO. **Cabos de Alumínio NU CA**, 2020. Disponível em: <<https://www.cordeiro.com.br/cabos-eletricos/cord-nu-cabos-de-aluminio-nu-ca/>> Acesso em: 16 de jan. de 2021.

- [20] ELIAS, K. M.; FAKURY, R. H.; GRILO, L.F. Torre de transmissão de energia elétrica: um novo olhar e possibilidades para o cenário de transmissão brasileiro. **CONGRESSO LATINO-AMERICANO DA CONSTRUÇÃO METÁLICA**, 7., 2016, São Paulo. Anais do Sétimo Congresso Latino-Americano da Construção Metálica [...]. São Paulo: [s. n.], 2016.
- [21] EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano decenal de expansão de energia de 2021**, 2012.
- [22] FUCHS, R. D. **Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas**. 3. ed. Uberlândia: EDUFU, 2015. v. 2.
- [23] GARCIA, M.A. **Concepção, fabricação e avaliação de um dispositivo de fadiga por fretting em fios de alumínio de cabos condutores**. – Brasília: ENM/UnB, 2019.
- [24] GENE, S. N. **Suppression of corona on EHV transmission line with bundled: conductors and spacers**, 2004.
- [25] GONÇALVES, D.N.; RODRIGUES, M.A.P.; MONTEZUMA, L.R. "Gestão de Interligações do SIN por Indicadores de Desempenho, X STPC - Seminário Técnico de Proteção e Controle, 2010.
- [26] INTELLI. **Condutor de Alumínio com Alma de Aço Revestido de Alumínio**, 2019. Disponível em: < <https://www.intelli.com.br/produtos/fios--cabos--de-aluminio/aluminio-nu-com-alma/condutor-de-aluminio-com-alma-de-aco-revestido-de-aluminio/139/>> Acesso em: 16 de jan. de 2021.
- [27] JUNG, J. G. **Fundações superficiais de linhas de transmissão submetidas a esforços de tração: comparação entre métodos de previsão de capacidade de carga**. 2009. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Florianópolis, p. 01-60, 2009.
- [28] JUNG, J. G. **Fundações superficiais de linhas de transmissão submetidas a esforços de tração: comparação entre métodos de previsão de capacidade de carga**. 2009. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Florianópolis, 2009.

- [29] KINDERMANN, J. M.; CAMPAGNOLO, G. **Aterramento elétrico**. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1995.
- [30] LABEGALINI, P. R. *et al.* **Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 1992.
- [31] LACERDA, L. A. de; OLIVEIRA, P. A.; FILIPPIN, C. G. Modelo reduzido de uma torre LT - ensaios mecânicos e modelagens computacionais. **Anais - IV Congr. Inovação Tecnológica Em Energ. Elétrica Citinel Citinel**, 2007.
- [32] MILITITSKY, J. **Fundações de torres: aerogeradores, linhas de transmissão e telecomunicações**. -- São Paulo: Oficina de Texto, 2019.
- [33] MME. Fontes de energia renováveis representam 83% da matriz elétrica brasileira. **Governo do Brasil**, 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/01/fontes-de-energia-renovaveis-representam-83-da-matriz-eletrica-brasileira>>. Acesso em: 20 de out. de 2020.
- [34] MUGHRABI, H. Specific features and mechanisms of fatigue in the ultrahigh-cycle regime. **International Journal of Fatigue**, v. 28, no. 11, pp. 1501–1508, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2005.05.018> Acesso em: 14 de abr. de 2022.
- [35] NAMETALA, C. A. L.; MARTINS, P. E. T. Modelagem multicritério aplicada às linhas de transmissão compactas suportando múltiplos circuitos. CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 12., 2017, Curitiba. **Anais da XII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica** [...]. Curitiba: [s. n.], 2017.
- [36] NAMETALA, C. A. L.; MARTINS, P. E. T. Modelagem multicritério aplicada às linhas de transmissão compactas suportando múltiplos circuitos. *In*: Conferência Brasileira Sobre Qualidade Da Energia Elétrica, 12., 2017, Curitiba. **Anais da XII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica** [...]. Curitiba: [s. n.], 2017.
- [37] NERI, Thiago Fernandes. Proteção de Perda de Sincronismo – Aplicação e Avaliação no Sistema Interligado Nacional Brasileiro/Thiago Fernandes Neri – Rio de

Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015. XVIII, 171p.: il.; 29,7 cm. **Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica**, 2015. Disponível em: pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2015063003.pdf Acesso em: 14 de abr. de 2022.

[38] OLIVEIRA, Amélia; SOUZA, A. et al. **Guia de Orientação do Exercício Profissional em Transportadora de Produtos de Interesse à Saúde e Boas Práticas em Transporte**. Expediente, Conselho Regional de Farmácia do Estado do Paraná, janeiro de 2019. Disponível em: <https://www.crf-pr.org.br/uploads/revista/36166/4U1VAA0NoOuvrDR-y7aoH57Zp97VvXTw.pdf>. Acesso em: 05 de mai. de 2021.

[39] ONS – OPERADOR NACIONAL DE SISTEMA ELÉTRICO. **Submódulo 2.4: requisitos mínimos para linhas de transmissão aéreas**. Rio de Janeiro, 2011.

[40] PAPAILIOU, K. O. (ed.). **Overhead lines**. [S. l.]: Springer International Publishing, 2017.

[41] PAVLIK, B. L. **Tecnologia da ferragem para linhas de AT e EAT**. São Paulo: Editora Gente, 1989.

[42] PEEK, F. W. **Dielectric phenomena in high voltage engineering**. Nova York: McGrawHill, New York, 1915.

[43] PEREIRA, A. J. L.; BATALHA, R. M. S.; P. DA COSTA JUNIOR, P.; ANDRADE, J. S. Comportamento elétrico de feixes de condutores em linhas aéreas de energia. **CONFERÊNCIA DE ESTUDOS EM ENGENHARIA ELÉTRICA**, 16, 2018, Uberlândia, p. 1.

[44] RAMOS, D.S.; MOROZOWSKI, M.; SCHILLING, M. Th. Metodologia para Avaliação Integrada da Ampliação da Capacidade Instalada em Centrais Hidrelétricas: Enfoques Sistêmico e Empresarial. **R.S.**, v. 1, n. 1, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/MarcusSchilling/publication/316342419_Metodologia_para_Avaliacao_Integrada_da_Ampliacao_da_Capacidade_Instalada_em_Centraes_Hidreletricas_Enfoques_Sistemico_e_Empresarial/links/58fa82a34585152edeced641/Metodologia-para-Avaliacao-Integrada-da-Ampliacao-da-Capacidade-Instalada-em-Centraes-Hidreletricas-Enfoques-Sistemico-e-Empresarial.pdf Acesso em: 12 de abr. de 2022.

- [45] SANTIAGO, N. H. **Linhas aéreas de transmissão**. 1983, Departamento de Eletrotécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro.
- [46] SANTOS, Alexandre; FERNANDES, João; FELCHAK, Leonardo. Comparative study of transmission towers with different heights aiming at the structural evaluation of isolated and conventional cormules by means of computational modeling. **Brazilian Journal of Developmente**, v. 6, n. 8, 2020. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/15884> Acesso em: 01 de abr. de 2022.
- [47] SILVA, Pietro; SHINOHARA, Armando. Inspeção da degradação nos isoladores de compósito de linhas de transmissão através de ensaios não destrutivos. 2009. **Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares**, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/9846> Acesso em: 12 de abr. de 2022.
- [48] STEPHAN, J. C. S. Reforços em fundações de suportes de linhas de transmissão: a experiência da Eletrosul. **SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**, 18, 2005.
- [49] STEVENSON, W. **Elementos de análise de sistemas de potência**. 2ed., Nova York: McGraw Hill, 1986.
- [50] TARBOSA, Felipe; SILVA, Alex. Utilização de feixe expandido de condutores alicados a linhas de transmissão na classe de 500kV. **Revista Eng. Elé., TEC-USU, R.J.**, v. 4, n. 1, 2021.
- [51] TAVARES, N. T. S. **Condutores aéreos de elevada capacidade –Avaliação de up-rating –Dimensionamento elétrico e mecânico**. 2013. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores Major Energia) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2013.
- [52] TEXPI. **Catálogo de isoladores de vidro de suspensão**. Campo Largo: [s. n.], 2020. 11 p.

[53] UMARJI, H. **Cálculo de parâmetros de linhas aéreas para redes de distribuição**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia eletrotécnica e de computadores) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010

[54] VIEIRA, Erick; FERREIRA, Jorge; ARAUJO, José. Análise comparativa da resistência à fadiga por fretting entre os cabos condutores feitos de liga de alumínio 900 MCM e 823 MCM. **Matéria**, Rio J., v. 26, n. 1, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/rKZ83ydvFQZZrz6nsnCP9Tw/?format=html&lang=pt>
Acesso em: 11 de abr. de 2022.

[55] ZAMBELLI, J.; YAEGASHI, M.; CARVALHO, D. Prova de Carga à Tração em Tubulões Curtos: Caso 01 Tubulão Revestido com Manilha e Caso 02 Tubulão sem Revestimento. **9º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia 3ª Feira da Indústria de Fundações e Geotecnia SEFE 9** –, São Paulo, Brasil ABEF, 4 a 6 de junho de 2019. Disponível em: pvista.proevento.com.br/qe/subpaper/upload/594950_207_SEFE2019_Prova_de_Carga_a_Tracao_Tubuloes_Entrega_MH_JVZ.pdf.

[56] MACLEAN. **Emendas preformadas para cabos condutores**, 2019. Disponível em: <https://www.macleandobrasil.com/produtos/distribuicao/transmissao/?gclid=CjwAsIGrBhAAEiwAEzMIC9zi6nOHRChllyp0MB4BdGdfW0bMvMctZf5YJExa5i8YQGW6N2kTDBoCawQQA_vD_BwE> Acesso em: 20 de jan. de 2021.

[57] SALVI. **Emendas preformadas para cabos condutores**, 2019. Disponível em: <<https://salvibr.com.br/>> Acesso em: 20 de mar. de 2021.

[58] EDUARD, D., International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys – The Aluminum Association (Eduard, 2015), Aluminum Association, 2015.