

TESE DE DOUTORADO

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA MONTAGEM
CABO/GRAMPO DE SUSPENSÃO SOBRE A
VIDA EM FADIGA DE CABOS CONDUTORES
DE ALUMÍNIO 6201 E 1120**

THIAGO BARBOSA DE MIRANDA

Brasília, 13 de dezembro de 2021

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS**

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA MONTAGEM CABO/GRAMPO DE SUSPENSÃO
SOBRE A VIDA EM FADIGA DE CABOS CONDUTORES DE ALUMÍNIO 6201 E 1120**

THIAGO BARBOSA DE MIRANDA

ORIENTADOR: Prof. JORGE LUIZ DE ALMEIDA FERREIRA

COORIENTADOR: Prof. JOSÉ ALEXANDER ARAÚJO

Tese de doutorado

BRASÍLIA/ DF: DEZEMBRO DE 2021

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS**

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA MONTAGEM CABO/GRAMPO DE
SUSPENSÃO SOBRE A VIDA EM FADIGA DE CABOS
CONDUTORES DE ALUMÍNIO 6201 E 1120**

THIAGO BARBOSA DE MIRANDA

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIAS MECÂNICAS FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE
BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO
DO GRAU DE DOUTOR.**

APROVADA POR:

**Profº Jorge Luiz de Almeida Ferreira, Dr. (UnB)
(Orientador)**

**Profº Fábio Comes de Castro, Dr. (UnB)
(Examinador Interno)**

**Profº Marcelo Augusto Santos Torres, Dr. (Unesp)
(Examinador Externo)**

**Profº Raimundo Carlos Silvério Freire Júnior, Dr. (UFRN)
(Examinador Externo)**

Brasília, 13 de dezembro de 2021

FICHA CATALOGRÁFICA

Miranda, Thiago Barbosa de
Avaliação do efeito da montagem cabo/grampo de suspensão sobre a vida em fadiga de cabos condutores de alumínio 6201 e 1120, [Distrito Federal] 2021.
117.p. 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Doutorado, Ciências Mecânicas, 2021).
Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Mecânica
Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas.

| | |
|-------------------------|---------------------|
| 1. Linha de Transmissão | 2. Cabos Condutores |
| 3. Grampos de suspensão | 4. Fadiga |
| I. ENM/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MIRANDA, T.B. (2021). Avaliação do efeito da montagem cabo/grampo de suspensão sobre a vida em fadiga de cabos condutores de alumínio 6201 e 1120. Tese de Doutorado em Ciências Mecânicas, Publicação ____/2021, ENM/ FT/ Universidade de Brasília, Brasília-DF, 117.p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Thiago Barbosa de Miranda

TÍTULO: Avaliação do efeito da montagem cabo/grampo de suspensão sobre a vida em fadiga de cabos condutores de alumínio 6201 e 1120

GRAU: Doutor ANO: 2021

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

Thiago Barbosa de Miranda
thiago.enm@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado à oportunidade de ingressar nesse doutorado, ter me dado saúde e força para superar todos os desafios dessa caminhada e principalmente por ter colocado em minha vida as pessoas que serão citadas abaixo.

Agradeço à minha amada esposa Andressa por cada palavra de apoio, por ter sempre acreditado e incentivado meu trabalho, pelo conforto nos períodos difíceis e pelos momentos felizes que compartilhamos nesse tempo.

Agradeço aos meus pais, Alberto e Luciene, sem eles seria impossível concluir esta jornada. Agradeço por todo cuidado e amor que me dedicaram.

Agradeço ao meu irmão, Thalbert, por seu companheirismo e camaradagem e por ter a oportunidade de desfrutar de sua companhia em vários bons momentos da minha vida.

Agradeço à toda equipe do Laboratório de Cabos, Remy, Ricardo e Erick que tanto colaboraram com seus conhecimentos e discussões e que ao longo desse tempo de convívio diário passaram a ser grandes amigos.

Aos Professores Jorge Ferreira e Alex Araújo, por todo apoio, confiança e orientação fornecida durante a elaboração desse trabalho.

À Capes e ao grupo Transmissoras Brasileiras de Energia - TBE pelo apoio financeiro por meio do projeto de P&D ANEEL 2651-0014/2017 que possibilitou a realização deste trabalho.

Cabos condutores de energia em linhas de transmissão estão submetidos a carregamentos cíclicos devido a ação do vento - o que pode levar a falhas por fadiga dos fios do cabo condutor. A fadiga ocasionada pela vibração eólica tem como característica principal o *fretting* que ocorre nos pontos de contato entre os fios do condutor. Em geral, o local mais crítico para ocorrência de falhas é próximo ao grampo de suspensão, pois é nessa região que o cabo é exposto às maiores tensões de flexão e também cargas compressivas devido ao aperto do grampo. Dessa forma o grampo de suspensão está diretamente ligado ao fenômeno de fadiga em cabos condutores. Por conta da relevância do grampo de suspensão na fadiga do condutor, esse trabalho se propõe a avaliar experimentalmente o efeito de grampos de suspensão tipo metálico, metálico com armadura, elastomérico e HAES (*helically attached elastomeric suspension*) na vida em fadiga de cabos condutores fabricados a partir do alumínio 1120 e da liga de alumínio 6201. O estudo divide-se em três partes que avaliam: o impacto do tipo de grampo na tensão de flexão nos fios do condutor na região de acoplamento, as consequências da utilização de material elastomérico no grampo de suspensão sobre a vida em fadiga de condutores e o efeito do tipo de grampo sobre o comportamento das zonas de contato entre os fios do condutor. As três etapas basearam-se em ensaios de vibração dos condutores realizados nas bancadas do Laboratório de Cabos e Integridade Estrutural da Universidade de Brasília, as quais foram adaptadas para ensaios com diferentes tipos de grampos de suspensão. Com relação ao estudo da tensão de flexão, foi constatado que o elastômero, quando comparado com o grampo metálico, reduz a deformação dos fios na região de acoplamento enquanto a armadura pré-formada teve pouco impacto nessa análise. Nessa etapa também foi averiguado que a formulação de Poffenberger-Swart se adequa apenas aos grampos metálicos e também foram propostas adequações para o emprego dessa formulação em grampos elastoméricos. Na segunda etapa constatou-se uma significativa melhora da performance em fadiga dos condutores montados em grampos elastoméricos quando comparados com o desempenho dos mesmos condutores montados em grampos metálicos. Por fim, foi constatado que cada tipo de grampo impacta de forma diferente na pressão de contato e no nível de deslocamento entre os fios do condutor na região de acoplamento do condutor com o grampo de suspensão.

ABSTRACT

Overhead conductors are subject to cyclic loading due to wind action. This can lead to fatigue failure of the conductor wires. In general, the most critical place for failure to occur is close to the suspension clamp, as it is in this region that the cable is exposed to the greatest bending stresses and also compressive loads due to the clamp's tightening. In general, the most critical location for failures is close to the suspension clamp, as it is in this region that the cable is exposed to the greatest bending stresses and also compressive loads due to the clamp's tightening. Thus, the suspension clamp is directly linked to the phenomenon of fatigue in conductors. Due to the relevance of suspension clamps in conductor fatigue, this work proposes to experimentally evaluate the effect of metallic, armored metallic, elastomeric and HAES (helically attached elastomeric suspension) suspension clamps on the fatigue life of 1120 aluminum and 6201 aluminum alloy conductors. The study is divided into three parts that assess: the impact of the type of clamp on the bending stress in the conductor wires in the coupling region, the consequences of using elastomeric material in the suspension clamp on the fatigue life of conductors and the effect of clamp type on the behavior of the contact zones between conductor wires. The three stages were based on vibration tests of the conductors carried out on the benches of the Fatigue and Structural Integrity of Overhead Conductors Laboratory at the University of Brasília, which were adapted for tests with different types of suspension clamps. Regarding the study of bending stress, it was found that the elastomer, when compared to the metallic clamp, reduces the deformation of the wires in the coupling region, while the preformed reinforcement had little impact on this analysis. At this stage, it was also verified that the Poffenberger-Swart formulation is suitable only for metallic clamps, and adjustments were also proposed for the use of this formulation in elastomeric clamps. In the second stage, there was a significant improvement in the fatigue performance of conductors mounted on elastomeric clamps when compared with the performance of the same conductors mounted on metal clamps. Finally, it was found that each type of clamp has a different impact on the contact pressure and on the displacement level between the conductor wires in the region where the conductor is coupled with the suspension clamp.

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 | Contexto e Motivação | 1 |
| 1.2 | Objetivos | 4 |
| 1.3 | Metodologia..... | 5 |
| 1.4 | Estado da Arte sobre a influência do grampo de suspensão na vida em fadiga de cabos condutores | 6 |
| 1.4.1 | Contribuições para área de transmissão de energia e para o estado da arte..... | 8 |
| 1.5 | Estrutura do trabalho | 9 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 10 |
| 2.1 | Vibração em condutores de energia | 10 |
| 2.1.1 | Vibrações Eólicas | 10 |
| 2.2 | Fadiga em cabos condutores..... | 16 |
| 2.2.1 | Cabos condutores de energia..... | 16 |
| 2.2.2 | Grampos de Suspensão..... | 17 |
| 2.2.3 | Mecanismo de falha em condutores | 20 |
| 2.2.4 | Pares de contato..... | 21 |
| 2.2.5 | Parâmetros de intensidade de vibração..... | 24 |
| 2.2.6 | Tensão de flexão idealizada..... | 26 |
| 2.3 | Limites de resistência de cabos condutores..... | 30 |
| 2.3.1 | Limite de deformação (IEEE, 1966)..... | 30 |
| 2.3.2 | Limite de resistência a fadiga | 30 |
| 2.3.3 | Curva de segurança e dano cumulativo | 31 |
| 2.4 | Parâmetros de projeto para carga de esticamento do condutor..... | 31 |
| 2.4.1 | Parâmetro EDS | 32 |
| 2.4.2 | Parâmetro H/w | 32 |
| 3 | <i>MATERIAIS E MÉTODOS PARA ENSAIOS DE VIBRAÇÃO EM CONDUTORES</i> | 34 |
| 3.1 | Cabos condutores | 34 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.2 | Grampos de Suspensão..... | 36 |
| 3.2.1 | Grampo de suspensão metálico | 36 |
| 3.2.2 | Grampo de suspensão metálico com armadura | 37 |
| 3.2.3 | Grampo de suspensão elastomérico..... | 38 |
| 3.2.4 | Grampo HAES | 38 |
| 3.3 | Bancada para ensaios de vibração em cabos condutores..... | 39 |
| 3.3.1 | Controle do ensaio e aquisição de dados | 40 |
| 3.4 | Adaptação das bancadas para utilização de grampos metálico com armadura, elastomérico e HAES | 42 |
| 3.4.1 | Fixação e alinhamento dos grampos na bancada..... | 42 |
| 3.4.2 | Suspensão do condutor para a montagem dos grampos | 43 |
| 4 | CORRELAÇÃO ENTRE AMPLITUDE DE DESLOCAMENTO E TENSÃO DE FLEXÃO EM CABOS CONDUTORES..... | 46 |
| 4.1 | Procedimento Experimental | 46 |
| 4.1.1 | Instrumentação da montagem cabo/grampo – Acelerômetros..... | 46 |
| 4.1.2 | Instrumentação da montagem cabo/grampo – Extensômetros | 47 |
| 4.1.3 | Ensaio dinâmico | 52 |
| 4.2 | Resultados e discussões..... | 53 |
| 4.2.1 | Mapeamento das tensões na região de montagem cabo/grampo | 53 |
| 4.2.2 | Tensão de flexão (σa) em função da amplitude de deslocamento (Yb)..... | 56 |
| 4.2.3 | Correção do fator de correlação de P-S (KYb e KYc) para grampos elastoméricos e com armadura 61 | |
| 4.2.4 | Tensão de flexão (σa) em função do parâmetro $fymax$ | 66 |
| 4.2.5 | Amplitude de deslocamento (Yb) em função da velocidade de vibração no antinó ($fymax$) 69 | |
| 4.3 | Conclusões parciais | 70 |
| 5 | AVALIAÇÃO DO EFEITO DO GRAMPO ELASTOMÉRICO SOBRE A VIDA EM FADIGA DE CABOS CONDUTORES | 72 |
| 5.1 | Metodologia experimental..... | 72 |
| 5.1.1 | Instrumentação e sensoriamento do ensaio | 73 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.1.2 | Detecção de falha do fio | 73 |
| 5.1.3 | Procedimento experimental | 75 |
| 5.2 | Resultados e discussões | 76 |
| 5.2.1 | Ensaio de fadiga | 77 |
| 5.2.2 | Análise de Falhas..... | 79 |
| 5.2.3 | Comparação entre as falhas do condutor montado no grampo metálico e elastomérico | 80 |
| 5.2.4 | Análise de falhas do grampo elastomérico | 84 |
| 5.2.5 | Análise microscópica da superfície de falha | 89 |
| 5.3 | Conclusões parciais | 90 |
| 6 | ANÁLISE DOS PONTOS DE CONTATO ENTRE FIOS..... | 91 |
| 6.1 | Metodologia..... | 91 |
| 6.2 | Resultados | 93 |
| 6.2.1 | Mapeamento das marcas de contato | 93 |
| 6.2.2 | Características das marcas de contato em função da distância em relação ao UPC | 99 |
| 6.2.3 | Comparação entre marcas de contato próximas ao UPC entre o cabo e o grampo | 105 |
| 6.3 | Conclusões Parciais..... | 106 |
| 7 | DISCUSSÕES E CONCLUSÕES FINAIS..... | 108 |
| 7.1 | Sugestões de Trabalhos Futuros | 112 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS | 113 |
| | APÊNDICE I..... | 117 |
| | Ensaio de fadiga em grampos elastomérico | 117 |
| | APÊNDICE II | 113 |
| | Marcas formadas pelo contato entre fios do condutor | 113 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 – Acoplamento do condutor com o grampo de suspensão e as forças que induzem a falha dos fios | 2 |
| Figura 1.2 – Comparação entre propriedades mecânicas e elétricas de cabos fabricados a partir de diferentes ligas..... | 3 |
| Figura 1.3 – Grampos de suspensão: (a) Metálico, (b) metálico com armadura, (c) elastomérico e (d) HAES..... | 4 |
| Figura 2.1 - Esteira de Vórtice de Von Karman em um cilindro circular. (VAN DYKE, 1982).. | 12 |
| Figura 2.2 – Distribuição de pressão e modulo da força em nove momentos do desprendimento de vórtices (ZASSO et al., 2008). | 12 |
| Figura 2.3 – Balanço de energia em um cabo condutor | 15 |
| Figura 2.4 – Coeficiente de máxima potência introduzida ao cabo (EPRI, 2006) | 15 |
| Figura 2.5 – Esquema de um cabo condutor esticado entre duas torres de transmissão | 16 |
| Figura 2.6 – Estrutura de um cabo condutor típico | 17 |
| Figura 2.7 - Grampo de suspensão metálico | 18 |
| Figura 2.8 - Grampo de suspensão com armadura pré-formada | 19 |
| Figura 2.9 - Grampo de suspensão elastomérico..... | 19 |
| Figura 2.10 – Grampo de suspensão armado | 19 |
| Figura 2.11 – Falha no fio do condutor..... | 20 |
| Figura 2.12 – Localização de cada tipo de contato que ocorre na montagem cabo/grampo de suspensão..... | 22 |
| Figura 2.13 – Marcas de contato típicas encontradas na montagem cabo/grampo de suspensão . | 22 |
| Figura 2.14 – Representação do contato entre dois fios de camada adjacentes | 23 |
| Figura 2.15 – Marcas de contato típicas encontradas em montagens com grampo metálico..... | 23 |
| Figura 2.16 –Diagramas esquemáticos da vida em fadiga sob variação do (a) deslocamento relativo e da (b) força de contato (VINGSBO; SÖDERBERG, 1988)..... | 24 |
| Figura 2.17 – Representação esquemática dos parâmetros utilizados na medição da intensidade de vibração de cabos condutores | 25 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.18 - Curvas de carregamento e deflexão de uma viga utilizadas na formulação de P-S. (a) Carregamento distribuído senoidal e carga de tração, (b) Momento na extremidade esquerda e carga de tração, (c) combinação dos carregamentos (a) e (b)..... | 27 |
| Figura 2.19 – Rigidez a flexão do condutor em função da curvatura do condutor (PAPAILIOU, 1997)..... | 28 |
| Figura 3.1 – Curvas tensão em função da deformação dos alumínios 6201-T81 e 1120-H19. (VIEIRA, 2020)..... | 35 |
| Figura 3.2 – Partes do grampo de suspensão metálico..... | 37 |
| Figura 3.3 – Partes do grampo de suspensão metálico com armadura..... | 37 |
| Figura 3.4 – Vista da parte interna do grampo elastomérico | 38 |
| Figura 3.5 – Partes do condutor HAES..... | 39 |
| Figura 3.6 - Representação esquemática da bancada de ensaio | 40 |
| Figura 3.7 – (a) Sistema de aquisição de sinais, ADS 1800. (b) Controlador de vibração, LDS LASERUSB. | 40 |
| Figura 3.8 – Esquema de controle do ensaio em malha fechada..... | 41 |
| Figura 3.9 – Exemplo de Função de Resposta em Frequência do condutor, onde cada pico corresponde a uma frequência natural..... | 41 |
| Figura 3.10 – (a) Castelo utilizado na montagem do grampo de suspensão metálico ao cabo condutor; (b) Placa do castelo | 42 |
| Figura 3.11 - Vistas do modelo da placa do castelo para fixação do grampo HAES na bancada. a) frontal, b) lateral, c) superior d) isométrica | 43 |
| Figura 3.12 – Cabo suspenso para a montagem do grampo ES. | 43 |
| Figura 3.13 – Montagem do grampo HAES na bancada | 45 |
| Figura 3.14 - Esquema para reduzir a carga vertical durante a montagem do grampo HAES..... | 45 |
| Figura 3.15 – Posição final do Grampo HAES montado na bancada | 45 |
| Figura 4.1 – Posicionamento dos acelerômetros. (a) Acelerômetro a 89 mm do UPC entre o cabo e grampo. (b) Acelerômetro no antinó. | 47 |
| Figura 4.2 – Representação esquemática do grampo HAES com o posicionamento dos sensores..... | 47 |
| Figura 4.3 – Posição dos extensômetros para mapeamento da tensão de flexão do condutor montado no grampo metálico | 48 |
| Figura 4.4 – Grampo de suspensão metálico instrumentado com acelerômetro e extensômetros montados na região de máxima tensão de flexão. | 49 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.5 – Posição dos extensômetros montados no grampo de suspensão metálico com armadura..... | 49 |
| Figura 4.6 – Extensômetros colados diametralmente opostos ao UPC entre a armadura e o grampo. (a) Fios do condutor; (b) Varetas da armadura..... | 50 |
| Figura 4.7 – Extensômetros colados no condutor antes da montagem do grampo de suspensão elastomérico. (a) Extensômetros sem proteção. (b) Extensômetros protegidos com borracha de silicone | 50 |
| Figura 4.8 – Instrumentação do grampo elastomérico, indicando a posição dos extensômetros colados no topo do condutor. | 51 |
| Figura 4.9 – Extensômetros colados no ponto de máxima tensão de flexão no grampo elastomérico. | 51 |
| Figura 4.10 – Posição dos extensômetros colados no condutor montado no grampo HAES. (a) Análise da região ativa do grampo. (b) Análise com refinamento dos extensômetros na região de máximas tensões de flexão. | 52 |
| Figura 4.11 - Tensão de flexão na saída do grampo de suspensão metálico | 53 |
| Figura 4.12 - Tensão de flexão na saída do grampo de suspensão metálico com armadura | 54 |
| Figura 4.13 – Tensão de flexão no interior do grampo HAES..... | 55 |
| Figura 4.14 - Tensão de flexão no interior do grampo HAES com refinamento da posição dos extensômetros..... | 55 |
| Figura 4.15 - Tensão de flexão no interior do elastômero do grampo elastomérico. | 56 |
| Figura 4.16 – Tensão de flexão em função da amplitude de deslocamento no grampo de suspensão metálico com condutores (a) CA/1120 823 MCM e (b) CAL/6201 900 MCM..... | 57 |
| Figura 4.17 – Tensão de flexão em função da amplitude de deslocamento do condutor CA/1120 823 MCM montado no grampo de suspensão metálico com armadura. | 58 |
| Figura 4.18 – Tensão de flexão em função da amplitude de deslocamento no grampo de suspensão elastomérico com condutores (a) CA/1120 823 MCM e (b) CAL/6201 900 MCM. | 58 |
| Figura 4.19 – Tensão de flexão em função da amplitude de deslocamento do condutor (a) CA/1120 823 MCM e (b) CAL/6201 900 MCM montado no grampo de suspensão HAES..... | 59 |
| Figura 4.20 – UPC virtual entre o cabo e grampo considerado como sendo a metade do comprimento do material elastomérico. (a) Grampo HAES e (b) Grampo elastomérico. | 62 |
| Figura 4.21 - Tensão de flexão em função da amplitude de deslocamento calculado por meio da Eq. (4.3), considerando três comprimentos de braço de alavanca. Grampo: HAES; condutor: CA 1220 | 65 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.22 - Tensão de flexão em função da amplitude de deslocamento calculado por meio da Eq. (4.3), considerando três comprimentos de braço de alavanca. Grampo: HAES; condutor: CAL 6201 | 65 |
| Figura 4.23 – Tensão de flexão em função da amplitude de deslocamento calculado por meio da Eq. (4.3), considerando três comprimentos de braço de alavanca. Grampo: Elastomérico; condutor: CA 1120..... | 66 |
| Figura 4.24 – Tensão de flexão em função da amplitude de deslocamento calculado por meio da Eq. (4.3), considerando três comprimentos de braço de alavanca. Grampo: Elastomérico; condutor: CAL 6201 | 66 |
| Figura 4.25 – Tensão de flexão dinâmica em função do parâmetro f_{ymax} para o condutor CA/1120 823 MCM | 67 |
| Figura 4.26 – Tensão de flexão dinâmica em função do parâmetro f_{ymax} para o condutor CAL/6201 900 MCM..... | 68 |
| Figura 4.27 – Parâmetro f_{ymax} em função da amplitude de deslocamento, Y_b ou Y_c | 70 |
| Figura 5.1 – (a) Acelerômetro posicionado a 89 mm do UPC; (b) Acelerômetro posicionado no antinó (c) Extensômetros colocados no UPC entre o cabo e grampo..... | 73 |
| Figura 5.2 – Dispositivo de detecção de quebras em ensaios de fadiga de cabos condutores. | 74 |
| Figura 5.3 – Sensor de deslocamento a laser responsável pela contagem de ciclos de vibração durante o ensaio de fadiga | 74 |
| Figura 5.4 – Gráfico gerado a partir do dispositivo de detecção de quebras ao longo de um ensaio de fadiga | 75 |
| Figura 5.5 – Curva $\sigma_a \times N$ condutor CA 823 MCM liga 1120 montado em grampo elastomérico e em grampo metálico | 78 |
| Figura 5.6 – Curva $f_{ymax} \times N$ do condutor CA 823 MCM liga 1120 montado em grampo elastomérico e em grampo metálico..... | 78 |
| Figura 5.7 – Curva $\sigma_a \times N$ do condutor CAL/6201 900 MCM montado em grampo elastomérico e em grampo metálico | 79 |
| Figura 5.8 – Curva $f_{ymax} \times N$ condutor CAL/6201 900 MCM montado em grampo elastomérico e em grampo metálico | 79 |
| Figura 5.9 – Posição longitudinal das falhas dos condutores CA/1220 e CAL 6201 montados no grampo elastomérico | 81 |
| Figura 5.10 – Posição longitudinal das falhas dos condutores CA/1220 e CAL 6201 montados no grampo metálico..... | 81 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.11 – Seção transversal do condutor indicando a classificação da falha de acordo com a posição radial..... | 82 |
| Figura 5.12 – Distribuição das falhas por camada do condutor - comparação entre grampo metálico e elastomérico..... | 82 |
| Figura 5.13 - Distribuição das falhas por localização relativa (topo ou base) - comparação entre grampo metálico e elastomérico..... | 83 |
| Figura 5.14 – Tipos de superfície encontrados nos fios rompidos dos ensaios de fadiga. Sendo os tipos (a) em V, (b) a 45° e (c) plana..... | 83 |
| Figura 5.15 – Proporção de tipos de superfície de falha encontradas nos cabos CAL 823 e CAL 900..... | 84 |
| Figura 5.16 – Posicionamento radial da falha..... | 84 |
| Figura 5.17 – Distância média entre as falhas e o UPC de acordo com: (a) a camada do condutor, (b) a posição (base ou topo), (c) o tipo de superfície de falha e (c) as tensões de flexão..... | 85 |
| Figura 5.18 – Tipo de falha em função da tensão de flexão..... | 86 |
| Figura 5.19 – Tipo da falha por camada de ocorrência..... | 87 |
| Figura 5.20 – Tipo de falha por posição..... | 87 |
| Figura 5.21 – Posição da falha em função da tensão de flexão..... | 88 |
| Figura 5.22 – Camada de ocorrência da falha por tensão de flexão..... | 88 |
| Figura 5.23 – Superfície de falha de um fio do condutor CA 1120 montado no grampo elastomérico e $\sigma_a = 29,4$ MPa. a) região de ruptura, caracterizada pela presença de <i>dimples</i> , b) transição entre zona de propagação da trinca e a região ruptura abrupta, c) zona de propagação de trinca, caracterizada por marcas de praia e d) região da nucleação da trinca na marca de contato entre dois fios..... | 89 |
| Figura 5.24 - Superfície de falha de um fio do condutor CAL 6201 montado no grampo elastomérico e $\sigma_a = 29,4$ MPa. a) região de ruptura, caracterizada pela presença de <i>dimples</i> , b) região da nucleação da trinca na marca de contato entre dois fios..... | 90 |
| Figura 6.1 – Representação esquemática da região de análise das marcas de contato..... | 92 |
| Figura 6.2 – Representação das cinco marcas de contato consecutivas mais próximas da linha longitudinal traçada a partir do UPC entre o e o grampo..... | 92 |
| Figura 6.3 – Características geométricas das marcas de contato..... | 93 |
| Figura 6.4 – Principais marcas de contato na região de acoplamento entre condutor CA 1120 e o grampo de suspensão metálico..... | 94 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6.5 - Principais marcas de contato na região de acoplamento entre condutor CAL 6201 e o grampo de suspensão metálico | 94 |
| Figura 6.6 – Principais marcas de contato na região de acoplamento entre condutor CA 1120 e o grampo metálico com armadura | 95 |
| Figura 6.7 - Principais marcas de contato na região de acoplamento entre condutor CAL 6201 e o grampo metálico com armadura | 95 |
| Figura 6.8 – Principais marcas de contato na região de acoplamento entre condutor CA 1120 e o grampo elastomérico | 96 |
| Figura 6.9 - Principais marcas de contato na região de acoplamento entre condutor CAL 6201 e o grampo elastomérico | 96 |
| Figura 6.10 – Principais marcas de contato na região de acoplamento entre condutor CA 1120 e o grampo HAES | 97 |
| Figura 6.11 – Principais marcas de contato na região de acoplamento entre condutor CAL 6201 e o grampo HAES | 97 |
| Figura 6.12 – Marcas de escorregamento na região do vão ativo | 98 |
| Figura 6.13 – Comportamento típico das marcas de contato em fios de condutores montados em grampo metálicos | 99 |
| Figura 6.14 – (a) Área de contato total, (b) comprimento dos eixos da elipse de contato, (c) área de contato relativa classificada em adesão ou escorregamento e (d) área de contato absoluta classificada em adesão ou escorregamento, em função da distância em relação ao UPC. Grampo: Metálico; Condutor: CA 1120 | 101 |
| Figura 6.15 – (a) Área de contato total, (b) comprimento dos eixos da elipse de contato, (c) área de contato relativa classificada em adesão ou escorregamento e (d) área de contato absoluta classificada em adesão ou escorregamento, em função da distância em relação ao UPC. Grampo: Metálico; Condutor: CAL 6201 | 101 |
| Figura 6.16 – (a) Área de contato total, (b) comprimento dos eixos da elipse de contato, (c) área de contato relativa classificada em adesão ou escorregamento e (d) área de contato absoluta classificada em adesão ou escorregamento, em função da distância em relação ao UPC. Grampo: Elastomérico; Condutor: CA 1120 | 102 |
| Figura 6.17 – (a) Área de contato total, (b) comprimento dos eixos da elipse de contato, (c) área de contato relativa classificada em adesão ou escorregamento e (d) área de contato absoluta classificada em adesão ou escorregamento, em função da distância em relação ao UPC. Grampo: Elastomérico; Condutor: CAL 6201 | 102 |

Figura 6.18 – (a) Área de contato total, (b) comprimento dos eixos da elipse de contato, (c) área de contato relativa classificada em adesão ou escorregamento e (d) área de contato absoluta classificada em adesão ou escorregamento, em função da distância em relação ao UPC. Grampo: Metálico com armadura; Condutor: CA 1120 103

Figura 6.19 – (a) Área de contato total, (b) comprimento dos eixos da elipse de contato, (c) área de contato relativa classificada em adesão ou escorregamento e (d) área de contato absoluta classificada em adesão ou escorregamento, em função da distância em relação ao UPC. Grampo: Metálico com armadura; Condutor: CAL 6201 103

Figura 6.20 – (a) Área de contato total, (b) comprimento dos eixos da elipse de contato, (c) área de contato relativa classificada em adesão ou escorregamento e (d) área de contato absoluta classificada em adesão ou escorregamento, em função da distância em relação ao UPC. Grampo: HAES; Condutor: CA 1120 104

Figura 6.21 – (a) Área de contato total, (b) comprimento dos eixos da elipse de contato, (c) área de contato relativa classificada em adesão ou escorregamento e (d) área de contato absoluta classificada em adesão ou escorregamento, em função da distância em relação ao UPC. Grampo: HAES; Condutor: CA 1120 104

Figura 6.22 – Características das marcas de contato proximas ao UPC ou BI, considerando o condutor e a posição transversal: (a) Topo da montagem com CA 1120; (b) Topo da montagem com CAL 6201; (c) Base da montagem com CA 1120 e (d) Base da montagem com CAL 6201. 106

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Comparação entre os tipos de vibração induzidas pelo vento em cabos condutores (EPRI, 2006)..... | 11 |
| Tabela 2 - Regimes de fluxo de fluido em torno de cilindros circulares (LIENHARD, 1966)..... | 14 |
| Tabela 3 – Limite de resistência a fadiga de condutores segundo a EPRI..... | 31 |
| Tabela 4 – Valores de EDS recomendados pelo CIGRÉ | 32 |
| Tabela 5 – Valores recomendados de H/w em função do terreno (CIGRÉ, 2005) | 33 |
| Tabela 6 - Propriedades dos cabos condutores CAL/6201 900 MCM e CA/1120 823 MCM..... | 34 |
| Tabela 7 – Propriedades elétricas dos alumínio 6201-T81 e 1120-H19..... | 35 |
| Tabela 8 – Propriedades mecânicas estáticas dos alumínio 6201-T81 e 1120-H19 (VIEIRA, 2020) | 36 |
| Tabela 9 – Resumo da análise de regressão linear dos dados experimentais do condutor CA/1120 823 MCM (Modelo de regressão: $\sigma a = K\varepsilon Yb/c$) | 60 |
| Tabela 10 – Resumo da análise de regressão linear dos dados experimentais do condutor CAL/6201 900 MCM (Modelo de regressão: $\sigma a = K\varepsilon Yb/c$) | 60 |
| Tabela 11 – Fator de correlação de P-S ($K'Yb$ e $K'Yc$) ajustado para grampos elastoméricos e com armadura pré-formada - Condutor CA 1120 | 63 |
| Tabela 12 – Fator de correlação de P-S ($K'Yb$ e $K'Yc$) ajustado para grampos elastoméricos e com armadura pré-formada - Condutor CAL 6201 | 63 |
| Tabela 13 – Resumo da análise de regressão linear dos dados experimentais (Modelo de regressão: $\sigma a = K\varepsilon fy_{max}$) - Condutor CA 1120 | 68 |
| Tabela 14 – Resumo da análise de regressão linear dos dados experimentais (Modelo de regressão: $\sigma a = K\varepsilon fy_{max}$) - Condutor CAL 6201..... | 69 |
| Tabela 15 - Resumo da análise de regressão linear dos dados experimentais da correlação entre Parâmetro fy_{max} em função da amplitude de deslocamento, Yb ou Yc | 70 |
| Tabela 16 – Fator de correlação entre tensão e deformação – experimental e teórico..... | 76 |
| Tabela 17 – Parâmetros do ensaio de fadiga com grampo elastomérico e metálico | 77 |

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

| | | |
|--------------|---|-------------------|
| d | Diâmetro do fio da camada externa | [m] |
| E | Módulo de Elasticidade | [MPa] |
| f | Frequência | [Hz] |
| f_s | Frequência de formação de vórtices | [Hz] |
| H | Carga de esticamento | [kgf] |
| I | Momento de inercia | [m ⁴] |
| K_ϵ | Fator de correlação experimental | [MPa/mm] |
| K_{Yb} | Fator de correlação de Poffenberger-Swart | [MPa/mm] |
| K'_{Yb} | Fator de correlação de Poffenberger-Swart ajustado | [MPa/mm] |
| L | Comprimento do vão | [m] |
| m | Massa linear | [kg/m] |
| n | Número de fios | [1] |
| N | Número de ciclos até a falha | [1] |
| P_v | Potência introduzida pelo vento | [W] |
| Re | Número de Reynolds | [1] |
| S | Número de Strouhal | [1] |
| T | Força de tração | [N] |
| V | Velocidade escoamento | [m/s] |
| Y_b | Amplitude de vibração a 89 mm do UPC entre cabo e o grampo | [mm] |
| Y_c | Amplitude de vibração no primeiro ponto de contato entre o cabo e os arames pré-formados do grampo HAES | [mm] |
| y_{max} | Amplitude de vibração zero-a-pico no antinó | [mm] |
| x | Distância de referência para cálculo da tensão de flexão de Poffenberger-Swart | [mm] |
| x' | Distância entre o ponto de medição do deslocamento e o UPC virtual | [mm] |

x^* Distância entre o ponto de medição do deslocamento e o ponto de referência na metodologia sugerida pelo IEEE

Símbolos Gregos

| | | |
|---------------|--|---------------------|
| β | Ângulo nodal | [°] |
| σ_a | Tensão de flexão alternada | [MPa] |
| ε | Deformação dinâmica nos fios da camada externa do condutor | [1] |
| ν | Viscosidade cinemática do fluido | [m ² /s] |

Siglas

| | |
|----------|--|
| BI | Borda do invólucro metálico do grampo HAES |
| BT | Borda da Telha do grampo de suspensão metálico |
| CAL | Condutor de Alumínio Liga |
| CGS | <i>Cushioned Grip Suspension</i> |
| Cigré | <i>Conseil International des Grands Réseaux Électrique</i> |
| EDS | <i>Every Day Stress</i> |
| Labcabos | Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores |
| SIN | Sistema Interligado Nacional |
| HAES | Helically attached elastomeric suspension |
| IEEE | Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos |
| UPC | Último Ponto de Contato entre o cabo e o grampo de suspensão |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e Motivação

A energia elétrica é essencial para o progresso e sustentação de qualquer atividade humana moderna. O acesso à eletricidade é realizado por meio de uma rede de transmissão que conecta as unidades geradoras aos centros consumidores. Devido à grande extensão territorial do Brasil e de sua matriz energética ser majoritariamente proveniente de hidroelétricas, os centros consumidores geralmente estão localizados a centenas ou milhares de quilômetros dos pontos de geração de energia elétrica.

A transmissão de energia elétrica é feita usualmente por meio linhas de transmissão. O principal elemento da linha de transmissão é o cabo condutor formado por fios de alumínio trançados helicoidalmente, pois este é responsável por realizar a transmissão da energia elétrica, além desse componente ter um peso significativo no custo total da linha de transmissão, podendo chegar a valores superiores a 40% do total investido na instalação de uma nova linha de transmissão (EPRI, 2006). Os cabos condutores são apoiados em estruturas metálicas denominadas de torres de transmissão, onde os condutores são unidos as torres por meio de grampos de suspensão.

Nesse contexto, linhas de transmissão estão submetidas a ação do vento que causam a vibração eólica nos cabos condutores. Esse tipo de vibração é caracterizado por frequências que variam entre 3 e 150 Hz e amplitudes que alcançam no máximo o valor do diâmetro do condutor. O início das vibrações ocorre com a combinação de dois fatores: i) A frequência de excitação do vento se iguala a uma das frequências naturais dos cabos condutores, o que ocorre facilmente, pois em geral a frequência natural de um cabo condutor em uma linha de transmissão varia em média a cada 0,2 Hz. ii) A velocidade do vento deve ser de 1 m/s a 7 m/s, para gerar as vibrações eólicas. Essas condições de vento são encontradas em praticamente todo território nacional, como registra o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (CEPEL, 2001), gerando assim, uma condição muito favorável para a ocorrência do fenômeno no território nacional.

Os cabos condutores são fixos as torres de transmissão por meio de grampos de suspensão. No acoplamento entre cabo e o grampo, as vibrações eólicas causam uma tensão de flexão dinâmica nos fios do condutor por conta da restrição de movimentação e um consequente aumento na curvatura dos fios. Além disso, nesses locais, existe uma combinação da tensão de flexão estática, por conta do ângulo de saída do cabo, da tensão axial associada com a carga de esticamento e a carga compressiva do aperto do grampo. A combinação desses fatores gera o micro deslizamento e por consequência o fenômeno de *fretting* no contato entre os fios, o que por sua vez pode induzir falhas por fadiga e levar a falha

catastrófica do cabo. Na Figura 1.1 é apresentado esquematicamente as forças atuantes na região de acoplamento durante a vibração do cabo condutor.

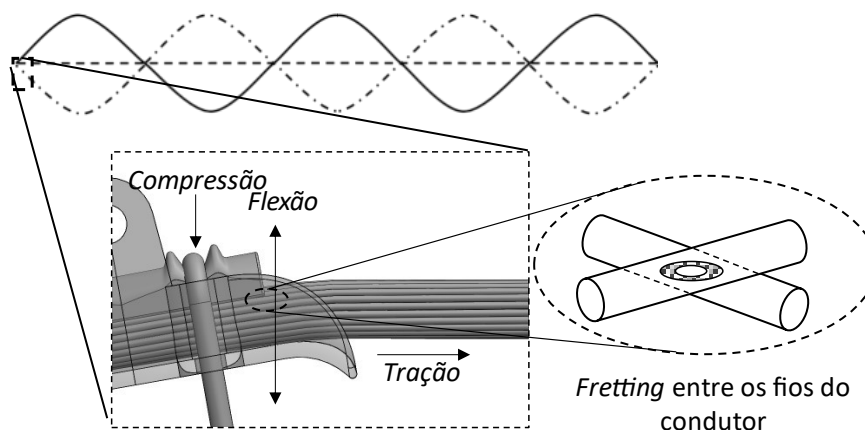


Figura 1.1 – Acoplamento do condutor com o grampo de suspensão e as forças que induzem a falha dos fios

A maior parte dos requisitos na seleção e projeto de um condutor estão relacionados às suas propriedades mecânicas. Os aspectos relacionados a parte elétrica estão associados a densidade de corrente, resistência elétrica e perda de energia elétrica, o que pode ser resolvido aumentando a seção transversal do condutor ou utilizando feixe de cabos condutores. Para o ajuste das características mecânicas do condutor, são utilizados tipos de alumínio com diferentes composições.

Majoritariamente são empregados três tipos de alumínio na fabricação de condutores: 1350, 6201 e 1120. O alumínio 1350 possui baixa relação resistência por peso e alta condutividade elétrica esse tipo de condutor é recomendado para ser instalado em linhas de transmissão com pequenos vãos e áreas onde os carregamentos de vento são baixos, ou utilizado juntamente com fios de aço para compor o cabo CAA (Condutor de Alumínio com Alma de Aço). Outra opção é o alumínio 6201, esta liga é caracterizada pela adição de silício e magnésio passa por um tratamento térmico, o que encarece o processo de fabricação e confere ao material uma maior resistência mecânica e uma menor condutividade elétrica. Outra composição de alumínio que vem ganhando destaque no cenário nacional é o 1120, este alumínio apresenta propriedades mecânicas e elétricas equilibradas quando comparado aos outros dois tipos de alumínio e por não necessitar de tratamento térmico apresenta menor custo de produção, qualidades que o tornam uma alternativa muito atraente para o projeto de linhas de transmissão, mas por outro lado, a literatura acadêmica é bastante escassa no que diz respeito ao comportamento em fadiga para cabos fabricados com esta liga.

Para melhor compreensão das diferenças de características elétricas e mecânicas dos tipos de alumínio utilizados na produção de cabos condutores. A Figura 1.2 apresenta os valores de resistência mecânica a ruptura (a) e condutividade elétrica (b) de cada tipo de cabo.

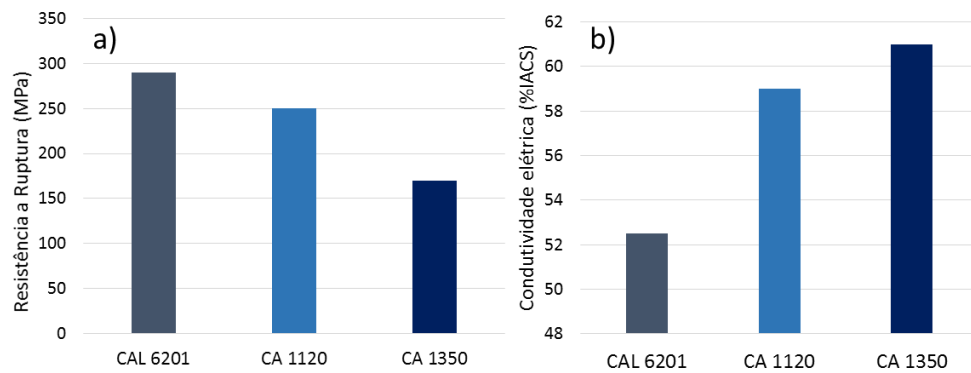


Figura 1.2 – Comparação entre propriedades mecânicas e elétricas de cabos fabricados a partir de diferentes ligas

Outro componente importante da linha de transmissão são os grampos de suspensão cuja função primária é suspender o cabo condutor na torre, além disso o grampo deve ter a capacidade de suportar os carregamentos mecânicos impostos pelo condutor em todas as condições de serviço. O grampo de suspensão é o local mais crítico para ocorrência de falhas devido ao movimento oscilatório do cabo condutor e está diretamente relacionado a causa da falha (MCGILL; RAMEY, 1986; SANDBERG, 1949).

Conforme citado anteriormente, a montagem cabo/grampo de suspensão é o local onde o cabo experimenta uma combinação de carregamentos estáticos e dinâmicos que levam a falha por fadiga. Por isso, a sua importância para a integridade mecânica da linha de transmissão é significativa. Como consequência, fabricantes de ferragens tem apresentado diferentes configurações de grampos de suspensão que, segundo eles, se propõem a minimizar de maneira distinta a severidade do fenômeno de fadiga em cabos condutores. O grampo que fornece o menor nível de proteção ao condutor é o grampo metálico convencional, no qual o condutor é acomodado em entre as duas partes de alumínio (corpo e telha) que são unidas por meio de parafusos em U. Para elevar o nível de proteção desse grampo, pode ser utilizado uma armadura de fios pré-formados em torno do condutor, com o intuito de elevar o amortecimento do sistema e distribuir a carga de compressão ao longo de uma área maior. Outra abordagem possível é utilizar um material elastomérico na região de contato entre o cabo e o grampo, o que potencialmente reduz a tensão de flexão estática, dinâmica e endentações que podem ser formadas no contato com o grampo. Ainda, no grampo elastomérico pode ser adicionada a armadura pré-formada o que produzirá o tipo de grampo com maior grau de proteção para o condutor, que passa a ser denominado HAES. Na Figura 1.3 é apresentado uma imagem de cada tipo de grampo citado.

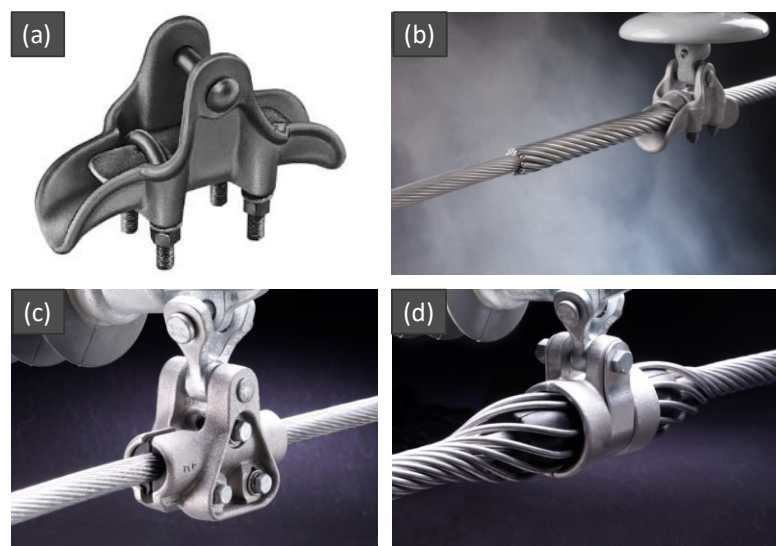


Figura 1.3 – Grampos de suspensão: (a) Metálico, (b) metálico com armadura, (c) elastomérico e (d) HAES.

Portanto, a maneira que o grampo de suspensão afeta a vida em fadiga dos cabos condutores se baseia em como o grampo acomoda o movimento do cabo. A curvatura do condutor ao se deformar – o que reflete na tensão de flexão - e a quantidade de pressão que é distribuída para o cabo dentro do grampo - que impacta na força de contato entre os fios do condutor - são os principais fatores que influenciam a resistência a fadiga de condutores (CIGRÉ, 1985; MCGILL; RAMEY, 1986). Como relatado, cada tipo de grampo irá atuar de maneira distinta a relação que existe entre o deslocamento do cabo e a tensão de flexão, o que torna mais difícil a avaliação e comparação de cada tipo de grampo na vida em fadiga dos condutores.

Dessa forma, foi realizado no âmbito de um programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Empresa Brasileira de Transmissão de Energia S.A – EBTE, um amplo estudo experimental sobre o efeito dos grampos de suspensão metálico, metálico com armadura, elastomérico e o grampo elastomérico com armadura (HAES - helically attached elastomeric suspension clamps) sobre os principais aspectos que influenciam o comportamento em fadiga dos condutores quando submetidos às vibrações eólicas.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o efeito dos grampos de suspensão metálico, metálico com armadura, elastomérico e HAES sobre o fenômeno de fadiga em cabos condutores CA fabricado em alumínio 1120 e CAL alumínio 6201. Mais especificamente, o trabalho teve os seguintes objetivos:

- Avaliar o comportamento da tensão de flexão em função da amplitude deslocamento para diferentes montagens grampo/condutor.
- Comparar o desempenho em fadiga entre cabos condutores montados em grampos de suspensão elastoméricos e metálicos.

- Analisar a influência do tipo de grampo de suspensão nos pontos de contato entre os fios da camada externa e a camada intermediária do condutor.

1.3 Metodologia

Foram conduzidos ensaios dinâmicos e de fadiga em cabos condutores. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores da Universidade de Brasília (Labcabos-UnB) em bancadas que foram adaptadas para utilização de grampos metálicos com armadura, elastoméricos e HAES.

A tensão de flexão máxima que ocorre em cabos condutores é localizada próximo aos pontos de restrição de movimento especialmente no último ponto de contato (UPC) entre o cabo e o grampo de suspensão. A forma de avaliação da tensão de flexão das montagens cabo/grampo de suspensão foi feita por meio da medição da deformação gerada pela deflexão do cabo condutor. Primeiramente, foi localizada a posição onde ocorre a máxima tensão de flexão por meio de um mapeamento, no qual a deformação do condutor foi medida ao longo da região de acoplamento entre o cabo e grampo. Após, um novo ensaio foi montado e a deformação medida por meio de três extensômetros colados nos fios no condutor – na posição de máxima tensão – enquanto esse vibra com amplitude prescrita nos pontos de referência. Por fim, foi analisado se os resultados das medições em diferentes tipos de grampo de suspensão se adequam as previsões de equações que originalmente foram propostas para prever a tensão de flexão em cabos montados em grampos rígidos.

Ademais, foram conduzidos ensaios de fadiga em cabos montados em grampo de suspensão elastomérico. A severidade da vibração foi avaliada considerando a tensão de flexão nos fios do condutor e o parâmetro $f y_{max}$, que é a velocidade de vibração no antinó. O ensaio de fadiga consiste em vibrar o condutor em uma de suas frequências naturais, com amplitude prescrita a 89 mm do UPC entre o cabo e o grampo. O ensaio é interrompido após a quebra de quatro fios do cabo condutor. Ao fim do ensaio, o seguimento do cabo que está montado no grampo é retirado e as falhas dos fios são analisadas e catalogadas. No total, foram realizados 9 ensaios de fadiga com cabo CAL/1120 823 MCM e 9 ensaios com o CAL/6201 900 MCM, cada conjunto de ensaios distribuídos em três níveis de tensão.

Por fim, foram analisadas as marcas que se formam no contato entre os fios da camada externa com os fios da camada intermediária. As marcas inspecionadas estiveram localizadas nas zonas onde há a maior incidência de falhas por fadiga. A análise consiste em medir o tamanho e as características das marcas de contato formadas pelo deslocamento do condutor e carga compressiva imposta por cada tipo de montagem cabo/grampo e, ao final, comparar a influência de cada grampo de suspensão no contato entre os fios do condutor.

1.4 Estado da Arte sobre a influência do grampo de suspensão na vida em fadiga de cabos condutores

O fenômeno de fadiga em cabos condutores decorre basicamente da vibração do condutor e de carregamentos estáticos, como a carga de esticamento e a restrição de movimento imposta pelo grampo suspensão. O conceito de amplitude de deslocamento para a avaliação da severidade de vibrações eólicas foi primeiramente introduzido e estudado por Tebo, (1941). Mas, foi só em 1965 que Poffenberger e Swart (POFFENBERGER; SWART, 1965) formularam uma solução analítica para correlacionar a deformação dinâmica com amplitude de deslocamento em cabos condutores rigidamente fixados e sem armadura pré-formada. Os autores assumiram que o condutor se comporta como uma viga estática nas proximidades do grampo de suspensão, sendo essa região restrita de translação e rotação. Além disso, foi assumido que o condutor está submetido a um carregamento dinâmico inercial que segue uma forma senoidal, e um carregamento de tração. Os autores concluíram que a relação entre deformação e tensão depende da tensão de esticamento, rigidez a flexão e o comprimento de onda e com isso propuseram e validaram, com alguns experimentos, uma formulação para correlacionar a deformação dos fios do condutor com a amplitude de deslocamento.

Um estudo sobre o efeito da geometria de grampos metálicos na fadiga de condutores foi conduzido por McGill e Ramey em 1986 (MCGILL; RAMEY, 1986). Foram empregados quatro tipos de grampo metálicos, sendo a diferença entre eles o ângulo de curvatura na saída grampo. Os autores identificaram que tanto a tensão estática quanto a tensão dinâmica variaram de forma inversamente proporcional ao ângulo de curvatura do grampo. Bem como o desempenho em fadiga do condutor era reduzido com a diminuição da curvatura do grampo de suspensão.

O primeiro estudo relacionando as falhas por fadiga em fios de cabos condutores com o fenômeno de *fretting*, foi conduzido por (FRICKE; RAWLINS, 1968a). Os autores mostram por meio de análises metalográficas de falhas de fios de condutores que a trinca sempre inicia nas marcas de contato, caracterizando a importância do *fretting* na falha por fadiga dos condutores. Zhou et al. (ZHOU et al., 1994a) mapearam, em 1994, as marcas de contato entre fios de um condutor CAA montado em um grampo metálico em duas situações: quando este foi submetido apenas ao carregamento estático (aperto do grampo e carga de tração) e quando submetido ao carregamento estático e dinâmico proveniente de vibrações transversais. Além disso, os autores apresentaram uma curva tensão em função da vida em fadiga, analisando a posição das falhas em relação ao mapeamento das marcas de contato. Foi observado pelos autores que as falhas nos fios de alumínio ocorreram predominantemente na região onde haviam marcas de contato com regime misto de adesão e desgaste. No mesmo ano, os autores publicaram um outro estudo (ZHOU et al., 1994b) sobre o surgimento e propagação de trincas que se originam na região de contato entre os fios. Os autores verificaram que as trincas nucleavam nas regiões de *fretting* e a subsequente propagação ocorria devido ao carregamento local de contato combinado com o

carregamento externo. Também foi observado pelos autores que zona crítica para o surgimento de trincas é a região entre a borda da telha e o último ponto de contato entre o condutor e o grampo metálico.

Uma investigação do fenômeno de fretting em cabos condutores foi conduzida por Zhou et al. (ZHOU et al., 1996) em 1996. Os principais parâmetros analisados neste trabalho foram a amplitude de flexão, o tipo de travamento e a lubrificação. Em relação ao tipo de travamento, os autores estudaram três configurações: grampo metálico, espaçador metálico e espaçador elastomérico. Foi constatado que esta última configuração diminuiu a degradação dos fios e elevou o limite de resistência a fadiga do condutor.

Papailiou (PAPAILIOU, 1995) publicou, em 1995, um modelo teórico para a estimação da tensão de flexão em cabos condutores em grampos rígidos. Neste modelo é considerado a interação entre os fios que leva a uma variação da rigidez a flexão do condutor. Segundo Papailiou, quando não há escorregamento entre os fios, a rigidez assume o valor máximo que é equivalente ao condutor se comportar como uma barra rígida. Quando ocorre o escorregamento entre os fios, a rigidez a flexão passa ser função da curvatura do condutor e da carga de esticamento e tende para um valor mínimo onde todos os fios defletem em torno de seu eixo neutro.

Lévesque et al. (LÉVESQUE et al., 2015) apresentaram em 2015 um estudo experimental sobre a deformação de dois tipos de cabos condutores de alumínio com alma de aço (CAA) montados em grampos metálicos. Foi avaliado nesse trabalho diferentes tensões de esticamento, amplitudes de deslocamento e frequências. Os autores verificaram por meios de medições de amplitudes de deslocamento uma grande variação de rigidez do condutor na região próxima ao ponto de engaste.

Com o intuito de elevar o desempenho em fadiga de condutores e diminuir o desgaste que ocorre entre o grampo metálico e cabo condutor, Steiner et al. (2014) realizaram um estudo sobre o efeito do revestimento superficial do grampo metálico. Para isso, grampos de suspensão metálicos foram submetidos a dois tipos de modificação: um tratamento criogênico e um revestimento de nitreto de cromo. Com isso, os autores relataram uma melhora de 20% na vida em fadiga, considerando como critério de falha a quebra do primeiro fio. Ademais os autores observaram um menor desgaste do grampo de suspensão.

O Grupo de Trabalho B2.49 do Cigré (CIGRÉ, 2016) publicou recomendações para a carga de esticamento em condutores montados em grampos HAES. As recomendações se basearam em ensaios de fadiga em laboratórios e em análise de dados de campo. Para o grampo HAES o Grupo de Trabalho estabeleceu recomendações em função de quatro tipos de terreno e intensidade de turbulência, sendo proposto um aumento de 10-25% no parâmetro H/w (Carga de esticamento dividida pela massa linear do condutor) em relação as recomendações existentes para grampos metálicos. Foi observado que para o grampo elastomérico houve uma melhora no desempenho em fadiga de condutores, porém os dados obtidos foram insuficientes para quantificar o acréscimo na carga de esticamento.

Além da influência do grampo de suspensão, outro fator importante na fadiga de cabos condutores é a carga de esticamento da linha de transmissão. Esse parâmetro foi estudado por Fadel (2010) e Kalombo (2017). Os autores avaliaram a vida em fadiga de cabos condutores submetidos a altos carregamentos de tração de condutores montados em grampos metálicos, sendo que Fadel (2010) focou seu trabalho no parâmetro EDS enquanto Kalombo (2017) fez seus estudos baseados no parâmetro H/w . Ambos concluíram que o aumento da carga de esticamento reduz a vida em fadiga de cabos condutores montados em grampos metálicos.

1.4.1 Contribuições para área de transmissão de energia e para o estado da arte

Grampos de suspensão com elastômero e com varetas pré-formadas oferecem maior proteção contra fadiga ao condutor, mas por outro lado, possuem um custo de instalação e fabricação mais elevado, quando comparados com grampos metálicos. Apesar de ser bem aceito o fato desses grampos melhorarem o desempenho em fadiga, na prática, essas vantagens não são totalmente aproveitadas por falta de conhecimento quantitativo dessa melhora.

Nesse contexto, o presente trabalho apresenta contribuições inéditas para o entendimento do comportamento em fadiga de diferentes montagens cabo/grampo de suspensão. As contribuições podem ser divididas em três aspectos.

- Correlação entre amplitude de vibração e tensão de flexão: Tipicamente, no processo de inspeção de linhas de transmissão, são utilizados equipamentos que medem a amplitude de deslocamento do condutor em relação ao grampo. As amplitudes medidas são posteriormente convertidas em tensão para estimativa da vida remanescente do condutor, porém nessa conversão não é levada em conta o efeito do grampo de suspensão. Dessa forma, grampos elastoméricos são tratados na mesma maneira que grampos metálicos, o que pode trazer estimativas muito conservadoras da vida remanescente do condutor ou gastos desnecessários com sistemas e amortecimento de vibração mais robustos. Nesse contexto, são apresentadas correlações entre a amplitude de deslocamento e a tensão de flexão, que permitem a quantificação da redução da tensão de flexão em grampos elastoméricos.
- Fadiga de condutores montados em grampos elastoméricos: A amplitude de flexão não é o único fator determinante para a fadiga de condutores. A inicialização das trincas de fadiga ocorre nos pontos de contato entre os fios do condutor, onde as tensões são extremamente complexas e influenciadas pela pressão de contato e nível de deslocamento entre os fios. Os grampos elastoméricos induzem uma menor pressão de contato e esse efeito é novamente negligenciado nas análises de vida remanescente de cabos condutores, uma vez que na análise são empregadas curvas de fadiga geradas a partir de ensaios com cabos condutores montados em grampos metálicos. Além da correlação entre deslocamento e tensão, também serão apresentadas curvas de fadiga de condutores montados em grampo elastomérico.

- Marcas de contato entre os fios: Cada grampo de suspensão impacta de maneira distinta o micro deslizamento que ocorre no contato entre os fios. Esse aspecto trata de uma melhor compressão do efeito do grampo de suspensão no contato entre os fios e fornece informações relevantes para pesquisas futuras. Nesse sentido, são apresentados mapeamentos das marcas de contato entre fios da camada externa com a camada intermediária, bem como uma análise do tamanho das marcas de contato geradas.

1.5 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está organizado em sete capítulos. O primeiro capítulo apresenta a motivação, objetivos e, resumidamente, a metodologia empregada, o estado da arte e as contribuições deste trabalho. No segundo capítulo é relatada uma revisão bibliográfica sobre o problema de vibração em cabos condutores, no qual são descritas as causas das vibrações em cabos condutores, o mecanismo de fadiga, os parâmetros para avaliação da severidade da vibração, os parâmetros de projeto para carga de esticamento e considerações sobre os grampos de suspensão utilizados neste trabalho.

No terceiro capítulo são descritos os materiais e os métodos utilizados nos ensaios de vibração em cabos condutores, o que inclui: descrição dos condutores e grampos de suspensão, visão geral da bancada experimental e seus equipamentos e mudanças realizadas no Labcabos para possibilitar a utilização de diferentes tipos de grampos de suspensão nas bancadas de fadiga.

Nos capítulos 4, 5 e 6 são apresentados os resultados do trabalho e as respectivas metodologias. Sendo que no quarto capítulo são relatados a metodologia e os resultados para a criação das correlações entre amplitude de deslocamento e tensão de flexão. O quinto capítulo trata dos ensaios de fadiga em cabos condutores montados em grampos de suspensão elastoméricos e o sexto capítulo versa sobre a metodologia de ensaios para formação e análise de marcas de contato entre os fios do condutor. Por fim, no sexto capítulo são apresentadas as conclusões finais do trabalho, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Vibração em condutores de energia

Cabos condutores de energia elétrica estão sujeitos a ação do vento, o qual provoca carregamentos dinâmicos que podem levar a ruptura dos fios do condutor. A falha ocorre normalmente por fadiga nos locais onde há restrição de movimento do condutor, como grampos, espaçadores e amortecedores (AZEVEDO et al., 2009; ZHOU et al., 1994b). O movimento oscilatório causado pela ação do vento gera tensões de flexão alternadas e que combinadas com as tensões estáticas (Carga de esticamento, aperto do grampo, curvatura do cabo) formam um estado complexo de tensões.

Os movimentos oscilatórios estão divididos em três principais categorias: Vibração eólica, galope do condutor e vibração de esteira. Estes tipos de vibrações se distinguem um do outro pelos diferentes mecanismos de transferência de energia, por distintos padrões de movimento, por diferentes frequências e amplitudes de vibração e por provocarem diferentes efeitos sobre os cabos, assim como a outros componentes das linhas de transmissão. A Tabela 1 apresenta resumidamente as características de cada de cada fenômeno que provoca a oscilação dos condutores. Adiante será tratado apenas da vibração eólica, por esta ser a maior causa de falhas em condutores, grampos e dispositivos de amortecimento de vibração em linhas de transmissão (EPRI, 2006), além de ser o tipo de vibração que será simulado durante a campanha experimental deste trabalho.

2.1.1 Vibrações Eólicas

As vibrações eólicas podem ocorrer, em maior ou menor intensidade, em qualquer linha de transmissão que estejam sujeitas a ventos com velocidade em torno de 1 m/s a 7 m/s. O nível da tensão de flexão nos fios do condutor por conta da vibração eólica irá depender do tipo de grampo de suspensão, da carga de esticamento do condutor e da amplitude do movimento oscilatório do cabo, a qual pode alcançar valores correspondentes a medida do diâmetro do cabo condutor. Com o intuito de evitar a fadiga do cabo condutor pode ser feito o controle da amplitude de deslocamento através de amortecedores posicionados ao longo da linha de transmissão e com a utilização de grampos de suspensão que oferecem um maior grau de proteção ao condutor contra os efeitos da vibração eólica.

Tabela 1 – Comparação entre os tipos de vibração induzidas pelo vento em cabos condutores (EPRI, 2006)

| Parâmetro | Vibração Eólica | Galope do Conductor | Oscilação devido à Esteira |
|---|--|---|---|
| Tipos de Linhas de Transmissão Afetadas | Todas | Todas | Apenas linhas com feixe de condutores |
| Faixa de Frequência (Hz) | 3 a 150 | 0,08 a 3 | 0,15 a 10 |
| Faixa de Amplitude (Valor vezes o diâmetro do condutor) | 0,01 a 1 | 5 a 300 | 0,2 a 80 |
| Condições Favoráveis para o Fenômeno de Vibração | | | |
| Característica do Vento | Laminar | Laminar | Laminar |
| Velocidade do Vento (m/s) | 1 a 7 | 7 a 18 | 4 a 18 |
| Superfície do Conductor | Desencapado/Congelado uniformemente | Congelado assimetricamente | Desencapado/Seco |
| Danos | | | |
| Tempo estimado para ocorrer a falha | 3 meses a mais de 30 anos | 1 a 48 horas | 1 mês a 8 anos |
| Causa da Falha | Falha por fadiga devido ao carregamento cíclico | Altos carregamentos dinâmicos | Colisão dos condutores e desgaste físico acelerado |
| Componentes da Linha mais afetados | Fios do cabo condutor | Conductor, ferragens, isoladores e estruturas | grampos de suspensão, espaçadores, amortecedores e condutor |
| Condições de projeto que afetam o movimento do condutor | Carga de esticamento, auto amortecimento, uso de amortecedores | Relação entre frequências naturais verticais e torcionais | Separação e arranjo dos condutores, distância entre espaçadores |

A vibração eólica é originada do fenômeno de desprendimento de vórtices em um escoamento em torno de um corpo cilíndrico, fenômeno conhecido também como esteira de vórtices de Von Karman, como mostrado na Figura 2.1. A geração de vórtices causa uma distribuição instável de pressão na superfície do condutor que provoca o movimento oscilatório. É apresentado na Figura 2.2 a distribuição da pressão em torno de um cilindro estacionário durante o desprendimento de vórtices, nessa situação praticamente três quartos do cilindro é exposto a uma pressão negativa. Essa distribuição alternada de pressão gera carregamentos distribuídos e o módulo dessas forças é indicado por setas sólidas.

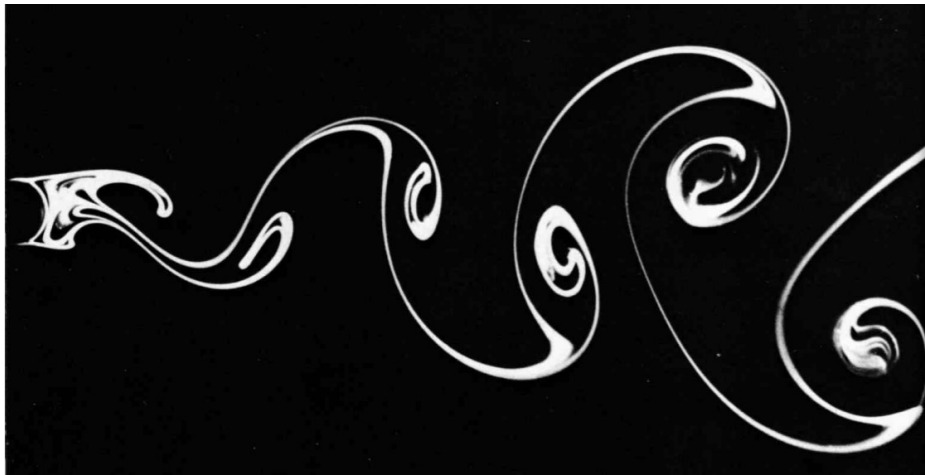


Figura 2.1 - Esteira de Vórtice de Von Karman em um cilindro circular. (VAN DYKE, 1982)



Figura 2.2 – Distribuição de pressão e modulo da força em nove momentos do desprendimento de vórtices (ZASSO et al., 2008).

A primeira investigação científica sobre esse fenômeno foi feita por Strouhal em 1878. Ele estudou a vibração de um fio sujeito a uma corrente de ar e concluiu que a frequência do som emitido variava com o diâmetro do fio e a velocidade relativa entre o fio e o ar (apud RAYLEIGH, 1998). Em sua homenagem foi estabelecido o número Strouhal (S) que relaciona a frequência de desprendimento de vórtices com a velocidade do escoamento e o diâmetro do corpo cilíndrico. Esse parâmetro é representado pela Eq. (2.1)

$$S = \frac{f_s d}{V} \quad (2.1)$$

onde f_s é a frequência de formação de vórtices, V é a velocidade do vento e d é o diâmetro do condutor.

Para cabos condutores o número de Strouhal é adotado como sendo igual a 0,185. Com isto é possível utilizar a Equação 2.1 de duas formas. Conhecendo-se a velocidade do vento é possível calcular a frequência em que o cabo condutor será excitado e conhecendo as frequências naturais do cabo (f_n) pode-se verificar quais velocidades de vento gerariam uma excitação no cabo condutor.

O movimento vibratório iniciar-se-á quando a velocidade do vento é suficiente para gerar frequências de desprendimento de vórtices que se igualam as frequências naturais do condutor e além

disso o condutor não está suficientemente amortecido. Com isso, o cabo condutor iniciará um movimento oscilatório no sentido transversal ao escoamento.

A frequência de desprendimento de vórtices é de grande importância no processo de fadiga do cabo condutor. Quando maior a frequência de excitação menor será o tempo de vida do cabo para uma mesma condição de carregamento. A frequência também é determinante para o início da vibração do cabo uma vez que o condutor será submetido a maiores deslocamentos quando for excitado em uma de suas frequências naturais, o que acontece com uma grande constância, pois as frequências naturais de um cabo condutor na linha de transmissão estão muito próximas uma da outra, variando a cada 0,2 a 0,5 Hz (GUERARD; GODARD; LILIEN, 2011).

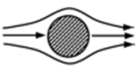
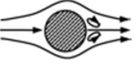




Outro parâmetro adimensional importante no estudo de vibrações eólicas é o número de Reynolds. O número de Reynolds descreve a relação entre forças inerciais e forças viscosas no escoamento. De forma prática, é possível prever por meio do número de Reynolds o tipo de escoamento que será gerado após a interação do vento com o cabo condutor. O número de Reynolds relaciona as propriedades físicas do fluido, sua velocidade e a geometria do corpo cilíndrico por meio da Eq. (2.2).

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad (2.2)$$

onde V é a velocidade do escoamento, d é o diâmetro do cilindro e ν é a viscosidade cinemática do fluido ($1,51 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ para o ar a 20°C).

Como o diâmetro do condutor e a viscosidade cinemática são aproximadamente constantes, este parâmetro adimensional e, conseqüentemente, o comportamento do escoamento são afetados diretamente pela variação da velocidade do vento. A Tabela 2 mostra a evolução do processo de desprendimento de vórtices em função do número de Reynolds. Para Reynolds menor que 5 o escoamento é laminar e possui uma simetria em relação ao centro do cilindro, à medida que o número de Reynolds aumenta é formado um par de vórtices na parte posterior ao escoamento. A partir de Reynolds 40 a simetria é gradualmente perdida e os vórtices começam a se desprender de forma alternada e periódica, quando o número de Reynolds alcança 150 a esteira de vórtices inicia uma transição para um escoamento turbulento. Quando o escoamento se torna totalmente turbulento o desprendimento de vórtices é cessado e no estágio seguinte o desprendimento de vórtices é reestabelecido de forma turbulenta.

Tabela 2 - Regimes de fluxo de fluido em torno de cilindros circulares (LIENHARD, 1966)

| Ilustração | Faixa do Número de Reynolds | Regime de escoamento |
|--|---|--|
|  | $Re \leq 5$ | Regime com fluxo não separado e laminar |
|  | $5 \leq Re < 40$ | Par fixo de vórtices estacionários |
|  | $40 \leq Re < 150$ | Desprendimento de vórtices laminar |
|  | $150 \leq Re < 300$ | Faixa de transição para vórtices turbulentos |
| | $300 \leq Re < 3 \times 10^5$ | Desprendimento de vórtices totalmente turbulento |
|  | $3 \times 10^5 \leq Re < 3 \times 10^6$ | A camada limite passa a ser turbulenta e não há desprendimento de vórtices |
|  | $3 \times 10^6 \leq Re$ | O desprendimento de vórtices turbulentos é reestabelecido |

De forma prática, o movimento vibratório iniciará quando a velocidade do vento incide sobre o cabo atendendo a dois requisitos. O primeiro é que o vento induza o desprendimento de vórtices em um escoamento laminar, o que ocorre em geral com velocidades de vento entre 1 m/s a 7 m/s. O segundo é que a frequência de desprendimento destes vórtices seja igual a uma das frequências naturais do condutor.

A partir disso, a amplitude de vibração do condutor irá aumentar até que se alcance o regime estacionário entre a energia introduzida e a energia que o condutor e o sistema de amortecimento são capazes de dissipar enquanto ocorre a vibração, dessa forma quando a energia introduzida se iguala a energia dissipada a amplitude de vibração se estabiliza, este comportamento é ilustrado graficamente na Figura 2.3.

A potência dissipada pelo condutor é denominada autoamortecimento e pode ser obtida por meio de ensaios em laboratório (MIRANDA, 2017). Já a máxima potência mecânica que pode ser inserida no condutor devido as forças aerodinâmicas com o regime de escoamento estacionário e laminar, soprando perpendicularmente ao condutor, pode ser determinado utilizando uma formulação empírica (Eq. (2.3)).

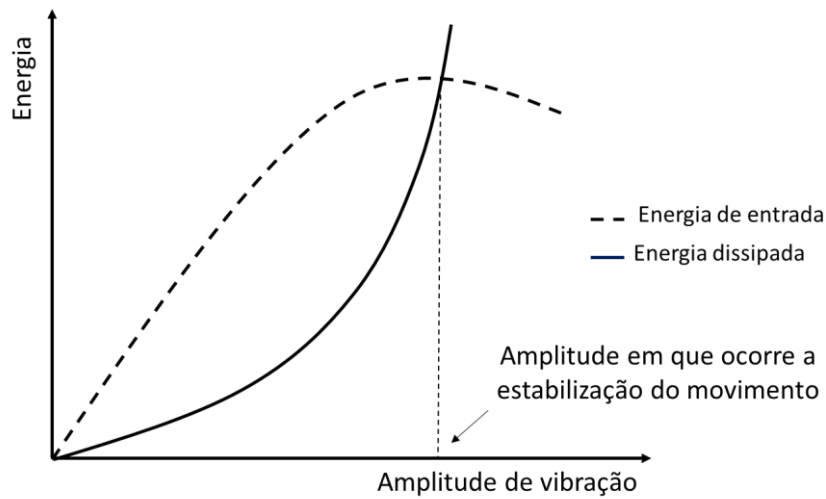


Figura 2.3 – Balanço de energia em um cabo condutor

$$P_v = Lf^3 D^4 fnc(Y/D) \quad (2.3)$$

onde L é o comprimento do cabo condutor no vão, f é a frequência em que o vento excita do cabo, D é o diâmetro do cabo e $fnc(Y/D)$ é a função reduzida do coeficiente de máxima potência introduzida função do deslocamento no antinó, Y , e o diâmetro do condutor, D . Diferentes coeficientes foram propostos por diversos autores. Esses coeficientes foram obtidos a partir de estudos experimentais em tuneis de vento com escoamento sobre um cilindro estacionário. A Figura 2.5 apresenta curvas obtidas por diferentes autores para os coeficientes de potência introduzida.

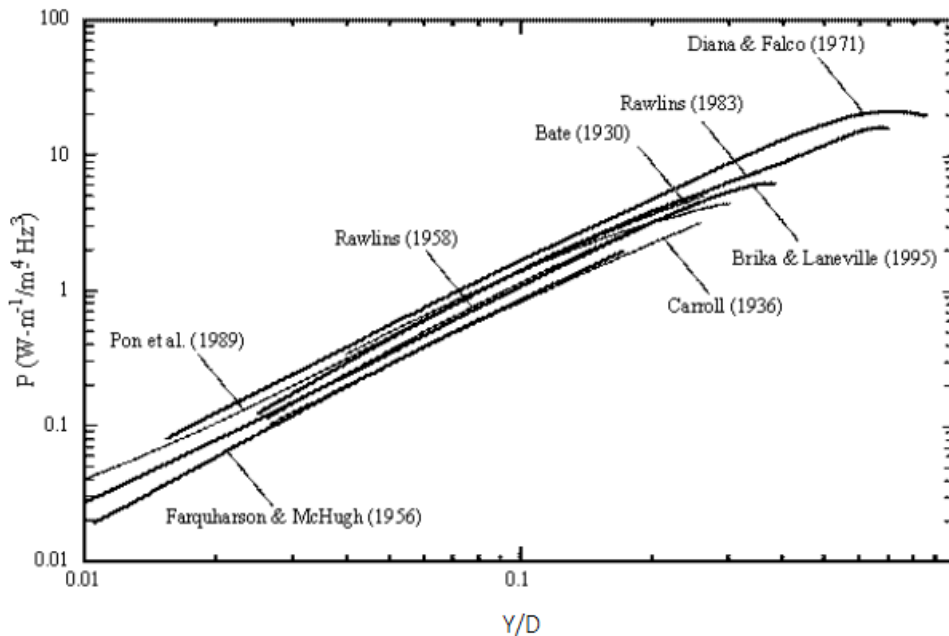


Figura 2.4 – Coeficiente de máxima potência introduzida ao cabo (EPRI, 2006)

2.2 Fadiga em cabos condutores

2.2.1 Cabos condutores de energia

Para entender o mecanismo de falha que ocorre em cabos condutores, primeiramente é necessário conhecer a forma construtiva e o emprego de cabos condutores em linhas de transmissão. Os cabos condutores são fixos às torres de transmissão por meio de grampos de suspensão e o isolamento elétrico entre o condutor e a torre é feito por meio de isoladores. Devido ao peso do condutor, este se acomoda entre as torres na forma de uma catenária, a qual possui uma flecha no centro do vão. Nessa situação, o cabo condutor é tracionado o suficiente para que haja um espaço livre mínimo entre o condutor e o solo. A forma catenária do condutor na linha de transmissão também faz com que nos pontos de suspensão do condutor exista um ângulo de saída que em geral assume valores entre 6° e 10° . Na Figura 2.5 é apresentado um esquema ilustrando o ângulo de saída, a flecha e o espaço livre de um condutor tracionado entre duas torres de transmissão.

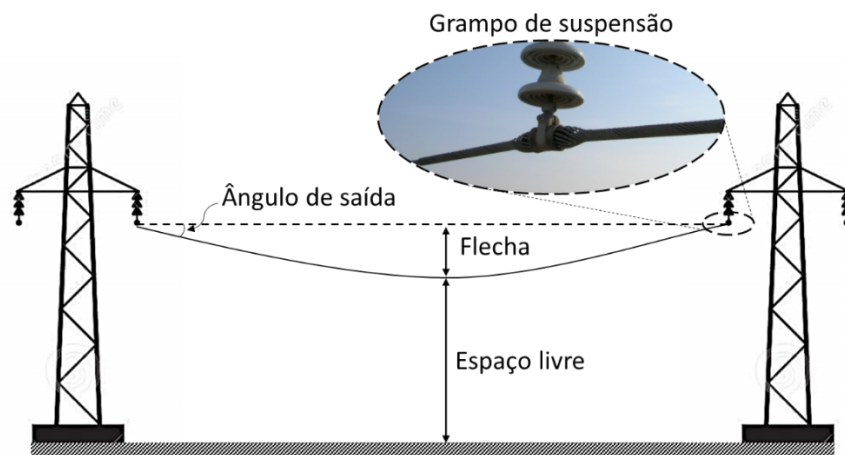


Figura 2.5 – Esquema de um cabo condutor esticado entre duas torres de transmissão

Em relação as características construtivas do condutor, a formação mais comum é a de fios com seção circular dispostos em camadas concêntricas a um fio central, chamado de alma que pode ser fabricada com mesmo material ou de material diferente, como por exemplo aço, fibra de carbono ou um alumínio mais resistente. Um exemplo de configuração de cabo condutor é mostrado na Figura 2.6. O sentido de encordoamento dos fios é sempre feito no sentido oposto de uma camada para outro, com o intuito de manter a integridade construtiva do cabo. Sendo que para cabos de alumínio a convenção usual é que a camada mais externa tenha o sentido de rotação voltado para a direita. Para que as camadas de fios dos condutores com fios de mesmo diâmetro se encaixem corretamente, a camada imediatamente inferior terá seis fios a menos que a camada superior. Devido a necessidade de ajustar a relação entre resistência mecânica e peso do condutor, ainda existe a possibilidade de utilizar fios de diferentes diâmetros.



Figura 2.6 – Estrutura de um cabo condutor típico

A maior parte dos requisitos na seleção e projeto de um condutor estão relacionados às suas propriedades mecânicas. Os aspectos relacionados a parte elétrica estão associados a densidade de corrente, resistência elétrica e perda de energia elétrica, o que pode ser resolvido aumentando a seção transversal do condutor ou utilizando feixe de cabos condutores. Para o ajuste das características mecânicas, são empregados o uso de diferentes ligas de alumínio em diferentes configurações.

Os tipos de cabos mais utilizados em linhas de transmissão aéreas:

- Cabo de Alumínio (CA): Todos os fios desse tipo de condutor são produzidos com alumínio normalmente 1350-H19 ou 1120-H19. Devido à baixa relação resistência por peso, esse tipo de condutor é recomendado para ser instalado em linhas de transmissão com pequenos vãos e áreas onde os carregamentos de vento são baixos.
- Cabo de Alumínio Liga (CAL): Esses condutores são construídos com fios de liga alumínio da série 6000. Essa liga é caracterizada pela adição de silício e magnésio e por passar por um tratamento térmico. Apesar de ter uma resistência mecânica superior à dos CA's a condutividade elétrica é inferior.
- Cabo de Alumínio com Alma de Aço (CAA): Esses cabos são caracterizados por possuírem os fios de aço nas camadas mais internas e fios de alumínio nas camadas mais externas. Os fios de aço asseguram uma maior resistência a tração para o cabo condutor.
- Cabo de Alumínio com Alma de Liga Alumínio (CALA): Os condutores do tipo CALA são constituídos por fios de alumínio nas camadas externas e fios de liga alumínio na alma do condutor. Tanto para os cabos CAA quanto CALA os fios de alumínio são posicionados nas camadas mais externas, isso é feito devido ao efeito pelicular que faz com que a maior parte da corrente passe pela região mais distante do centro do condutor e como o alumínio puro tem uma condutividade maior, ele é posicionado nessas regiões.

2.2.2 Grampos de Suspensão

Grampos de suspensão tem a função primaria de suspender o cabo condutor na torre de transmissão, além disso o grampo deve ter a capacidade de suportar os carregamentos mecânicos impostos pelo condutor em todas as condições de serviço. O grampo de suspensão é o local mais crítico para ocorrência de falhas devido ao movimento oscilatório do cabo condutor e está diretamente relacionado a causa da falha (MCGILL; RAMEY, 1986; SANDBERG, 1949).

A montagem cabo/grampo de suspensão é o local onde o cabo experimenta uma combinação de carregamentos estáticos e dinâmicos que levam a falha por fadiga, por isso a sua importância para a integridade mecânica do condutor. A maneira que o grampo de suspensão afeta a vida em fadiga dos cabos condutores se baseia em como o grampo acomoda o movimento do cabo. A curvatura do grampo, a forma e a quantidade de pressão que é distribuída para o cabo dentro do grampo são os principais fatores que influenciam a resistência a fadiga de condutores (CIGRÉ, 1985; MCGILL; RAMEY, 1986). Existem diferentes configurações de grampos de suspensão que vão afetar de maneira distinta a severidade do fenômeno de fadiga em cabos condutores.

2.2.2.1 Grampo de suspensão metálico

O grampo de suspensão metálico é um grampo de alumínio em que o cabo é acomodado no corpo do grampo e fixo por meio de uma telha na parte superior que é travada utilizando-se de parafusos no formato de U (Figura 2.7). O corpo do grampo possui uma geometria com ângulo de saída em suas extremidades para minimizar a tensão de flexão estática devido a flecha do condutor no vão. Este tipo de grampo de suspensão oferece a menor proteção contra fadiga devido a vibração do cabo. Na montagem com este tipo de grampo, existe um alto carregamento compressivo imposto ao condutor na região do aparafusamento do grampo, o que pode causar danos ou endentações e, além disto, a amplitude de vibração tende a ser maior, uma vez que o condutor não possui armadura pré-formada.



Figura 2.7 - Grampo de suspensão metálico

2.2.2.2 Grampo de suspensão com armadura pré-formada

O grampo de suspensão metálico com armadura pré-formada é idêntico ao citado na seção acima, porém com a adição de varetas pré-formadas ao longo da região do grampo (Figura 2.8). As varetas pré-formadas são fios no formato helicoidal que são montadas em volta do cabo condutor para aumentar a rigidez do cabo. As varetas atuam aumentando a região onde as forças compressivas são distribuídas. Além disto, a camada extra de fios em volta do cabo, aumenta a capacidade de amortecimento do sistema, por meio da fricção entre os fios da armadura e do cabo condutor.



Figura 2.8 - Grampo de suspensão com armadura pré-formada

2.2.2.3 Grampo de suspensão elastomérico

O grampo de suspensão elastomérico tem como característica principal o material elastomérico que é a parte do grampo que faz o contato com o cabo (Figura 2.9). Essa configuração permite que o cabo condutor não sofra danos ou endentações devido ao esforço compressivo e que a tensão de flexão dinâmica seja reduzida, uma vez que este grampo permite que condutor vibre dentro da região acolchoada do grampo.

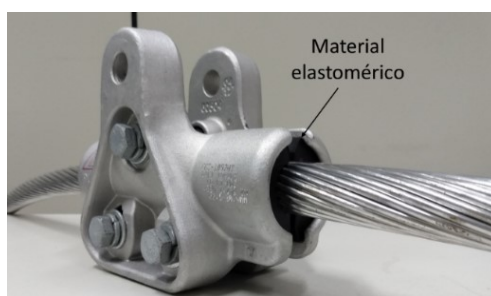


Figura 2.9 - Grampo de suspensão elastomérico

2.2.2.4 Grampo de suspensão armado (HAES)

No grampo de suspensão armado ou HAES (da sigla em inglês) assim como no grampo elastomérico, a parte do grampo que faz contato com o cabo condutor é feita de material elastomérico e como diferencial conta com a adição de varetas de alumínio pré-formadas (Figura 2.10). Este grampo oferece o maior nível de proteção contra a fadiga de cabos, uma vez que ele une as principais vantagens do grampo de suspensão elastomérico e as varetas pré-formadas. A desvantagem deste tipo de grampo é o seu custo elevado e instalação mais complexa, quando comparado com os demais grampos.



Figura 2.10 – Grampo de suspensão armado

2.2.3 Mecanismo de falha em condutores

A vibração do condutor na linha de transmissão ocorre usualmente em formato senoidal, no qual as ondas de vibração percorrem o condutor até o grampo de suspensão. Neste local a curvatura do movimento de vibração é amplificada devido a restrição de movimento que o grampo impõe ao condutor. O aumento da curvatura associada à carga de esticamento do condutor, a carga compressiva do grampo, à tensão de flexão estática provocam a falha dos fios do condutor (Figura 2.11).

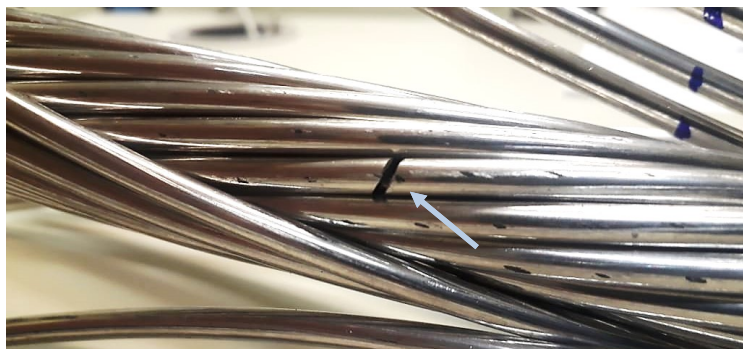


Figura 2.11 – Falha no fio do condutor

Como já explicado, a amplitude de vibração que provoca o aumento da curvatura nas regiões de fixação é função da intensidade do vento e da energia mecânica dissipada pelo sistema. A amplitude de vibração é a causa primária da tensão de flexão dos fios do condutor e também é um dos fatores que determinam o regime de interação entre os fios de camadas adjacentes (ver seção 2.2.4).

Outro fator determinante para o regime de interação entre os fios é a carga de tração do condutor, a qual é distribuída nos fios e faz com que haja um carregamento normal entre os fios de uma camada com os fios da camada adjacente, formando os pontos de contato, nesses locais ocorrerá o *fretting* que é o mecanismo principal para o início das trincas que induzem a falha dos fios (ZHOU et al., 1996).

O *fretting* é o fenômeno já conhecido por reduzir a resistência a fadiga de materiais metálicos (NISHIOKA; HIRAKAWA, 1969a), tal fenômeno ocorre no contato entre dois corpos submetidos a um carregamento dinâmico gerando um pequeno deslocamento relativo entre as partes e os principais parâmetros que influenciam o seu efeito são a pressão de contato e a amplitude de deslizamento (ZHOU; FAYEULLE; VINCENT, 1992). O *fretting* desempenha um papel importante no processo de falha por fadiga de fios de condutores de alumínio (FRICKE; RAWLINS, 1968a). Com isso, a resistência a fadiga de fios individuais não pode ser diretamente relacionada a vida em fadiga de condutores devido ao complexo estado de tensões que ocorre na região de contato (ZHOU et al., 1994b).

A vida em fadiga por *fretting* diminui com o aumento da amplitude de flexão, até certo ponto quando o *fretting* dá lugar ao desgaste, que normalmente é menos crítico por eliminar as trincas presentes

na superfície. Porém no grampo de suspensão sempre haverá uma região onde as forças compressivas são maiores e o deslocamento relativo mais restrito onde ocorrerá o *fretting*.

No mecanismo de falha dos fios do condutor, o grampo de suspensão tem o papel de acomodar a vibração e deve ser projetado para minimizar efeito da tensão de flexão estática – devido ao ângulo de saída do condutor na linha de transmissão – e diminuir a curvatura do condutor – devido a vibração eólica – no ponto de suspensão. Isso ao mesmo tempo que fixa o cabo com pressão o suficiente para garantir que o condutor não escorregue em seu interior.

2.2.4 Pares de contato

Como já mencionado, carregamentos de vento provocam em cabos condutores de energia a vibração eólica. Tal vibração gera tensões dinâmicas que quando associadas as tensões estáticas nas regiões de acoplamento do cabo condutor com os equipamentos das linhas de transmissão (espaçadores, amortecedores de vibração e grampos de suspensão) podem levar a falha por fadiga dos fios do condutor (CLOUTIER et al., 1999). A nucleação das trincas das falhas por fadiga que ocorrem em fios de cabos condutores sempre se iniciam nos pontos de contato (FRICKE; RAWLINS, 1968b). Existem três tipos de contato característicos em uma montagem grampo/condutor:

- i. Contato externo: ocorre entre os fios do condutor e o grampo de suspensão, são identificados por linhas de contato. Tal contato fica mais evidenciado em grampos metálicos, sendo praticamente imperceptíveis em condutores montados em grampos elastoméricos, uma vez que a região acolchoada do grampo se deforma e protege o condutor das forças compressivas da montagem com o grampo;
- ii. Contato interno: formado pelo contato dos fios de camadas diferentes. Devido ao sentido alternado do encordoamento das camadas do condutor, as marcas geradas têm normalmente o formato de elipse e sempre o eixo maior da elipse fica no sentido longitudinal do cabo. Marcas de contato interno podem ser encontradas em qualquer localização do vão, uma vez que apenas a carga de esticamento do condutor é suficiente para provocar uma pressão de contato entre os fios que geram tais marcas. Porém essas marcas são mais perceptíveis na região próxima ao grampo de suspensão;
- iii. Contato lateral: este tipo de contato ocorre entre dois fios consecutivos da mesma camada e se dá na forma de uma linha. Ao contrário dos outros dois tipos de contato, não existe relato na literatura que relaciona o contato lateral com falhas ocorridas em fios de condutores.

Na Figura 2.12 é apresentado a seção transversal de um condutor montado em um grampo de suspensão metálico, onde é indicado a localização de cada tipo de contato, enquanto na Figura 2.13 são apresentadas imagens dos três tipos de contatos característicos encontrados na montagem grampo/condutor.

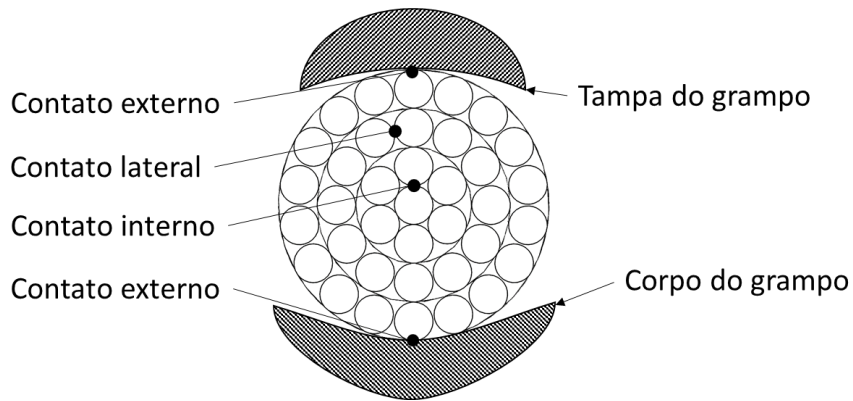


Figura 2.12 – Localização de cada tipo de contato que ocorre na montagem cabo/grampo de suspensão

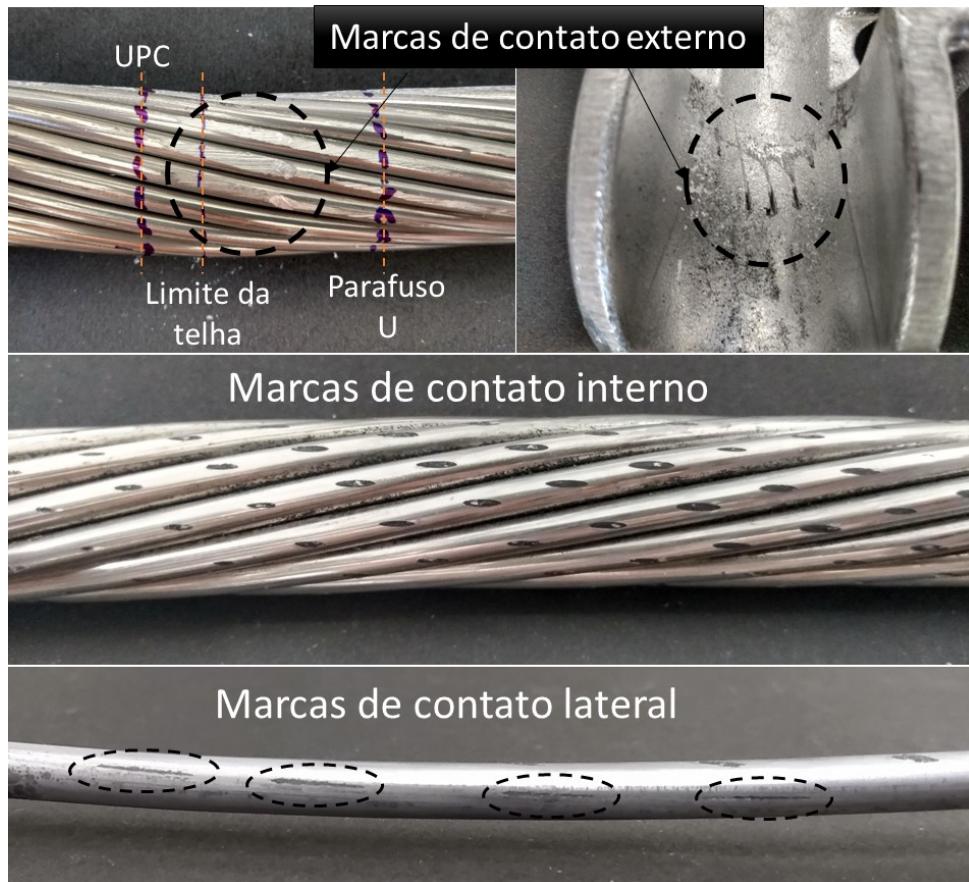


Figura 2.13 – Marcas de contato típicas encontradas na montagem cabo/grampo de suspensão

As marcas de contato internas podem ser classificadas em três tipos de regime: adesão, escorregamento e misto, cada uma associada a uma condição de deslocamento e pressão entre os fios. Quando o condutor vibra a carga de tração do condutor faz com que as camadas do cabo pressionem uma à outra, inicialmente, isso faz com que não haja deslizamento (zona de adesão) entre os fios por conta da força de atrito entre eles. Com o aumento do deslocamento, o atrito começa a ser vencido e a região mais externa da zona de contato começa a deslizar (zona de escorregamento), neste momento o desgaste se inicia na região onde há o deslocamento relativo, indicado na Figura 2.14. Tal desgaste libera

detritos – partículas de alumínio que oxidam e formam óxidos de alumínio (Al_2O_3) – que atuam como lubrificantes (OUAKI et al., 2003), favorecendo o deslocamento relativo entre os fios. À medida que o deslocamento aumenta toda a zona de contato passa deslocar relativamente ao fio da camada adjacente, nesse momento o regime de interação passa a ser denominado de escorregamento. Uma imagem de cada tipo de marca de contato é apresentada na Figura 2.15. As características principais das marcas de contato de cada regime são:

- i. As marcas de adesão estão associadas as deformações plásticas e a não ocorrência de deslizamento e nem degradação dos fios (ZHOU et al., 1994a). Estas marcas são tipicamente encontradas no interior do grampo de suspensão, onde as forças compressivas são maiores;
- ii. As marcas de escorregamento são associadas ao deslocamento total entre fios com uma menor pressão de contato. O escorregamento provoca o desgaste dos fios e é caracterizado por uma marca com a superfície enegrecida devido a oxidação do material. O desgaste expande a área de contato e reduz as forças de tração tangenciais por conta do efeito lubrificante do material desgastado.
- iii. As marcas que apresentam os dois tipos de contato, adesão e escorregamento, são chamadas de marcas de regime misto. Estas marcas são caracterizadas por zonas de escorregamento parcial nas bordas e uma zona de adesão no centro. As marcas de regime misto são tipicamente encontradas no último ponto de contato entre o cabo e grampo de suspensão e são normalmente associadas a ocorrência de *fretting* (BHATTI; ABDEL WAHAB, 2018).

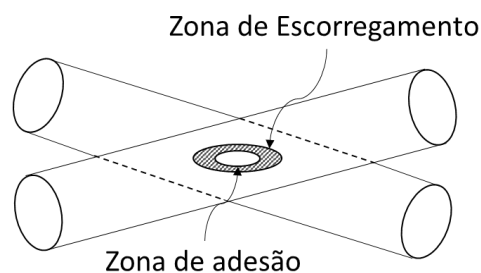


Figura 2.14 – Representação do contato entre dois fios de camada adjacentes

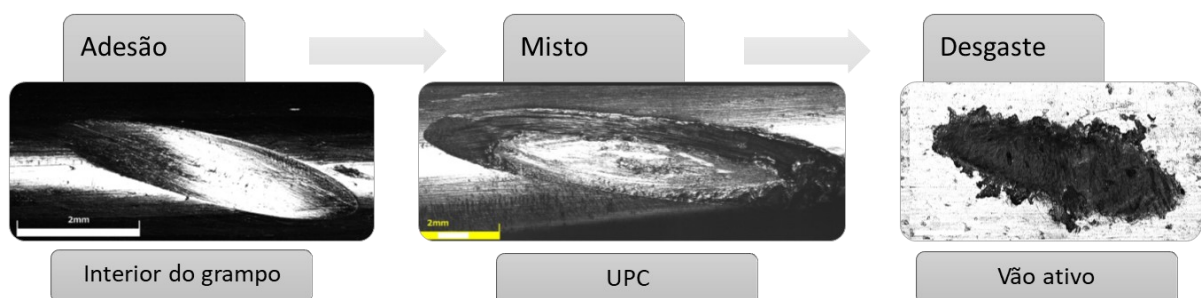


Figura 2.15 – Marcas de contato típicas encontradas em montagens com grampo metálico

A Figura 2.16 ilustra o comportamento da vida em fadiga de um componente submetido a um deslocamento relativo. No regime misto, onde o *fretting* ocorre, a vida em fadiga é severamente afetada devido ao estado de tensões e a nucleação de trincas na região de contato. Já no regime de escorregamento total as trincas são rapidamente eliminadas pelo desgaste, elevando a vida em fadiga do componente para valores próximos ao registrado no regime de adesão onde não há a ocorrência do *fretting*. Com relação a mudança de um regime para outro, observa-se que ao aumentar o deslocamento existe a migração do regime de adesão para o escorregamento passando pelo regime misto e o contrário ocorre ao aumentar a força de contato, mantendo-se o deslocamento constante (NISHIOKA; HIRAKAWA, 1969b; NISHIOKA; KENJI, 1972).

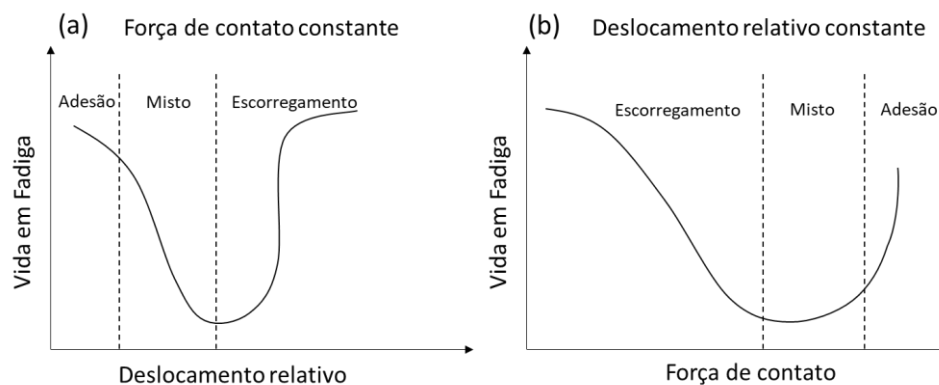


Figura 2.16 –Diagramas esquemáticos da vida em fadiga sob variação do (a) deslocamento relativo e da (b) força de contato (VINGSBO; SÖDERBERG, 1988)

No contexto de cabos condutores a força de contato e o deslocamento entre os fios está diretamente relacionada a forma como o grampo de suspensão acomoda o condutor (ZHOU et al., 1996). O grampo deve prender o condutor para evitar o deslizamento, mas de forma que provoque o menor dano ao condutor. Como descrito na Seção 2.2.2, existem diversos tipos de grampos que são empregados em linhas de transmissão e que vão afetar de forma distinta a interação entre os fios do cabo condutor acomodado no seu interior.

2.2.5 Parâmetros de intensidade de vibração

Uma vez que o fenômeno de falha e as tensões envolvidas no processo de fadiga de fios de condutores são complexas, faz-se necessário adotar parâmetros que quantifiquem a severidade da intensidade de vibração e que possam ser correlacionados com a vida em fadiga de cabos condutores. Diversos parâmetros foram utilizados no projeto e avaliação da vida remanescentes de cabos condutores ao longo dos anos (EPRI, 2006; GUÉRARD; VAN DYKE; LILLIEN, 2009; TEBO, 1941). Os principais parâmetros para medição da intensidade de vibração de cabos condutores encontrados na literatura são:

- Amplitude de vibração no antinó (y_{max});
- Amplitude de flexão (Y_b);
- Ângulo de deformação do condutor próximo ao grampo (β);
- Deformação dinâmica (ε) nos fios do condutor medida próximo ao ponto de fixação.

Na Figura 2.17 é apresentado esquematicamente um condutor vibrando com uma excitação senoidal e cada um dos parâmetros de intensidade de vibração com seus respectivos pontos de medição.

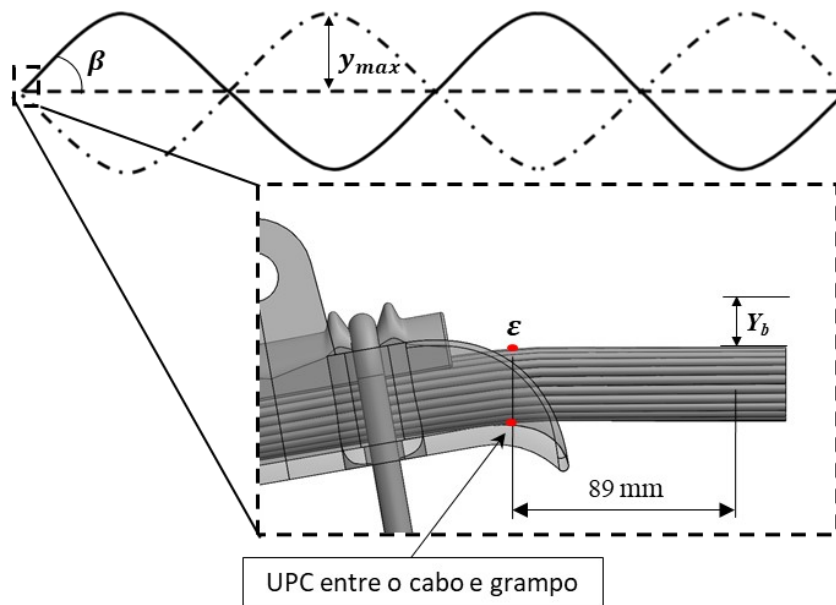


Figura 2.17 – Representação esquemática dos parâmetros utilizados na medição da intensidade de vibração de cabos condutores

O parâmetro y_{max} é a amplitude de vibração no antinó (zero a pico), ou seja, a máxima amplitude de vibração no vão. Porém, tal parâmetro é inviável de ser medido em campo, uma vez que a posição do antinó varia de acordo com a frequência de vibração do condutor que, como visto na seção 2.1, depende da velocidade do vento. Portanto, sua utilização se limita apenas ensaios em laboratório e simulações computacionais.

O ângulo de deformação (β) e a deformação nos fios do condutor (ε) necessitam de uma instrumentação complexa e são difíceis de serem empregados em linhas energizadas, também limitando a sua utilização a ensaios laboratoriais. Já a amplitude de flexão (Y_b) – que é a amplitude de vibração (pico a pico) medida, usualmente, a 89 mm do último ponto de contato (UPC) entre o cabo e grampo de suspensão (TEBO, 1941) – pode ser medida por meio de equipamentos denominados vibrógrafos que são instalados sobre o condutor ou abaixo do grampo suspensão. Por conta disto o IEEE recomendou em 1966 que seja utilizado a amplitude de flexão, Y_b , como parâmetro para medição da amplitude de vibração para avaliação da fadiga de condutores tanto em campo como em laboratório (IEEE, 1966).

2.2.6 Tensão de flexão idealizada

Apesar da amplitude de flexão possuir maior praticidade para medição da intensidade de vibração, este parâmetro ainda não resolvia o problema. Pois, um parâmetro de deslocamento absoluto não seria suficiente para representar as tensões que induzem a falha em diferentes tipos e diâmetros de cabos e diferentes montagens cabo grampo.

Em 1965 Poffenberger e Swart (POFFENBERGER; SWART, 1965) formularam uma expressão para o cálculo de uma tensão nominal nos fios do condutor, próximos ao UPC entre o cabo e grampo de suspensão. Esta tensão é usada apenas como uma tensão de referência, de modo a comparar a intensidade de vibração em diferentes cabos condutores, e não expressa as tensões que levam a falha nos pontos de iniciação de trinca nos fios do condutor. Apesar disso, a chamada fórmula de Poffenberger-Swart tem sido uma ferramenta muito utilizada por pesquisadores e engenheiros de campo para a avaliação da severidade das vibrações em cabos condutores de energia (CLOUTIER et al., 1999; FADEL et al., 2012; IEEE, 1966; KALOMBO et al., 2019).

A equação proposta por Poffenberger-Swart se baseia na correlação entre o deslocamento vertical medido próximo ao grampo, Y_b , (Figura 2.17) e um fator de correlação, K , que leva em consideração as características geométricas e materiais e carga de tração do condutor (Eq. (2.4)). Poffenberger e Swart assumiram na formulação que a equação generalizada de deflexão do condutor pode ser obtida pela superposição da equação de deflexão de uma viga em duas situações. A primeira é de uma viga apoiada em grampos articulados, submetida a uma força de tração axial, T , e um carregamento distribuído em formato senoidal (w) de uma corda vibrando (Figura 2.18(a)). Na segunda situação, consideraram a mesma viga, tracionada com a mesma carga axial, mas ao invés de um carregamento distribuído é aplicado um momento na extremidade do vão onde fica localizado o grampo de suspensão (Figura 2.18(b)). A combinação da deflexão das duas situações pelo método da superposição pode ser vista na Figura 2.18(c).

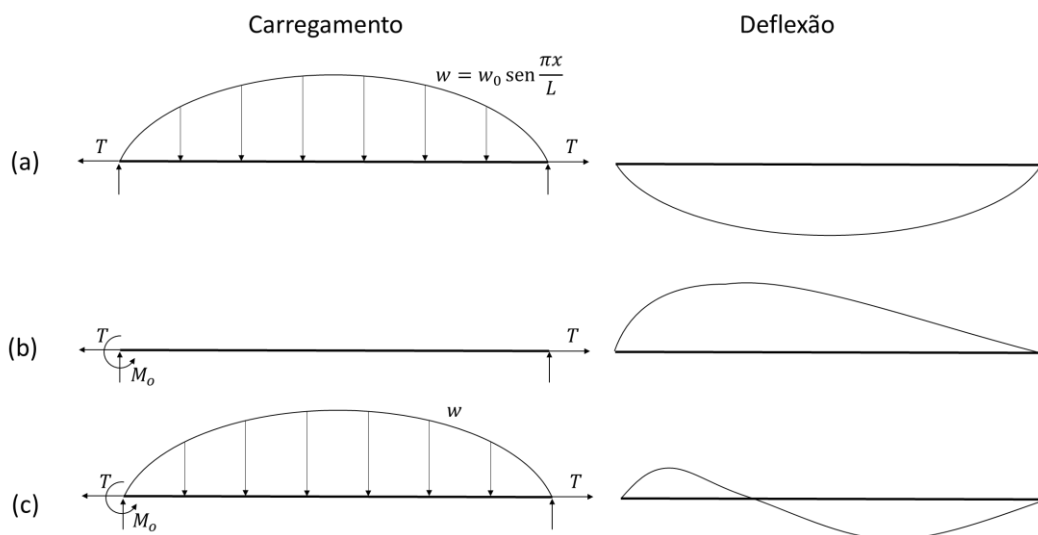


Figura 2.18 - Curvas de carregamento e deflexão de uma viga utilizadas na formulação de P-S. (a) Carregamento distribuído senoidal e carga de tração, (b) Momento na extremidade esquerda e carga de tração, (c) combinação dos carregamentos (a) e (b)

Um das considerações feitas no desenvolvimento da equação é de que o condutor no grampo de suspensão é totalmente fixo contra a rotação, implicando em uma curvatura nula na extremidade do vão. Essa consideração pode ser satisfeita se a medição da amplitude de flexão for feita em relação a um grampo totalmente fixo. Ainda para simplificar os cálculos é considerado uma carga de tração superior a 10% da resistência mecânica do condutor e que o comprimento de onda seja de no mínimo 1143 mm.

A partir da observação de marcas de *fretting* entre os fios do condutor, que indicam a existência de movimento relativo entre os fios do condutor, os autores consideraram que cada fio do condutor flexiona individualmente em torno de seu próprio eixo neutro. Essa abordagem implica que a rigidez a flexão do condutor assume o seu valor mínimo, sendo calculada pelo somatório da rigidez a flexão individual de cada fio do condutor. Porém como apontado por Papailiou, (1997), essa consideração só pode ser válida para valores elevados de deslocamento do condutor, uma vez que a rigidez a flexão do condutor varia entre o valor máximo e mínimo a depender da amplitude de deslocamento. Para baixas amplitudes, os fios do condutor estão aderidos e o condutor age como uma barra sólida e à medida que o deslocamento aumenta os fios do condutor passam a deslizar um sobre o outro fazendo com que a rigidez a flexão diminua até próximo de seu valor mínimo. Esse comportamento é ilustrado na Figura 2.19.

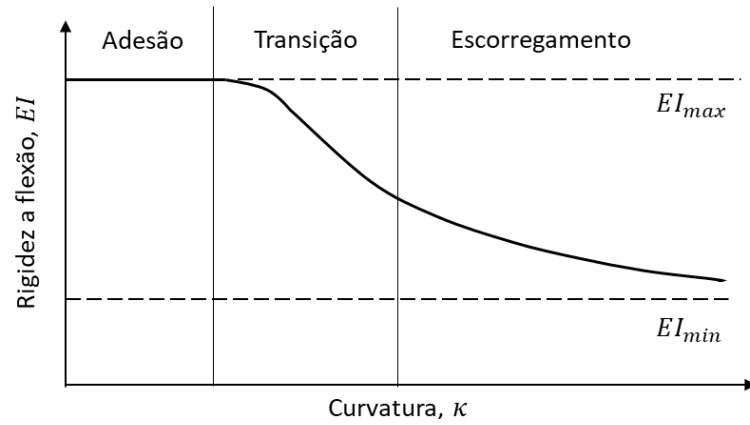


Figura 2.19 – Rigidez a flexão do condutor em função da curvatura do condutor (PAPAILIOU, 1997)

2.2.6.1 Equação de Poffenberger-Swart, $\sigma_a(Y_b)$

A Equação (2.4) é a proposta por Poffenberger-Swart (P-S) para correlacionar a tensão nominal, $\sigma_a(Y_b)$, em um fio da camada mais externa do condutor com o deslocamento vertical, Y_b , medido em relação ao grampo de suspensão.

$$\sigma_a(Y_b) = K_{Y_b} Y_B \quad (2.4)$$

onde $\sigma_a(Y_b)$ é a tensão dinâmica (zero a pico), Y_B corresponde a amplitude de deslocamento (pico-pico). O valor de K_{Y_b} é o fator de correlação de P-S que leva em consideração as características construtivas do cabo, a carga de esticamento e a distância entre o grampo e o ponto de medição da amplitude de deslocamento (Eq. (2.5)).

$$K_{Y_b} = \frac{E d_f p^2}{4(e^{-px} - 1 + px)} \quad (2.5)$$

Em que E e d_f são o módulo de elasticidade e diâmetro dos fios da camada mais externa do condutor, respectivamente. A variável x é o braço de alavanca medido entre o último ponto de contato (UPC) entre o cabo e grampo e o ponto de medição de Y_B , o qual é usualmente adotada como 89 mm (TEBO, 1941). O parâmetro de rigidez p pode ser obtido a partir da Equação (2.6).

$$p = \sqrt{\frac{T}{EI}} \quad (2.6)$$

onde T é a carga de esticamento do cabo em Newton e EI é a rigidez a flexão do condutor, onde assume-se que os fios do condutor vibram de forma independente e a flexão ocorre entorno da própria linha neutra do fio, portanto a rigidez a flexão é calculada pelo somatório da rigidez dos fios individuais conforme a Equação (2.7):

$$EI_{min} = n_f E_f \frac{\pi d_f^4}{64} \quad (2.7)$$

onde n_f , E_f e d_f representam respectivamente, o número de fios, o módulo de elasticidade e o diâmetro dos fios de alumínio.

2.2.6.2 Tensão nominal $\sigma_a(fy_{max})$

Em algumas circunstâncias, como por exemplo, em ensaios laboratoriais no grampo HAES (ver seção 2.2.2.4), pode ser mais prático utilizar o deslocamento y_{max} para medir a intensidade de vibração em condutores, ou ainda o parâmetro fy_{max} que é o deslocamento no antinó, y_{max} , multiplicado pela frequência de excitação, f durante o movimento vibratório do condutor. Tal parâmetro pode ser correlacionado com uma tensão nominal por meio da Equação (2.8), onde $K_{fy_{max}}$ é o fator de correlação do parâmetro fy_{max} , Eq. (2.9).

$$\sigma_a(fy_{max}) = K_{fy_{max}} fy_{max} \quad (2.8)$$

$$K_{fy_{max}} = \pi d_f E_f \sqrt{\frac{m}{EI}} \quad (2.9)$$

onde, m é a massa do condutor por unidade de comprimento e as demais variáveis são as mesmas consideradas para o cálculo das Equações (2.5) a (2.7).

A tensão nominal $\sigma_a(fy_{max})$ é deduzida a partir da consideração que o condutor é tracionado e apoiado em um grampo rigidamente fixo enquanto vibra em formato de ondas estacionárias. Assume-se também que o formato do condutor deformado ao grampo é diferente do restante do vão e esta região é significativamente menor que o comprimento do *loop*. A dedução completa dessa formulação é descrita em EPRI, (2006) e GOUDREAU et al., (2010). Nestas referências também é descrita dedução para a formulação de correlação entre o ângulo de deformação do condutor, β (Eq. (2.10)), e a tensão de flexão nominal (Eq. (2.11))

$$\beta = \frac{2\pi fy_{max}}{\sqrt{T/m}} \quad (2.10)$$

$$\sigma_a(\beta) = \frac{d_w E_a}{2} \sqrt{\frac{T}{EI}} \beta \quad (2.11)$$

É importante alertar que as tensões calculadas por meio das Equações (2.4), (2.8) e (2.11) quando calculadas para a mesma situação não apresentam o mesmo valor e não também correspondem ao

complexo estado de tensões nos fios do cabo condutor (COSMAI et al., 2017). Por conta disso, sempre que uma tensão nominal é utilizada para avaliação ou comparação da vida em fadiga de cabos condutores, deve ser especificado o parâmetro utilizado para o cálculo da tensão nominal.

O cálculo das tensões alternadas por meio das Equações (2.4), (2.8) e (2.11) não é válida para grampos com armaduras pré-formadas e nem grampos feitos de materiais elastomérico (CLOUTIER et al., 2009), uma vez que essas configurações não se adequam a hipótese de que próximo ao grampo o cabo condutor vibra como uma barra fixada em um suporte rígido sob o efeito de uma tensão de deflexão. Para o caso de grampos com materiais elastoméricos o Cigré (1995) recomenda que o fator de correlação K seja determinado por meio de ensaios de vibração realizados em laboratório.

2.3 Limites de resistência de cabos condutores

Os valores tensão obtidos por meio das Equações (2.4) e (2.8) ou por meio das medições de extensômetros podem ser aplicados na avaliação da severidade dos danos causados pela vibração eólica por meio de três métodos:

- 1) Metodologia IEEE (1966) – Máxima deformação de flexão admissível;
- 2) Metodologia EPRI (1979) (2006) – Limites de resistência à fadiga;
- 3) Metodologia CIGRÉ WG 22-04 (1985) – Curva de segurança e dano cumulativo.

2.3.1 Limite de deformação (IEEE, 1966)

Como forma de determinar o limite de resistência a fadiga de condutores o IEEE recomenda que a máxima deformação do condutor durante a vibração seja de $150 \mu m/m$ no UPC entre o cabo e o grampo. A própria recomendação do IEEE considera que este valor pode ser muito conservativo e sugere que valores da ordem de $200 \mu m/m$ podem ser considerados seguros. Para chegar nesses valores o IEEE utilizou como parâmetro ensaios de fadiga realizados em condutores CAA montados em grampos de suspensão metálicos. As deformações propostas pelo IEEE considerando o módulo de elasticidade do alumínio igual a 69 GPa correspondem a tensões entre 10,35 - 13,80 MPa.

2.3.2 Limite de resistência a fadiga

O EPRI (1979) utilizou dados de diversos trabalhos que relataram ensaios de fadiga em condutores CAA montados em grampos metálicos para estabelecer uma recomendação para o limite de resistência à fadiga. A metodologia sugerida pela EPRI se baseia em calcular as tensões por meio da fórmula de P-S (2.4) e comparar com o limite resistência a fadiga de condutores, o qual é dado em função do número de camadas de alumínio para os condutores CAA. Em 2006 uma nova publicação do EPRI (2006) também trouxe recomendações para condutores de alumínio liga. Estes valores estão indicados na Tabela 3.

Tabela 3 – Limite de resistência a fadiga de condutores segundo a EPRI

| Tipo de Conductor | Número de camadas de alumínio | Limite de Resistência a fadiga (MPa) |
|-------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| CAA | 1 | 22 |
| | >1 | 8,5 |
| CAL | ≥1 | 15,0 |

2.3.3 Curva de segurança e dano cumulativo

Uma outra metodologia para a abordagem da vida fadiga foi sugerida pelo Cigré (1979, 1988). Essa metodologia utiliza a teoria do dano cumulativo de Miner (1945) para prever a vida remanescente da montagem cabo grampo. A regra de Miner considera que o material irá falhar quando o dano acumulado de todos os ciclos de tensão alcançarem um determinado valor (BRUNAIR; ED RAMEY; DUNCAN, 1988). Para o caso da metodologia do Cigré este valor é referenciado de acordo com: (i) a Curva de Segurança da CIGRÉ (CSBL - sigla em inglês), a qual foi gerada a partir de ensaios experimentais e estabelece um limite de segurança conservativo para vida em fadiga de cabos condutores; ou (ii) curvas de fadiga produzidas em laboratório para um condutor específico.

De forma prática, a intensidade de vibração em uma linha de transmissão pode ser medida por meio de vibrógrafos e com as amplitudes de vibração adquiridas, convertê-las em tensão por meio da Eq. (2.4) e, a partir disso, estimar o dano causado por cada ciclo de vibração, comparando as tensões registradas com as tensões admissíveis da CSBL. É possível ainda considerar que o condutor estará sujeito as mesmas condições de vibração durante todo o tempo de serviço e estimar a vida remanescente do mesmo. A CSBL para condutores multicamada é dada pela Equação (2.11), em que N é o número de ciclos e σ_{CSBL} é a tensão admissível.

$$\sigma_{CSBL} = \begin{cases} 450 N^{-0,2} & \text{para } N \leq 1,56 \times 10^7 \text{ Ciclos} \\ 263 N^{-0,17} & \text{para } N > 1,56 \times 10^7 \text{ Ciclos} \end{cases} \quad (2.11)$$

2.4 Parâmetros de projeto para carga de esticamento do condutor

Cabos condutores quando estão instalados em linhas de transmissão estão submetidos a uma carga de tração, também chamada de carga de esticamento (T). A carga de tração é de fundamental relevância no projeto de uma linha de transmissão, pois impacta diversos fatores, tais como, a vida útil do condutor, uma vez que carga de esticamento mais elevada acelera o processo de fadiga (FADEL et al., 2012; KALOMBO et al., 2017, 2019) e reduz o autoamortecimento do condutor (MIRANDA et al., 2019). Por outro lado, uma carga de esticamento menor vai aumentar a flecha do vão (Figura 2.5) que por sua vez,

é fundamental no projeto das torres de transmissão, fazendo com que exista a necessidade de construir torres maiores e mais resistentes, além de uma fundação mais robusta, encarecendo o projeto da linha de transmissão.

Portanto, a seleção da carga de esticamento é um dos requisitos para otimização do projeto de linhas de transmissão de energia. Dois parâmetros são empregados atualmente no projeto de linhas de transmissão para definir a tração horizontal do condutor: o parâmetro EDS que leva em consideração a carga máxima de ruptura do condutor e o parâmetro H/w que estabelece limites para a relação entre a carga de esticamento em kgf, H , e a massa linear do condutor, w .

2.4.1 Parâmetro EDS

Por muitos anos o CIGRÉ (*Conseil International des Grands Réseaux Électrique*) sugeriu o uso do parâmetro EDS (*Every Day Stress*) para o projeto de linhas de transmissão visando a proteção contra falhas por fadiga, esse parâmetro é expresso em termos da porcentagem da Tensão Limite de Ruptura do condutor. O parâmetro EDS foi estudado e estabelecido por um grupo do Cigré denominado “EDS Panel” e publicado em 1960 (ZETTERHOLM, 1960). As recomendações de níveis de EDS do Cigré de acordo com o tipo de condutor e os equipamentos de proteção instalados na linha de transmissão são reportados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores de EDS recomendados pelo CIGRÉ

| Tipo de condutor | Sem proteção | Amortecedor | Armadura pré-formada | Armadura e amortecedor |
|---------------------|--------------|-------------|----------------------|------------------------|
| Condutores de cobre | 26 | - | - | - |
| CAA | 18 | 22 | 24 | 24 |
| CA | 17 | - | - | - |

2.4.2 Parâmetro H/w

Foi observado que alguns cabos condutores falharam apesar de seguirem os valores recomendados de EDS, o que indica que este parâmetro pode ser insuficiente para explicar as falhas encontradas, principalmente para cabos com configurações diferentes daquelas encontradas até a realização do estudo pelo Cigré. Com o propósito de abranger diferentes tipos de condutores o mesmo Comitê propôs em como substituição ao parâmetro EDS um novo parâmetro, denominado H/w , (razão entre carga de tração H e massa por unidade de comprimento do condutor w) com o objetivo de mitigar o efeito da carga de esticamento na fadiga em cabos condutores.

O parâmetro H/w , também chamado de constante de catenária, apresenta uma série de vantagens como critério guia em relação ao estudo de fadiga em cabos condutores se comparado ao EDS. Apesar

de ainda não representar a solução definitiva para este estudo, o H/w abrange mais informações para a comparação de vida em fadiga e comportamento vibratório entre os diferentes condutores.

Os valores máximos de H/w sugeridos pela CIGRÉ (2005), para um dimensionamento seguro da linha de transmissão contra falhas por fadiga são em função do terreno onde a linha será instalada. A formação do terreno influencia na intensidade das vibrações eólicas, isso devido ao fato de que ventos laminares (ocorrem em terrenos planos) geram movimentos mais severos que ventos em regimes turbulentos. A Tabela 5 apresenta os valores de recomendados de H/w de acordo com a categoria do terreno. O valor mínimo admissível é de 1000 m para terrenos planos, onde os carregamentos devido a ação do vento tendem a ser maiores. É importante ressaltar que os valores da Tabela 5 são validos para condutores sem armadura e não amortecidos do tipo CA, CAA, CAL e CALA.

Tabela 5 – Valores recomendados de H/w em função do terreno (CIGRÉ, 2005)

| Categoria de Terreno | Características do Terreno | $(H/w)_{adm}$ [m] |
|----------------------|--|-------------------|
| 1 | Aberto, plano, sem árvores ou obstrução e com cobertura de neve ou próximo a grandes corpos d'água ou desertos planos. | 1000 |
| 2 | Aberto, plano, sem obstrução e sem cobertura de neve. | 1125 |
| 3 | Aberto, plano ou com ondulações com poucos obstáculos, sebes e barreiras, pradarias, tundra. | 1225 |
| 4 | Terreno com construções ou árvores, florestas e arbustos. Pequenos campos com arbustos, árvores e cercas. | 1425 |

3 MATERIAIS E MÉTODOS PARA ENSAIOS DE VIBRAÇÃO EM CONDUTORES

O presente capítulo se propõe a apresentar a bancada experimental de fadiga em cabos condutores, bem como as adaptações feitas para que fosse possível a utilização de grampos de suspensão dos tipos HAES, elastomérico e metálico com armadura. Neste capítulo também é descrito de forma detalhada a geometria e características dos condutores e grampos utilizados nesse trabalho.

3.1 Cabos condutores

Foram utilizados dois tipos de cabos condutores ao longo de toda a campanha experimental, os quais possuem resistência elétrica equivalente e são fabricados a partir de diferentes ligas de alumínio. Sendo eles, o Cabo de Alumínio Liga 6201-T81 com seção de 900 MCM (CAL/6201 900 MCM) e Cabo de Alumínio 1120-H19 com seção de 823 MCM (CA/1120 823 MCM). Ambos possuem 37 fios de seção circular, encordoados em três camadas concêntricas a um fio central. A Tabela 6 apresenta as características mecânicas de cada condutor.

Tabela 6 - Propriedades dos cabos condutores CAL/6201 900 MCM e CA/1120 823 MCM

| Propriedades | Cabo Condutor | |
|-------------------------------|---------------|-------------|
| | CA 823 MCM | CAL 900 MCM |
| Carga de Ruptura (kN) | 91,2 | 131,6 |
| Massa Linear (kg/km) | 1150,8 | 1250,9 |
| Alumínio dos Fios | 1120 | 6201 |
| Tratamento da Liga | H19 | T81 |
| Diâmetro Nominal do Cabo (mm) | 26,53 | 27,72 |
| Diâmetro dos Fios (mm) | 3,79 | 3,96 |
| Número de Fios | 37 | 37 |

Como mencionado, o alumínio que forma cada condutor é diferente em sua constituição. A liga de alumínio 6201-T81 possui os elementos magnésio e silício na composição, o que confere a capacidade de ser tratada termicamente e possuir uma elevada ductilidade quando comparada com outras ligas de alumínio termicamente tratáveis. A ductilidade desta liga é uma característica fundamental no processo de fabricação de fios de condutores, uma vez os fios são feitos por meio da trefilação do alumínio. A designação T81 na nomenclatura deste alumínio se refere ao tratamento térmico que este recebeu durante o processo de fabricação, que no caso foi a solubilização seguido de envelhecimento artificial. Já o alumínio 1120-H19 é um alumínio comercialmente puro, o qual é composto de 99,2% de alumínio com

pequenas adições controladas de magnésio, cobre e ferro. Este alumínio não é tratável termicamente, o que confere a ele um menor custo de fabricação, sendo a designação H19 uma referência ao nível de encruamento que o material sofre durante o processo de fabricação do fio.

Comparando diretamente os tipos de alumínio, temos que o Al 6201 possui propriedades mecânicas superiores enquanto o Al 1120 apresenta propriedades elétricas mais adequadas para a transmissão de energia elétrica. Se por um lado condutores formados pelo Al 6201 podem ter uma carga de tração maior, reduzindo os custos com a metragem do condutor lançado na linha de transmissão, por outro lado condutores fabricados a partir do Al 1120 possuem a capacidade de transmitir mais energia elétrica para uma mesma seção transversal, o que reduz a quantidade de material utilizado na fabricação e consequentemente o peso que é suportado pelas torres de transmissão.

As propriedades elétricas são apresentadas na Tabela 7. Na Figura 3.1 e na Tabela 8 são apresentadas as diferenças das propriedades mecânicas dos dois alumínios (VIEIRA, 2020), vale ressaltar que os dados da Tabela 8 foram obtidos a partir de ensaios realizados com amostras retiradas dos fios das mesmas bobinas dos condutores utilizados do desenvolvimento do presente trabalho. Estes dados mostram que o alumínio 6201 possui maior limite de resistência a tração, escoamento e dureza, quando comparado com o alumínio 1120.

Tabela 7 – Propriedades elétricas dos alumínios 6201-T81 e 1120-H19

| Propriedades | Alumínio | |
|--|----------|----------|
| | 6201 T81 | 1120 H19 |
| Condutividade (% IACS) | 59 | 65 |
| Resistividade (Ohm.mm ² /m) | 0,0328 | 0,0293 |
| Coefficiente da variação da resistência com a temperatura (k°C ⁻¹) | 3,47 | 3,90 |

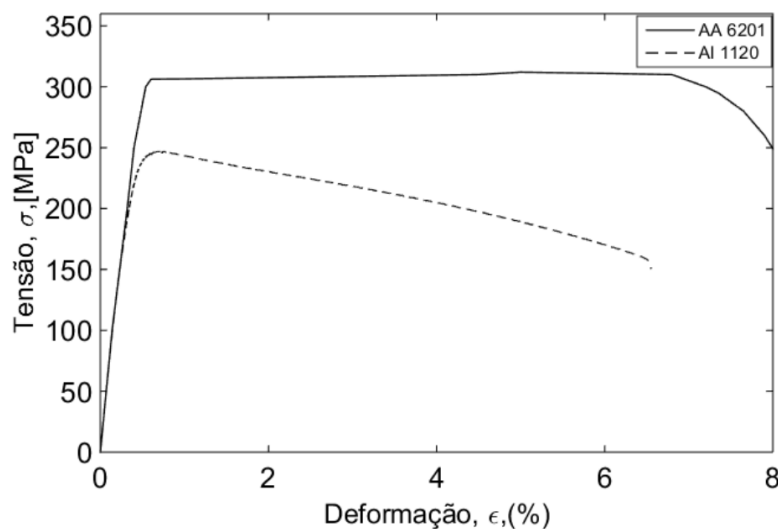


Figura 3.1 – Curvas tensão em função da deformação dos alumínios 6201-T81 e 1120-H19. (VIEIRA, 2020)

Tabela 8 – Propriedades mecânicas estáticas dos alumínios 6201-T81 e 1120-H19 (VIEIRA, 2020)

| Propriedades | Alumínio | |
|---------------------------------------|----------|----------|
| | 6201 T81 | 1120 H19 |
| Módulo de elasticidade (GPa) | 63 | 65 |
| Tensão de escoamento (MPa) | 306 | 245 |
| Resistência a tração (MPa) | 311 | 248 |
| Tensão de ruptura (MPa) | 249 | 150 |
| Dureza Vickers (HV) | 90 | 56 |
| Massa específica (g/cm ³) | 2,703 | 2,700 |

3.2 Grampos de Suspensão

Nesta seção serão apresentadas as características geométricas de cada um dos grampos de suspensão utilizados neste trabalho. A relevância e as características gerais dos grampos são discutidas no Capítulo 2.

3.2.1 Grampo de suspensão metálico

O grampo de suspensão metálico é composto por duas partes fabricadas em alumínio e a união destas duas partes e o cabo condutor é feita por meio de parafusos em U, os quais são apertados com um torque de 50 N.m. As duas partes que compõe este grampo são: (i) corpo do grampo, onde o cabo é acomodado, esta parte possui dois pares de furos que distam 35 mm do centro do grampo para a passagem de parafusos em U. O corpo do grampo possui um comprimento de 200 mm, um ângulo de saída nas extremidades de 20° (Figura 2.7) e o diâmetro interno apropriado para acomodar cabos condutores com diâmetros de 14 mm a 29 mm. (ii) A Telha do grampo fica na parte superior do conjunto e evita o contato direto dos parafusos em U com o condutor, distribuindo a carga de aperto ao longo de um comprimento de 132 mm. As partes que compõe o grampo de suspensão metálico são apresentadas na Figura 3.2.

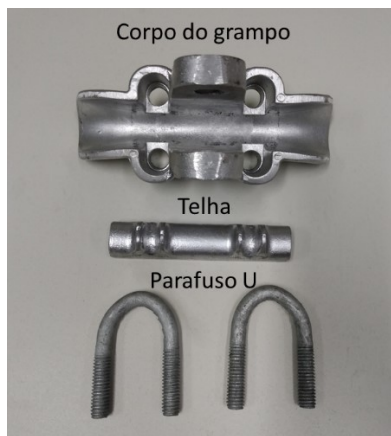


Figura 3.2 – Partes do grampo de suspensão metálico

3.2.2 Grampo de suspensão metálico com armadura

O grampo de suspensão metálico com a armadura é essencialmente o mesmo grampo da subseção anterior com a adição de um conjunto de varetas pré-formadas no condutor antes da montagem do grampo de suspensão metálico (Figura 3.3). São aplicadas no condutor um total de 12 varetas pré-formadas helicoidalmente com o centro das varetas coincidindo com o centro do grampo de suspensão, cada vareta possui diâmetro de 7,87 mm e 2,4 m de comprimento, que formam a chamada armadura do condutor. O grampo de suspensão metálico possui um comprimento de 260 mm, telha de 170 mm, ângulo de saída de 20° e é apropriado para comportar diâmetros de 35 mm a 45 mm, suficiente para acomodar o condutor e o diâmetro adicional da armadura pré-formada. Nesse grampo, o torque de aperto dos parafusos em U também é de 50 N.m.

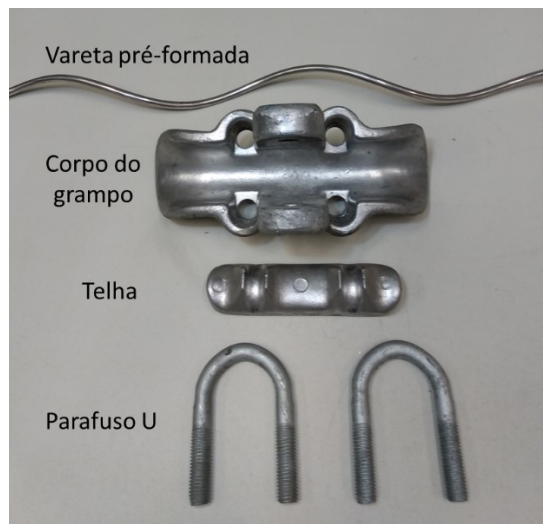


Figura 3.3 – Partes do grampo de suspensão metálico com armadura

3.2.3 Grampo de suspensão elastomérico

O grampo elastomérico é composto por duas partes simétricas de alumínio que se encaixam lateralmente no cabo (Figura 3.4) e são fixas um a outra por meio de três parafusos que comprimem lateralmente o condutor com um torque 54 N.m. O contato do cabo com o grampo se dá apenas nas extremidades do grampo, as quais são feitas de material elastomérico com diâmetro interno para acomodar condutores com diâmetro de 22,45 mm a 30,38 mm e possui uma espessura de 10 mm com comprimento de 39,5 mm. Ensaios realizados pela Técnica de Excitação por Impulso indicaram que o material elastomérico possui um módulo de elasticidade de 0,4 GPa.



Figura 3.4 – Vista da parte interna do grampo elastomérico

3.2.4 Grampo HAES

O grampo HAES é composto por duas partes simétricas de material elastomérico EPDM (etileno-propileno-dieno), denominadas coxim, que se encaixam para acomodar o condutor. Por cima do coxim são montadas varetas pré-formadas. Dessa forma, na região de suspensão, o condutor fica em contato apenas com o material elastomérico. O coxim possui 250 mm de comprimento e diâmetro externo na saída do grampo de 26,5 mm. As varetas pré-formadas possuem um diâmetro de 7,87 mm e um comprimento 2038 mm cada. A fixação do grampo na torre de transmissão se dá por duas sapatas que compõem um invólucro metálico de 140 mm de comprimento e uma abraçadeira que envolve o coxim e a armadura (Figura 3.5), todo o conjunto unido por um parafuso que deve ser apertado até que a arruela de pressão fique plana (recomendação do fabricante). Para o condutor CAL/6201 900 MCM é utilizado um modelo de grampo apropriado para condutores com diâmetro de 27,71 mm a 28,42 mm e são aplicadas 12 varetas pré-formadas na montagem, já para o condutor CA/1120 823 MCM o grampo é desenhado para acomodar condutores com diâmetros entre 26,44 mm e 27,29 mm e é montado juntamente com um conjunto de 11 varetas pré-formadas.

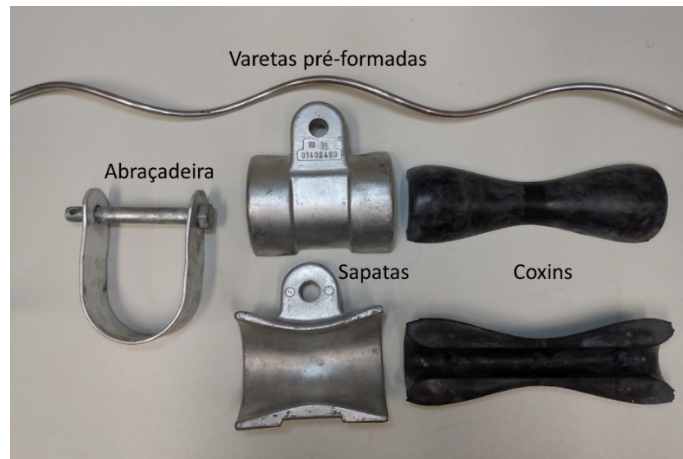


Figura 3.5 – Partes do condutor HAES

3.3 Bancada para ensaios de vibração em cabos condutores

Ensaio de fadiga e de vibração de cabos condutores são realizados em laboratórios onde se possa simular condições as quais o cabo estaria submetido em uma linha de transmissão. O Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores da Universidade de Brasília (LabCabos) conta com três bancadas experimentais para ensaios de vibração e fadiga. As bancadas possuem um vão ativo de 40,2 metros e são compostas por:

- i) Blocos Fixos: localizados nas extremidades do vão, os quais são utilizados para a ancoragem do sistema de tracionamento;
- ii) Talha de alavanca: a talha é conectada ao condutor por meio de grampos de ancoragem e é utilizada no pré-tracionamento no cabo condutor;
- iii) Sistema de contrapesos (braço de alavanca): posicionado na extremidade oposta à talha de alavanca. Está conecta a uma célula de carga que por sua vez é montada em série com o condutor por meio de um grampo de ancoragem. O sistema de contrapesos faz parte do conjunto responsável pelo tracionamento do condutor, nele é feito o ajuste fino da carga de tração, além de manter a carga de tração constante, em casos de dilatação ou contração do condutor.
- iv) Bloco Móvel: onde o suporte para o grampo de suspensão (castelo) está posicionado. Neste ponto o grampo é fixado na bancada com um ângulo de 10° para simular o ângulo de saída que ocorre na linha de transmissão.
- v) *Shaker* Eletromecânico: Responsável por simular a ação do vento gerando movimentos oscilatórios senoidais no cabo condutor. Conectado ao condutor por meio de acoplamento que permite o correto alinhamento entre o eixo central do *shaker* e o cabo condutor.

Um esquema da bancada com cada componente é apresentado na Figura 3.6.

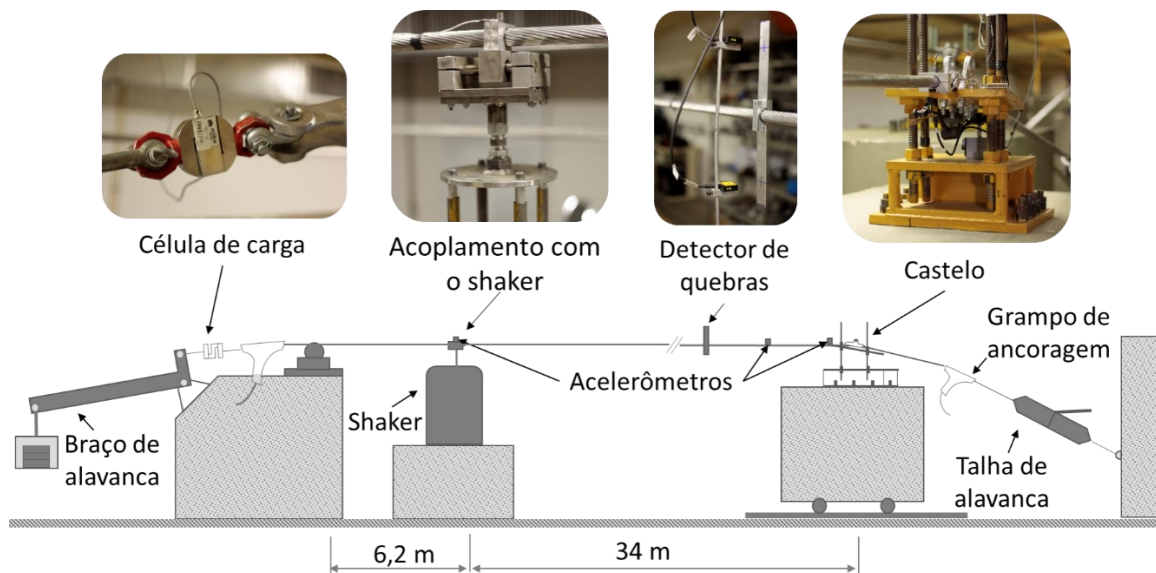


Figura 3.6 - Representação esquemática da bancada de ensaio

3.3.1 Controle do ensaio e aquisição de dados

Os ensaios vibratórios em cabos condutores consistem, essencialmente, em excitar o condutor em uma de suas frequências naturais. Dependendo do objetivo do ensaio podem ser aquisitados dados como rotação do condutor em relação ao próprio eixo, contagem de ciclos de vibração e/ou deformação mecânica nos fios dos condutores.

O controle dos ensaios em cabos condutores é feito por meio de um sistema de controle de vibração em malha fechada que é composto por: computador, controlador (Figura 3.7(b)), amplificador de sinal, atuador (*shaker*) e sensores de deslocamento (acelerômetros). Um esquema do sistema de controle é apresentado na Figura 3.8.



Figura 3.7 – (a) Sistema de aquisição de sinais, ADS 1800. (b) Controlador de vibração, LDS LASERUSB.

O controle do ensaio pode ser feito de duas formas para atender objetivos diferentes: a primeira maneira é simplesmente manter o condutor vibrando com a amplitude e frequência prescritas, nesse caso o sensor de deslocamento utilizado para alimentar o sistema de controle é montado em algum ponto do cabo condutor, geralmente no antinó ou próximo ao grampo de suspensão. A segunda forma de controle é utilizada para encontrar as frequências naturais do condutor, em um procedimento denominado

varredura, no qual a frequência de excitação é variada com uma taxa constante dentro de uma faixa de frequência preestabelecida. Nesse caso, o sensor de deslocamento que alimenta o sistema de controle é posicionado no atuador e um segundo acelerômetro é montado no condutor para obter a resposta à excitação. O resultado da varredura é um gráfico de Função Resposta em Frequência (FRF), que é a razão entre a aceleração no ponto de conexão com o *shaker* e aceleração no condutor em função da frequência de excitação, na Figura 3.9 é apresentado uma FRF, onde cada pico no gráfico refere-se a uma frequência natural do condutor.

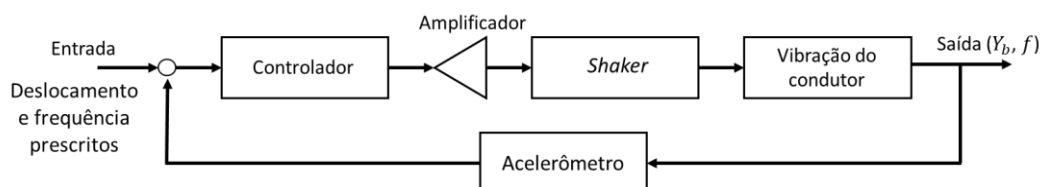


Figura 3.8 – Esquema de controle do ensaio em malha fechada

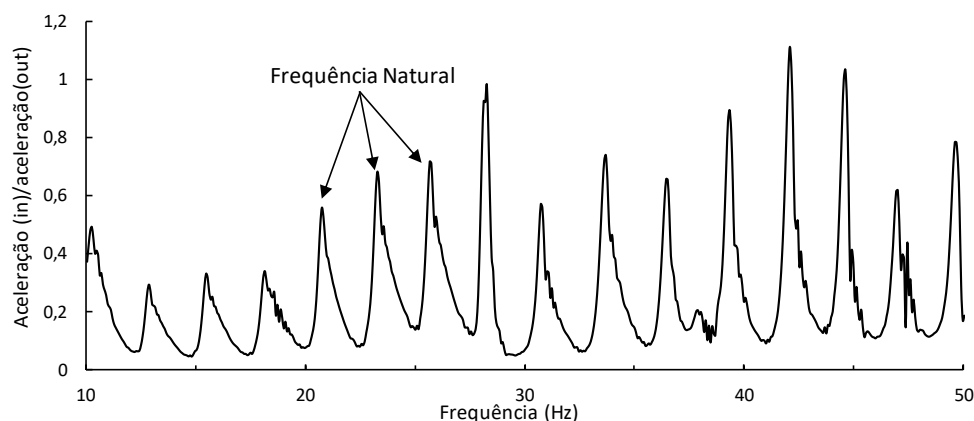


Figura 3.9 – Exemplo de Função de Resposta em Frequência do condutor, onde cada pico corresponde a uma frequência natural

A depender do tipo de ensaio, também podem ser adquiridos dados de diferentes sensores. A obtenção e registro de dados durante o ensaio pode ser feito tanto pelo controlador (apenas o sinal de acelerômetros) ou por um sistema de aquisição de sinais (Figura 3.7). Um aquisitor de dados (modelo: ADS 1800) é utilizado para receber e traduzir os sinais dos sensores de deslocamento laser empregados no monitoramento da rotação do condutor em relação ao seu eixo, bem como, na contagem de ciclos de vibração durante todo o ensaio de fadiga. Além disso, também é possível realizar aquisição do sinal de extensômetros que medem a deformação de flexão nos fios do condutor.

3.4 Adaptação das bancadas para utilização de grampos metálico com armadura, elastomérico e HAES

O principal ponto de interesse nos ensaios de fadiga é o local da montagem cabo/grampo. Pois nessa região é onde se observam as falhas devido aos esforços cíclicos. As bancadas do Labcabos possuem um suporte para os grampos de suspensão, denominado castelo, como mostrado na Figura 3.10. Inicialmente as bancadas do Labcabos só estavam aptas a realizar ensaios com grampos de suspensão metálicos.

A montagem do grampo metálico é feita por meio de dois parafusos U que fixam a tampa do grampo ao cabo. Esses parafusos também são utilizados para posicionar e fixar o grampo ao castelo que possui uma placa (Figura 3.10-a) com furos para a passagem dos parafusos U (Figura 3.10-b). Essa montagem é relativamente simples, devido a geometria do grampo de suspensão metálico. Porém, os demais tipos de grampos de suspensão possuem características que dificultam sua montagem na bancada de testes. Os grampos HAES e elastomérico (Figura 2.9 e Figura 2.10) possuem apenas parafusos horizontais de forma que não é possível utiliza-los para a fixação do grampo no castelo. Outra dificuldade que esses grampos apresentam em sua instalação é que o condutor deve estar suspenso, ou seja, não pode estar apoiado na placa do castelo para que seja possível a montagem e fixação do grampo no cabo.

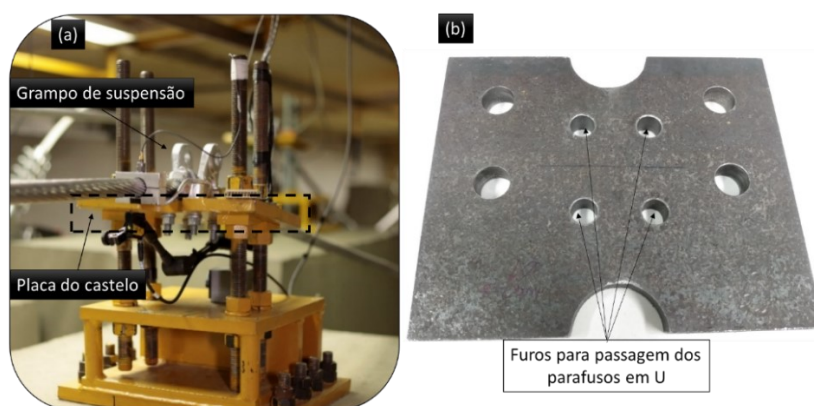


Figura 3.10 – (a) Castelo utilizado na montagem do grampo de suspensão metálico ao cabo condutor; (b) Placa do castelo

3.4.1 Fixação e alinhamento dos grampos na bancada

Para realizar a fixação do grampo de suspensão HAES na bancada experimental foi desenvolvida uma nova placa para o castelo. Este suporte possui dois mecanismos que permitem o alinhamento e a imobilização do grampo junto ao castelo. O primeiro mecanismo é constituído por duas placas que prendem o grampo lateralmente, indicadas na Figura 3.11 pelas cores azul e verde. A placa verde é fixa, enquanto a azul é móvel para possibilitar a aplicação de uma força lateral que irá alinhar o cabo com o

centro do vão. O segundo mecanismo se refere a dois parafusos em formato de “U” fabricados com o diâmetro interno equivalente a parte externa no corpo do grampo, os parafusos se encaixam no grampo e passam pela placa do castelo, onde são fixados por meio de porcas e arruelas. Tais parafusos atuam auxiliando o alinhamento do grampo e exercendo uma força horizontal para evitar a movimentação do grampo nesse sentido. Para a montagem do grampo elastomérico, são utilizados apenas os parafusos em U, uma vez que a base do desse grampo é plana e não necessita das placas laterais para o correto posicionamento. Já a fixação do grampo metálico com armadura se dá da mesma forma que o grampo metálico convencional.

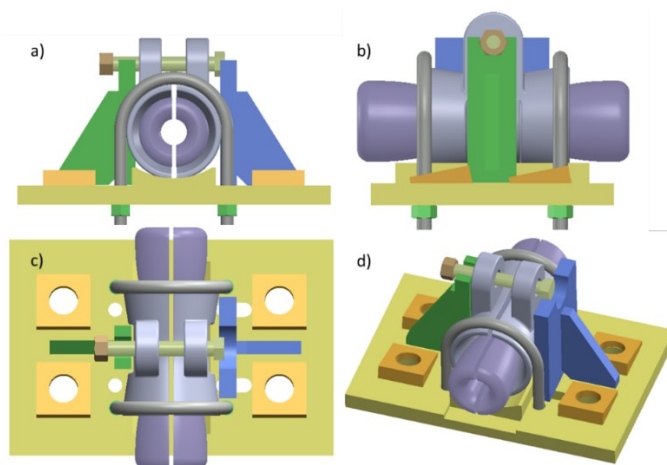


Figura 3.11 - Vistas do modelo da placa do castelo para fixação do grampo HAES na bancada. a) frontal, b) lateral, c) superior d) isométrica

3.4.2 Suspensão do condutor para a montagem dos grampos

As varetas da armadura pré-formados do grampo HAES e do grampo metálico com armadura devem ser montadas com o cabo condutor suspenso para que os arames possam passar pela parte de baixo do cabo. O condutor também precisa ser suspenso para a montagem do grampo elastomérico, pois o grampo se encaixa lateralmente no cabo (Figura 3.12). O que em ambos os casos não é possível se o condutor estiver tracionado e apoiado na placa do castelo.



Figura 3.12 – Cabo suspenso para a montagem do grampo ES.

A placa do castelo que apoia o grampo possui uma inclinação de 10° , para simular o ângulo de saída do condutor quando suspenso na linha de transmissão. E como o grampo deve ser montado com o condutor tensionado com a carga de ensaio, a angulação faz com que o sistema de tracionamento exerça um componente de força na horizontal, impossibilitando que o cabo fique suspenso.

Foram adotadas duas soluções para serem utilizadas simultaneamente para realizar a montagem dos grampos com o cabo tracionado e em suspensão. A primeira constitui da utilização de um pórtico que foi construído na bancada para que, por meio de cintas com catraca, o cabo pudesse ser elevado. A solução com cintas foi adotada pois esta permite que o cabo seja suspenso por uma região próxima a saída do grampo e sem que o cabo seja danificado. Aqui será descrito apenas a montagem do grampo HAES, pois a montagem desse grampo apresenta o maior grau de dificuldade e os procedimentos para a montagem adotados são equivalentes para aos demais grampos.

Durante a montagem são utilizadas duas cintas, os pontos de içamento são selecionados de forma que as cintas fiquem posicionadas nas extremidades do grampo, em uma região onde ficará a gaiola do formada pela armadura grampo HAES (ver Figura 2.4). Logo em seguida o cabo é erguido por meio das catracas (Figura 2.8-a). O coxim é posicionado no cabo condutor de forma que o centro do coxim fique localizado no centro da placa do castelo (Figura 3.13-b). Com o cabo suspenso é possível montar as varetas pré-formadas junto ao cabo, posicionando o centro da vareta com o centro do coxim (Figura 3.13-c). Finalmente a parte metálica do grampo é instalada (Figura 3.13-d). Após a montagem dos arames a cinta é retirada e se inicia a segunda parte da montagem.

Devido a diferença de nível existente entre a talha de alavanca que traciona o cabo e o castelo, existe um componente de força vertical que torna o levantamento do cabo por meio das catracas inviável. Por conta disso foi adotada uma segunda solução para ser aplicada durante a montagem do grampo HAES para diminuir a componente vertical da carga de tração no cabo condutor. Que consiste em utilizar uma segunda talha alinhada com a altura do castelo.

A Figura 3.14 apresenta esquematicamente a solução adotada. São utilizadas duas talhas de alavanca para realizar o procedimento. Utilizando a talha “a” da Figura 3.14 posicionada na parte superior do bloco fixo, o cabo é tracionado em sua carga de ensaio na posição I, nesse momento é feita a instalação do grampo HAES com o auxílio do pórtico. Após a instalação do grampo, é feita a mudança da talha “a” para a talha “b”, nessa etapa a talha “b” é engatada juntamente com a talha “a” (Figura 3.14-II) e gradativamente a carga da talha “a” é transferida para a talha “b” até a carga seja totalmente transferida e se alcance a configuração III da Figura 2.9. Só então o grampo HAES é fixo à placa do castelo (Figura 2.10).

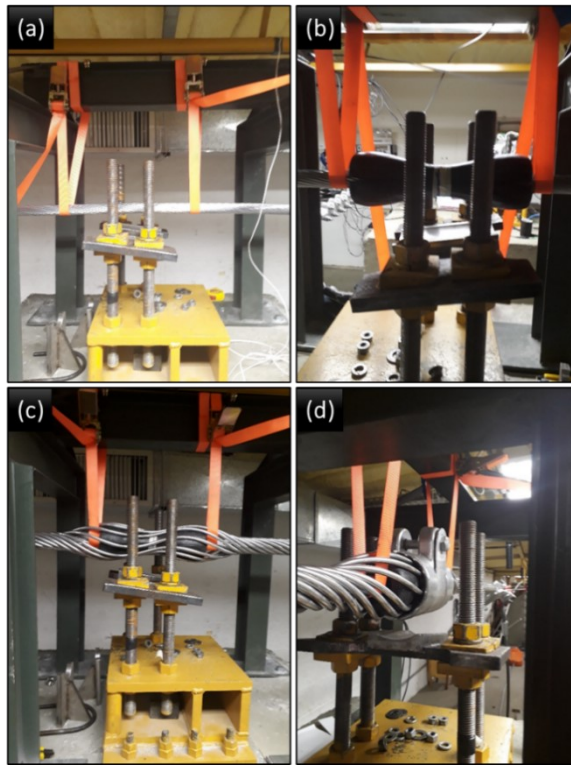


Figura 3.13 – Montagem do grampo HAES na bancada

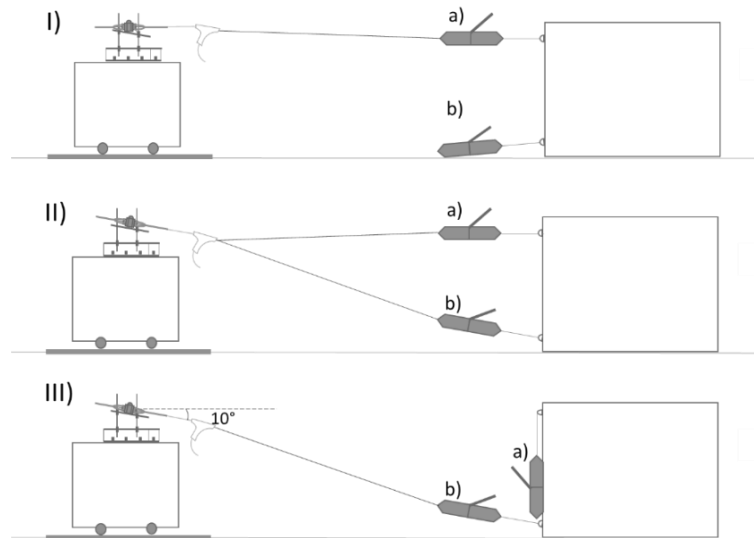


Figura 3.14 - Esquema para reduzir a carga vertical durante a montagem do grampo HAES



Figura 3.15 – Posição final do Grampo HAES montado na bancada

4 CORRELAÇÃO ENTRE AMPLITUDE DE DESLOCAMENTO E TENSÃO DE FLEXÃO EM CABOS CONDUTORES

O movimento oscilatório dos cabos condutores na linha de transmissão gera uma tensão de flexão dinâmica nos pontos de restrição de movimento. Neste capítulo é criada uma correlação experimental entre a tensão de flexão nos fios do condutor e a amplitude de vibração. A correlação é gerada para as montagens com grampos de suspensão metálico, metálico com armadura, HAES e elastomérico e condutores tracionados com carga de esticamento equivalente a 20% da carga de ruptura. Para isso, a deformação dos fios do condutor é medida em pontos onde são localizadas as maiores tensões de flexão e plotada em função do deslocamento do condutor. Os resultados apresentados no presente capítulo ajudam a compreender o efeito de cada tipo de grampo de suspensão na tensão de flexão dinâmica no acoplamento cabo/grampo. Além disso, a correlação experimental entre o deslocamento e a tensão de flexão é utilizada no Capítulo 5 para a avaliação da vida em fadiga das montagens cabo/grampo de suspensão elastomérico.

4.1 Procedimento Experimental

Como apresentado na seção 2.2.6, a formulação de P-S, para o cálculo da tensão nominal nos fios do condutor, não pode ser aplicada para grampos com material elastomérico e/ou com armadura pré-formada. Para o caso de grampos elastoméricos, o CIGRÉ recomenda em seu manual para medição de vibração em linhas de transmissão (CIGRÉ, 1995) que o fator de correlação entre a tensão dinâmica e o deslocamento seja obtido por meio de ensaio de vibração conduzidos em laboratório. Tal recomendação foi estendida para grampo metálicos e com armadura para que fosse possível realizar a avaliação – na mesma base de comparação – do efeito do grampo de suspensão na tensão dinâmica dos fios do condutor.

Para criar a correlação entre a amplitude de deslocamento e a tensão de flexão dinâmica no condutor, são utilizados dois tipos de sensores, dois acelerômetros e extensômetros para cada conjunto de ensaios. A metodologia desenvolvida para a avaliação da tensão de flexão dinâmica em diferentes tipos de grampos de suspensão é descrita nas seções seguintes.

4.1.1 Instrumentação da montagem cabo/grampo – Acelerômetros

Os acelerômetros são utilizados para medir o deslocamento no antinó (y_{max}) e controlar amplitude de flexão do condutor (Y_b ou Y_c). O acelerômetro que mede o deslocamento y_{max} é posicionado no primeiro antinó a partir do grampo em direção ao *shaker* (ver seção 3.3). O controle da amplitude de

flexão do condutor é feito por meio de um acelerômetro montado a 89 mm do UPC entre o condutor e o grampo (Y_b) nos grampos de suspensão metálico (Figura 4.1), metálico com armadura e elastomérico. No caso grampo HAES não é possível montar um acelerômetro a 89 mm a partir do UPC por conta da gaiola formada pela armadura a frente da saída do grampo. Para contornar essa situação no grampo HAES, um acelerômetro é posicionado no primeiro ponto onde a armadura toca o condutor (Figura 4.2). O posicionamento dos acelerômetros foi realizado seguindo as recomendações de normas de medição de vibração em cabos condutores, inclusive para o caso do grampo HAES (CIGRÉ, 1995; IEEE, 2006a).

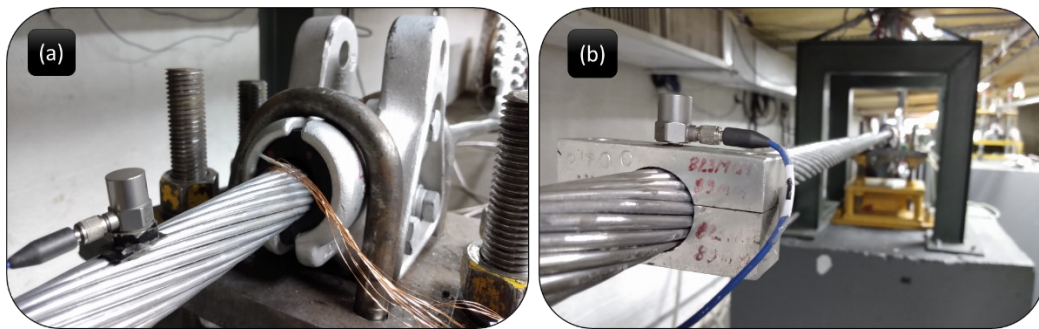


Figura 4.1 – Posicionamento dos acelerômetros. (a) Acelerômetro a 89 mm do UPC entre o cabo e grampo. (b) Acelerômetro no antinó.

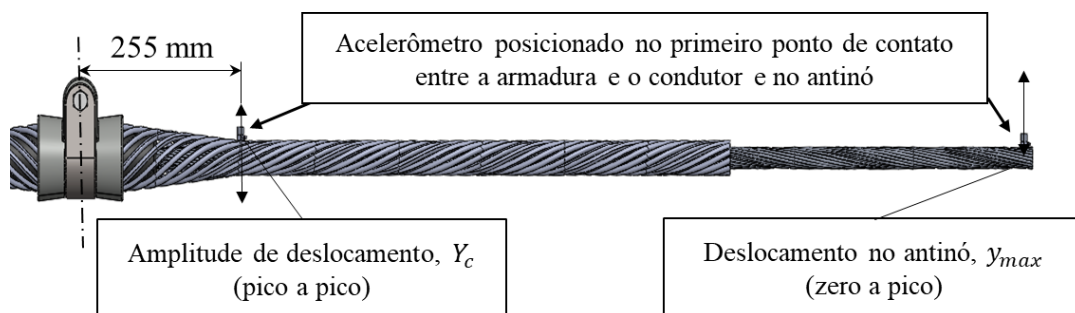


Figura 4.2 – Representação esquemática do grampo HAES com o posicionamento dos sensores

4.1.2 Instrumentação da montagem cabo/grampo – Extensômetros

Os extensômetros são utilizados para medição da deformação nos fios dos condutores que por meio da lei de Hooke é convertida em tensão de flexão. Para grampo metálicos, o local de referência para a medição da deformação são os fios diametralmente opostos ao UPC entre o cabo e grampo (CIGRÉ SC 22 WG 04, 1988), pois trata-se do local onde são esperadas as maiores tensões de flexão no condutor quando montado em um grampo metálico. No caso dos grampos elastoméricos, o comportamento do condutor no interior do grampo não é conhecido, uma vez que pode ocorrer a deformação do elastômero permitindo que o condutor se movimente em seu interior, não sendo possível inferir a localização da máxima tensão de flexão para estes tipos de grampos, dessa forma foi feito um mapeamento no interior dos grampos elastoméricos para determinar o local de máxima tensão de flexão.

A metodologia proposta para essa etapa se baseia em duas medições. Na primeira os extensômetros são montados, aos pares, em várias seções ao longo da região onde espera-se as maiores tensões de flexão. Uma segunda medição é feita para verificar a repetibilidade e a dispersão do resultado, nessa medição são colados três extensômetros no topo da seção onde ocorreu a máxima tensão de flexão. Sendo que o mapeamento da tensão de flexão (primeira medição) foi feito utilizando apenas o condutor CA/1120 823 MCM e na segunda etapa de medições, além do condutor CA, também foram feitos ensaios com o condutor CAL/6201 900 MCM.

A instrumentação detalhada para caracterizar o comportamento da curvatura do condutor na região de montagem do grampo e identificar a máxima deformação é relatada nas subseções a seguir, para cada tipo de grampo.

4.1.2.1 Grampo de suspensão metálico

A instrumentação do grampo metálico, para mapeamento da tensão, foi feita com um conjunto de seis extensômetros, distribuídos em três seções, cada seção com dois extensômetros. A primeira seção analisada foi o último ponto de contato entre a telha e o condutor, neste caso, para facilitar a instrumentação, os extensômetros foram colados antes da montagem da telha. A segunda seção foi o ponto diametralmente oposto ao UPC entre o cabo e grampo de suspensão, que como já citado, é o local usualmente adotado como ponto de máxima tensão de flexão. A da terceira seção analisada está localizada a 8 mm do UPC entre o cabo e grampo, para que houvessem duas medições equidistantes do UPC, uma em direção ao grampo e outra em direção ao vão ativo, conforme indicado na Figura 4.3. A instrumentação da medição com os extensômetros localizados no local de máxima tensão de flexão é apresentada na Figura 4.4

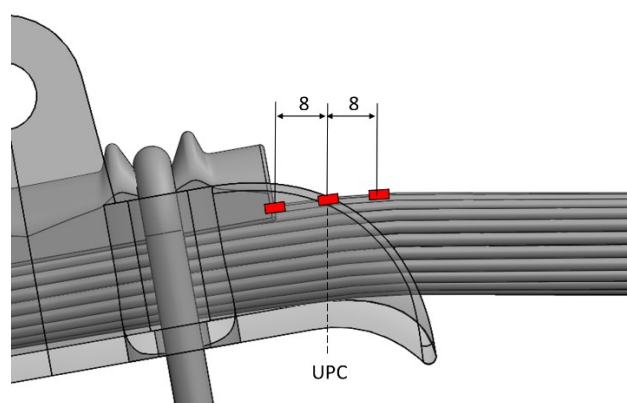


Figura 4.3 – Posição dos extensômetros para mapeamento da tensão de flexão do condutor montado no grampo metálico

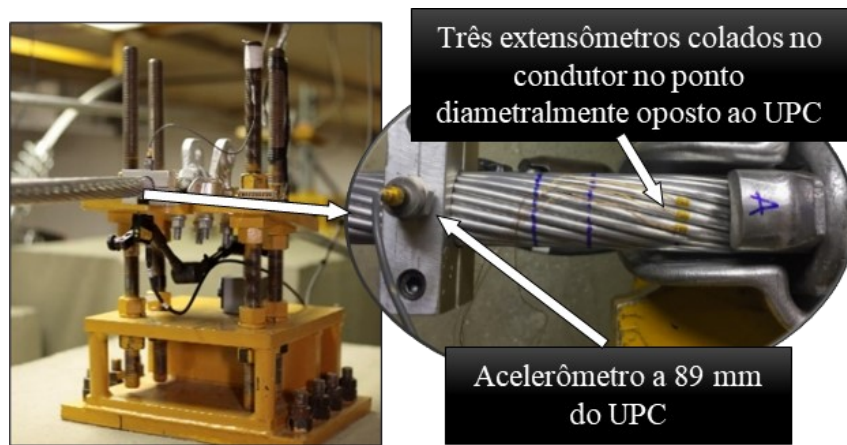


Figura 4.4 – Grampo de suspensão metálico instrumentado com acelerômetro e extensômetros montados na região de máxima tensão de flexão.

4.1.2.2 Grampo de suspensão metálico com armadura

Para a colagem extensômetros nos fios do condutor montado no grampo de suspensão metálico com armadura, após a finalização da montagem, o UPC entre o cabo e a armadura é identificado e marcado e em seguida as varetas do topo do grampo são removidas para a colagem dos extensômetros no condutor. Os extensômetros são protegidos por uma camada de resina de silicone - própria para tal aplicação - e em seguida as varetas pré-formadas são recolocadas. Após, mais um conjunto de três extensômetros são colados nas varetas, na mesma posição que foram colados os extensômetros no condutor. Para o mapeamento das tensões flexão do condutor, foram monitoradas três posições (UPC entre a armadura e o grampo, borda da tampa do grampo e um ponto equidistante em direção ao vão ativo) da mesma forma como feito no grampo de suspensão metálico sem armadura. As posições de montagem dos extensômetros são indicadas na Figura 4.5 enquanto que na Figura 4.6 é apresentada a montagem dos extensômetros na seção crítica do condutor.

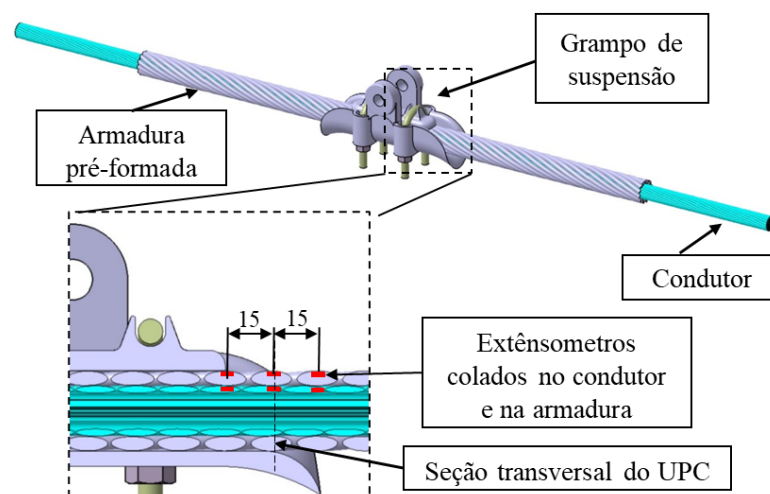


Figura 4.5 – Posição dos extensômetros montados no grampo de suspensão metálico com armadura.

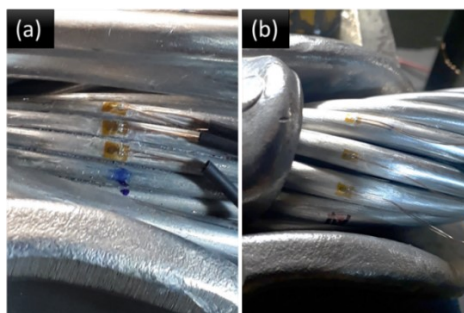


Figura 4.6 – Extensômetros colados diametralmente opostos ao UPC entre a armadura e o grampo. (a) Fios do condutor; (b) Varetas da armadura.

4.1.2.3 Grampo de suspensão elastomérico (ES)

As medições de deformação do grampo elastomérico (ES) foram feitas em cinco seções do cabo condutor, cada seção com dois extensômetros colados nos fios do topo do condutor. Os extensômetros foram colados antes da montagem do grampo suspensão e protegidos contra impactos por meio de uma borracha de silicone, conforme apresentado na Figura 4.7.

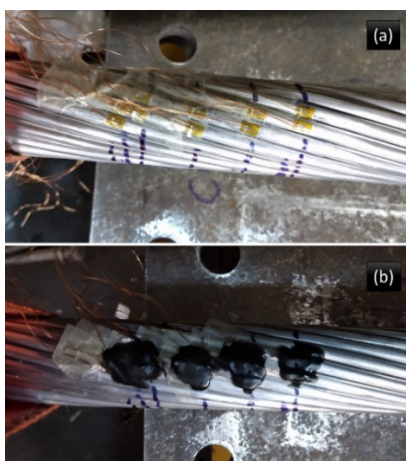


Figura 4.7 – Extensômetros colados no condutor antes da montagem do grampo de suspensão elastomérico. (a) Extensômetros sem proteção. (b) Extensômetros protegidos com borracha de silicone

A primeira seção analisada estava localizada imediatamente antes do início do material elastomérico e a última seção imediatamente após o fim do material elastomérico. As demais seções analisadas foram distribuídas do interior da região elastomérica do grampo de suspensão, conforme indicado na Figura 4.8. A instrumentação da montagem com os extensômetros no ponto de máxima tensão de flexão é apresentada na Figura 4.9.

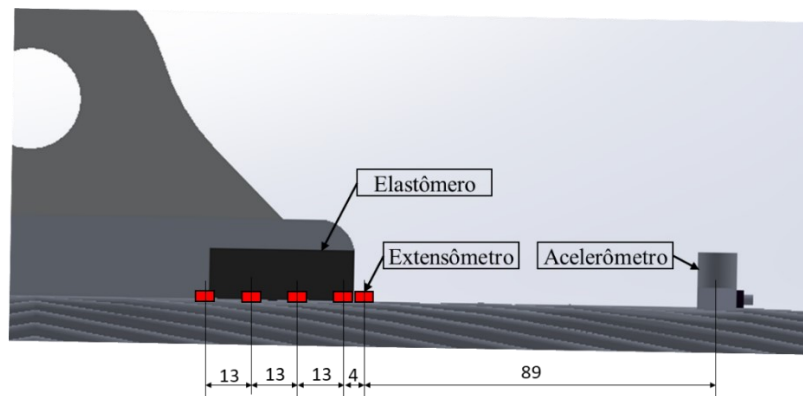


Figura 4.8 – Instrumentação do grampo elastomérico, indicando a posição dos extensômetros colados no topo do condutor.

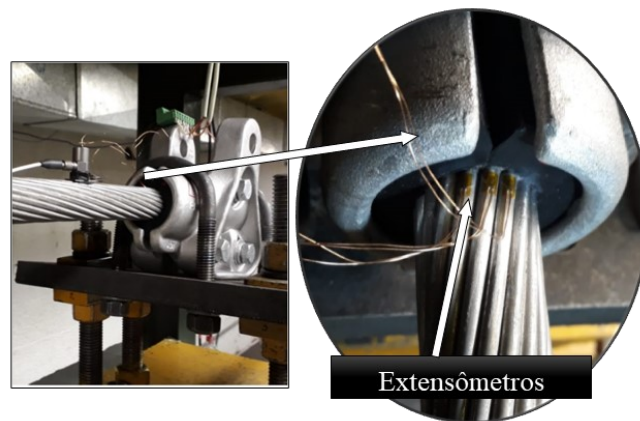


Figura 4.9 – Extensômetros colados no ponto de máxima tensão de flexão no grampo elastomérico.

4.1.2.4 Grampo de suspensão elastomérico com armadura (HAES)

Assim como no grampo elastomérico, foi realizada a instrumentação por meio de extensômetros no interior da região elastomérica do grampo HAES. Devido a extensão do elastômero, o mapeamento da tensão de flexão foi realizado em duas etapas. A primeira etapa é realizada com extensômetros colados de forma mais espaçada e cobrindo toda a região ativa do grampo (metade do grampo voltada para o vão ativo) e na segunda etapa é feito um refinamento da região onde foram identificadas as maiores tensões de flexão no interior do grampo de suspensão. A posição de cada seção instrumentada por extensômetros, nas duas etapas de medição, é apresentada na Figura 4.10.

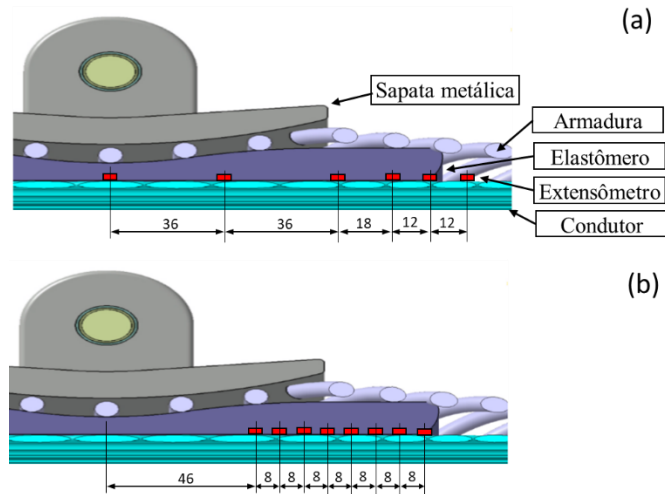


Figura 4.10 – Posição dos extensômetros colados no condutor montado no grampo HAES. (a) Análise da região ativa do grampo. (b) Análise com refinamento dos extensômetros na região de máximas tensões de flexão.

A montagem dos extensômetros é feita de forma similar ao grampo elastomérico, onde os extensômetros são colados com o condutor esticado na bancada experimental e antes da montagem do grampo de suspensão é aplicada uma camada de borracha de silicone por cima dos extensômetros para preservar a integridade dos mesmos durante a montagem do grampo e execução do ensaio.

4.1.3 Ensaio dinâmico

Após a instrumentação e montagem do conjunto cabo/grampo é realizado o ensaio dinâmico. Esse ensaio consiste em excitar o condutor em uma de suas frequências naturais, com a amplitude de deslocamento sendo controlada por meio do acelerômetro posicionado a 89 mm de distância do UPC entre o cabo e grampo, Y_b , ou pelo acelerômetro posicionado no primeiro ponto de contato entre a armadura e o condutor, Y_c , no caso do grampo HAES.

Durando o ensaio são aquisitados os sinais do acelerômetro no antinó para a medição de y_{max} e os sinais dos extensômetros para aferição da deformação de flexão nos fios do condutor. A média aritmética da deformação lida por meio dos três extensômetros colados nos fios do condutor é convertida em tensão por meio da Lei de Hooke (Eq. (4.1)). O ensaio é repetido variando o valor prescrito de amplitude de deslocamento para construir uma curva de tensão de flexão em função da amplitude de deslocamento, seja ela no antinó ou medida a 89 mm do UPC entre o cabo e o grampo de suspensão. Todos os testes foram conduzidos com os condutores esticados com uma carga de tração equivalente a 20% da carga de ruptura nominal do cabo e a frequência de excitação empregada no ensaio foi a frequência natural da montagem mais próxima de 24 Hz.

$$\sigma_a(\varepsilon) = E \varepsilon \quad (4.1)$$

onde E é o módulo de elasticidade dos fios de alumínio (69 GPa) e ε é a deformação lida pelos extensômetros.

4.2 Resultados e discussões

4.2.1 Mapeamento das tensões na região de montagem cabo/grampo

Os resultados das medições das tensões de flexão dinâmica nos fios do topo do condutor CA 1120 no interior dos grampos metálico, metálico com armadura, elastomérico e HAES são apresentados na Figura 4.11 a Figura 4.14. Nessas figuras, a tensão é plotada em função da distância em relação ao centro do grampo. Sendo que, cada conjunto de pontos representa uma amplitude de vibração e cada ponto representa a média das tensões registradas pelos extensômetros colados naquela posição específica.

4.2.1.1 Tensão de flexão na saída do grampo metálico

A tensão de flexão em função da distância em relação ao UPC entre o cabo CA 1120 e o grampo de suspensão metálico é apresentada na Figura 4.11. A posição de medição da deformação foi feita conforme indicado na Figura 4.3. Observa-se destes resultados que a máxima tensão de flexão nos fios da camada externa do condutor ocorre no UPC entre o cabo e grampo de suspensão. Além disso, é constatado que em baixos níveis de amplitude de deslocamento a variação da tensão ao longo do perfil analisado é percentualmente menor do que a variação da tensão em níveis mais altos de vibração, em outras palavras, à medida que a amplitude de vibração aumenta a região próxima ao UPC torna-se mais crítica em relação as outras. Esse comportamento pode ajudar a explicar a mudança da posição preferencial de falha com a alteração da tensão de flexão, reportado por Kalombo (2017) em seus ensaios de fadiga de condutores montados em grampos metálicos.

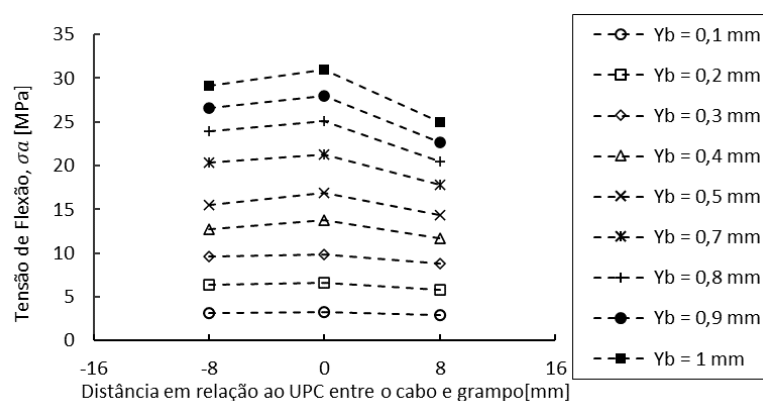


Figura 4.11 - Tensão de flexão na saída do grampo de suspensão metálico

4.2.1.2 Tensão de flexão na saída do grampo metálico com armadura

O mapeamento da distribuição das tensões no condutor CA1120 montado no grampo de suspensão metálico com armadura foi feito conforme indicado na Figura 4.5 e os resultados são apresentados na Figura 4.12. Observa-se destes resultados que, dentre os pontos analisados, a maior tensão de flexão ocorreu na seção transversal do UPC entre a armadura e grampo de suspensão. Foi possível constatar que conforme a amplitude de vibração se torna mais severa a tensão de flexão na borda da telha, tende a se aproximar da tensão registrada no UPC.

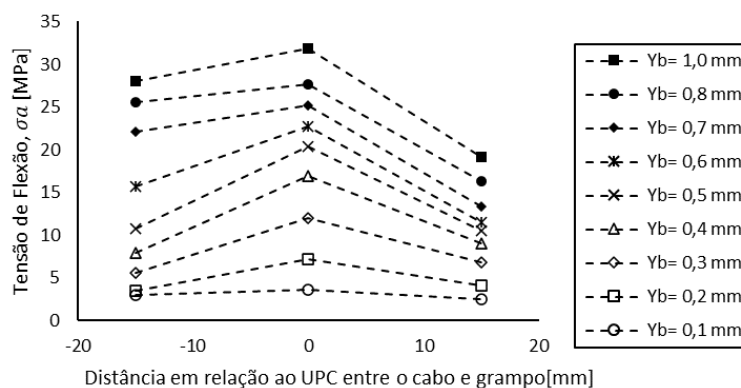


Figura 4.12 - Tensão de flexão na saída do grampo de suspensão metálico com armadura

4.2.1.3 Tensão de flexão do interior do Grampo HAES

A análise para a montagem do condutor com o grampo HAES foi conduzida em duas etapas e são apresentados nas Figura 4.13 e Figura 4.14. Na primeira etapa (Figura 4.13), toda a região ativa do grampo foi investigada. Para facilitar a análise, uma imagem do condutor montado no grampo HAES foi inserida como plano de fundo do gráfico. Na Figura 4.13 são observados dois picos de tensão, um a 72 mm em relação ao centro do grampo e outro no UPC entre o material elastomérico e o condutor. No caso do condutor vibrando, a tensão de flexão dinâmica está associada a uma restrição de movimento, ou seja, a um aumento localizado da curvatura dos fios do condutor. Ao observar a Figura 4.13, é possível notar que o primeiro pico ocorre próximo à borda do invólucro metálico, o que sugere que o material elastomérico se deforma solidário ao condutor em seu interior e a movimentação do conjunto elastômero/condutor é limitada pela borda do invólucro metálico. O segundo pico de tensão está localizado na saída do grampo, posição onde tipicamente são registradas as máximas tensões de flexão nos fios dos condutores montados em grampos metálicos. As tensões dinâmicas de flexão na saída do grampo também estão associadas a uma restrição de movimento, mas dessa vez, é o material elastomérico que restringe a movimentação do condutor.

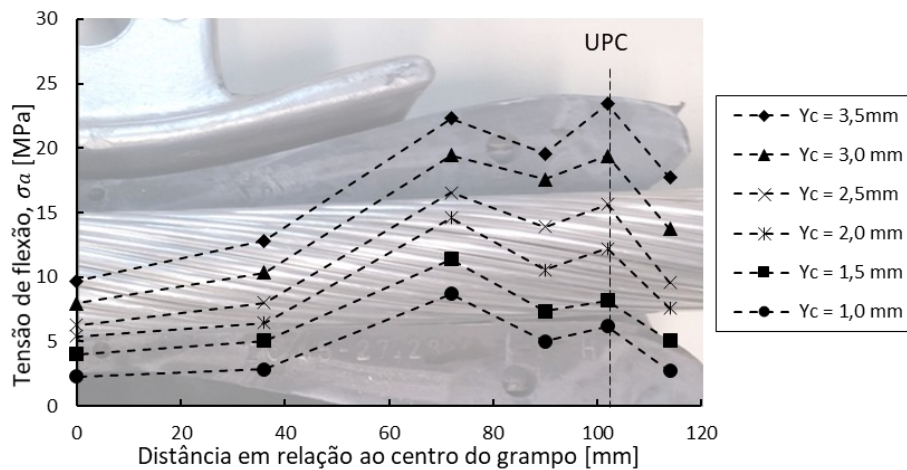


Figura 4.13 – Tensão de flexão no interior do grupo HAES

Na segunda etapa de medições na montagem com o grupo HAES, foi realizado um refinamento na posição dos extensômetros para a região onde foram observadas as maiores tensões de flexão. Importante notar que nessa nova medição foram montados extensômetros a 70 mm do centro do grupo, o que corresponde a posição da borda do invólucro metálico.

Observou-se, novamente, que na seção transversal da borda do invólucro metálico e na seção do UPC entre o condutor e o elastômero foram registradas as maiores tensões de flexão. Na Figura 4.14 são apresentados os resultados, onde as duas regiões de máxima tensão de flexão são identificadas no gráfico por meio de linhas tracejadas na vertical. Ao comparar os resultados das duas etapas de medição no grupo HAES, nota-se que as tensões na seção da borda do invólucro (Figura 4.14) foram maiores que as registradas a 2 mm a frente da borda do invólucro (Figura 4.13), o que reforça o argumento de que o invólucro metálico é responsável pelas tensões dinâmicas observadas nessa região.

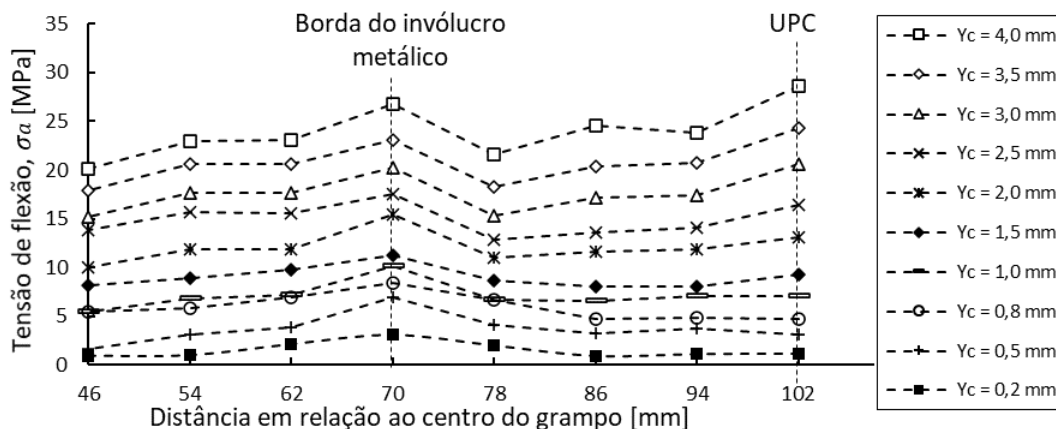


Figura 4.14 - Tensão de flexão no interior do grupo HAES com refinamento da posição dos extensômetros.

4.2.1.4 Tensão de flexão do interior do grampo de suspensão elastomérico

Na Figura 4.15 são apresentados os resultados do grampo elastomérico. Os primeiros pontos do gráfico ($x = 0$) são os resultados das medições na seção imediatamente anterior ao primeiro ponto de contato entre o condutor e o material elastomérico. As três seções seguintes são os resultados das tensões no interior do elastômero e o conjunto de pontos da última seção são referentes às tensões na seção imediatamente posterior ao UPC entre o cabo e o grampo (ver Figura 4.8).

Por meio da análise dos resultados apresentados na Figura 4.15 é possível identificar que as tensões assumem um comportamento crescente à medida que a seção analisada se aproxima da saída do grampo. Dessa forma, dentre as posições analisadas a máxima tensão de flexão ocorre na seção imediatamente a frente do UPC entre o condutor e o grampo.

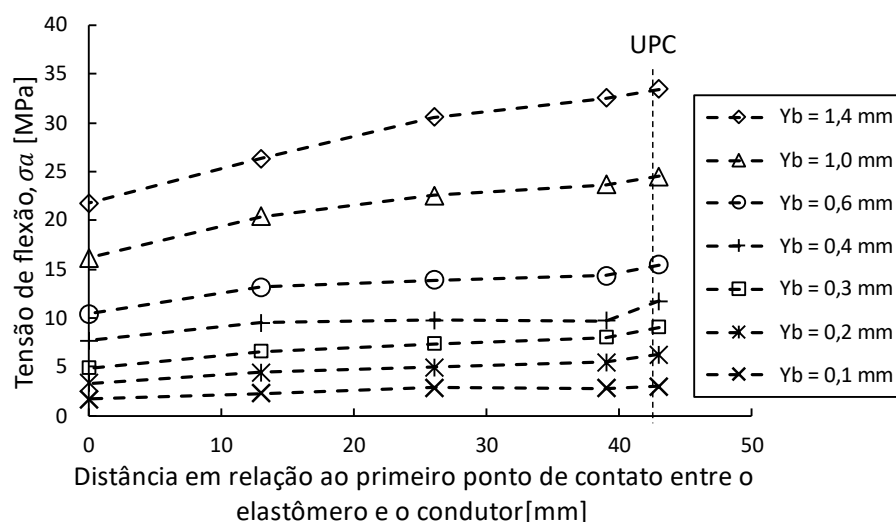


Figura 4.15 - Tensão de flexão no interior do elastômero do grampo elastomérico.

4.2.2 Tensão de flexão (σ_a) em função da amplitude de deslocamento (Y_b)

Nessa seção são apresentados e analisados os resultados das medições nas posições onde ocorreram as máximas tensões de flexão dinâmica. Os resultados dos ensaios dinâmicos do condutor CA/1120 823 MCM e CAL/6201 900 MCM montado em diferentes configurações de grampos suspensão são apresentados nas Figura 4.16 a Figura 4.19. Nesses gráficos as relações entre a tensão de flexão, σ_a , e a amplitude de deslocamento, Y_b ou Y_c , foram estimadas com base na deformação medida com extensômetros, ϵ_a , Eq. (4.1) e são comparadas com a tensão prevista pela fórmula de Poffenberger-Swart, Eq. (2.4). Os resultados obtidos a partir das medições realizadas com extensômetros são apresentadas na forma de símbolos e a linha de tendência que melhor ajusta esses resultados é representada pela linha pontilhada, enquanto que os resultados estimados por meio da fórmula de Poffenberger-Swart (P-S) são representados por linha cheias.

A seção crítica no grampo metálico foi a localizada no UPC entre o cabo e o corpo do grampo de suspensão. Os resultados dos ensaios dinâmicos para os extensômetros colados nesta posição são apresentados na Figura 4.16. Os dados obtidos do ensaio dinâmico para o grampo metálico apontaram que a formulação de Poffenberger-Swart (P-S) é adequada para representar a relação existente entre deslocamento do condutor e a tensão de flexão nos fios para ambos os condutores testados.

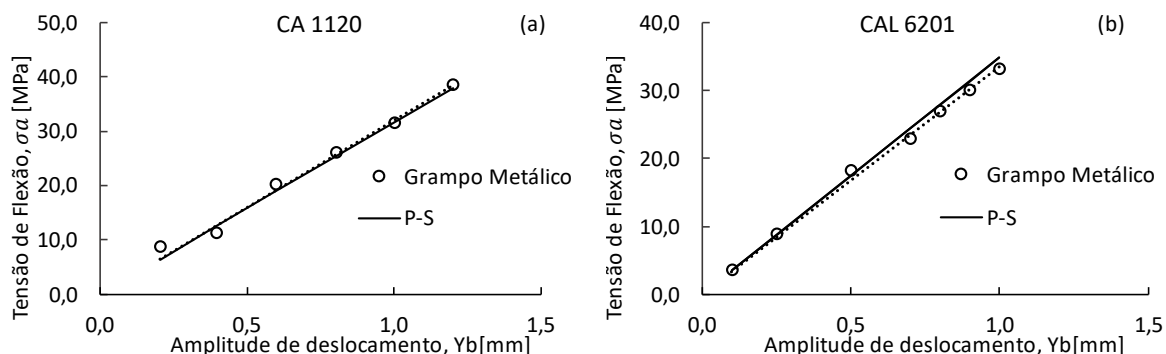


Figura 4.16 – Tensão de flexão em função da amplitude de deslocamento no grampo de suspensão metálico com condutores (a) CA/1120 823 MCM e (b) CAL/6201 900 MCM.

Nas Figura 4.16 a Figura 4.19 são apresentados os resultados para os grampos com material elastomérico e/ou armadura pré-formada. As considerações feitas no desenvolvimento da formulação de P-S não abrangem os grampos metálico com armadura, HAES e elastomérico. A amplitude de deslocamento, Y_b , é definida como sendo o deslocamento do condutor relativo ao corpo de um grampo rígido; os grampos de suspensão HAES e elastomérico são projetados para não serem rígidos, o que faz com que o emprego da amplitude de deslocamento, Y_b seja inadequado na fórmula de P-S, nesses dois casos (IEEE, 2006a).

São apresentados na Figura 4.17 os dados de tensão em função do deslocamento da montagem do condutor no grampo metálico com armadura pré-formada. Onde os triângulos cheios são os resultados da tensão nos fios da armadura pré-formada enquanto os triângulos vazios são as tensões registradas nos fios do condutor, ambas medições tomadas simultaneamente na seção transversal do UPC entre o cabo e o grampo de suspensão.

Os resultados, apresentados Figura 4.17, mostraram que quando o condutor é montado em um grampo metálico e protegido por armadura a tensão de flexão dinâmica registradas nos fios do condutor, são maiores que a dos fios da armadura pré-formada, o que está associado ao fato de que a armadura não está submetida a carregamentos de tração, uma vez que a montagem da armadura é feita com o condutor já tracionado na bancada experimental. É importante observar também que a presença da armadura proveu uma pequena redução da tensão de flexão, quando comparado com a previsão da formulação de Poffenberger-Swart.

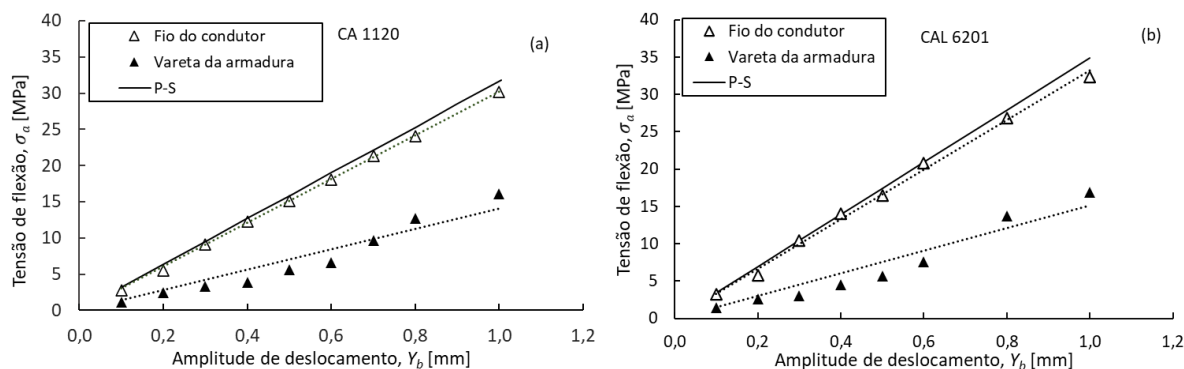


Figura 4.17 – Tensão de flexão em função da amplitude de deslocamento do condutor CA/1120 823 MCM montado no grupo de suspensão metálico com armadura.

O ponto crítico, em relação a máxima tensão de flexão, no grampo elastomérico foi a seção imediatamente após o UPC entre o cabo e o grampo de suspensão. Os resultados da tensão de flexão nesta seção são apresentados na Figura 4.18. Observa-se que, independentemente do tipo de cabo, o grampo elastomérico atuou reduzindo as tensões de flexão em relação ao previsto pela fórmula de P-S. Isso pode estar associado a menor rigidez do acoplamento que permite uma maior movimentação do condutor na região de acoplamento, o que reduz a curvatura dos fios durante a vibração.

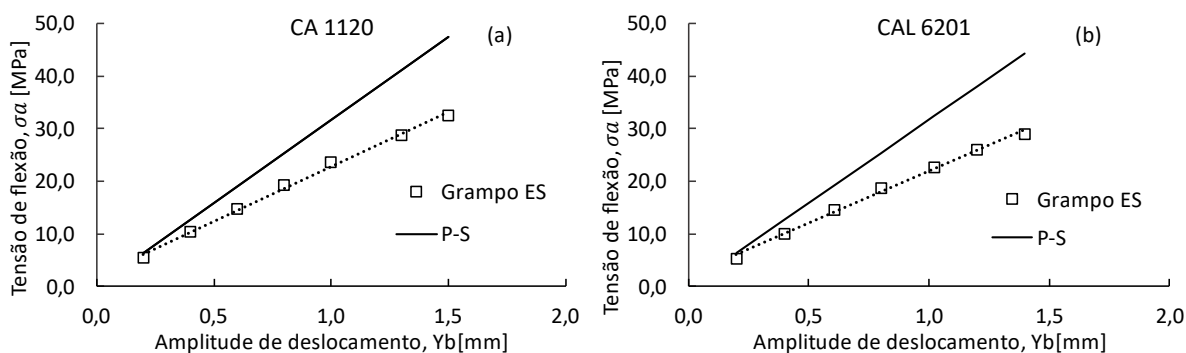


Figura 4.18 – Tensão de flexão em função da amplitude de deslocamento no grampo de suspensão elastomérico com condutores (a) CA/1120 823 MCM e (b) CAL/6201 900 MCM.

Conforme discutido na seção 4.2.1, o grampo elastomérico com armadura (HAES) apresentou duas regiões críticas quanto a tensão de flexão dinâmica: a saída do grampo e a seção transversal da borda do invólucro metálico. Na Figura 4.19 são apresentados os resultados de medições de deformação realizados nas duas posições críticas. Os dados são comparados com o resultado previsto pela formulação de Poffenberger-Swart (P-S) calculado considerando duas posições de referências. A posição $x = 120$ mm que se refere à distância entre o ponto de medição do deslocamento e a saída do grampo, enquanto a posição $x = 185$ mm é tomada em relação à distância entre o ponto de medição do deslocamento e a seção transversal da borda do invólucro metálico. As tensões de flexão adquiridas estiveram abaixo do previsto pela formulação de P-S, apontando que o material elastomérico atuou reduzindo a curvatura local dos fios do condutor nos pontos de medição.

Comparando a tensão de flexão nos dois pontos críticos observa-se um comportamento semelhante das duas regiões. No caso do condutor CA 1120, montado do grampo HAES, as tensões de flexão na seção transversal da borda do invólucro foram maiores que na saída do grampo em amplitudes de deslocamento inferiores a 2,5 mm, nas amplitudes superiores a este valor a saída do grampo passou a registrar a máximas tensões de flexão. Nos ensaios realizados com o condutor CAL 6201, montado do grampo HAES, as tensões na borda do invólucro metálico foram em média 4% superiores as registradas no UPC entre o cabo e o elastômero.

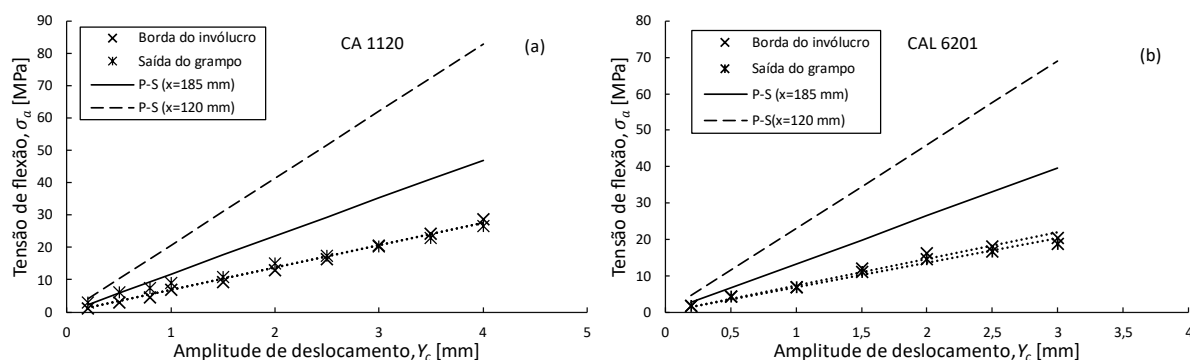


Figura 4.19 – Tensão de flexão em função da amplitude de deslocamento do condutor (a) CA/1120 823 MCM e (b) CAL/6201 900 MCM montado no grampo de suspensão HAES.

Analisando qualitativamente a relação entre a amplitude de deslocamento e as tensões estimadas experimentalmente verifica-se que, independentemente do tipo de montagem, os dados apresentados na Figura 4.16 a Figura 4.19 são muito bem ajustados a equação de uma reta que passa pela origem – o que mostra que a relação entre esses parâmetros é linear. A linearidade observada pode indicar que em todos os níveis de deslocamento ocorreu a movimentação relativa entre os fios do condutor, o que representa que o condutor vibrou com sua rigidez a flexão mínima em todas as condições de ensaio.

Quantitativamente pode-se verificar a partir da análise de regressão dos dados experimentais que o modelo de regressão linear com intercessão nula apresenta um coeficiente de Pearson, r , da ordem de 0,99, o que indica que o modelo linear é adequado para explicar a relação entre a amplitude de deslocamento medida próxima ao grampo e a tensão medida no fio diametralmente oposto ao último ponto de contato entre o cabo e grampo, σ_{α} . Com base nessa mesma análise pode-se obter tanto o valor esperado da constante de proporcionalidade, $K_{\varepsilon}(Y_b)$, que correlaciona a tensão de flexão dinâmica com o deslocamento do condutor; bem como os limites do intervalo de confiança considerando um nível de significância de 5%. Os valores supracitados são reportados na Tabela 9 para o condutor CA/1120 823 MCM, enquanto os dados referentes ao condutor CAL/6201 900 MCM são apresentados na Tabela 10.

Tabela 9 – Resumo da análise de regressão linear dos dados experimentais do condutor CA/1120 823 MCM
(Modelo de regressão: $\sigma_a = K_\varepsilon Y_{b/c}$)

| Grupo de suspensão | Coeficiente Angular, $K_\varepsilon(Y_{b/c})$ (MPa/mm) | | | Coeficiente de Pearson (r) |
|--|--|---|----------|-----------------------------------|
| | Média | Limites do Intervalo de Confiança (95.0%) | | |
| | | Inferior | Superior | |
| Metálico ¹ | 32,14 | 30,36 | 33,93 | 0,99 |
| Metálico com armadura ¹ | 30,19 | 29,46 | 30,93 | 0,98 |
| Elastomérico ¹ | 22,63 | 21,50 | 23,75 | 0,99 |
| HAES (Saída) ² | 6,873 | 6,551 | 7,194 | 0,99 |
| HAES (Borda do invólucro) ² | 6,921 | 5,214 | 8,627 | 0,99 |

¹ Coeficiente angular para deslocamento medido a 89 mm do UPC entre o cabo e o grampo (Y_b)
² Coeficiente angular para deslocamento medido no primeiro ponto de contato entre o cabo e a armadura (Y_c)

Tabela 10 – Resumo da análise de regressão linear dos dados experimentais do condutor CAL/6201 900 MCM
(Modelo de regressão: $\sigma_a = K_\varepsilon Y_{b/c}$)

| Grupo de suspensão | Coeficiente Angular, $K_\varepsilon(Y_b)$ (MPa/mm) | | | Coeficiente de Pearson (r) |
|--|--|---|----------|-----------------------------------|
| | Média | Limites do Intervalo de Confiança (95.0%) | | |
| | | Inferior | Superior | |
| Metálico ¹ | 33,33 | 32,27 | 34,39 | 0,99 |
| Metálico com armadura ¹ | 33,23 | 31,80 | 34,66 | 0,98 |
| Elastomérico ¹ | 21,82 | 20,45 | 23,19 | 0,99 |
| HAES (Saída) ² | 6,762 | 6,136 | 7,388 | 0,99 |
| HAES (Borda do invólucro) ² | 7,318 | 6,952 | 7,684 | 0,99 |

¹ Coeficiente angular para deslocamento medido a 89 mm do UPC entre o cabo e o grampo (Y_b)
² Coeficiente angular para deslocamento medido no primeiro ponto de contato entre o cabo e a armadura (Y_c)

A comparação do desempenho de cada grampo com relação ao nível de tensão no condutor em função do deslocamento pode ser avaliada pelo coeficiente angular reportado na Tabela 9 e na Tabela 10. Como já apontado anteriormente, o grampo de suspensão metálico com ou sem armadura é o único cujos resultados se adequam ao predito pela formulação de Poffenberger-Swart (P-S). Este grampo também apresenta o menor grau de proteção para o condutor em relação a tensão de flexão ocasionada por vibrações eólicas.

O grampo de suspensão elastomérico possui um nível correlação entre tensão e deslocamento inferior ao grampo metálico e metálico com armadura. O elastômero presente do corpo do grampo se deforma durante a vibração do condutor, permitindo uma movimentação transversal do condutor dentro do grampo de suspensão. Dessa forma, o elastômero atua reduzindo a curvatura do condutor no ponto

de medição da deformação. O grampo HAES não pode ser comparado diretamente com os demais, pois a medição do deslocamento foi tomada em uma posição diferente. Na comparação com a previsão da formulação de P-S, o grampo HAES teve uma correlação inferior ao calculado, também indicando que o material elastomérico agiu reduzindo as tensões de flexão dinâmicas na região de acoplamento entre o cabo e grampo de suspensão.

4.2.3 Correção do fator de correlação de P-S (K_{Yb} e K_{Yc}) para grampos elastoméricos e com armadura

Como exposto na seção anterior a formulação proposta por Poffenberger-Swart (P-S) se adequa apenas ao grampo de suspensão metálico com ou sem armadura. Em caráter investigativo, duas abordagens foram propostas para melhorar a correlação da previsão de P-S da tensão de flexão em função do deslocamento. As abordagens consistem em considerar o efeito do material elastomérico e a presença da armadura pré-formada no cálculo das tensões.

No caso específico do grampo HAES, existe uma recomendação do Cigré (1995) que define a distância x como sendo a distância entre o ponto de medição do deslocamento e o centro do grampo de suspensão (o que equivale à metade da região acolchoada), criando assim um comprimento efetivo, nomeado aqui por x' . A recomendação do Cigré foi extrapolada para o grampo de suspensão elastomérico, para este, o ponto de referência para a distância do braço de alavanca x é considerado como sendo a metade do comprimento do material elastomérico. A Figura 4.20 ilustra a distância a ser considerada como comprimento efetivo para os grampos elastomérico e HAES.

Para adequação da formulação de P-S para grampos com armadura pré-formada, foi avaliada a possibilidade de realizar um incremento na rigidez do condutor, o qual passaria a ser equivalente a soma da rigidez mínima da armadura somada à rigidez do condutor. Dessa forma a Equação (2.7) se torna:

$$EI_{min} = (n_v d_v^4 + n_f d_f^4) \frac{E\pi}{64} \quad (4.2)$$

onde n_v e d_v são o número de varetas pré-formadas e o diâmetro das varetas, respectivamente e n_f e d_f o número de fios e o diâmetro dos fios do condutor respectivamente.

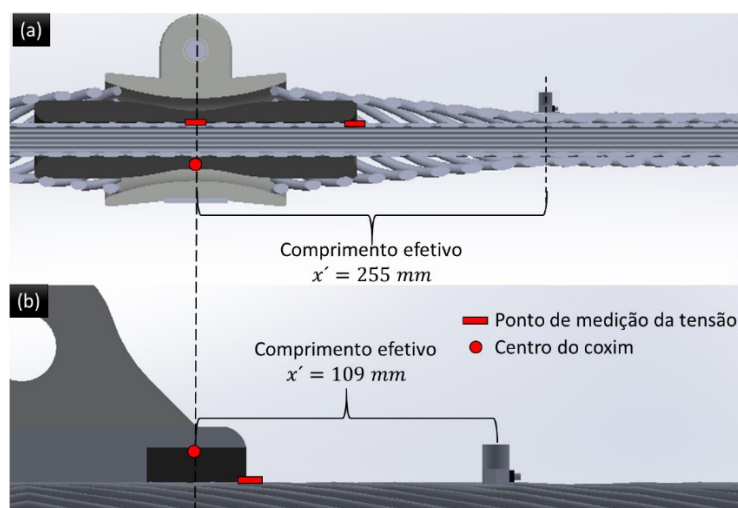


Figura 4.20 – UPC virtual entre o cabo e grampo considerado como sendo a metade do comprimento do material elastomérico. (a) Grampo HAES e (b) Grampo elastomérico.

Um novo cálculo do fator de correlação de Poffenberger-Swart (P-S) foi feito considerando as duas abordagens supracitadas e os resultados são apresentados na Tabela 11 e na Tabela 12, para os condutores CA 1120 e CAL 6201, respectivamente.

O coeficiente angular da regressão linear dos ensaios de dinâmicos apresentados na Tabela 9 representam as correlações entre a tensão de flexão dinâmica obtida experimentalmente, $\sigma_a(\varepsilon)$, e a amplitude de deslocamento, Y_B ou Y_C . Por conta disso, o coeficiente angular do ensaio dinâmico desempenha o papel do fator de correlação experimental, K_ε , que é comparado com o fator de correlação de P-S ajustado ($K'_{Yb/c}$) de acordo com as hipóteses mencionadas nesta seção. Vale ressaltar que como o grampo HAES possui duas posições críticas em relação a tensão deflexão, os pontos utilizados para gerar o coeficiente de correlação experimental para este grampo foram sempre os que apresentaram as maiores tensões para o deslocamento prescrito.

Os valores de K_ε e $K'_{Yb/c}$ ajustado são reportados na Tabela 11 e na Tabela 12, para o condutor CA 1120 e CAL 6201, respectivamente. Os parâmetros utilizados para o ajuste da constante de P-S, $K_{Yb/c}$, para cada condição de montagem, são mencionados nos rodapés das tabelas.

Tabela 11 – Fator de correlação de P-S (K'_{Yb} e K'_{Yc}) ajustado para grampos elastoméricos e com armadura pré-formada - Condutor CA 1120

| Grampo | Condição | Fator de correlação experimental, $K_{\epsilon}(Y_{b/c})$ (MPa/mm) | Fator de correlação de P-S ajustado, $K'_{Yb/c}$ (MPa/mm) | Sem ajuste $\left(\frac{K_{\epsilon} - K_{Yb/c}}{K_{\epsilon}}\right)$ [%] | Ajustado $\left(\frac{K_{\epsilon} - K'_{Yb/c}}{K_{\epsilon}}\right)$ [%] |
|-----------------------|----------|--|---|--|---|
| Metálico | (1) | 32,14 ($\pm 1,78$) | 31,64 | -1,6 | -1,6 |
| Metálico com armadura | (1) | 30,19 ($\pm 0,73$) | 31,64 | -4,8 | -4,8 |
| Metálico com armadura | (2) | 30,19 ($\pm 0,73$) | 21,76 | -4,8 | 27,9 |
| Elastomérico | (3) | 22,63 ($\pm 1,12$) | 23,65 | -39,8 | -4,5 |
| HAES | (4) | 7,24 ($\pm 0,41$) | 7,99 | -185,9 | -10,4 |
| HAES | (5) | 7,24 ($\pm 0,41$) | 4,10 | -185,9 | 43,3 |

(1) Condição sem nenhum ajuste: $EI_{min} = 2,586 \times 10^7$ N.mm² e $x = 89$ mm.

(2) Considerando a rigidez da armadura: $EI_{min} = 1,818 \times 10^8$ N.mm² e $x = 89$ mm.

(3) Comprimento efetivo em relação ao centro do elastômero: $x' = 109$ mm.

(4) Sem considerar a rigidez da armadura, $EI_{min} = 2,586 \times 10^7 \times 10^8$ N.mm² e comprimento efetivo em relação ao centro do grampo, $x' = 255$ mm.

(5) Considerando a rigidez da armadura, $EI_{min} = 1,688 \times 10^8$ N.mm² comprimento efetivo em relação ao centro do grampo, $x' = 255$ mm.

Tabela 12 – Fator de correlação de P-S (K'_{Yb} e K'_{Yc}) ajustado para grampos elastoméricos e com armadura pré-formada - Condutor CAL 6201

| Grampo | Condição | Fator de correlação experimental, $K_{\epsilon}(Y_{b/c})$ (MPa/mm) | Fator de correlação de P-S ajustado, $K_{Yb/c}$ (MPa/mm) | Sem ajuste $\left(\frac{K_{\epsilon} - K_{Yb/c}}{K_{\epsilon}}\right)$ [%] | Ajustado $\left(\frac{K_{\epsilon} - K'_{Yb/c}}{K_{\epsilon}}\right)$ [%] |
|-----------------------|----------|--|--|--|---|
| Metálico | (1) | 33,33 ($\pm 1,06$) | 34,83 | -4,5 | -4,5 |
| Metálico com armadura | (1) | 33,23 ($\pm 1,43$) | 34,83 | -4,8 | -4,8 |
| Metálico com armadura | (2) | 33,23 ($\pm 1,43$) | 23,82 | -4,8 | 28,3 |
| Grampo elastomérico | (3) | 21,82 ($\pm 1,37$) | 26,20 | -52,4 | -20,0 |
| HAES | (4) | 7,32 ($\pm 0,37$) | 9,04 | -214,2 | -23,5 |
| HAES | (5) | 7,32 ($\pm 0,37$) | 4,64 | -214,2 | 36,6 |

(1) Condição sem nenhum ajuste: $EI_{min} = 3,082 \times 10^7$ N.mm² e $x = 89$ mm.

(2) Considerando a rigidez da armadura: $EI_{min} = 1,867 \times 10^8$ N.mm² e $x = 89$ mm.

(3) Comprimento efetivo em relação ao centro do elastômero: $x' = 109$ mm.

(4) Sem considerar a rigidez da armadura, $EI_{min} = 3,082 \times 10^7$ N.mm² e comprimento efetivo em relação ao centro do grampo, $x' = 255$ mm.

(5) Considerando a rigidez da armadura, $EI_{min} = 1,867 \times 10^8$ N.mm² e comprimento efetivo em relação ao centro do grampo, $x' = 255$ mm.

Avaliando as diferenças relativas entre K_E , $K_{Yb/c}$ e $K'_{Yb/c}$ para os grampos com material elastomérico, nota-se que a adequação do comprimento efetivo sendo a distância entre o ponto de medição do deslocamento e o centro do material elastomérico resultou em uma melhoria significativa da previsão da tensão de flexão pela formulação P-S, corroborando com a recomendação do CIGRÉ (1995).

Por outro lado, corrigir a rigidez a flexão com a soma da rigidez do conjunto de varetas com a rigidez do condutor, originou erros superiores do que quando é considerado a constante de correlação $K_{Yb/c}$ sem ajuste. A correção da rigidez, além de aumentar o erro, subestimou os valores de tensão, o que leva a uma análise não conservativa do problema.

Por fim, verifica-se que a comparação entre os resultados da Tabela 11 e da Tabela 12, indicam que as montagens com o cabo condutor CA 1120 se adequaram melhor aos ajustes feitos do que os resultados calculados para o condutor CAL 6201.

4.2.3.1 Abordagem considerando a correção da distância, x , proposta pelo IEEE

Uma outra abordagem possível para o caso do grampo HAES, no qual a medição do deslocamento não pode ser feita a 89 mm do ponto de referência é proposta pelo IEEE (2006a). Segundo o manual de medição de vibração em cabos condutores do IEEE, as amplitudes de deslocamento medidas em um braço de alavanca diferente de 89 mm podem ser corrigidas pela Equação (4.3), onde x^* é o braço de alavanca, ou seja, a distância entre o ponto de referência e a posição de medição da amplitude de deslocamento, Y_x . Porém o mesmo manual não informa qual seria o ponto de referência para grampos com material elastomérico e sugere que essa informação seja buscada junto ao fabricante do grampo.

$$Y_b = Y_x \left(\frac{89}{x^*} \right)^2 \quad (4.3)$$

Para fins de investigação, foram considerados três pontos de referência: o centro do grampo, a seção transversal da borda do invólucro metálico e a saída do grampo, os quais representam um braço de alavanca, x^* , de 250 mm, 185 mm e 120 mm, respectivamente. A partir destes três pontos de referência, as amplitudes de deslocamento medidas no primeiro ponto de contato entre a armadura e o cabo no grampo HAES foram convertidas em Y_b por meio da Equação (4.3).

Os resultados das medições das tensões de flexão máximas no grampo HAES são plotados em função da amplitude de deslocamento calculadas a partir da Equação (4.3) com os três valores de braço de alavanca citados no parágrafo anterior. A análise é apresentada na Figura 4.21 e na Figura 4.22, para os condutores CA 1120 e CAL 6201, respectivamente. Cada conjunto de pontos refere-se a um braço de alavanca, x^* e os resultados são comparados com a equação de P-S, sem ajustes, a qual é representada no gráfico por uma linha contínua.

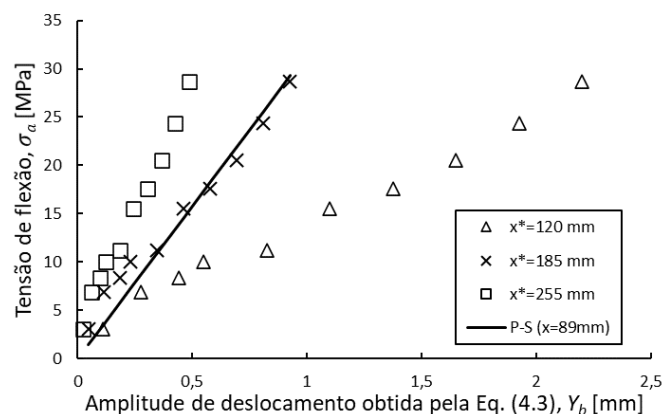


Figura 4.21 - Tensão de flexão em função da amplitude de deslocamento calculado por meio da Eq. (4.3), considerando três comprimentos de braço de alavanca. Grupo: HAES; condutor: CA 1220

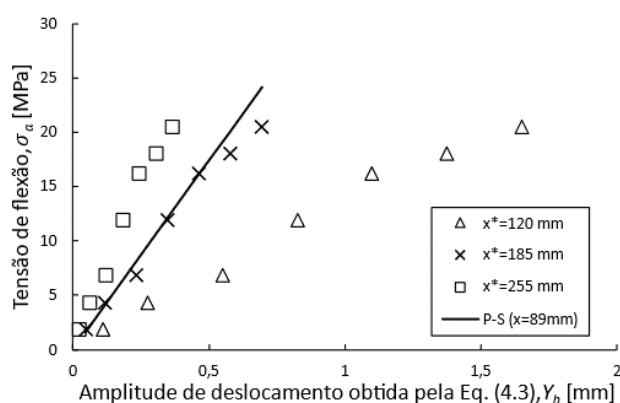


Figura 4.22 - Tensão de flexão em função da amplitude de deslocamento calculado por meio da Eq. (4.3), considerando três comprimentos de braço de alavanca. Grupo: HAES; condutor: CAL 6201

Considerando a abordagem sugerida pelo IEEE, observa-se que na montagem do grampo HAES com ambos os condutores, o ponto de referência que possibilitou o melhor ajuste dos dados experimentais com o previsto pela formulação de Poffenberger-Swart foi a seção transversal da borda do invólucro metálico, cuja distância até o ponto de medição do deslocamento é de 185 mm. Posição esta que o condutor experimenta um aumento localizado da curvatura, devido a limitação de movimentação produzida pelo invólucro metálico (Figura 4.13).

No caso do grampo de suspensão elastomérico, a medição do deslocamento é feita a 89 mm do último ponto de contato entre o cabo e o grampo. Porém, como existe a possibilidade do cabo se mover no interior da região elastomérica, este não é, necessariamente, o ponto de referência para a medição do comprimento do braço de alavanca, x (IEEE, 2006a).

Para fins de investigação, assim como feito na seção anterior, o ponto de referência no grampo elastomérico foi considerado como sendo o centro do material elastomérico (Figura 4.20-b). Dessa forma, o valor de x^* na Eq. (4.3) passa a ser 109 mm.

O resultado da Eq. (4.3) em função da tensão de flexão obtida experimentalmente é apresentado na Figura 4.21 e na Figura 4.22, para a análise referente aos condutores CA 1120 e CAL 6201, respectivamente. Constatou-se que ao utilizar a metodologia do IEEE e o ponto de referência no centro do material elastomérico, a diferença percentual entre o coeficiente de regressão linear dos dados experimentais e o modelo teórico passou de 39,8% para 5,92%, no caso do cabo CA 1220, e de 52,4% para 7,43%. Indicando que o centro do elastômero pode ser considerado como referência para a medição do braço de alavanca tanto para a abordagem do IEEE quanto para a abordagem do CIGRÉ.

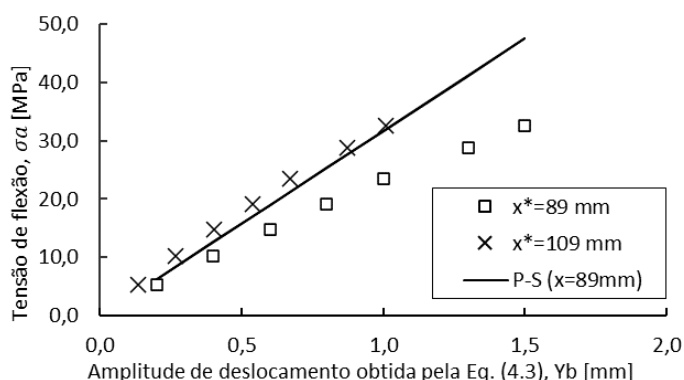


Figura 4.23 – Tensão de flexão em função da amplitude de deslocamento calculado por meio da Eq. (4.3), considerando três comprimentos de braço de alavanca. Grupo: Elastomérico; condutor: CA 1120

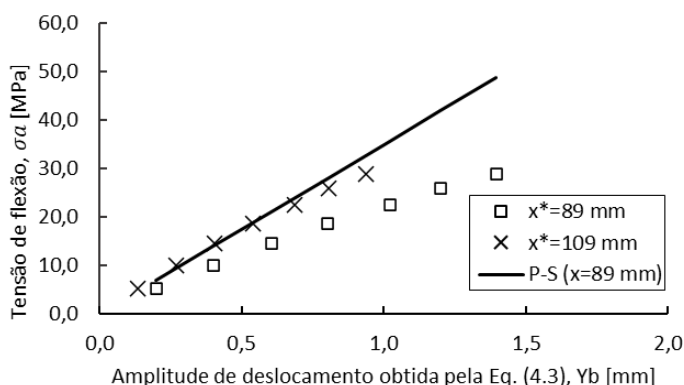


Figura 4.24 – Tensão de flexão em função da amplitude de deslocamento calculado por meio da Eq. (4.3), considerando três comprimentos de braço de alavanca. Grupo: Elastomérico; condutor: CAL 6201

4.2.4 Tensão de flexão (σ_a) em função do parâmetro $f y_{max}$

A tensão de flexão de dinâmica do condutor também pode ser avaliada a partir da velocidade de vibração no antinó por meio da Equação (2.8). A velocidade de vibração no antinó, ou parâmetro $f y_{max}$ é obtida experimentalmente por meio do produto entre a frequência e amplitude de vibração (0-pico) no segundo antinó a partir do grupo de suspensão.

O parâmetro $f y_{max}$ é plotado em função da tensão de flexão máxima medida nos fios do condutor na Figura 4.25 e na Figura 4.26 para os cabos CA 1120 e CAL 6201, respectivamente. Além dos

resultados experimentais das montagens com o grampo metálico, metálico com armadura, elastomérico e HAES (apresentados por linhas de tendência pontilhadas e símbolos geométricos), também é plotada a Equação (2.8).

Quando a tensão de flexão dinâmica, σ_a , no condutor é avaliada por meio da velocidade de vibração no antinó, fy_{max} , o efeito do grampo de suspensão sob a relação entre tensão e severidade de vibração é diferente da observada quando se utiliza a amplitude de deslocamento, Y_b . Com exceção do grampo HAES, todos os demais grampos possuem uma correlação similar entre o parâmetro fy_{max} e a tensão de flexão. Sendo o grampo HAES aquele que mais reduziu a tensão de flexão nos fios do condutor para um mesmo nível de intensidade de vibração no antinó.

Observa-se na Figura 4.25 e na Figura 4.26 que nenhum grampo de suspensão se adequou a predição dada pela Equação (2.8), o que já era esperado. Pois no Orange Book da EPRI (EPRI, 2006) são reportados ensaios, onde a razão entre a tensão medida experimentalmente e a tensão calculada pela Equação (2.8) é, em média, 0,59 para ensaios realizados com grampos de suspensão metálico e grampos rígidos. Foi averiguado que esta mesma razão é em média de 0,54 para os ensaios conduzidos com os grampos metálico, metálico com armadura e elastomérico enquanto que para o grampo HAES é de 0,19. Por outro lado, uma vez que os valores calculados são sempre superiores ao medido pelos extensômetros, a Equação (2.8) trata de uma abordagem conservadora para a estimativa da tensão de flexão nos fios do condutor, embora não seja acurada.

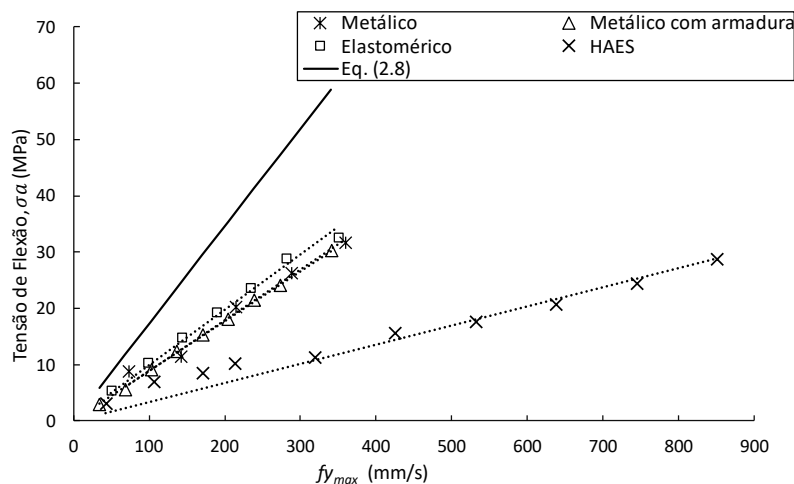


Figura 4.25 – Tensão de flexão dinâmica em função do parâmetro fy_{max} para o condutor CA/1120 823 MCM

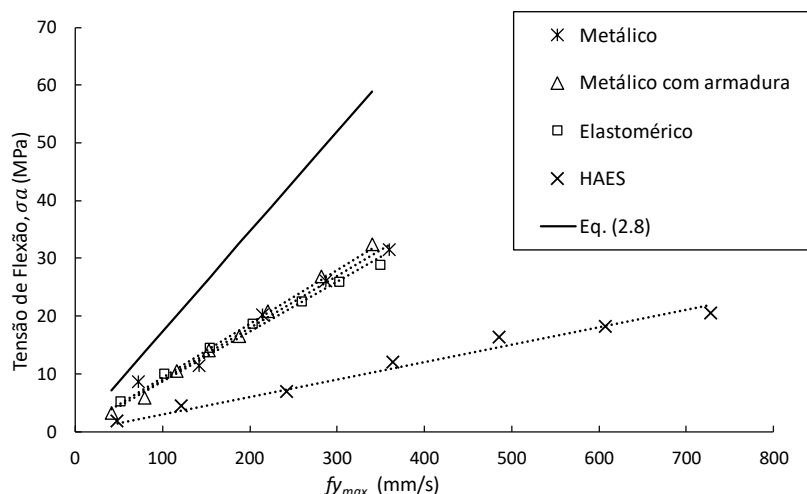


Figura 4.26 – Tensão de flexão dinâmica em função do parâmetro $f y_{max}$ para o condutor CAL/6201 900 MCM

O coeficiente de correlação de Pearson (r), o modelo regressão linear com interseção nula e o intervalo de confiança de 95,0% foram aplicados aos dados experimentais da Figura 4.25 e da Figura 4.26 e o resultado é apresentado na Tabela 13 e na Tabela 14, respectivamente. Observa-se pelo coeficiente de Pearson que a tensão e o parâmetro $f y_{max}$ se correlacionam muito bem ($r \approx 1,0$). O coeficiente angular do modelo de regressão linear expressa a correlação experimental entre a tensão e a velocidade no antinó, $K_{f y_{max}}$ e pode ser usado, dentro do intervalo de velocidade analisado, como fator para converter velocidade no antinó em tensão de flexão nos fios do condutor.

Tabela 13 – Resumo da análise de regressão linear dos dados experimentais (Modelo de regressão: $\sigma_a = K_\epsilon f y_{max}$) - Condutor CA 1120

| Grupo de suspensão | Coeficiente Angular, $K_\epsilon(f y_{max})$ [MPa/mm] | | | Coeficiente de Pearson (r) |
|-----------------------|---|---|----------|--------------------------------|
| | Média | Limites do Intervalo de Confiança (95.0%) | | |
| | | Inferior | Superior | |
| Metálico | 0,090 | 0,087 | 0,093 | 0,99 |
| Metálico com armadura | 0,089 | 0,086 | 0,091 | 0,99 |
| Elastomérico | 0,098 | 0,095 | 0,102 | 1,00 |
| HAES | 0,034 | 0,024 | 0,0438 | 0,99 |

Tabela 14 – Resumo da análise de regressão linear dos dados experimentais (Modelo de regressão: $\sigma_a = K_\epsilon f y_{max}$) - Conductor CAL 6201

| Grupo de suspensão | Coeficiente Angular, $K_\epsilon(f y_{max})$ [MPa/mm] | | | Coeficiente de Pearson (r) |
|-----------------------|---|---|----------|--------------------------------|
| | Média | Limites do Intervalo de Confiança (95.0%) | | |
| | | Inferior | Superior | |
| Metálico | 0,090 | 0,077 | 0,102 | 0,99 |
| Metálico com armadura | 0,093 | 0,087 | 0,099 | 0,99 |
| Elastomérico | 0,086 | 0,082 | 0,091 | 1,00 |
| HAES | 0,030 | 0,027 | 0,033 | 0,98 |

4.2.5 Amplitude de deslocamento (Y_b) em função da velocidade de vibração no antinó ($f y_{max}$)

A correlação entre a amplitude de deslocamento, Y_b , e o parâmetro $f y_{max}$, também foi analisada para os grampos metálico, metálico com armadura, elastomérico e HAES. A correlação entre os parâmetros de medição de intensidade de vibração é útil para transformar limites de resistência a fadiga de cabos condutores que foram estabelecidos em termos de um parâmetro e converte-lo para outro (EPRI, 2006).

Na Figura 4.27 é apresentada a correlação experimental entre a velocidade de vibração no antinó (zero a pico) e a amplitude de deslocamento (pico a pico), os resultados dos condutores CA 1120 e CAL 6201, montados nas quatro configurações de grampos. Em todas as situações foi observado uma relação linear entre os dois parâmetros de intensidade de vibração.

A Tabela 15 reporta o coeficiente angular de cada uma das curvas apresentadas na Figura 4.27, tal coeficiente pode estar associado a rigidez da montagem cabo/grampo. LÉVESQUE et al., (2015) avaliaram a correlação entre Y_b e y_{max} para um condutor com alma de aço e montando em um grampo rígido, no qual o torque de aperto dos parafusos do grampo era aumentado a cada sequência de testes. Com o acréscimo do torque a rigidez na região da montagem do cabo/grampo aumentava, resultando no aumento do y_{max} para um mesmo Y_b . Essa mudança na relação entre a amplitude de deslocamento e amplitude no antinó ocorreu, pois, um maior nível de excitação é requerido para manter um mesmo Y_b em uma situação em que a rigidez da montagem seja mais elevada. Portanto a inclinação das curvas de correlação entre Y_b e $f y_{max}$, pode estar associada a liberdade de movimentação que o grampo permite ao condutor no ponto de medição da amplitude de deslocamento, Y_b . Dessa forma, dentre os grampos com medição da amplitude Y_b , o grampo de suspensão que mais restringe a movimentação do condutor é o metálico seguido por metálico com armadura e elastomérico. O grampo HAES não pôde ser comparado com nenhum outro por conta do diferente ponto de medição em relação aos demais.

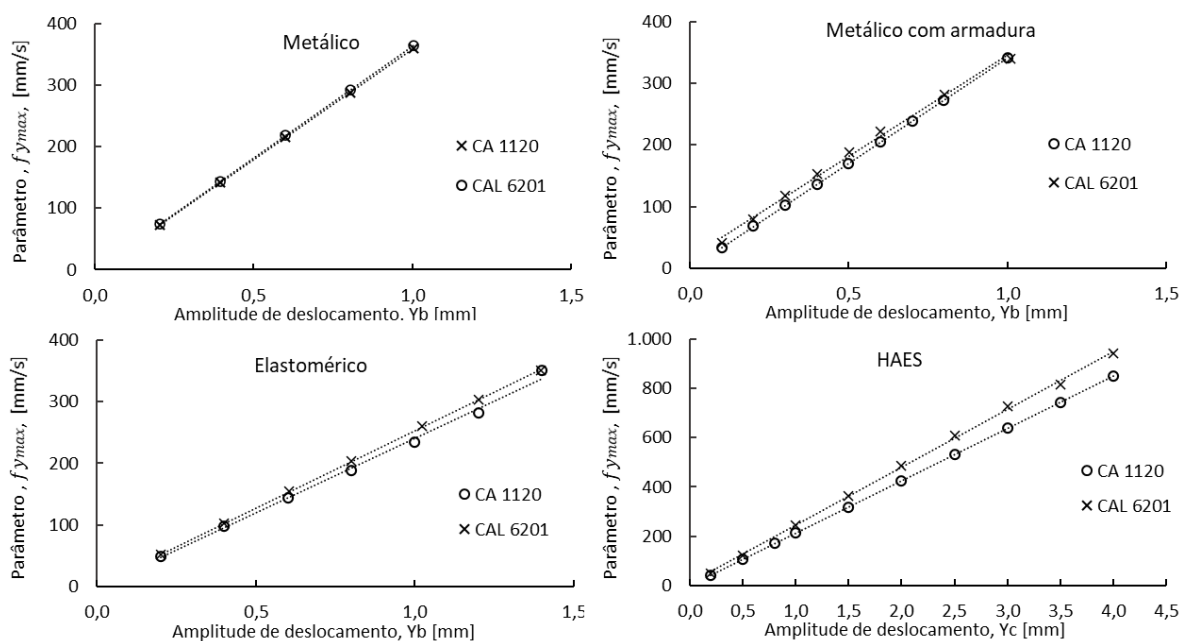


Figura 4.27 – Parâmetro $f y_{max}$ em função da amplitude de deslocamento, Y_b ou Y_c

Tabela 15 - Resumo da análise de regressão linear dos dados experimentais da correlação entre Parâmetro $f y_{max}$ em função da amplitude de deslocamento, Y_b ou Y_c

| Grupo de suspensão | Amplitude de deslocamento | Coeficiente angular da curva: | |
|-----------------------|---------------------------|---|------------------|
| | | Amplitude de deslocamento vs. $f y_{max}$ | |
| | | CA/1120 823 MCM | CAL/6201 900 MCM |
| Metálico | Y_b | 357,9 | 362,7 |
| Metálico com armadura | Y_b | 340,6 | 355,1 |
| Elastomérico | Y_b | 228,9 | 252,7 |
| HAES | Y_c | 212,7 | 242,9 |

4.3 Conclusões parciais

A tensão de flexão dinâmica no ponto de acoplamento entre cabo e o grampo foi medida nos fios dos condutores CA 1120 e CAL 6201. Cada condutor foi montado em quatro diferentes configurações de grampos de suspensão. Os resultados experimentais foram comparados com a tensão teórica de Poffenberger-Swart, também foram analisadas metodologias para aproximar os resultados teóricos dos resultados experimentais. Com base nos resultados e análises, as seguintes conclusões puderam ser feitas:

- A máxima tensão de flexão na região de acoplamento entre cabo e o grampo de suspensão ocorreu no último ponto de contato da montagem, no caso dos grampos metálico com ou

sem armadura e no grampo elastomérico. Já no grampo HAES, a máxima tensão de flexão foi registrada em duas posições: no UPC entre o material elastomérico e o condutor e na seção transversal do invólucro metálico do grampo. O que indica que o condutor se move dentro do grampo e existe uma restrição dessa movimentação gerada pelo invólucro.

- Dentro da faixa de deslocamento analisada, a tensão de flexão dinâmica se correlacionou de forma linear com a amplitude de deslocamento para todas as montagens cabo/grampo.
- A formulação de P-S mostrou-se adequada apenas para o grampo metálico com ou sem armadura.
- As tensões de flexão medidas nos grampos com material elastomérico, foram menores do que as previstas por P-S, indicando que o material elastomérico atua reduzindo a curvatura local do condutor no ponto de acoplamento.
- A metodologia do Cigré para a correção da tensão de P-S no grampo HAES foi avaliada. Nesse caso, foi constatada uma melhor correlação entre os resultados teóricos e os resultados experimentais, quando o centro do grampo HAES é considerado como ponto de referência para medição do braço de alavanca, x . A mesma metodologia foi extrapolada para o grampo de suspensão elastomérico, no qual foi considerado o centro da região acolchoada como sendo o ponto de referência. Nesse último caso, também houve uma melhora na predição da tensão de flexão. Os ajustes da formulação ainda não foram os mais adequados, mas representam uma melhora significativa na previsão da tensão de flexão, além de se mostrarem uma abordagem conservativa para a análise do problema.
- Também foi avaliada a possibilidade de incorporar a rigidez da armadura pré-formada na rigidez mínima do cabo condutor para o cálculo do fator de correlação de P-S. Nesse caso, os resultados calculados foram menores do que os resultados experimentais, ou seja, considerar a rigidez da armadura pré-formada resulta no cálculo de tensões não conservativas.
- A recomendação do IEEE para a correção das amplitudes de deslocamento medidas em uma posição diferente de $x = 89$ mm também foram analisadas. Para isso, foram considerados três pontos de referência para a medição do braço de alavanca no grampo HAES. Sendo que a posição que resulta na melhor aproximação é a seção transversal da borda do invólucro metálico.
- Os grampos metálicos, com ou sem armadura e o grampo elastomérico apresentaram uma correlação entre a tensão de flexão e o parâmetro $f y_{max}$ bastante similar. Tal fato pode ser explicado pela diferença da relação $f y_{max} x Y_b$ que cada grampo possui e que é contrabalanceada com a relação $\sigma_a x Y_b$. Já as montagens com grampos HAES apresentaram menor correlação $\sigma_a x f y_{max}$ dentre os grampos de suspensão analisados.

5 AVALIAÇÃO DO EFEITO DO GRAMPO ELASTOMÉRICO SOBRE A VIDA EM FADIGA DE CABOS CONDUTORES

Na região de acoplamento entre o cabo e grampo de suspensão o movimento oscilatório provocado pela vibração eólica gera tensões de flexão alternada. Quando combinadas com as tensões estáticas (carga de esticamento, força compressiva no interior do grampo, curvatura do cabo) formam um estado complexo de tensões na região de contato entre os fios, o que provoca a fadiga por *fretting* nos fios do condutor. Apesar de haver registros de falhas em todos os tipos de dispositivos instalados na linha de transmissão que restringem o movimento do condutor, a maior incidência de quebras ocorre na montagem grampo de suspensão/condutor. Existem diferentes tipos de grampos suspensão que oferecem distintos graus de proteção ao cabo condutor contra fadiga. Dentre eles, o grampo de suspensão elastomérico, conhecido comercialmente por grampo CGS™ (*Cushion Grip Suspension*). Este grampo foi projetado para reduzir tensões dinâmicas e estáticas na montagem e reduzir o desgaste no contato entre o cabo e o grampo de suspensão, quando comparado com grampo metálico convencional

Nesse capítulo são apresentados a metodologia e os resultados de ensaios de fadiga em cabos condutores montados no grampo elastoméricos. Dois parâmetros foram utilizados para correlacionar a vida em fadiga com a intensidade de vibração: o parâmetro $f_{y_{max}}$ e a tensão de flexão nos fios do condutor.

Para a avaliação do efeito do material elastomérico do grampo na fadiga do condutor, os resultados de desempenho em fadiga foram comparados com dados referentes a ensaios de fadiga dos mesmos condutores montados em grampos metálicos. Além disso, é apresentada uma análise de falhas com relação ao tipo de superfície de falha e posição que ocorreu o rompimento do fio.

5.1 Metodologia experimental

A metodologia experimental foi desenvolvida com base nas recomendações da norma IEC 62568 (IEC, 2015). A metodologia tem por finalidade gerar as curvas que correlacionem a intensidade de vibração *versus* número de ciclos até a falha dos cabos condutores CAL/6201 900 MCM e CA/1120 823 MCM montados em um grampo de suspensão tipo elastomérico. As curvas de fadiga foram produzidas a partir de ensaios com carga de esticamento de 20% da resistência mecânica a tração dos cabos condutores.

Todos os ensaios foram realizados nas bancadas do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia, cuja descrição completa está apresentada no Capítulo 3. Foram realizados um total de 18 ensaios de fadiga, sendo 9 ensaios em cada cabo condutor. Foi utilizado, em todos os ensaios, o grampo elastomérico para simular a suspensão do cabo em uma linha de transmissão

com ângulo de saída de 10°. O torque de aperto nos parafusos do grampo foi de 54 N.m, valor recomendado pelo fabricante. Após cada ensaio, a região de falha foi analisada, onde se observou a posição da falha e o tipo da superfície de falha.

5.1.1 Instrumentação e sensoriamento do ensaio

O ensaio de fadiga é realizado com base na prescrição de uma amplitude de deslocamento (Y_b) em um ponto do condutor a 89 mm do último ponto de contato entre o cabo e o grampo. Um acelerômetro é posicionado onde o deslocamento Y_b é prescrito, para juntamente com um sistema de controle em malha fechada, manter o cabo vibrando na condição desejada.

Apesar do ensaio de fadiga se basear na prescrição do deslocamento, Y_b , a correlação entre a vida em fadiga e a intensidade de vibração é feita por meio de dois parâmetros: (i) a tensão de flexão máxima nos fios da camada externa do condutor, a qual é medida por meio de três extensômetros colados no ponto diametralmente oposto ao UPC entre o cabo e o grampo. Outra forma de avaliar a severidade da vibração é por meio do (ii) parâmetro $f y_{max}$ (frequência de vibração vezes amplitude de vibração no antinó). Tal parâmetros é aquisitado por meio de um acelerômetro montado sobre o segundo antinó a partir do grampo de suspensão em direção ao *shaker*. O posicionamento dos acelerômetros e dos extensômetros pode ser observado na Figura 5.1.

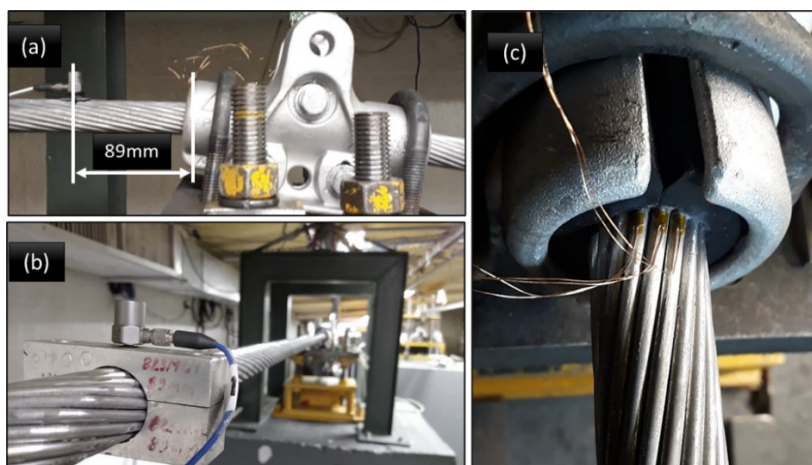


Figura 5.1 – (a) Acelerômetro posicionado a 89 mm do UPC; (b) Acelerômetro posicionado no antinó (c) Extensômetros colocados no UPC entre o cabo e grampo.

5.1.2 Detecção de falha do fio

O critério de parada no ensaio de fadiga é a quebra de 10% dos fios, o que, no caso dos condutores analisados, corresponde a quatro fios rompidos. A detecção da falha por fadiga dos fios do condutor baseia-se na medição da rotação do condutor em torno do próprio eixo (RAWLINS, 1979). No

rompimento de um fio, a carga de tração é redistribuída dentre os demais fios e uma consequente movimentação relativa ocorre entre as camadas do condutor, provocando a rotação.

Para detectar a quebra de um fio são utilizadas hastes rigidamente conectadas no primeiro nó a partir do grampo em direção ao *shaker*, as quais servem para amplificar a rotação do condutor. Dois sensores de deslocamento a laser são utilizados para capturar a variação da posição das hastes, conforme ilustrado na Figura 5.2.

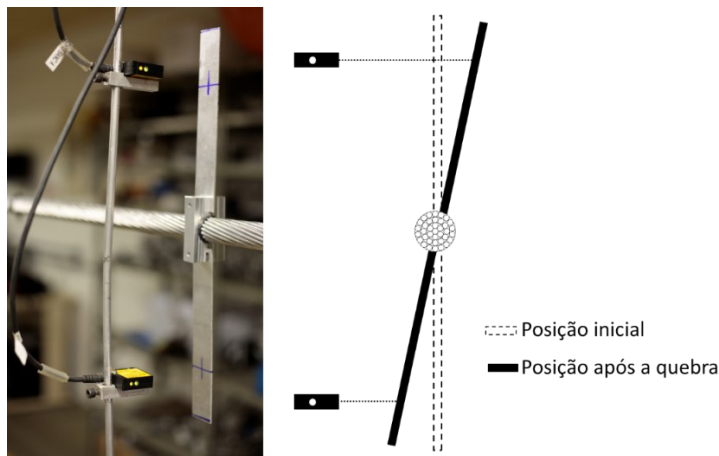


Figura 5.2 – Dispositivo de detecção de quebras em ensaios de fadiga de cabos condutores.

Os dados adquiridos pelo dispositivo de detecção de quebras são combinados com os dados de outro sensor de deslocamento a laser, esse posicionado abaixo do ponto de prescrição do deslocamento e responsável pela contagem dos ciclos de vibração (Figura 5.3). O resultado final do procedimento de detecção de quebras é apresentado na Figura 5.4, onde cada variação de nível no gráfico indica a quebra de um fio do condutor e o respectivo ciclo de vibração que ocorre a quebra.

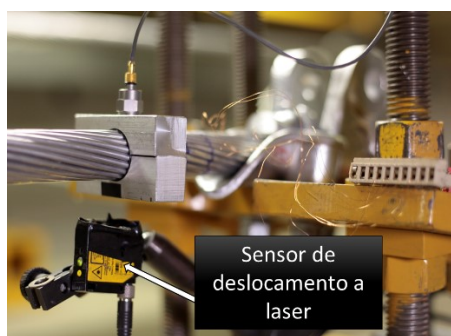


Figura 5.3 – Sensor de deslocamento a laser responsável pela contagem de ciclos de vibração durante o ensaio de fadiga

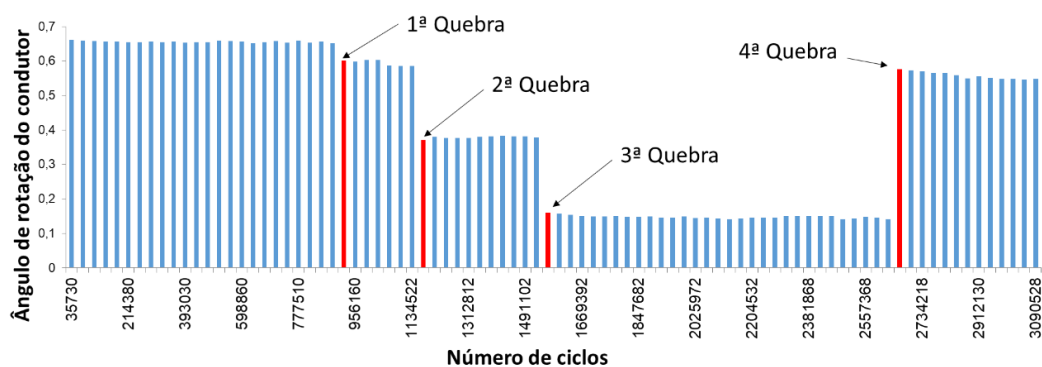


Figura 5.4 – Gráfico gerado a partir do dispositivo de detecção de quebras ao longo de um ensaio de fadiga

5.1.3 Procedimento experimental

O ensaio de fadiga em cabos condutores consiste em manter o cabo condutor vibrando em uma condição específica de deslocamento (Y_b), frequência e carga de esticamento. Para isso o cabo condutor é tracionado na bancada de ensaios de vibração em cabos condutores e fixo à bancada por meio do grampo de suspensão, onde é induzido um movimento vibratório nas condições pré-estabelecidas para o ensaio, mais detalhes da montagem e execução do ensaio são apresentados na seção 3.3.

O nível de excitação do condutor foi prescrito a partir da amplitude de deslocamento Y_b , a frequência de excitação do condutor corresponde a uma de suas frequências naturais e é encontrada por meio de uma varredura em frequência (ver seção 3.3.1). Foram empregadas frequências de excitação em torno de 24 Hz com a finalidade de reduzir o tempo de execução dos ensaios e ao mesmo tempo preservando a integridade dos equipamentos. Nos ensaios foram utilizadas cargas de esticamento equivalentes a 20% da carga de ruptura de cada cabo condutor, por se tratar de um valor típico de carga de tração em linhas de transmissão brasileiras. O torque de aperto dos parafusos do grampo de suspensão elastomérico foi de 54 N.m, valor recomendado pelo fabricante do grampo.

5.1.3.1 Fator de correlação experimental, deslocamento/tensão

Durante o ensaio de fadiga, a região do cabo próxima ao grampo de suspensão é submetida a uma tensão de flexão dinâmica. A formulação desenvolvida por Poffenberger-Swart (POFFENBERGER; SWART, 1965), para estimar a tensão de flexão nos fios do condutor, foi utilizada em diversos trabalhos como base para comparação do desempenho em fadiga de diferentes condutores e/ou cargas de esticamento distintas (CARDOU et al., 1990; FADEL et al., 2012; KALOMBO et al., 2017, 2018).

Porém, a formulação de Poffenberger-Swart foi idealizada para a situação da flexão de um cabo condutor montado em um grampo rígido, o que não é o caso do grampo elastomérico. Por conta da menor rigidez do material elastomérico a curvatura do condutor não pode ser avaliada por meio da medição da amplitude de deslocamento em um ponto próximo ao UPC entre o cabo e grampo de

suspensão (EPRI, 2006; IEC, 2015). Nessa situação o CIGRÉ (CIGRÉ, 1995) recomenda que o fator de correlação (K_{Y_b}) entre deslocamento (Y_b) e tensão seja determinado por meio de ensaios de vibração realizados em laboratório. A metodologia experimental para a obtenção, os valores do fator de correlação experimental (K_ε) para a montagem condutor/grampo elastomérico e os respectivos resultados são relatados no Capítulo 4 deste trabalho. Por conveniência, os resultados de K_{Y_b} e os resultados de K_ε são repetidos aqui na Tabela 16.

Tabela 16 – Fator de correlação entre tensão e deformação – experimental e teórico

| Condutor | Fator de correlação de P-S, K_{Y_b} (MPa/mm) | Fator de correlação experimental, K_ε (MPa/mm) | |
|----------|---|---|--------------|
| | | Metálico | Elastomérico |
| CA 1120 | 31,64 | 32,09 | 22,63 |
| CAL 6201 | 34,83 | 33,33 | 21,82 |

5.2 Resultados e discussões

A influência do grampo de suspensão elastomérico na vida em fadiga dos cabos condutores foi avaliada por meio de uma comparação com ensaios realizados com os mesmos condutores montados em grampos metálicos. Os ensaios de fadiga utilizados na comparação foram conduzidos por Kalombo na mesma bancada experimental e igual carga de tração (KALOMBO et al., 2018, 2019).

Uma vez que a formulação de P-S não é válida para grampos elastoméricos, outros parâmetros precisaram ser utilizados como base de comparação para avaliação do desempenho em fadiga dos condutores montados em grampos de suspensão elastoméricos e metálicos. A avaliação foi realizada mediante duas formas: uma análise local da curvatura do condutor no ponto de restrição de movimento, representada pela tensão de flexão obtida pela medição de extensômetros colados na posição crítica da tensão de flexão; e outra análise por meio do parâmetro $f y_{max}$ que enxerga o comportamento vibratório do condutor de forma independente da geometria ou configuração do grampo de suspensão.

Apesar do parâmetro $f y_{max}$ representar uma comparação mais realista com relação a vibração do condutor, uma vez que é independente da configuração do grampo, esse é de difícil medição, especialmente em linhas de transmissão. O que restringe o seu uso a medições em laboratório, simulações ou modelos matemáticos baseados em resultados experimentais. Por outro lado, a tensão de flexão dinâmica é correlacionada com a amplitude de vibração medida a 89 mm do UPC entre o cabo e grampo, a qual pode ser medida em campo por meio de vibrógrafos (IEEE, 2006b), permitindo uma aplicabilidade mais ampla dos resultados gerados a partir da avaliação da tensão de flexão.

Originalmente, os ensaios de fadiga em grampos metálicos conduzidos por Kalombo (KALOMBO et al., 2018, 2019) foram conduzidos com base na prescrição da amplitude de deslocamento, Y_b , e utilização da equação de P-S para correlacionar o deslocamento com a tensão de flexão em cada cabo

condutor, porém, no presente trabalho o valor de Y_b foi convertido para tensão de flexão por meio do fator de correlação experimental, K_ε (Tabela 16).

Na Tabela 17 são reportadas as amplitudes de deslocamento utilizadas nos ensaios de fadiga com grampo metálico e com grampo elastomérico, bem como, a tensão de flexão proveniente do produto entre K_ε e Y_b . Também é reportado, na mesma tabela, o respectivo valor de fy_{max} para cada amplitude de deslocamento.

Tabela 17 – Parâmetros do ensaio de fadiga com grampo elastomérico e metálico

| Condutor/ Grampo | Amplitude de deslocamento, Y_b (mm) | Tensão de flexão, σ_a (MPa) | Parâmetro fy_{max} (mm/s) |
|---------------------------|---|---------------------------------------|--------------------------------|
| CA 1120/ Elastomérico | 1,20 | 27,2 | 275 |
| | 1,30 | 29,4 | 298 |
| | 1,40 | 31,7 | 320 |
| CAL 6201/ Elastomérico | 1,24 | 27,2 | 314 |
| | 1,35 | 29,4 | 341 |
| | 1,45 | 31,7 | 367 |
| CA 1120/ Metálico | 0,82 | 25,5 | 293 |
| | 0,88 | 27,4 | 315 |
| | 0,89 | 30,5 | 351 |
| CAL 6201/ Metálico | 0,71 | 24,7 | 245 |
| | 0,85 | 29,6 | 293 |
| | 0,94 | 32,7 | 324 |

5.2.1 Ensaio de fadiga

Os ensaios de fadiga foram executados continuamente até que se alcançasse o critério de parada do ensaio. De acordo com a norma IEC 62568 (IEC, 2015), a finalização do ensaio de fadiga em cabos condutores pode ser feita tanto com base na ocorrência da quebra do primeiro fio, quanto no caso da quebra de 10% dos fios do condutor – o que representa a falha do quarto fio para os condutores testados. Por conta disto, optou-se por apresentar os resultados da curva de fadiga considerando como critério de falha tanto o rompimento do primeiro fio quanto o do quarto fio.

Os resultados para as montagens com grampos de suspensão elastomérico e metálico foram plotados em gráficos tensão de flexão, σ_a , em função do número de ciclos até a falha, N (Figura 5.5 e Figura 5.7) e em gráficos do parâmetro fy_{max} em função do número de ciclos até a falha. Ressalta-se que as tensões de flexão na ordenada na Figura 5.5 e na Figura 5.7 se referem as tensões obtidas pelo produto da amplitude de deslocamento, Y_b , e o fator de correlação experimental, K_ε .

Os resultados dos ensaios de fadiga do condutor CA/1120 823 MCM são apresentados na Figura 5.5 e na Figura 5.6, enquanto os resultados do cabo CAL/6201 900 MCM são mostrados na Figura 5.7

e na Figura 5.8. Nestas figuras os dados experimentais referentes a montagem com grampo metálico são representados por quadrados e o grampo elastomérico por losangos.

Na Figura 5.5 até a Figura 5.8, é possível identificar uma melhora no desempenho em fadiga dos dois condutores – tanto em termos da amplitude de tensão ou em termos do parâmetro $f_{y_{max}}$ – quando os condutores estiveram montados no grampo elastomérico. Os dados brutos referentes aos ensaios de fadiga em grampos elastoméricos estão disponíveis no Apêndice I.

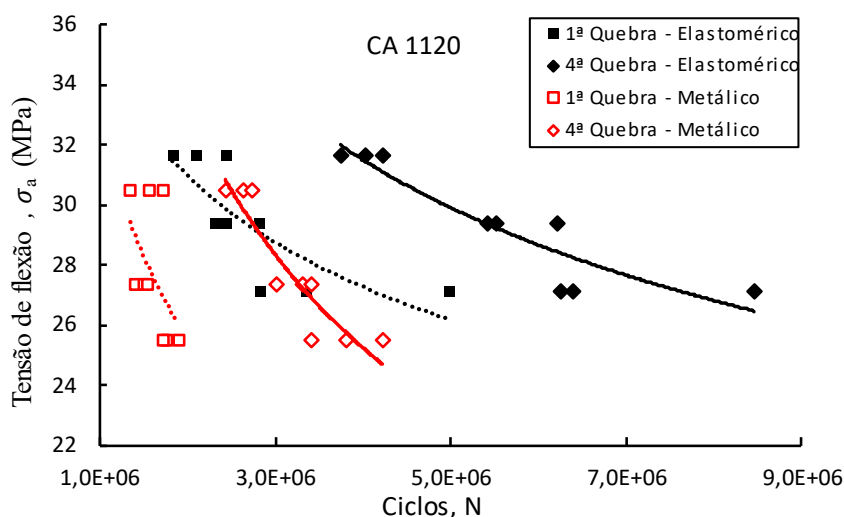


Figura 5.5 – Curva $\sigma_a \times N$ condutor CA 823 MCM liga 1120 montado em grampo elastomérico e em grampo metálico

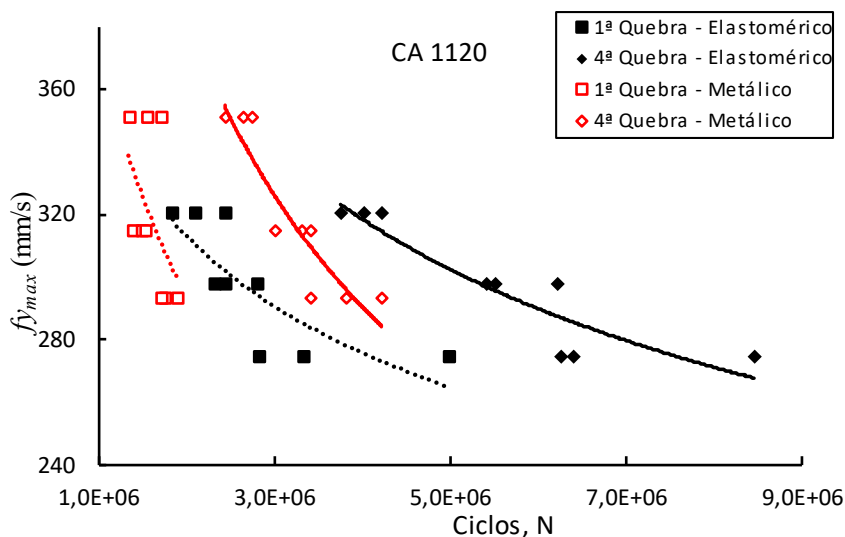


Figura 5.6 – Curva $f_{y_{max}} \times N$ do condutor CA 823 MCM liga 1120 montado em grampo elastomérico e em grampo metálico

O aumento da vida em fadiga para a montagem dos condutores com grampo elastomérico pode estar associado a diversos fatores mecânicos, tais como o aumento da conformidade do acoplamento, a redução da pressão de contato e da abrasão entre o condutor e o grampo. Adicionalmente, o grampo

elastomérico reduz as forças de contato entre os fios do condutor, enquanto diminui a rigidez a flexão da montagem próximo ao ponto de restrição de movimento. Portanto, para as condições estabelecidas nesse estudo, que restringem a análise para vidas na faixa de 10^5 e 10^7 ciclos de vibração, os condutores CA 1120 e CAL 6201 sempre apresentam uma vida em fadiga superior quando montados em grampos elastoméricos.

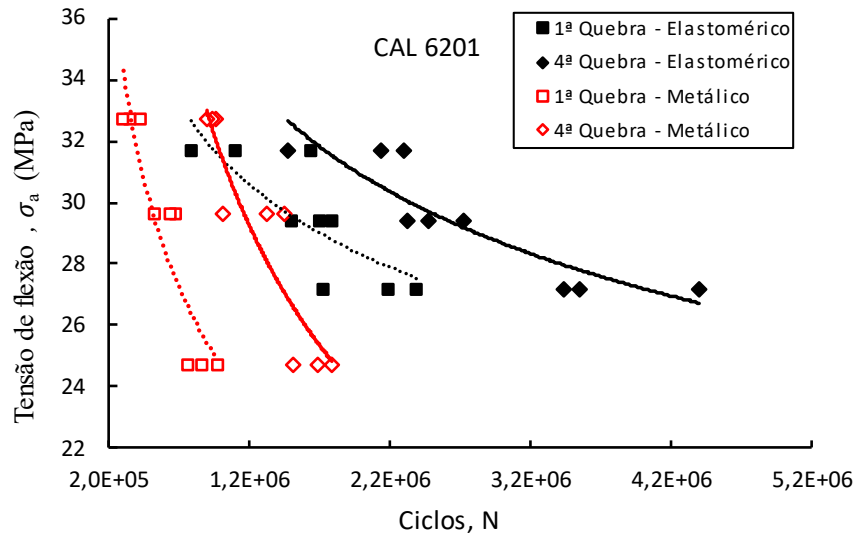


Figura 5.7 – Curva $\sigma_a \times N$ do condutor CAL/6201 900 MCM montado em grampo elastomérico e em grampo metálico

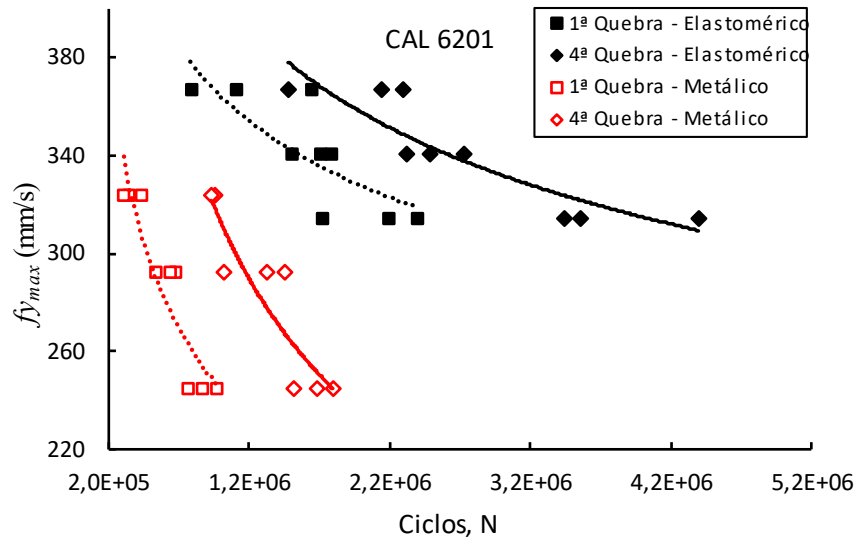


Figura 5.8 – Curva $f_{y_{max}} \times N$ condutor CAL/6201 900 MCM montado em grampo elastomérico e em grampo metálico

5.2.2 Análise de Falhas

Ao final de cada ensaio de fadiga a região do cabo em torno no grampo de suspensão é removida e analisada com o intuito de obter informações, tais como: posição longitudinal e radial da falha e o tipo

de superfície de falha. Além disso, cada falha é identificada e catalogada para posteriormente ser analisada no microscópio eletrônico de varredura.

5.2.3 Comparação entre as falhas do condutor montado no grampo metálico e elastomérico

A análise das falhas foi conduzida em duas etapas, a primeira trata de uma análise comparativa entre as falhas no grampo elastomérico e metálico e a segunda trata de uma análise mais minuciosa das falhas registradas no grampo elastomérico.

Nesta seção, os resultados do levantamento das características das falhas dos condutores CA 1120 e CAL 6201 montados no grampo elastomérico foram comparados com os dados dos ensaios em grampos metálicos realizados por Kalombo (KALOMBO et al., 2018, 2019).

5.2.3.1 *Posição longitudinal*

A posição longitudinal da falha é avaliada por meio da medição da distância entre a falha e o último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão. Para melhor visualização dos resultados, a região onde encontram-se as falhas foi dividida em 6 intervalos de 19,75 mm, o que corresponde à metade do comprimento do elastômero. O percentual de quebras encontrado em cada intervalo é apresentado na Figura 5.9 e na Figura 5.10 para as montagens com os grampos elastomérico e metálico, respectivamente. Em cada figura são apresentados os dados relativos aos cabos CA/1120 823 MCM e CAL/6201 900 MCM.

A maior incidência de falhas ocorreu no primeiro intervalo para dentro do grampo, em todas as configurações analisadas. O grande número de falhas encontradas indica que nesta região é onde se localiza a combinação mais crítica de tensões de flexão e forças compressivas para o cabo condutor. Com relação a comparação entre os grampos observa-se que quando o condutor é montado no grampo metálico, as falhas ocorrem de forma mais concentrada. Enquanto que na montagem com o grampo elastomérico a dispersão da localização das falhas é maior. O que sugere que no grampo metálico existe uma região significativamente mais crítica que as demais, enquanto que no grampo elastomérico, apesar de existir uma zona preferencial para falha, essa não é tão crítica quanto a zona preferencial de falha do grampo metálico.

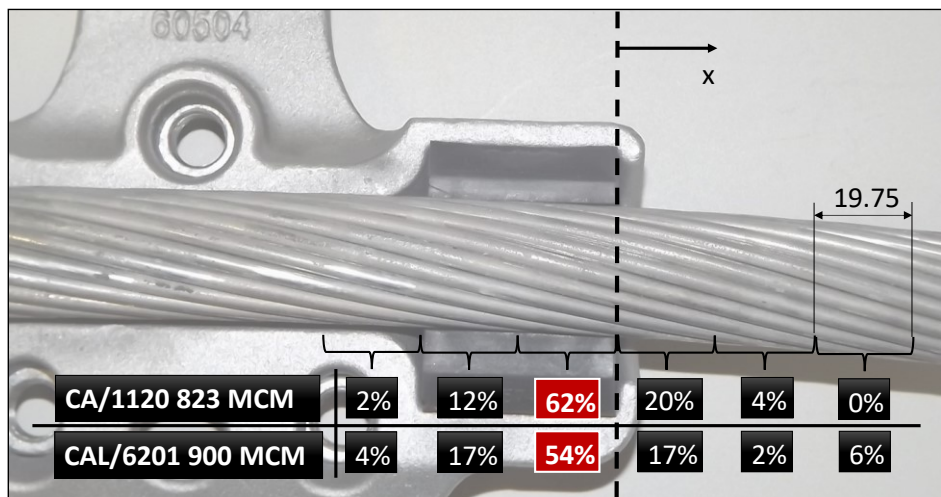


Figura 5.9 – Posição longitudinal das falhas dos condutores CA/1220 e CAL 6201 montados no grampo elastomérico

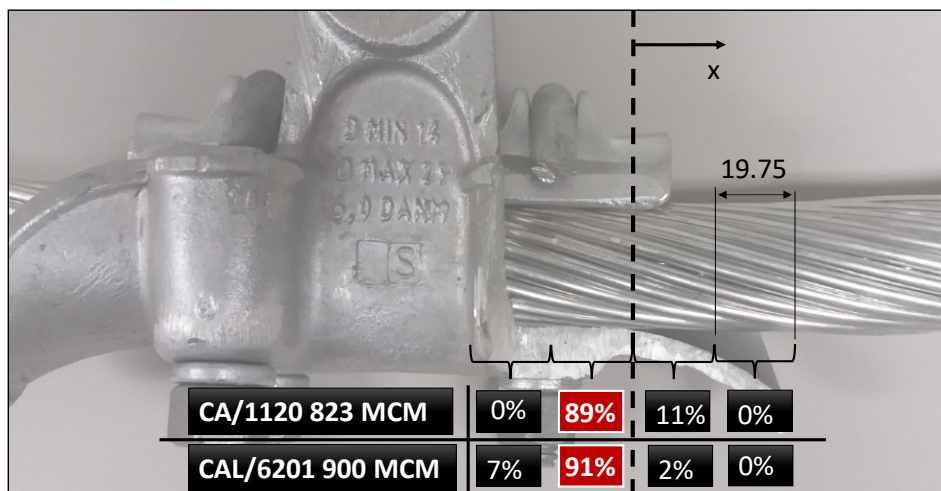


Figura 5.10 – Posição longitudinal das falhas dos condutores CA/1220 e CAL 6201 montados no grampo metálico

5.2.3.2 Posição Radial

Foi realizado um mapeamento para verificar a ocorrência de quebras de acordo com o posicionamento radial da falha. Neste sentido, as falhas foram classificadas por ocorrência de acordo com a camada e se a falha ocorreu no topo ou na base da montagem cabo/grampo. A Figura 5.11 ilustra esquematicamente a classificação da falha de acordo com a posição radial.

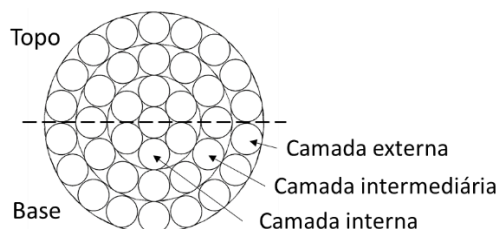


Figura 5.11 – Seção transversal do condutor indicando a classificação da falha de acordo com a posição radial

As distribuições de falhas por camada dos cabos CA 1120 e CAL 6201 montados nos grampos de suspensão elastomérico e metálico são apresentadas na Figura 5.12. Na montagem com grampo elastomérico, as falhas ocorreram predominantemente na camada intermediária, enquanto que no grampo metálico a maioria das falhas ocorreu na camada externa. Tal comportamento foi observado tanto para o condutor CA 1120 quanto CAL 6201 e pode ter relação com fato de que o material elastomérico do grampo reduz a abrasão que ocorre no contato entre o condutor e o corpo do grampo, diminuindo a quantidade de falhas na camada externa.

Uma vez que inspeções visuais podem verificar apenas falhas na camada externa, a ocorrência de falhas na camada intermediária na montagem com o grampo elastomérico representa um aspecto negativo para este grampo. Neste caso, faz-se necessário o emprego de outras técnicas, como o uso de inspeção termográfica para a detecção de falhas (CIMINI; FONSECA, 2013).

Com relação a localização das falhas na base e no topo do grampo (Figura 5.13), o topo da montagem com o grampo elastomérico mostrou-se uma região significativamente mais crítica do que a base para os dois condutores testados. Já na montagem com grampo metálico os resultados apontam que a posição mais crítica varia de acordo com o condutor testado, sendo que a maior ocorrência de falhas do CA 1120 foi na base do grampo e no CAL 6201 foi no topo da montagem.

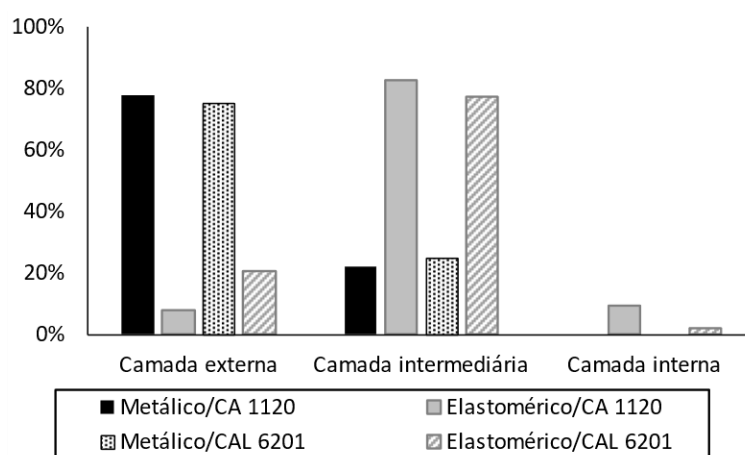


Figura 5.12 – Distribuição das falhas por camada do condutor - comparação entre grampo metálico e elastomérico

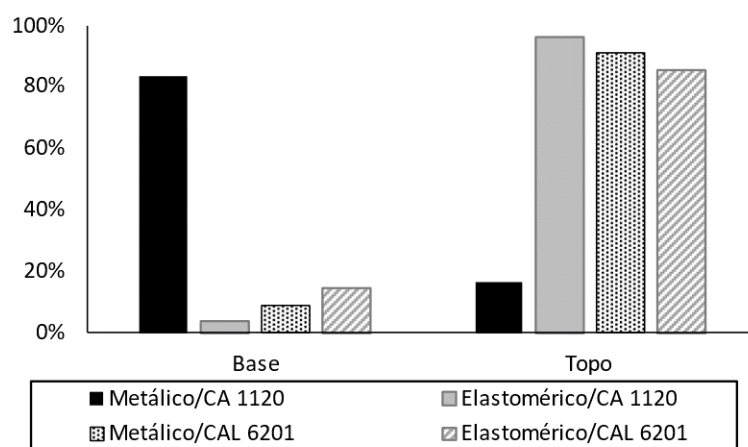


Figura 5.13 - Distribuição das falhas por localização relativa (topo ou base) - comparação entre grampo metálico e elastomérico

5.2.3.3 Tipo de superfície de falha

Em relação a superfície de falha, foram identificados três tipos: Plana, 45° e V, o formato de cada tipo pode ser observado na Figura 5.14. O tipo de falha predominante no cabo CA 1120 foi o tipo 45°, tanto no grampo de suspensão metálico quanto no grampo elastomérico. Já no cabo CAL 6201, ocorreu uma predominância da quebra tipo Plana (Figura 5.15). Como os condutores foram submetidos ao mesmo tipo de carregamento (mesmas tensões de flexão e condição de engastamento), a diferença do tipo predominante de quebra está associada ao tipo de material de cada condutor, uma vez que as propriedades mecânicas desses dois tipos de alumínio são distintas (ver seção 3.1).

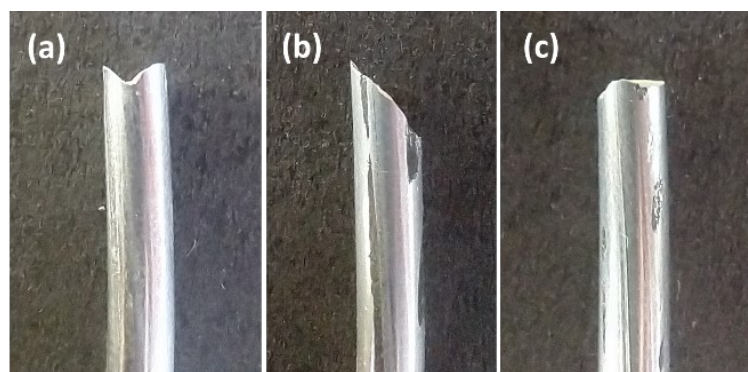


Figura 5.14 – Tipos de superfície encontrados nos fios rompidos dos ensaios de fadiga. Sendo os tipos (a) em V, (b) a 45° e (c) plana.

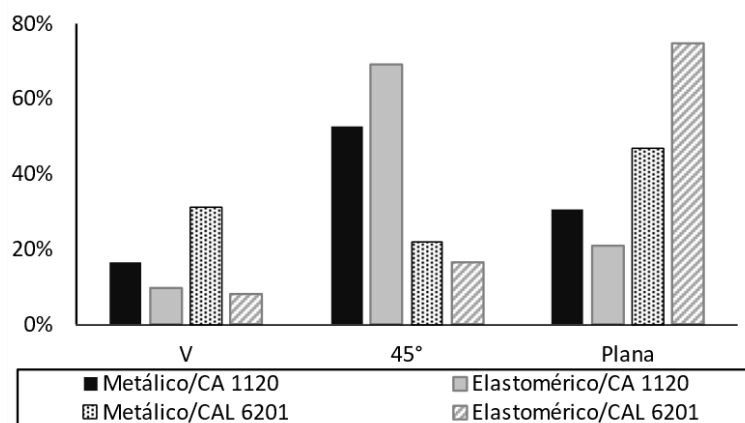


Figura 5.15 – Proporção de tipos de superfície de falha encontradas nos cabos CAL 823 e CAL 900

5.2.4 Análise de falhas do grampo elastomérico

Nesta seção é apresentada uma segunda etapa na análise de falhas. Aqui apenas os dados referentes ao ensaio de fadiga com grampo elastomérico foram analisados.

5.2.4.1 Distribuição radial das falhas

A distribuição das falhas ocorridas nos ensaios de fadiga dos cabos CAL/1120 823 MCM e CAL/6201 900 MCM com grampo elastomérico é apresentada na Figura 5.16, onde a incidência de falhas é indicado por diferentes símbolos descritos na legenda. Após o ensaio de fadiga, todas as amostras analisadas tiveram o fio mais superior da intermediária camada rompido e em apenas um ensaio com cabo CAL 1120 não houve falha nos dois fios da mesma camada adjacentes a este. Confirmando a predominância de falhas no topo da montagem e na camada intermediária do condutor.

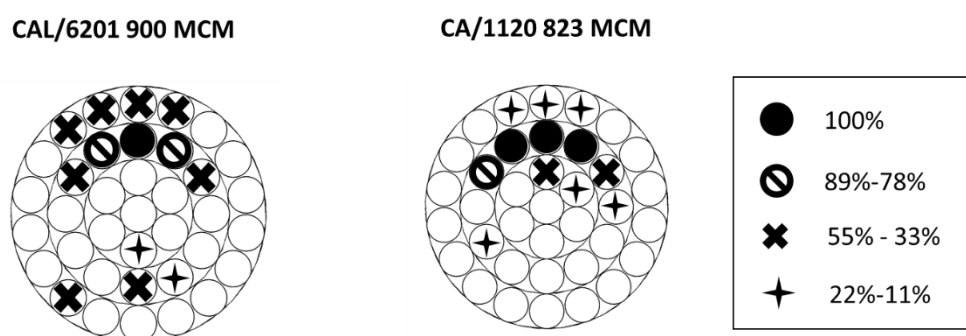


Figura 5.16 – Posicionamento radial da falha

5.2.4.2 Distância da falha em relação ao UPC

A média da distância entre todas as falhas e o UPC foi calculada para cada quebra de acordo com: (a) a camada do condutor, (b) a posição (base ou topo), (c) o tipo de superfície de falha e (c) as tensões

de flexão em que as quebras ocorreram. Os resultados são apresentados na Figura 5.17 para os condutores CA 1120 e CAL 6201.

A média da distância entre a falha e o UPC considerando todas as falhas para o condutor CA 1120 foi de -5,76 mm enquanto que para o condutor CAL 6201 foi de -7,08 mm (valores negativos são referentes as quebras no interior do grampo). Quando observada a média da distância em relação à camada de ocorrência, o único resultado positivo (quebra fora do grampo) foi do CAL 6201 na camada interna. Ademais, as falhas na camada externa estiveram, na média, mais afastadas do UPC do que as quebras que ocorreram na camada intermediária.

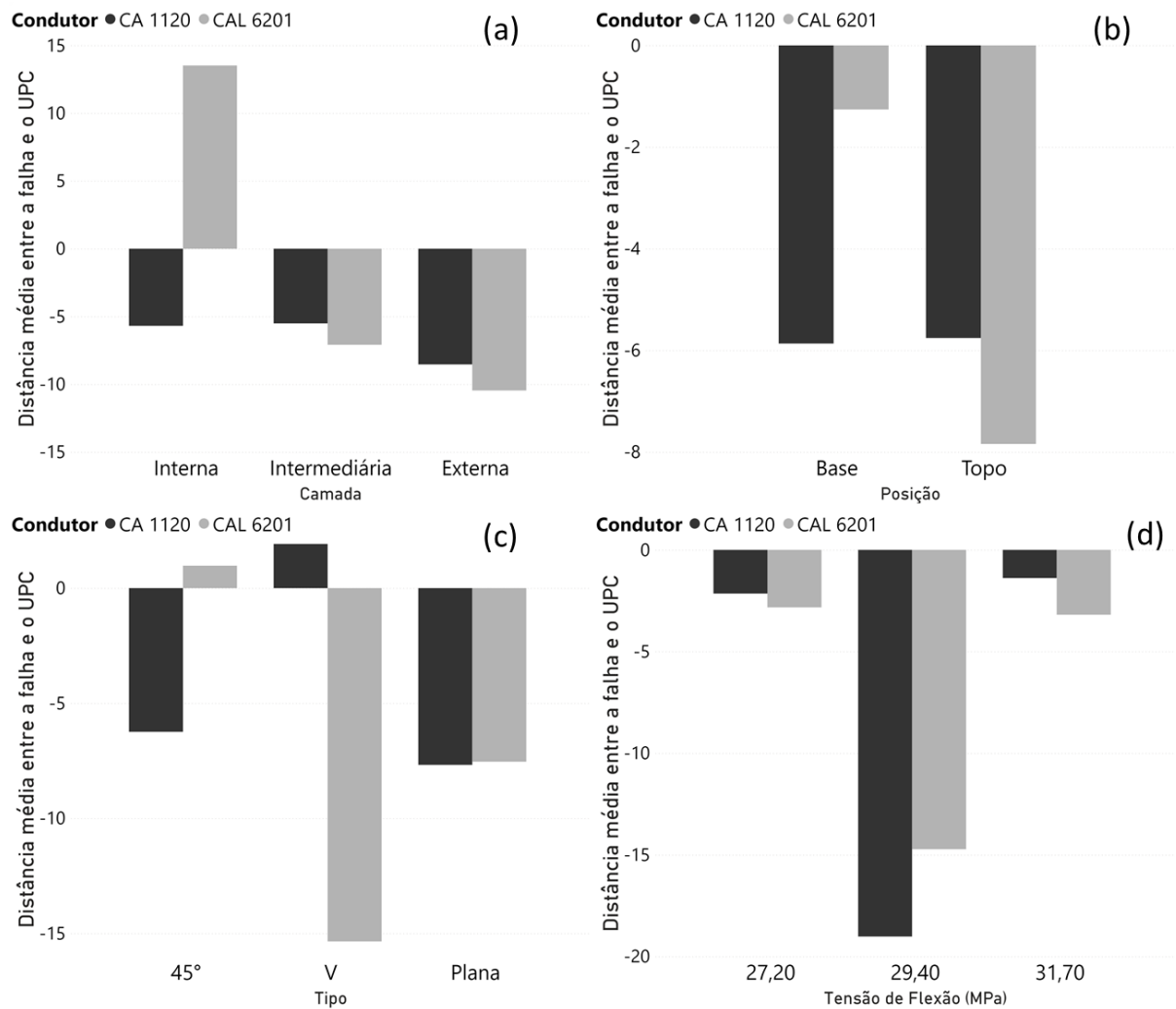


Figura 5.17 – Distância média entre as falhas e o UPC de acordo com: (a) a camada do condutor, (b) a posição (base ou topo), (c) o tipo de superfície de falha e (d) as tensões de flexão.

As distâncias entre a falha e o UPC do condutor CA 1120 se mostraram indiferente, com relação a posição. Já no condutor CAL 6201 as falhas no topo estiveram na média 7 mm mais distantes do UPC do que as falhas que ocorreram na base da montagem. Quando avaliado sobre a perspectiva da tensão

de flexão, a tensão intermediária utilizada nos ensaios (29,4 MPa) teve uma média da distância entre a falha e o UPC maior (em módulo) do que quando comparada com as outras duas tensões de flexão.

5.2.4.3 Tipo de superfície de falha em relação a tensão de flexão, camada e posição

Os formatos das superfícies de falha (categorizado em 45°, Plana e “V”) foram agrupados, para cada condutor, de acordo com: a tensão de flexão do ensaio (Figura 5.18), a camada de ocorrência da falha (Figura 5.19) e a posição (Figura 5.20). As principais observações sobre essa análise, de acordo com o tipo de falha, foram:

- Falha tipo 45°: este tipo de falha é o predominante no condutor CA 1120, sendo localizado em maior proporção na camada interna e no topo da montagem CA 1120/grampo elastomérico. Já no condutor CAL 6201, a falha em 45° foi observada apenas na camada intermediária.
- Falha tipo Plana: falha predominante no condutor CAL 6201, sendo observada com maior proporção em todas as camadas, posições e tensões de flexão. Destaca-se que todas as falhas registradas na camada interna do condutor CAL 6201 foram do tipo Plana. Dentre as falhas que ocorreram no condutor CA 1120, a maior incidência proporcional da falha do tipo Plana ocorreu na camada externa e na base da montagem.
- Falha tipo “V”: tipo de falha minoritária em todas as situações. Apesar de ter sido registrada independentemente da tensão de flexão, não se observou falhas desse tipo na camada interna e nem na base da montagem.

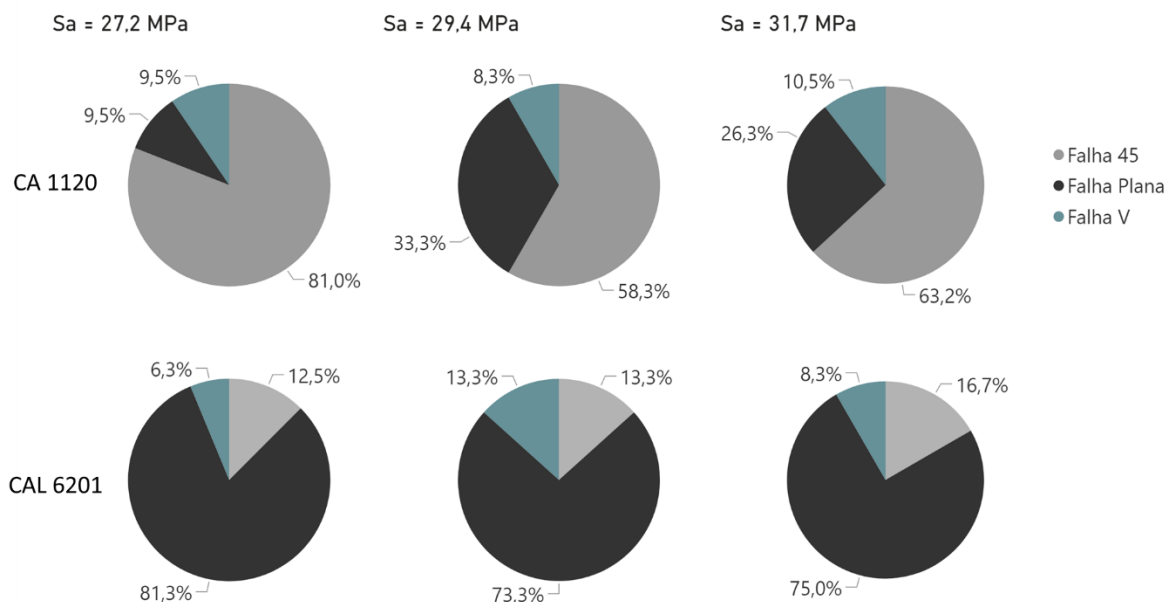


Figura 5.18 – Tipo de falha em função da tensão de flexão

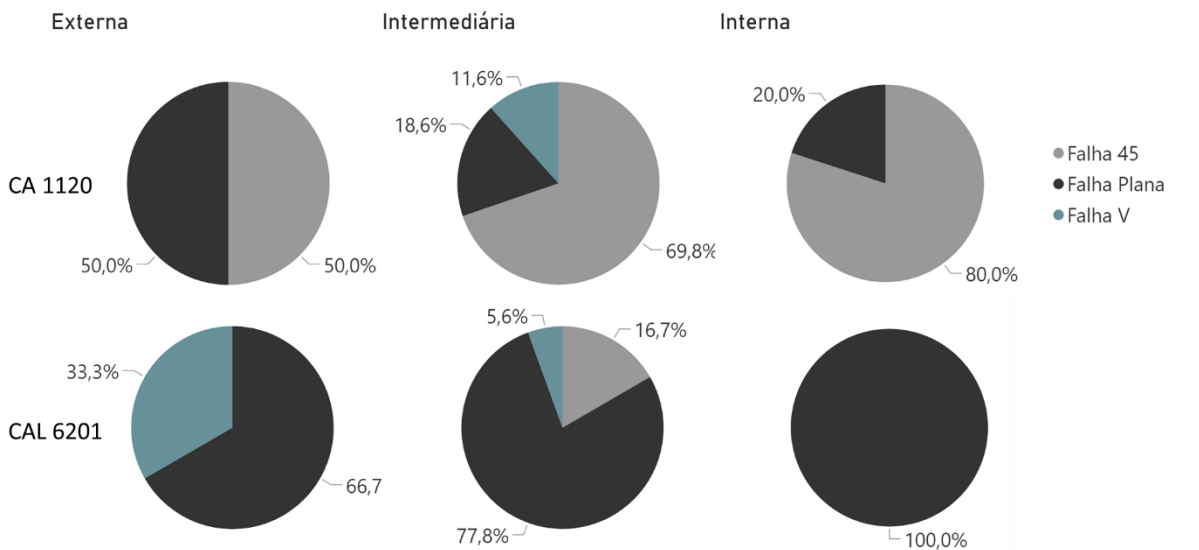


Figura 5.19 – Tipo da falha por camada de ocorrência

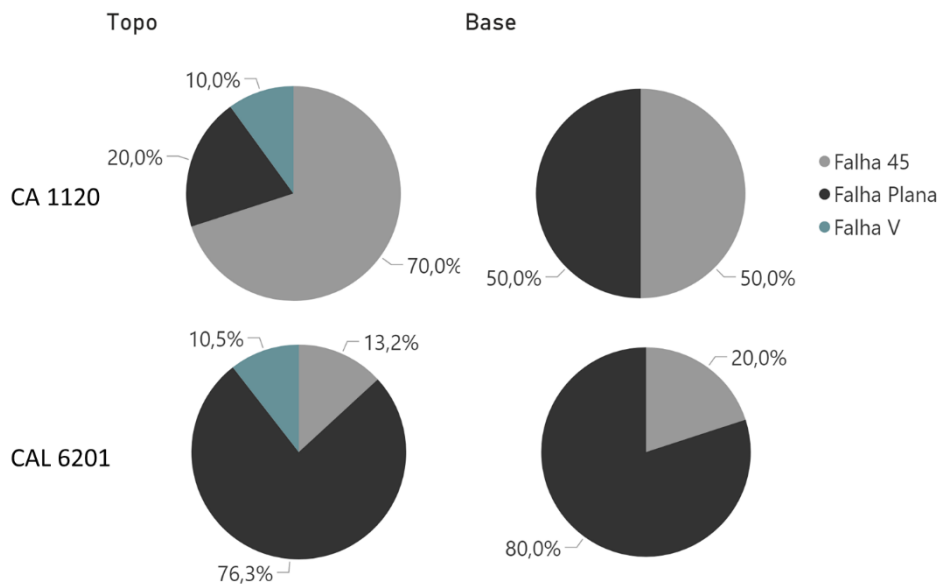


Figura 5.20 – Tipo de falha por posição

5.2.4.4 Posição da falha em relação a tensão flexão e camada

Como já relatado na seção 5.2.4.1, a maior incidência de falhas de fios do condutor montado no grampo elastomérico ocorreu no topo da montagem. Na Figura 5.21 a posição da falha é agrupada de acordo com a tensão de flexão nos fios do condutor durante o ensaio. Todas as falhas dos ensaios realizados com tensão de flexão igual a 29,4 MPa ocorreram no topo da montagem, enquanto a maior incidência de falhas na base do grampo ocorreu nos ensaios com o condutor CAL 6201 e com a tensão de flexão de 31,7 MPa.

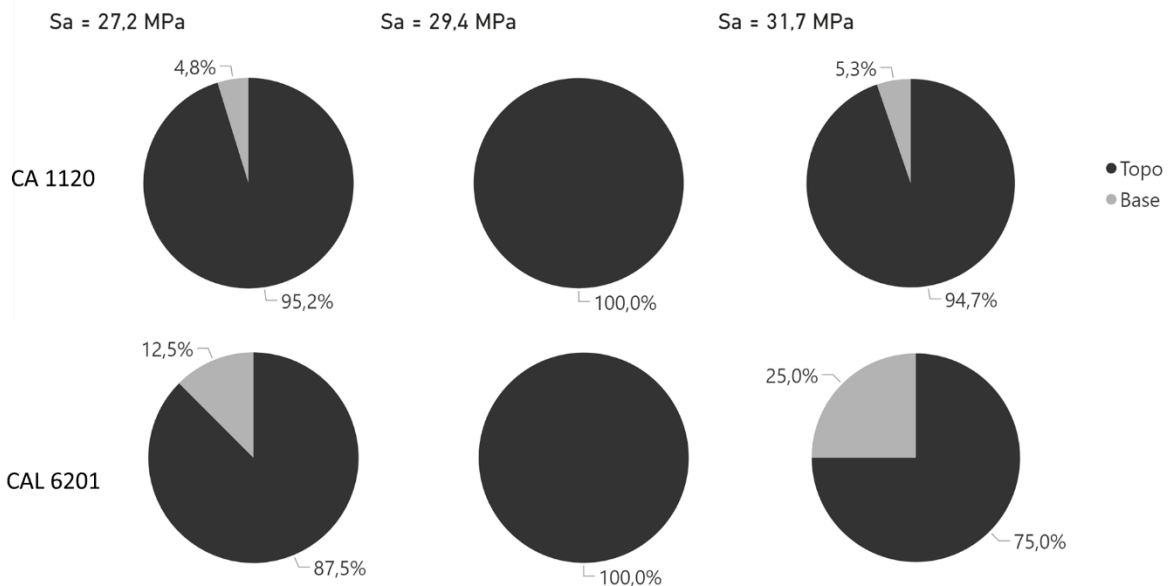


Figura 5.21 – Posição da falha em função da tensão de flexão

5.2.4.5 Camada de ocorrência da falha por tensão de flexão

A relação entre a tensão de flexão e a camada onde ocorre a falha é apresentada para os condutores CA 1120 e CAL 6201 na Figura 5.22. Falhas na camada interna não foram observadas nos ensaios com tensão de flexão de 29,4 MPa e nos ensaios no condutor CAL 6201 com tensão de 27,2 MPa. Já as falhas na camada externa do condutor CA 1120 foram observadas em maior proporção na menor tensão de ensaio e não foram observadas nos ensaios com tensão de flexão de 31,7 MPa.

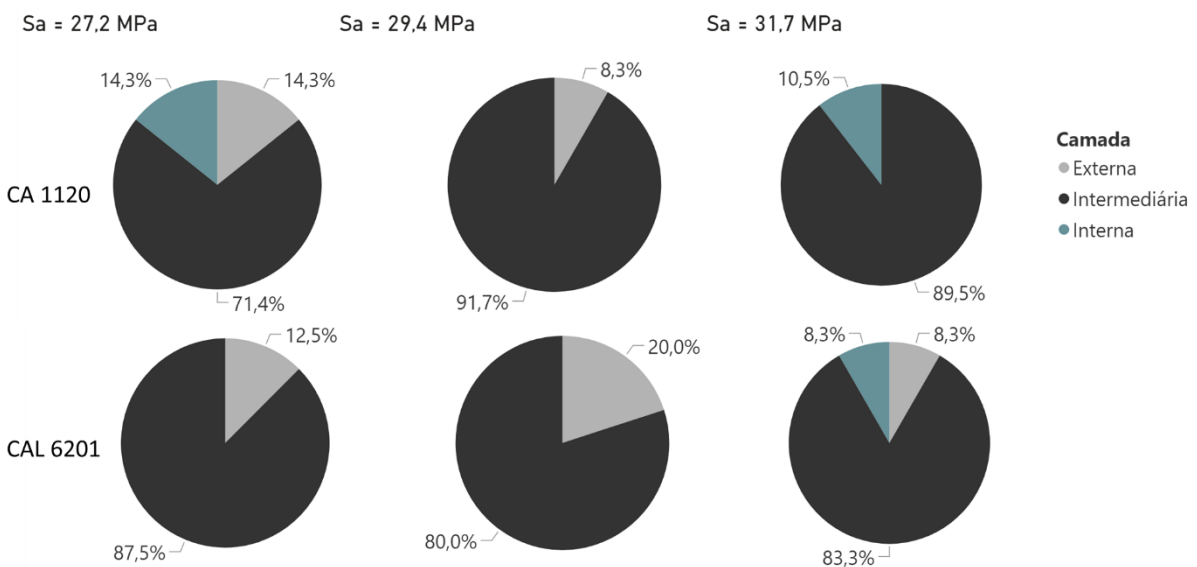


Figura 5.22 – Camada de ocorrência da falha por tensão de flexão

5.2.5 Análise microscópica da superfície de falha

Além do mapeamento das posições das quebras, alguns fios rompidos tiveram suas superfícies de falhas analisadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV). A investigação no MEV identificou as zonas que caracterizam os estágios de uma falha por fadiga: o local de início da trinca, a zona de propagação da trinca e região de ruptura.

Na Figura 5.23 é apresentada uma superfície típica de falha, em 45°, do condutor CA 1120 enquanto que na Figura 5.24 é apresentado uma superfície de falha plana proveniente de uma falha no condutor CAL 6201. Na falha ocorrida no fio de alumínio 1120 pôde se identificar claramente o local de iniciação de trinca, o qual ocorreu na região de contato com o fio de outra camada. As marcas de praia observadas na superfície da falha (Figura 5.23-c)) indicam o local de nucleação da trinca e a zona na de propagação da mesma. A zona de ruptura pôde ser identificada pela observação de *dimples* (Figura 5.23-c)) que são micro cavidades em formato de taça, as quais são características de carregamentos de tração que excedem a resistência do material (Metals Handbook, 1987). No caso das falhas ocorridas nos fios do condutor CAL 6201, não foram observadas marcas de praia, porém ainda assim foi possível identificar uma zona mais lisa e escura que também pode indicar a região de crescimento de trinca (Metals Handbook, 1987), a qual se diferencia da região onde foram observados *dimples* na região de propagação instantânea da trinca.

Por fim, ressalta-se que as características observadas nas superfícies de falha dos fios rompidos em grampos elastoméricos foram as mesmas relatadas por Kalombo (2017), portanto o mecanismo de falha de fios do condutor independe do tipo de grampo de suspensão.

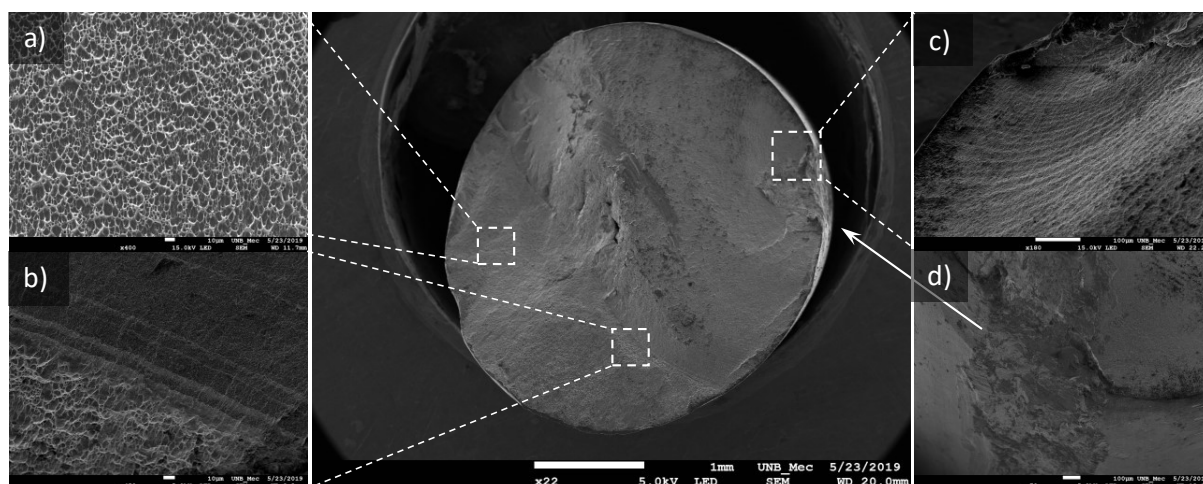


Figura 5.23 – Superfície de falha de um fio do condutor CA 1120 montado no grampo elastomérico e $\sigma_a = 29,4$ MPa. a) região de ruptura, caracterizada pela presença de *dimples*, b) transição entre zona de propagação da trinca e a região ruptura abrupta, c) zona de propagação de trinca, caracterizada por marcas de praia e d) região da nucleação da trinca na marca de contato entre dois fios.

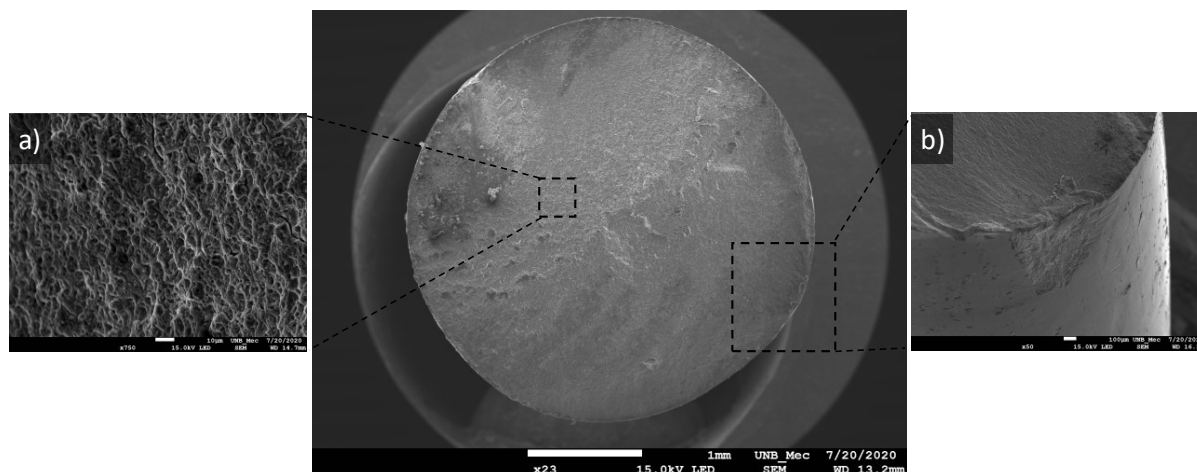


Figura 5.24 - Superfície de falha de um fio do condutor CAL 6201 montado no grampo elastomérico e $\sigma_a = 29,4$ MPa. a) região de ruptura, caracterizada pela presença de *dimples*, b) região da nucleação da trinca na marca de contato entre dois fios.

5.3 Conclusões parciais

Foram realizados ensaios de fadiga em cabos CAL 900 MCM liga 6201 e CAL 823 MCM liga 1120 montados em grampos de suspensão elastomérico. O efeito do uso do grampo elastomérico foi avaliado em relação ao desempenho em fadiga dos mesmos condutores montados em grampos metálicos. A partir da análise dos resultados, pode-se chegar as seguintes conclusões:

- Os resultados mostraram que a atuação em fadiga dos cabos condutores, dentro da faixa de 10^5 a 10^7 ciclos de vibração, melhorou quando utilizados grampos de suspensão elastoméricos. Essa observação foi feita tanto para a avaliação em termos da tensão de flexão quanto em termos do parâmetro $f y_{max}$.
- A grande maioria das falhas que ocorreram nas montagens com grampo metálico foram na camada externa, enquanto que no grampo elastomérico as falhas ocorreram de forma predominante na camada intermediária.
- A maioria das falhas ocorreu dentro do grampo de suspensão e próximo ao UPC entre o cabo e o grampo, tanto no grampo metálico quanto no grampo elastomérico, sendo que neste último as falhas foram mais distribuídas ao longo da região analisada.
- Foi verificado quanto ao tipo da superfície de falha que as montagens com o condutor CAL 6201 apresentou falhas predominantemente planas enquanto o CA 1120 teve a maioria de suas falhas em 45° .
- Foi confirmado, por meio de análise microscópica, que as falhas nos fios do condutor ocorreram, de fato, por fadiga. A qual tem a trinca nucleada na região de contato entre dois fios, que se propaga por um período até que ocorre a ruptura dúctil do fio devido à sobrecarga de tração.

6 ANÁLISE DOS PONTOS DE CONTATO ENTRE FIOS

As condições de acoplamento na montagem cabo/grampo variam de acordo com o tipo de grampo de suspensão e, assim como a intensidade de vibração, refletem nas condições de contato entre fio-fio e fio-grampo. Tendo em vista que o processo de fadiga por *fretting* em cabos condutores se inicia nas zonas de contato entre os fios do condutor, esse capítulo tem por objetivo identificar a influência do tipo de grampo de suspensão nas marcas de contato geradas a partir do contato entre os fios da camada externa com os fios da camada intermediária na região de acoplamento entre o cabo e o grampo.

6.1 Metodologia

A seguinte metodologia foi adotada para a análise da influência do tipo de grampo nas condições de contato entre os fios do condutor. A montagem do ensaio é realizada de forma semelhante a um ensaio de fadiga (Ver capítulo 5), porém com a diferença que o ensaio é interrompido quando o condutor alcança 3×10^5 ciclos de vibração. Tal patamar foi escolhido para que fosse suficiente para induzir marcas de desgaste entre os fios e que não excedesse uma condição que geraria falhas nos fios do condutor.

Uma das maiores preocupações desta análise é garantir que os condutores sejam submetidos as mesmas condições de ensaio. Como foi visto no Capítulo 4 cada tipo de grampo acomoda a vibração do condutor de uma maneira diferente. Para desconsiderar este aspecto e avaliar apenas o efeito das forças compressivas que o grampo impõe sobre o condutor, foi proposto que a condição de deslocamento no movimento vibratório induzisse a mesma curvatura nos fios do condutor no último ponto de contato (UPC) entre o cabo e grampo. Ressalta-se que os torques de aperto dos parafusos dos grampos obedeceram às recomendações dos fabricantes – ver seção 3.2.

Como apresentado da Figura 4.16 a Figura 4.19, cada montagem cabo/grampo apresenta uma diferente relação entre tensão alternada (σ_a) e amplitude de deslocamento (Y_b). A partir dos resultados apresentados no Capítulo 4, foi prescrito um deslocamento no condutor que causasse uma tensão no ponto diametralmente oposto ao UPC de 27,2 MPa.

Após passar pelo ensaio de vibração a região de acoplamento cabo/grampo é cuidadosamente removida e inspecionada. A análise de cada amostra se divide em duas partes, a primeira consiste em mapear as marcas de contato da camada intermediária, caracterizando-as em três tipos: adesão, escorregamento e misto.

A segunda etapa da análise trata da medição das características geométricas das marcas de contato. O objeto de estudo desta etapa foram os pontos de contato na camada intermediária que foram originados a partir da pressão imposta pelos fios da camada externa. Sendo abrangida na análise os locais com

maior ocorrência de falhas em ensaios de fadiga. Nesse sentido, observou-se que existe uma tendência de as rupturas dos fios ocorrerem no topo ou na base do grampo a depender da montagem e das condições de ensaio. Além disso, as falhas ocorrem sempre na região próxima ao último ponto de contato entre o cabo e o grampo (UPC); e mais de 80% das falhas registradas se situaram na faixa de $\pm 20,0$ mm do UPC. Dentro desta faixa normalmente são formados cinco pontos de contato entre os fios da camada externa e a camada intermediária. Dessa forma, foram selecionadas as marcas de contato entre os fios da camada externa e da camada intermediária, que se localizavam no topo e na base da montagem e que estiveram a $\pm 20,0$ mm de distância em relação ao UPC entre o cabo e o grampo.

Para a identificação dos pontos de contato examinados, primeiramente a camada externa é removida e em seguida são traçadas duas linhas longitudinais, uma a partir do UPC (base do grampo) e outra a partir do ponto diametralmente oposto ao UPC (topo do grampo) como é indicado na Figura 6.1. A partir de então, são selecionadas cinco marcas de contato consecutivas e mais próximas destas linhas. Sendo a marca central a mais próxima ao UPC, duas marcas localizadas no interior do grampo e duas marcas na região do vão ativo. A distância entre o centro geométrico das marcas é medida em relação ao UPC, como indicado na Figura 6.2. Após, cada marca de contato é identificada e levada para análise no microscópio confocal.

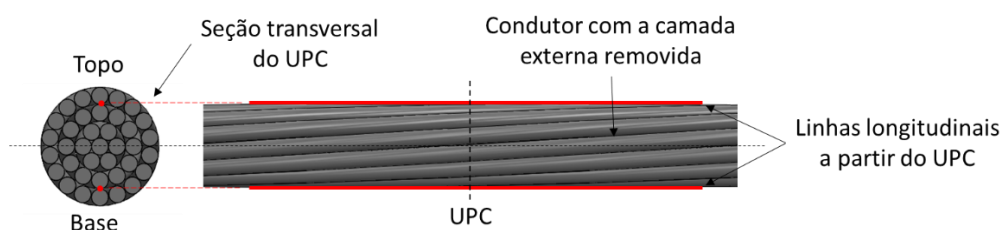


Figura 6.1 – Representação esquemática da região de análise das marcas de contato

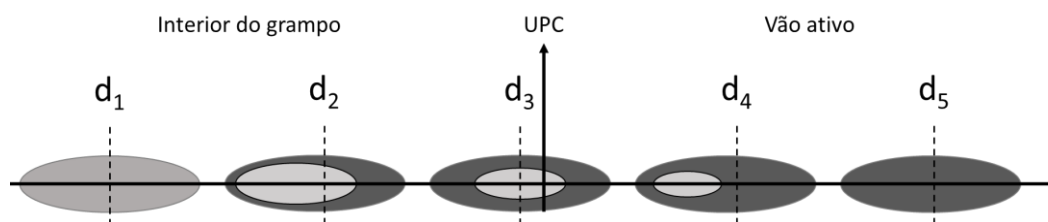


Figura 6.2 – Representação das cinco marcas de contato consecutivas mais próximas da linha longitudinal traçada a partir do UPC entre o e o grampo

Por meio da análise dos pontos de contato no microscópio foram identificadas as zonas de desgaste e adesão (ver seção 2.2.4), bem como medidas suas respectivas características geométricas: o eixo horizontal (maior) e o eixo vertical (menor) da elipse de contato, identificados na Figura 6.3, respectivamente, por H e V sendo o subíndice A referente a zona de adesão e o subíndice E a zona de escorregamento.

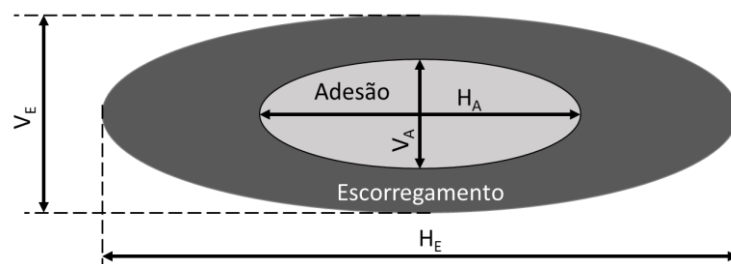


Figura 6.3 – Características geométricas das marcas de contato

6.2 Resultados

6.2.1 Mapeamento das marcas de contato

O mapeamento das marcas de contato levou em consideração a região de acoplamento a partir do centro do grampo de suspensão até, aproximadamente, 60 mm após o UPC entre o cabo e o grampo. As marcas de contato foram classificadas qualitativamente em adesão, escorregamento e misto representadas, respectivamente, por elipses com preenchimento branco, preenchimento preto e preenchimento preto com centro branco. É importante ressaltar que a representação das marcas de contato é focada nas marcas mais críticas ou atípicas, pontos de contato com leves desgastes ou deformações não são apresentadas nas imagens.

As análises feitas com grampo de suspensão metálico são apresentadas na Figura 6.4 e na Figura 6.5, para as montagens com os cabos CA 1120 e CAL 6201, respectivamente. Nestas imagens são destacadas as posições do parafuso em U que prende a telha do grampo, a borda da telha (BT) e o UPC entre o cabo e o grampo.

É possível observar a ocorrência de marcas de adesão na região entre o parafuso e a borda da telha, no topo e na base do grampo, o que indica uma maior pressão de contato entre os fios e a inexistência de movimento relativo entre eles nesta região. As marcas de regime misto, que caracterizam a transição entre a zona de regime de adesão e o regime de escorregamento total, concentraram-se entre a borda da telha e o UPC. Já as marcas de escorregamento mais relevantes foram observadas nas laterais da montagem, indicando que nessa posição existe uma movimentação relativa mais intensa da camada externa com camada intermediária no sentido da vibração do condutor.

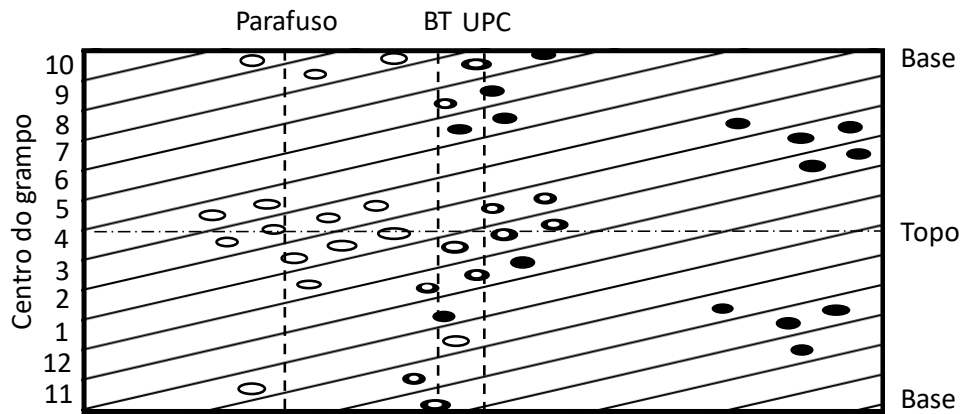


Figura 6.4 – Principais marcas de contato na região de acoplamento entre condutor CA 1120 e o grampo de suspensão metálico

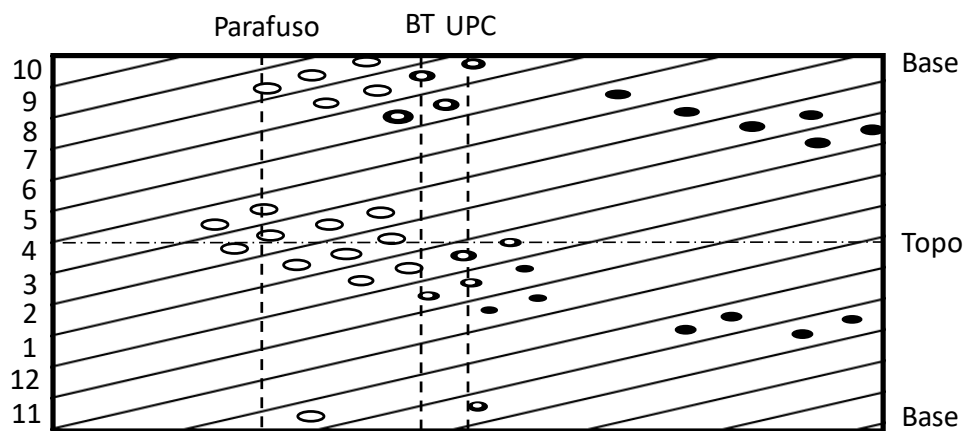


Figura 6.5 - Principais marcas de contato na região de acoplamento entre condutor CAL 6201 e o grampo de suspensão metálico

O mapeamento das marcas de contato das amostras das montagens com o grampo de suspensão metálico com armadura é apresentado na Figura 6.6 e na Figura 6.7, para os condutores CA 1120 e CAL 6201, respectivamente. Nestas imagens são identificadas as seções transversais da borda da telha (BT) e do UPC entre o cabo o grampo.

Nas montagens com o grampo metálico e armadura, as marcas de adesão foram observadas, em maior proporção, na região entre o centro do grampo e a borda da telha. Já as marcas de regime misto ficaram concentradas próximas ao UPC e no topo da montagem, enquanto que na base do grampo tais marcas localizaram-se na região entre o UPC e 20 mm em direção ao vão ativo.

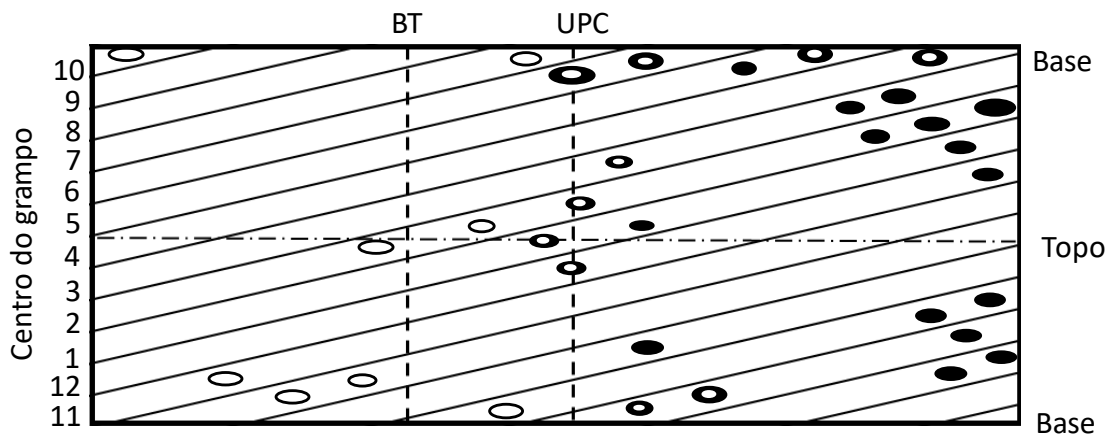


Figura 6.6 – Principais marcas de contato na região de acoplamento entre condutor CA 1120 e o grampo metálico com armadura

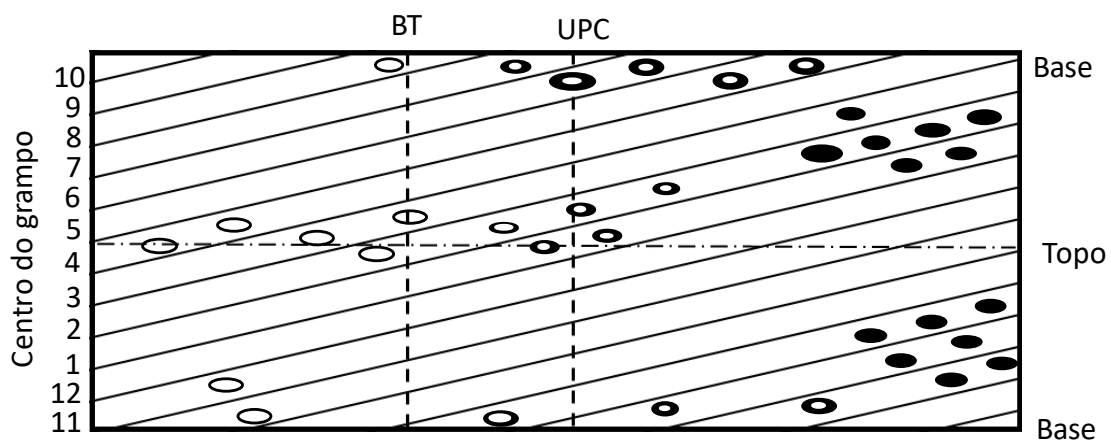


Figura 6.7 - Principais marcas de contato na região de acoplamento entre condutor CAL 6201 e o grampo metálico com armadura

As análises conduzidas a partir das montagens dos condutores CA 1120 e CAL 6201 no grampo elastomérico são apresentadas na Figura 6.8 e na Figura 6.9. No caso do grampo elastomérico não foram observadas marcas de adesão na região de montagem e as marcas de regime misto se concentraram majoritariamente no topo da montagem e próximo ao UPC entre o cabo e o grampo - a mesma região onde foram identificadas o maior número de falhas durante os ensaios de fadiga do condutor.

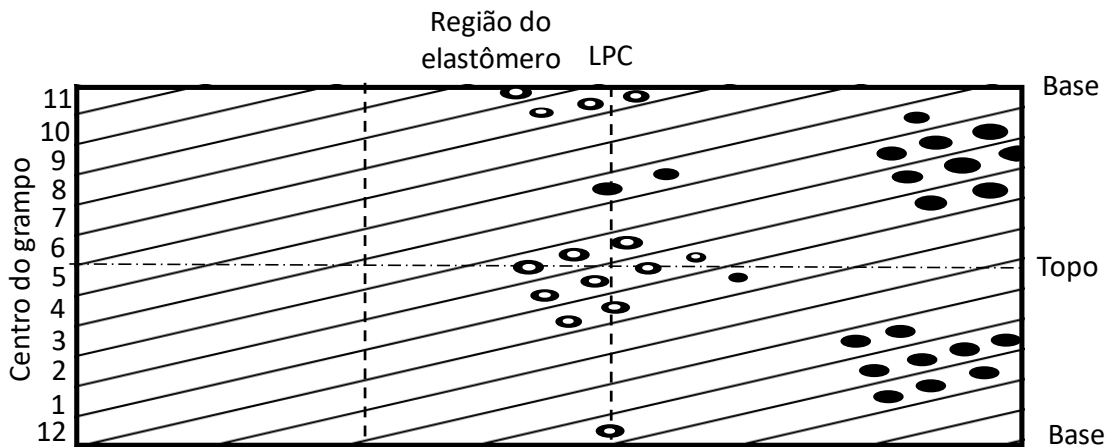


Figura 6.8 – Principais marcas de contato na região de acoplamento entre condutor CA 1120 e o grampo elastomérico

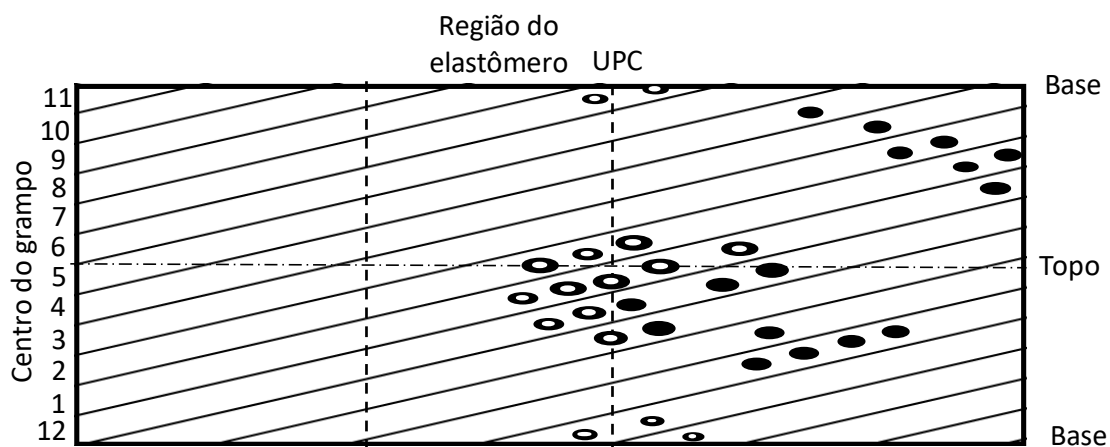


Figura 6.9 - Principais marcas de contato na região de acoplamento entre condutor CAL 6201 e o grampo elastomérico

A representação das marcas de contato nos condutores CA 1120 e CAL 6201 montados no grampo HAES são apresentadas na Figura 6.10 e na Figura 6.11, respectivamente. Nestas Figuras são identificados por linhas verticais tracejadas: a seção transversal do UPC entre o cabo e o material elastomérico e a seção transversal da borda invólucro metálico.

As marcas de contato encontradas no condutor montado no grampo HAES revelaram que ocorre o deslizamento total entre os fios do condutor no interior do grampo de suspensão, o que é evidenciado pelas marcas de desgaste encontradas nesta região. Também no interior do grampo, foram observadas marcas de regime misto. Tanto as marcas de escorregamento quanto as de desgaste concentraram-se entre a seção transversal da borda do invólucro metálico e o UPC entre o cabo e o grampo.

Uma vez que as marcas de regime misto e escorregamento são tipicamente localizadas a partir do UPC em direção ao vão ativo, a ocorrência de marcas de regime misto próximas a seção transversal da borda do invólucro na montagem com o grampo HAES reforçam a hipótese adotada no Capítulo 4 de que a essa posição pode ser considerada o UPC virtual para fins de cálculo da constante de P-S.

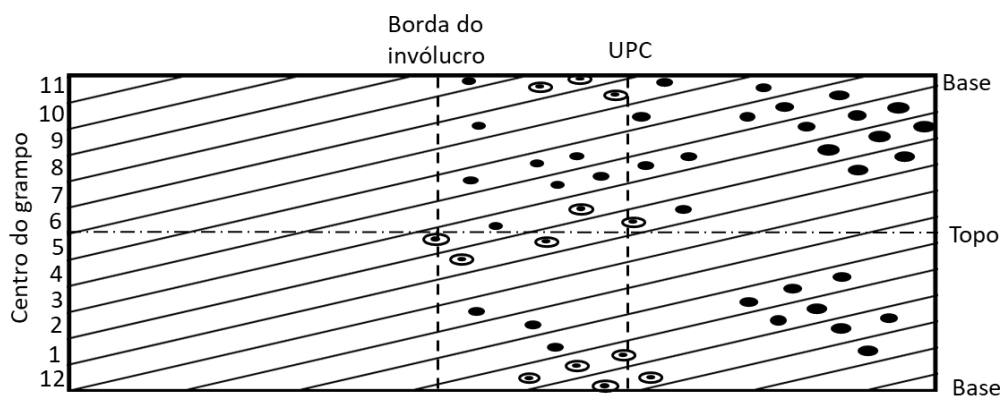


Figura 6.10 – Principais marcas de contato na região de acoplamento entre condutor CA 1120 e o grampo HAES

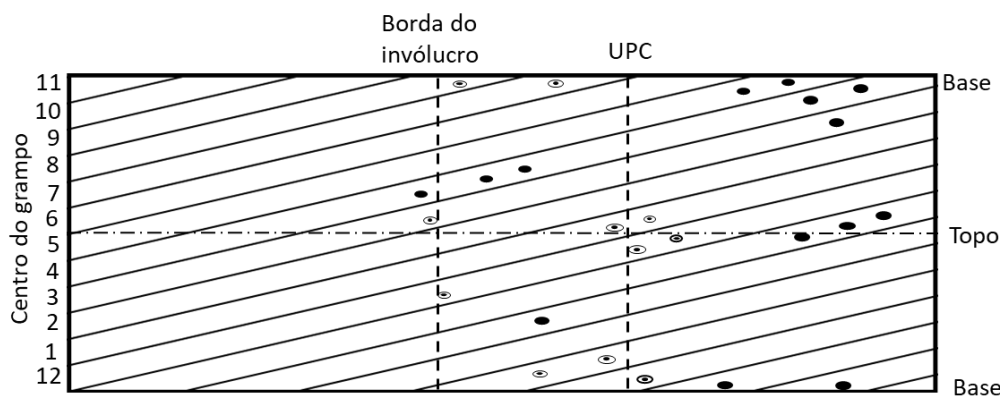


Figura 6.11 – Principais marcas de contato na região de acoplamento entre condutor CAL 6201 e o grampo HAES

Comparativamente foram feitas as seguintes observações de acordo com o tipo de marca de contato:

- Marcas de adesão: Foram observadas apenas nos grampos metálicos (com ou sem armadura), sempre no topo e na base do grampo. Predominantemente, estas marcas se concentraram entre a borda da telha e o centro do grampo de suspensão. Sendo o grampo metálico sem armadura o que teve o maior número de marcas de adesão, enquanto o grampo com armadura apresentou marcas mais distribuídas ao longo do interior do grampo.
- Marcas de regime misto: As marcas de regime misto concentraram-se tipicamente na região próxima ao UPC. As montagens com o grampo de suspensão metálico com armadura foram as que apresentaram marcas de regime misto mais distantes do UPC (em direção ao vão ativo), isso pode estar relacionado com a armadura que induz uma força compressiva suficiente para a ocorrência de marcas de fretting nessa região, onde tipicamente se observaria apenas pequenas marcas de desgaste. Já as montagens com o grampo HAES apresentaram estas marcas mais distantes do UPC em direção ao centro do grampo, o que pode estar associado ao material elastomérico – que se deforma solidário

ao condutor – e ao involucro metálico que limita a movimentação na região onde foram localizadas marcas de regime misto.

- Marcas de escorregamento: Na montagem com o condutor HAES foram observadas marcas de desgaste no contato entre os fios no interior do grampo de suspensão, indicando que ocorreu escorregamento total entre os fios do condutor nesta região. Tal observação foi feita apenas na montagem com o grampo HAES.

Ademais, em todas as montagens cabo/grampo foram observadas marcas de escorregamento nas laterais do condutor na região entre 30 mm e 90 mm a partir do UPC em direção do vão ativo, conforme apresentado na Figura 6.12. Nesse caso, as marcas de escorregamento estão associadas a uma intensa movimentação relativa entre a camada externa e a camada intermediária e podem indicar a transição entre a região de influência do grampo de suspensão sobre a rigidez do condutor e a região do vão livre onde não há influência do grampo de suspensão no comportamento vibratório do cabo.

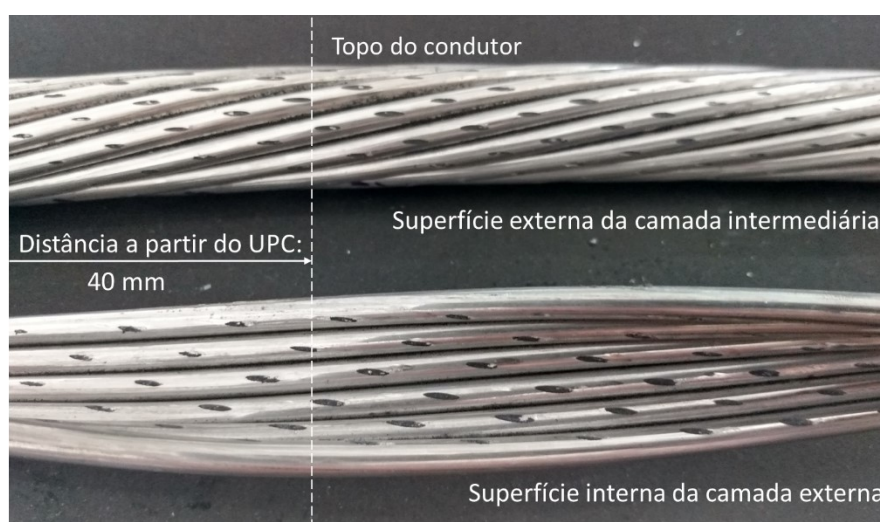


Figura 6.12 – Marcas de escorregamento na região do vão ativo

Por fim, seguem três observações relevantes para a inspeção da montagem condutores/grampo em linhas de transmissão: (i) independentemente da montagem foram identificadas marcas de desgaste fora da região do grampo de suspensão; (ii) o processo de desgaste libera um pó negro que são partículas de alumínio que oxidam e formam o óxido de alumínio (Al_2O_3) (OUAKI et al., 2003); (iii) para as mesmas condições de deformação dos fios onde foram observadas marcas de desgastes, também se observaram marcas de *fretting* entre os fios, principalmente próximo ao UPC. Portanto a visualização do óxido de alumínio no condutor pode ser considerado um indicativo de fadiga por *fretting* na região próxima ao UPC entre o cabo e o condutor.

6.2.2 Características das marcas de contato em função da distância em relação ao UPC

O tamanho e o tipo de marca que se forma no contato entre os fios do condutor variam de acordo com a pressão de contato e o nível de deslizamento entre os fios (ver seção 2.2.4). Nesta seção são apresentadas medições das características geométricas das marcas de contato no topo e na base do grampo de suspensão, conforme ilustrado na Figura 6.1 e na Figura 6.2.

Os resultados das medições realizadas no microscópio confocal, para cada montagem cabo/grampo, são apresentados da Figura 6.14 a Figura 6.21. Para ilustrar o comportamento típico das marcas de contato, na Figura 6.13 é apresentado as imagens das marcas de contato na base do grampo metálico com armadura. Todas as imagens feitas no microscópio confocal estão disponíveis no Apêndice II do trabalho.

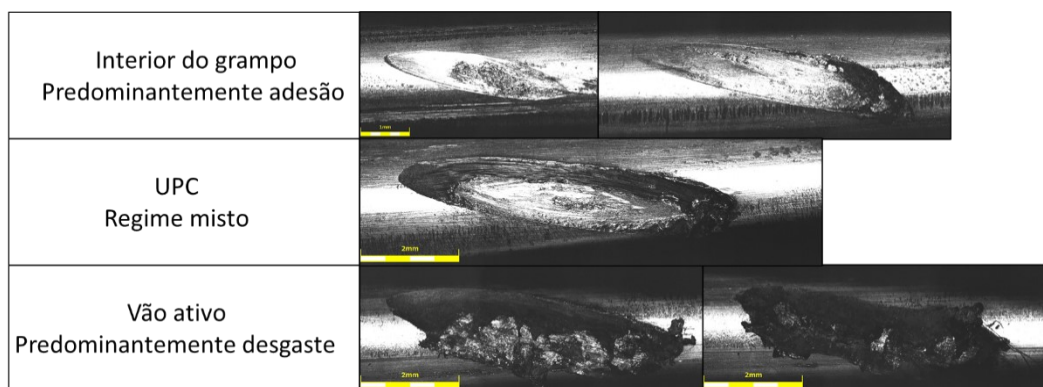


Figura 6.13 – Comportamento típico das marcas de contato em fios de condutores montados em grampo metálicos

Em cada figura são exibidos quatro gráficos, todos em função da distância da marca de contato em relação ao UPC entre o cabo e o grampo: (a) Área total da marca de contato; (b) Comprimento total dos eixos horizontal e vertical – identificados na Figura 6.2; (c) Área relativa da zona de adesão ou escorregamento (área da zona dividida pela área total da marca) e (d) área absoluta da marca de adesão ou escorregamento.

Inicialmente, cabe ressaltar que a observação do tamanho e das características das marcas de contato por si só não pode ser diretamente relacionada a vida em fadiga de cada conjunto cabo/grampo, mas somente visa analisar de forma qualitativa as condições de pressão de contato e deslizamento entre os fios.

Analisando a área total das marcas de contato nos grampos metálico, elastomérico e metálico com armadura, observa-se que as marcas na base são, em geral, maiores que as marcas de contato no topo do grampo. Sendo que nas proximidades do UPC a diferença de tamanho entre as marcas tende a aumentar. Com exceção da montagem com grampo metálico e condutor CAL 6201, as marcas na base da

montagem tendem a crescer à medida que se aproximam do UPC e ao se afastar dele observa-se uma redução do tamanho das marcas. Já as marcas no topo tendem a reduzir levemente à proporção que se avança na direção do vão ativo.

Com relação a área relativa da zona de adesão ou escorregamento em relação a área total da marca, observa-se que no interior do grampo existe a predominância da zona de adesão, indicando maiores pressões de contato e menores deslocamentos relativos. Conforme a análise das marcas se encaminha para o vão ativo, a proporção da zona de adesão diminui e a da zona de escorregamento aumenta, apontado para o aumento do movimento relativo e um alívio na pressão de contato entre os fios.

Sendo que nos grampos metálicos as marcas mais próximas ao UPC são também as que apresentam a proporção entre zona adesão e escorregamento mais equilibrados. Já no grampo de suspensão elastomérico as proporções adesão/escorregamento se equilibraram, no topo da montagem, na segunda marca analisada no interior do grampo, significando uma movimentação relativa entre os fios no interior do grampo, o que corrobora com as hipóteses levantadas na seção 4.2.3 que trata da correção da formulação de P-S para grampos elastoméricos.

Por fim, cabe analisar os resultados das montagens com grampo HAES (Figura 6.20 e Figura 6.21) que apresenta características bem distintas dos demais. Para esse tipo de montagem, em todas as marcas de contato, a zona de escorregamento ocupou uma proporção maior que a zona de adesão, independentemente da posição do contato. Tal observação indica que mesmo dentro da região do grampo de suspensão existe o deslocamento relativo entre os fios do condutor, o que não ocorre nas demais montagens. Além disso, na borda do invólucro (BI) e no UPC foram registradas as menores diferenças relativas entre as áreas das zonas de escorregamento e adesão, o que sugere que os pontos de contato na seção transversal da BI apresentam um comportamento semelhante ao observado na saída do grampo.

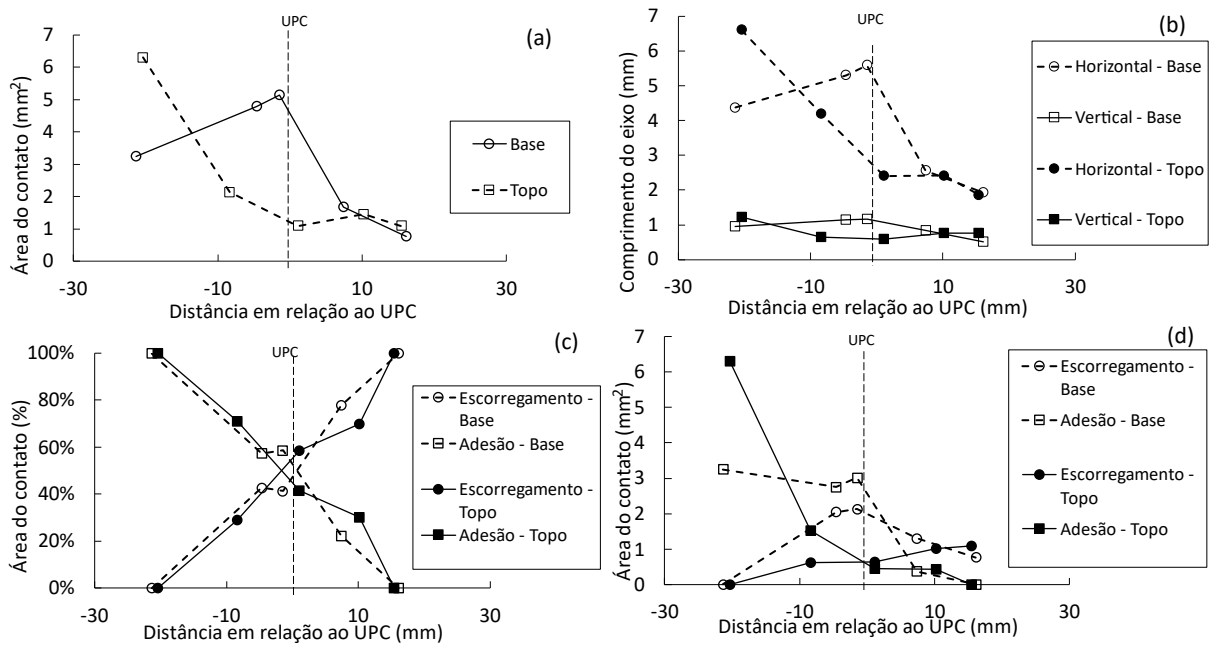


Figura 6.14 – (a) Área de contato total, (b) comprimento dos eixos da elipse de contato, (c) área de contato relativa classificada em adesão ou escorregamento e (d) área de contato absoluta classificada em adesão ou escorregamento, em função da distância em relação ao UPC. Grampo: Metálico; Condutor: CA 1120

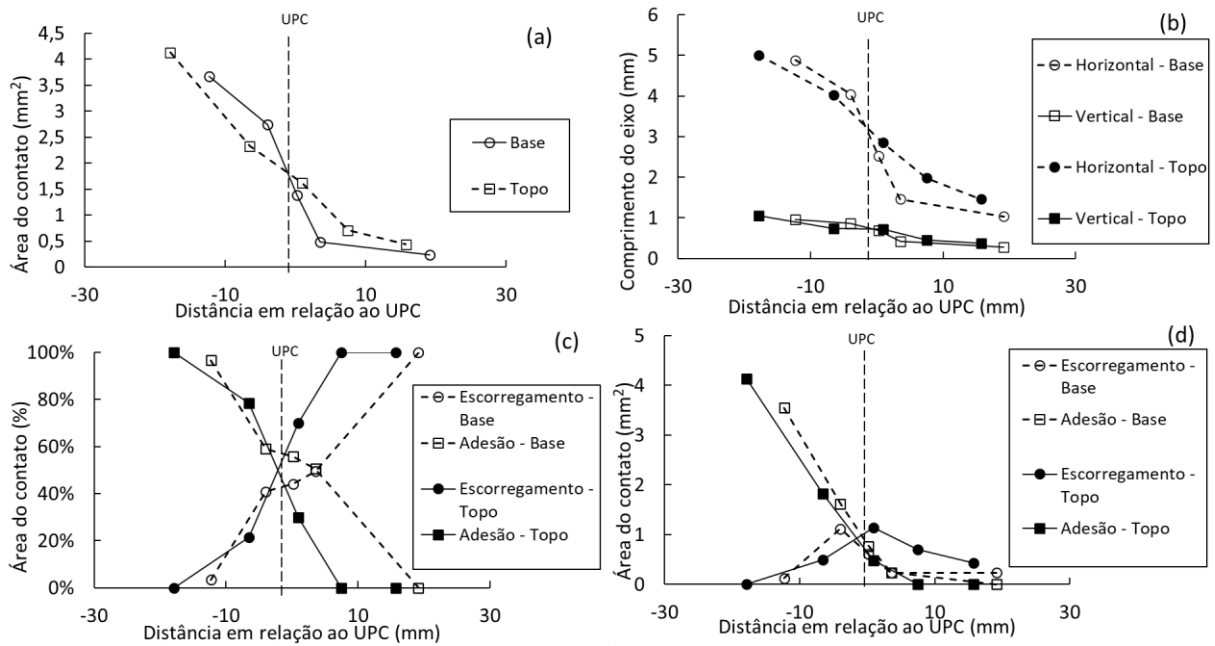


Figura 6.15 – (a) Área de contato total, (b) comprimento dos eixos da elipse de contato, (c) área de contato relativa classificada em adesão ou escorregamento e (d) área de contato absoluta classificada em adesão ou escorregamento, em função da distância em relação ao UPC. Grampo: Metálico; Condutor: CAL 6201

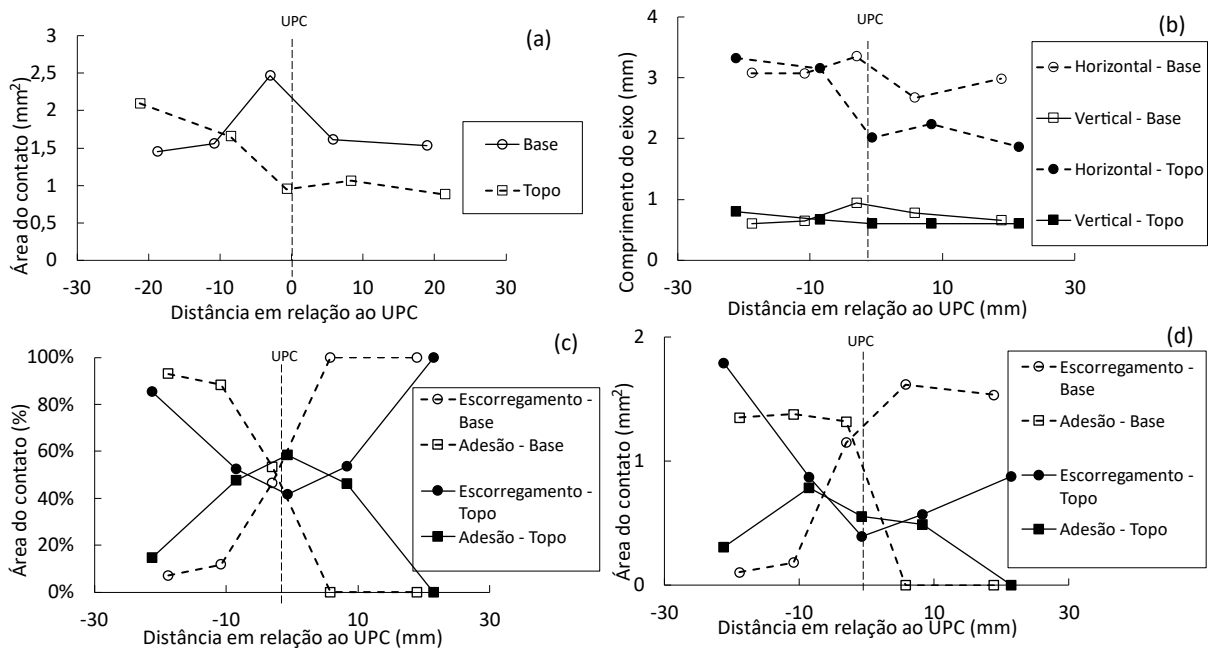


Figura 6.16 – (a) Área de contato total, (b) comprimento dos eixos da elipse de contato, (c) área de contato relativa classificada em adesão ou escorregamento e (d) área de contato absoluta classificada em adesão ou escorregamento, em função da distância em relação ao UPC. Grampo: Elastomérico; Condutor: CA 1120

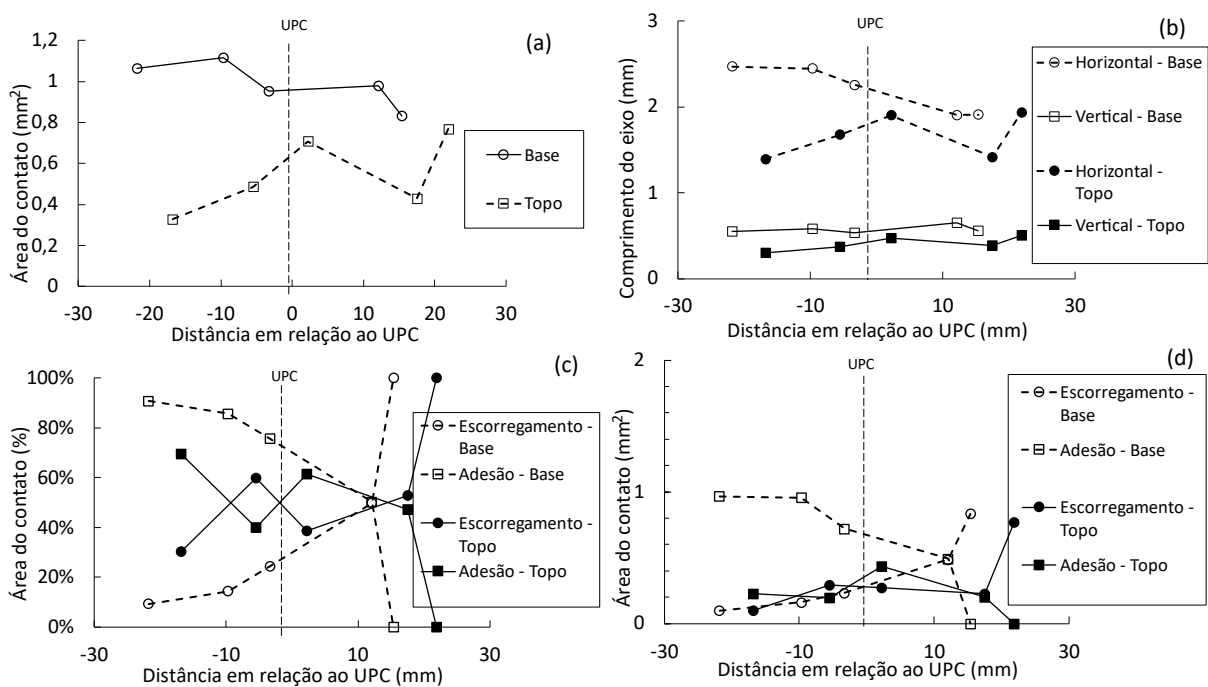


Figura 6.17 – (a) Área de contato total, (b) comprimento dos eixos da elipse de contato, (c) área de contato relativa classificada em adesão ou escorregamento e (d) área de contato absoluta classificada em adesão ou escorregamento, em função da distância em relação ao UPC. Grampo: Elastomérico; Condutor: CAL 6201

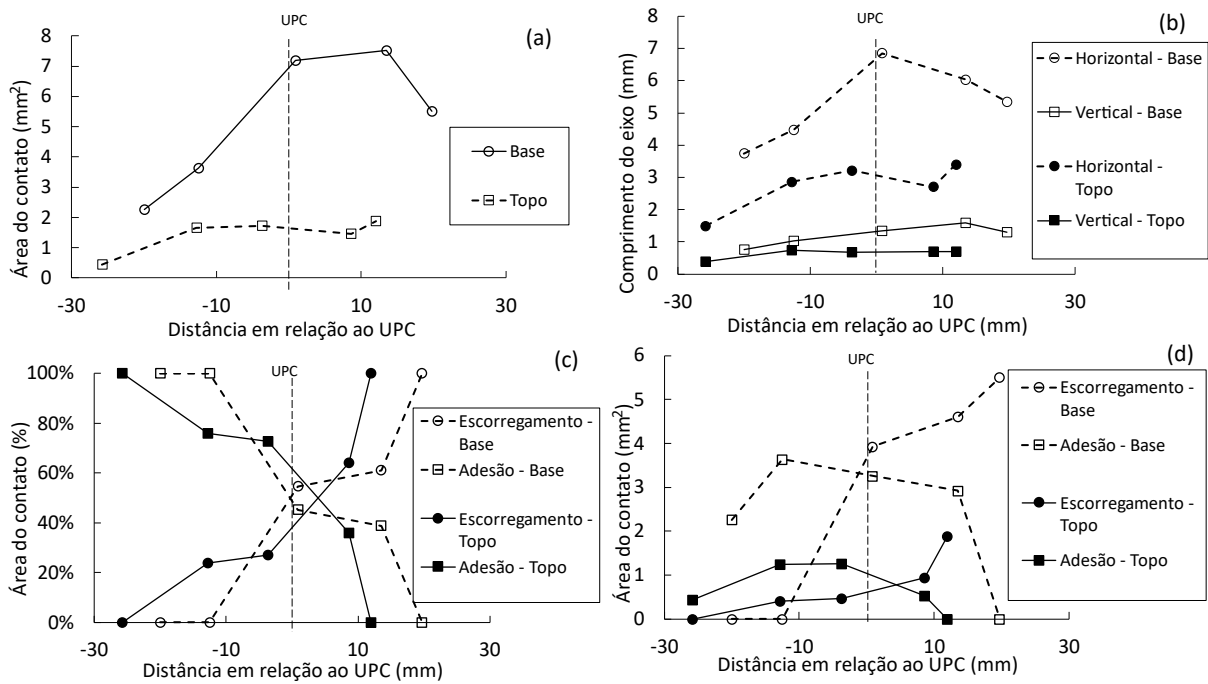


Figura 6.18 – (a) Área de contato total, (b) comprimento dos eixos da elipse de contato, (c) área de contato relativa classificada em adesão ou escorregamento e (d) área de contato absoluta classificada em adesão ou escorregamento, em função da distância em relação ao UPC. Grupo: Metálico com armadura; Condutor: CA 1120

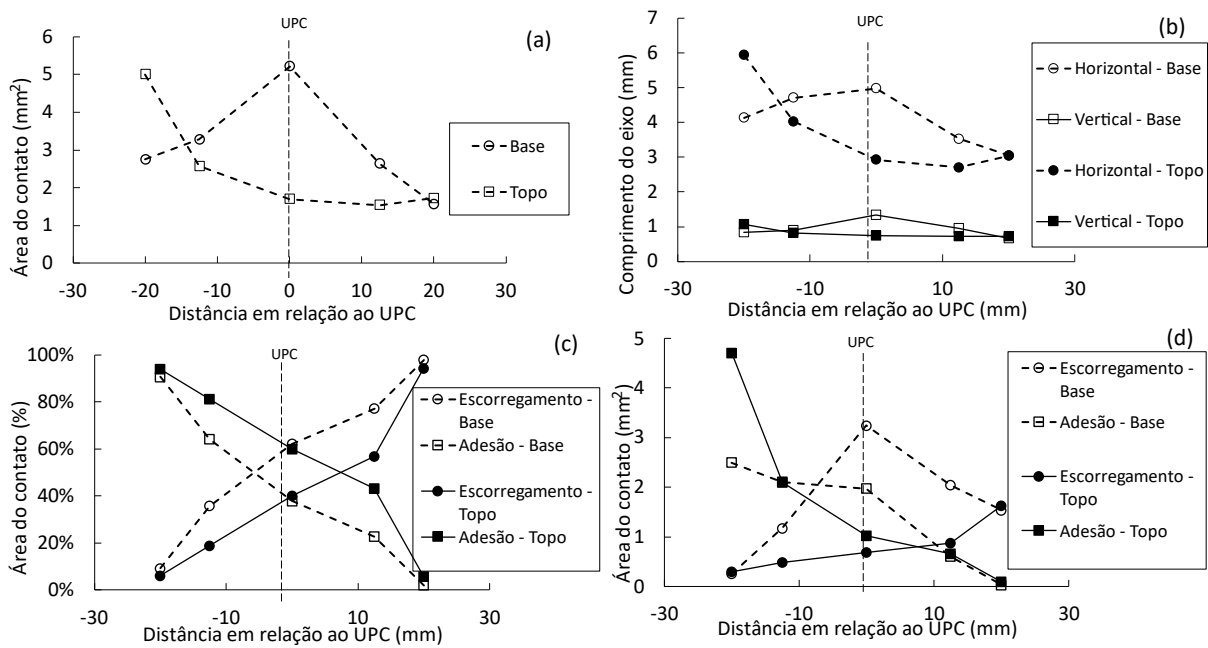


Figura 6.19 – (a) Área de contato total, (b) comprimento dos eixos da elipse de contato, (c) área de contato relativa classificada em adesão ou escorregamento e (d) área de contato absoluta classificada em adesão ou escorregamento, em função da distância em relação ao UPC. Grupo: Metálico com armadura; Condutor: CAL 6201

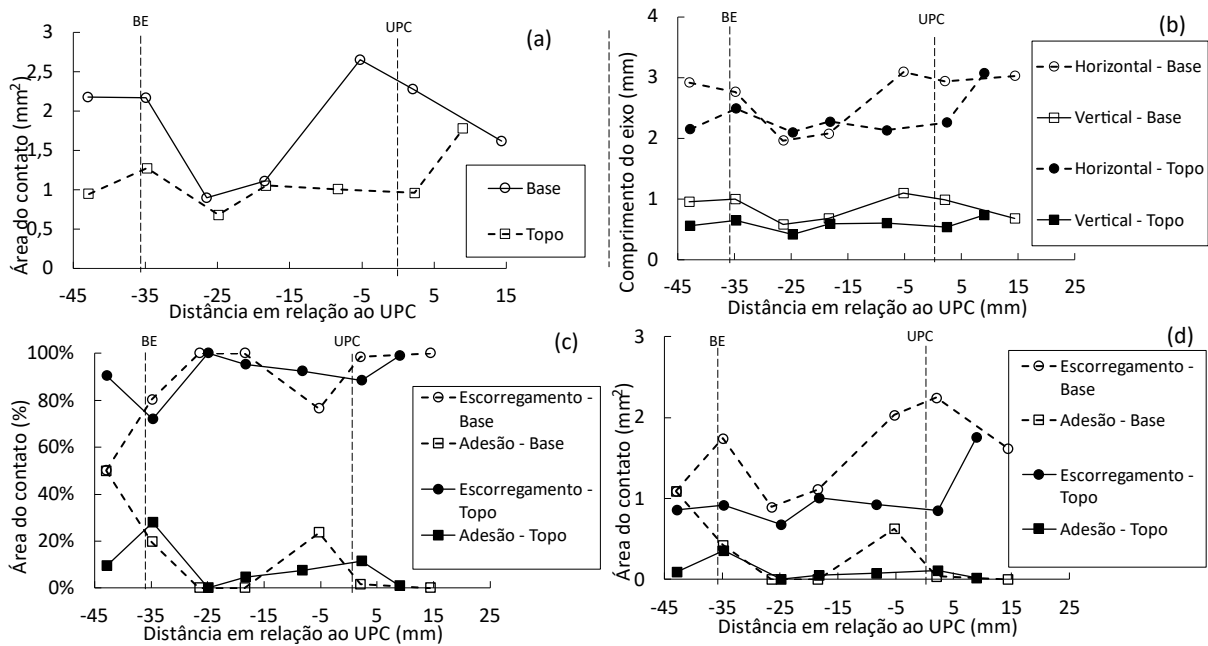


Figura 6.20 – (a) Área de contato total, (b) comprimento dos eixos da elipse de contato, (c) área de contato relativa classificada em adesão ou escorregamento e (d) área de contato absoluta classificada em adesão ou escorregamento, em função da distância em relação ao UPC. Grupo: HAES; Condutor: CA 1120

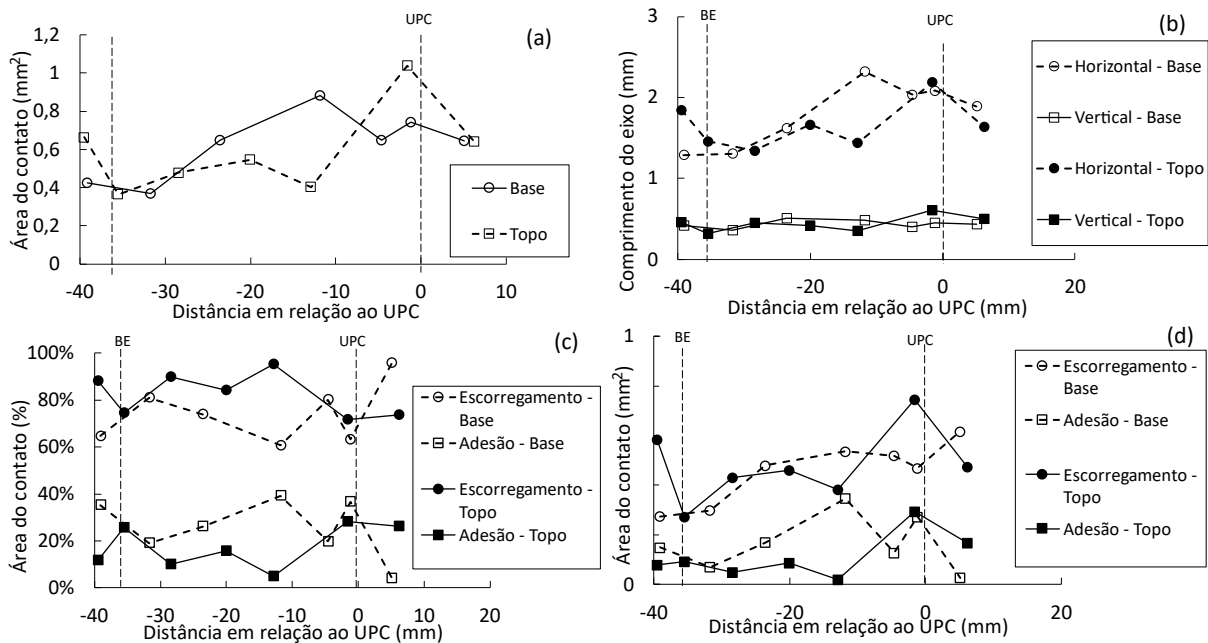


Figura 6.21 – (a) Área de contato total, (b) comprimento dos eixos da elipse de contato, (c) área de contato relativa classificada em adesão ou escorregamento e (d) área de contato absoluta classificada em adesão ou escorregamento, em função da distância em relação ao UPC. Grupo: HAES; Condutor: CA 1120

6.2.3 Comparação entre marcas de contato próximas ao UPC entre o cabo e o grampo

Para um melhor entendimento da influência do grampo de suspensão nas condições de contato entre os fios do condutor, faz-se necessária a comparação entre as marcas de contato em cada montagem. Para isso, foram selecionadas as marcas mais próximas ao UPC, de todas as montagens, e as marcas mais próximas da seção transversal da borda do invólucro (BI) do grampo HAES. Os resultados das medições das características geométricas são apresentados na Figura 6.22 para cada posição transversal da marca (topo ou base) e para cada tipo de condutor (CA 1120 ou CAL 6201)

Primeiramente, observou-se que as marcas de contato na base do grampo foram maiores que as marcas no topo das montagens. Além disso, em todas as marcas analisadas foram identificadas duas zonas distintas que caracterizam o regime de contato misto: (i) zona de escorregamento que é associadas ao deslocamento relativo entre fios com uma menor pressão de contato, esta zona é caracterizada por uma marca com a superfície enegrecida devido a oxidação do material; (ii) zona de adesão que está associada as deformações plásticas e a não ocorrência de deslizamento (ZHOU et al., 1994a), estas marcas são tipicamente encontradas no centro da marca de contato, onde as forças compressivas são maiores.

Ademais, as marcas de contato analisadas nos grampos metálicos foram maiores, em termos absolutos, e com zonas de adesão proporcionalmente superiores, em área, que as marcas nos demais tipos de grampo. Por outro lado, as marcas de contato na montagem com grampo HAES foram as que proporcionalmente tiveram as maiores áreas de escorregamento, o que está associado a pressão de contato entre os fios ser menor que no caso dos grampos metálicos. Por fim, ao comparar as marcas de contato com relação ao tipo de condutor, as marcas no CAL 6201 foram menores que as marcas formadas no condutor CA 1120, o que pode estar ligado com a dureza mais elevada da liga de alumínio 6201 (ver Tabela 8).

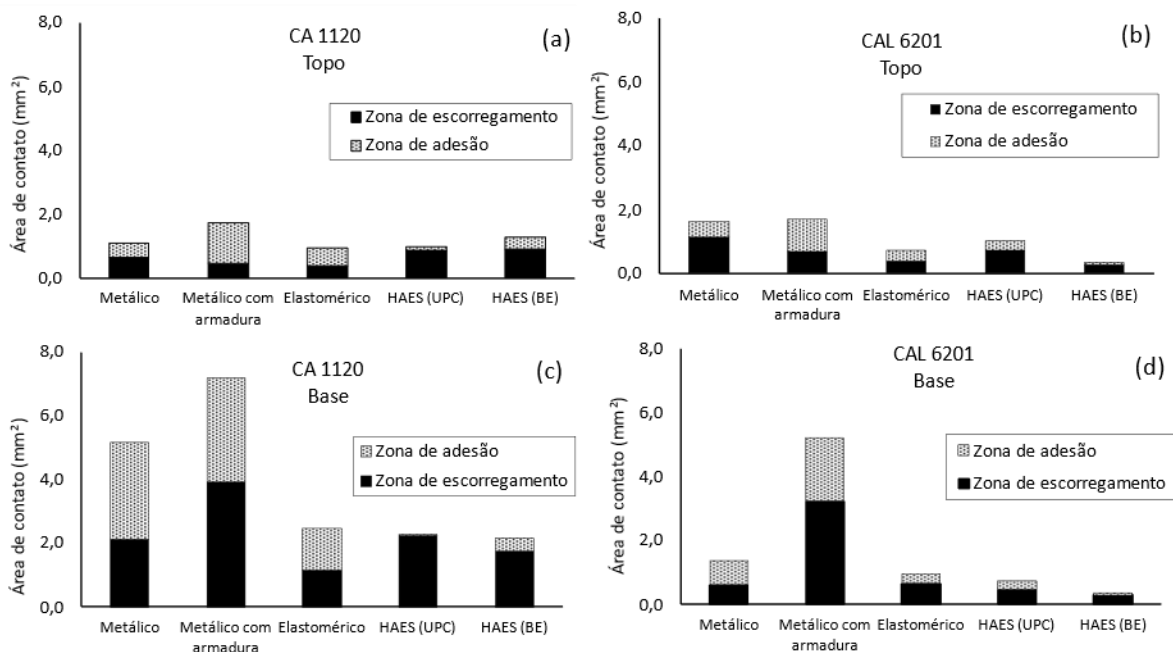


Figura 6.22 – Características das marcas de contato próximas ao UPC ou BI, considerando o condutor e a posição transversal: (a) Topo da montagem com CA 1120; (b) Topo da montagem com CAL 6201; (c) Base da montagem com CA 1120 e (d) Base da montagem com CAL 6201.

6.3 Conclusões Parciais

Foram induzidas marcas de contato entre os fios do condutor por meio de ensaios de vibração com os condutores montados nos grampos de suspensão metálico, metálico com armadura, elastomérico e HAES. Primeiramente as marcas foram mapeadas dentro da região de interesse do estudo e em seguida algumas marcas de contato foram selecionadas e inspecionadas com auxílio do microscópio confocal. Com base nas análises pôde-se alcançar as seguintes conclusões:

- As marcas de adesão foram observadas apenas no interior das montagens com grampos metálicos, indicando que no interior desses grampos o condutor está sujeito a maiores pressões de contato quando comparado com as demais montagens.
- Marcas de regime misto estão localizadas sempre próximas aos pontos de restrição de movimentação.
- Marcas de escorregamento são tipicamente localizadas em zonas de menor pressão e maior deslocamento relativo entre os fios das camadas do cabo condutor. Além de serem próximo ao grampo no lado ativo da montagem, também foram observadas no interior do grampo HAES.
- Marcas de contato próximas ao UPC são maiores em grampos metálicos e a zona de escorregamento, nas marcas de regime misto, é proporcionalmente maior em grampos com material elastomérico.
- Marcas de contato no interior do grampo tendem a ter uma área de adesão proporcionalmente maior e à medida que as marcas ficam mais próximas do vão ativo a

zona de escorregamento passa a predominar. Isso ocorre pois no centro do grampo as pressões de contato são maiores e no vão livre o deslizamento entre os fios são mais intensos.

- A diferença entre as propriedades mecânicas entre os alumínio que compõem os condutores faz com que marcas de contato nas montagens com o condutor CAL 6201 sejam maiores que as marcas de contato no condutor CA 1120, quando comparadas as montagens com mesmo grampo de suspensão.

7 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES FINAIS

Neste trabalho foi realizado um estudo experimental do efeito de diferentes tipos de grampos de suspensão nos aspectos que induzem à fadiga de cabos condutores de energia durante a vibração eólica. Mais especificamente, foram avaliadas montagens de condutores CA 1120 e CAL 6201 nos grampos de suspensão metálicos, metálicos com armadura, elastoméricos e HAES. Para tal, foram geradas curvas de correlação entre deslocamento e tensão de flexão do condutor, curvas de tensão de flexão em função de número de ciclos até a falha para condutores montados em grampos elastoméricos e um mapeamento das marcas de contato que se formam no contato entre os fios do condutor, marcas essas, provenientes dos esforços estáticos e dinâmicos na região de acoplamento do cabo com o grampo.

A primeira etapa para compreender o impacto de cada tipo de grampo na fadiga de condutores é analisar a tensão de flexão que cada tipo de montagem induz nos fios do condutor durante a vibração. Para comparação da tensão de flexão, primeiramente, foi preciso localizar a posição onde ocorrem as máximas tensões de flexão na região de acoplamento.

A tensão de flexão dinâmica nos condutores ocorre devido à restrição de movimento imposta pelo grampo, que faz com que a curvatura do movimento de vibração aumente e, conseqüentemente, amplia a deformação dos fios do condutor. Nesse sentido, observou-se que a máxima tensão de flexão para grampos metálicos com ou sem armadura ocorre nos fios diametralmente opostos ao último ponto de contato (UPC) entre o cabo e grampo. Nessas configurações, o UPC fica localizado na base da montagem e devido ao carregamento horizontal proveniente do ângulo de saída gera, nessa posição, a restrição de movimento. No grampo de suspensão elastomérico o UPC ocorre em toda a circunferência do condutor e nesse caso, mesmo o grampo elastomérico permitindo a movimentação condutor em seu interior, foi constatado que a maior tensão de flexão ocorreu na seção transversal imediatamente após ao UPC em direção ao vão ativo. Por fim, foram analisadas as tensões de flexão no interior do grampo HAES. Nessa configuração o condutor fica em contato apenas com o material elastomérico, o qual é envolto pela armadura pré-formada e duas sapatas metálicas que formam o invólucro metálico. O mapeamento das tensões no interior do grampo HAES revelou que, além do UPC, a seção transversal da borda do invólucro também é uma posição crítica para a tensão de flexão. Isso porque, o material elastomérico se deforma permitindo a movimentação do condutor em seu interior e, nesse caso, o invólucro metálico gera uma restrição do movimento. Assim, o grampo HAES possui duas regiões de máxima tensão de flexão, sendo que nos ensaios conduzidos com cabo CA 1120 ocorreu uma alternância na posição crítica a depender do nível de excitação, já no condutor CAL 6201 a seção transversal da borda do invólucro apresentou tensões de flexão ligeiramente superiores as registradas no UPC.

Com isso, partiu-se para a análise comparativa da máxima tensão de flexão em cada montagem cabo/grampo. Inicialmente, os dados experimentais da tensão de flexão em função da amplitude de

deslocamento foram contrastados com o predito pela formulação de Poffenberger-Swart (P-S), nessa análise apenas os resultados experimentais dos grampos metálicos se adequaram aos resultados calculados pela fórmula de P-S, o que já era esperado pois durante o desenvolvimento da equação é assumido que o condutor vibra fixo a um suporte e que não permite deslocamento ou rotação em sua extremidade, o que é satisfeito apenas pelo grampo metálico.

O fato dos grampos com material elastomérico não se adequarem ao predito por P-S ocorre por esses reduzirem o impacto da vibração eólica na tensão de flexão dos fios do condutor, justamente por permitir que o condutor vibre em seu interior de forma a reduzir a curvatura dos fios. Porém, uma vez que a fórmula de P-S é amplamente empregada por pesquisadores e engenheiros para previsão de vida dos condutores, ao aplica-la a grampos desse tipo poderá ocasionar em uma previsão de vida demasiadamente conservativa.

Por conta disso, foram analisadas duas formas de melhor correlacionar a formulação de P-S com os resultados experimentais dos grampos com material elastomérico. O Cigré (1995) recomenda que o valor do fator de correlação de P-S seja corrigido no caso de medições em grampos HAES, para isso o centro do grampo deve ser considerado como ponto de referência para a medição do braço de alavanca, x . A recomendação foi extrapolada para o grampo elastomérico, no qual foi considerado o centro do elastômero como sendo o ponto de referência para o braço de alavanca. No caso analisado, essa recomendação provou-se eficaz ao diminuir o erro relativo entre o resultado experimental e o calculado. Além disso, foi investigado o incremento da rigidez da armadura pré-formada no cálculo do fator de correlação de P-S, o qual tornou os resultados não conservativos, prevendo uma tensão inferior ao medido em laboratório. Já o IEEE propõe que o valor do deslocamento seja corrigido em função do tamanho do braço de alavanca, porém não é indicado qual deve ser o ponto de referência para a medição do braço. Por conta disso, três posições foram investigadas como referência para o grampo HAES e duas para o grampo elastomérico. Concluiu-se dessa análise que a melhor posição de referência para a metodologia do IEEE é a seção transversal do involucro metálico para o grampo HAES e o centro do elastômero para o grampo elastomérico.

Com base no exposto, caso a correlação experimental não esteja disponível, recomenda-se utilizar a metodologia do Cigré (1995) ou do IEEE (2006) para relacionar o deslocamento medido na linha de transmissão com a tensão de flexão no condutor. Sendo que para a medição do braço de alavanca deve ser considerado como ponto de referência, a seção transversal da borda do involucro do grampo HAES na metodologia do IEEE e o centro do elastômero nos demais casos.

Ademais, a equação que correlaciona o parâmetro $f_{y_{max}}$ com a tensão de flexão também foi analisada, sendo que nesse caso nenhum resultado experimental se adequou ao predito pela formulação. Ainda nesse sentido, foi criada uma correlação experimental entre os parâmetros de intensidade de

vibração Y_b e $f_{y_{max}}$, na qual cada tipo de grampo obteve uma correlação diferente que está associada ao nível de restrição de movimento imposto pelo grampo ao cabo.

O efeito do material elastomérico na fadiga do condutor foi averiguado por meio de ensaios de fadiga, nos quais dois parâmetros quantificaram a severidade de vibrações: o parâmetro $f_{y_{max}}$ e a tensão de flexão máxima nos fios do condutor. Foi constatado por meio de ensaios de fadiga em condutores CA 1120 e CAL 6201 montados em grampos elastoméricos que o desempenho em fadiga destas montagens é superior aos relatados para montagens com o grampo metálico. Isso, independentemente, do parâmetro utilizado para avaliação da severidade de vibração. Uma vez que a máxima tensão de flexão foi idêntica nos ensaios tanto com grampos elastoméricos quanto com grampos metálicos, e ainda assim o desempenho em fadiga foi superior nas montagens com elastômero, pode-se afirmar que a flexão pura não é o único fator determinante para a falha, mas também os pontos de interação entre os fios do condutor. Locais estes, onde ocorrem o *fretting* e a nucleação da trinca e os quais são diretamente influenciados pela forma como o grampo de suspensão acomoda o condutor.

Por meio das análises de falhas dos fios nos ensaios de fadiga em grampos elastoméricos concluiu-se que as falhas ocorrem preferencialmente entre o UPC e o centro do material elastomérico e que comparado com as falhas que ocorrem em grampos metálicos, existe uma maior dispersão das falhas ao longo da região de acoplamento. Isso pois, tendo o UPC entre o cabo e o grampo como referência, observou-se que, nos ensaios dinâmicos, a tensão de flexão reduz de forma mais acentuada no sentido do vão do que quando comparado com as tensões no sentido grampo. Já a dispersão das falhas está associada ao que foi observado no mapeamento das tensões no interior do grampo elastomérico, no qual ocorreu uma redução de apenas 35% da tensão no UPC em relação a tensão mínima registrada no extremo oposto ao UPC. Concluiu-se também que as falhas nos grampos elastoméricos ocorrem, majoritariamente, no topo da montagem e na camada intermediária, o que dificulta a inspeção visual para detecção de quebras em linhas de transmissão, sendo recomendado nesses casos a utilização de técnicas de termografia ou radiografia para detectar falhas por fadiga em linhas de transmissão.

A análise microscópica da superfície de fraturada dos fios revelou que, de fato, as falhas ocorreram por fadiga. Foram observadas as regiões de nucleação da trinca no ponto de contato entre dois fios, de propagação da trinca e a região de ruptura dúctil do fio devido à sobrecarga de tração. As mesmas características de falhas foram observadas também nas superfícies de falha dos fios rompidos em grampos metálicos relatadas por Kalombo (2017), portanto o mecanismo de falha de fios do condutor independe do tipo de grampo de suspensão.

Nos ensaios de fadiga, mesmo com as tensões de flexão equivalentes os condutores montados em grampos elastoméricos tiveram um melhor desempenho em fadiga quando comparado com as montagens em grampos metálicos. Por isso, percebeu-se a necessidade de investigar outro aspecto da fadiga em condutores que é o ponto de contato entre os fios do condutor, marcas essas provenientes da

combinação dos esforços estáticos e dinâmicos no condutor. Nesse sentido, foi observado que as marcas de contato variam em tamanho e aspecto de acordo com a posição da marca em relação ao UPC. Dessa forma, foi possível identificar dentre as marcas analisadas marcas de adesão, de escorregamento e aquelas que apresentam ambas zonas, sendo denominadas de mistas.

Com exceção do grampo HAES, no interior da montagem foram observadas marcas com características predominantes de adesão e à medida que as marcas observadas se direcionam para o vão ativo, a zona de adesão diminui enquanto a zona de escorregamento aumenta. Conclui-se disso que as condições de pressão e deslocamento entre os fios do condutor variam dentro da região de acoplamento. Sendo que no interior do grampo de suspensão ocorrem as maiores pressões e menores deslocamentos, enquanto o oposto é observado na região fora do grampo de suspensão. Já nas montagens com grampo HAES, as marcas de contato a partir da borda do invólucro tiveram características predominantemente de escorregamento. Depreende-se disso, que o grampo HAES permite a movimentação do condutor em seu interior, o que corrobora com a hipótese adotada para a consideração da borda do invólucro do grampo HAES, como ponto de referência para a medição do braço de alavanca na metodologia do IEEE para correção da tensão de flexão prevista na fórmula de P-S.

Ademais, foi constatado que cada tipo de grampo de suspensão impactou diferentemente o aspecto das marcas de contato na região de acoplamento. Foi observado nos grampos metálicos, com ou sem armadura, marcas de adesão mais expressivas e em maior quantidade do que em relação aos grampos com material elastomérico, confirmando que os grampos metálicos induzem uma pressão de contato nos fios do condutor maior que as montagens com grampos elastoméricos. Outrossim, as marcas de contato no interior com material elastomérico apresentaram predominância de escorregamento, constatando que nesse caso ocorre maiores níveis de deslocamento e menores forças de contato entre os fios. Além disso, outra diferença observada foi o tamanho das marcas de contato mais próximas ao UPC, nesse caso, as marcas nas montagens com grampos metálicos foram sempre maiores que as marcas em grampos com material elastomérico, o que também aponta para uma maior pressão de contato daqueles em relação a esses.

Com base no exposto, conclui-se que o tipo de grampo de suspensão: (i) impacta na relação entre o deslocamento vertical do condutor e a tensão de flexão, uma vez que grampos de suspensão elastoméricos permitem a movimentação do condutor em seu interior, o que reduz a curvatura e a deformação dos fios; (ii) influencia o desempenho em fadiga dos condutores, especificamente aumentando a vida em fadiga de condutores montados em grampos elastoméricos e (iii) impacta na quantidade e na distribuição da pressão ao longo da região de acoplamento, o que reflete na forma como os fios do condutor interagem entre si, nessas interação ocorrem os locais críticos para a nucleação das trincas que levam a fadiga do condutor.

7.1 Sugestões de Trabalhos Futuros

Durante o desenvolvimento da presente tese, foram identificados alguns aspectos que ainda carecem de uma investigação mais aprofundada e embasam as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Verificar a influência da carga de tração e da frequência na correlação entre deslocamento e tensão de flexão nos fios do condutor montado em diferentes configurações de grampos de suspensão;
- Avaliar a evolução das marcas de escorregamento no vão ativo para diversos número de ciclos de vibração para verificar se existe uma estabilização do crescimento das marcas ao longo dos ciclos de vibração.
- Realizar ensaios de fadiga com grampos elastoméricos para vidas a partir de 10^7 ciclos de vibração.
- Avaliar efeito da carga de esticamento no desempenho em fadiga de montagens com grampos elastoméricos.
- Avaliar o efeito da temperatura e da degradação do material elastomérico no desempenho em fadiga de cabos condutores.
- Refazer os ensaios do Capítulo 6 mantendo o deslocamento, Y_b , constante para todos os ensaios ao invés de realizar todos os ensaios com a mesma deformação nos fios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, C. R. F. et al. Fretting fatigue in overhead conductors: Rig design and failure analysis of a Grosbeak aluminium cable steel reinforced conductor. **Engineering Failure Analysis**, v. 16, n. 1, p. 136–151, 2009.

BHATTI, N. A.; ABDEL WAHAB, M. Fretting fatigue crack nucleation: A review. **Tribology International**, v. 121, p. 121–138, maio 2018.

BRUNAIR, R. M.; ED RAMEY, G. E.; DUNCAN, R. R. An Experimental Evaluation of S-N Curves and Validity of Miner's Cumulative Damage Hypothesis for an ACSR Conductor. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 3, n. 3, p. 1131–1140, 1988.

CARDOU, A. et al. Fatigue strength characterization of ACSR electrical conductors at suspension clamps. **Electric Power Systems Research**, v. 19, n. 1, p. 61–71, 1990.

CEPEL. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. **Ministério de Minas Energia**, p. 44, 2001.

CIGRÉ. Guide for endurance tests of conductors inside clamps. **Electra**, v. WG 22.04, p. 78–86, 1985.

CIGRÉ. Guide to Vibration Measurements On Overhead Lines. **Électra**, v. 162, n. Task Force 2 of Working Group 11 of Study Committee 22, 1995.

CIGRÉ. Overhead conductors Safe design tension with respect to Aeolian vibrations. v. 273, 2005.

CIGRÉ. Safe design tensions for single conductors fitted elastomer cushioned suspension units. **TB 653**, n. WG B2.49, 2016.

CIGRÉ SC 22 WG 04. Recommendations for the Evaluation of the Lifetime of Transmission Line Conductors. **Electra**, v. 63, p. 103–145, 1979.

CIGRÉ SC 22 WG 04. Endurance Capability of Conductors. **Electra**, v. Final Repo, p. 18 pages, 1988.

CIMINI, C. A.; FONSECA, B. Q. A. Temperature profile of progressive damaged overhead electrical conductors. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 49, p. 280–286, jul. 2013.

CLOUTIER, L. et al. **Studies of Conductor Vibration Fatigue Tests , Flexural Stiffness and Fretting Behaviour**. Trird Intl Symp. on Cable Dynamics. **Anais...Norway**: 1999

COSMAI, U. et al. Overhead Lines. In: PAPAIOU, K. (Ed.). . **CIGRE Green Book**. [s.l.] Springer Nature, 2017. p. 1347.

EPRI. **Transmission Line Reference Book: wind-induced Conductor Motion**. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, 2006.

FADEL, A. A. et al. Effect of high mean tensile stress on the fretting fatigue life of an Ibis steel reinforced aluminium conductor. **International Journal of Fatigue**, v. 42, p. 24–34, 2012.

FRANCO STEIER, V. et al. Effect of chromium nitride coatings and cryogenic treatments on wear and fretting fatigue resistance of aluminum. **Electric Power Systems Research**, v. 116, p. 322–329, nov. 2014.

FRICKE, W.; RAWLINS, C. Importance of Fretting in Vibration Failures of Stranded Conductors. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-87, n. 6, p. 1381–1384, jun. 1968a.

FRICKE, W.; RAWLINS, C. Importance of Fretting in Vibration Failures of Stranded Conductors. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-87, n. 6, p. 1381–1384, jun. 1968b.

GOUDREAU, S. et al. Strain Measurements on ACSR Conductors During Fatigue Tests II—Stress Fatigue Indicators. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 25, n. 4, p. 2997–3006, out. 2010.

GUERARD, S.; GODARD, B.; LILIEN, J.-L. Aeolian Vibrations on Power-Line Conductors, Evaluation of Actual Self Damping. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 26, n. 4, p. 2118–2122, out. 2011.

GUÉRARD, S.; VAN DYKE, P.; LILLIEN, J. L. **Evaluation of power line cable fatigue parameters based on measurements on a laboratory cable test span**. Eight International Symposium on Cable Dynamic. **Anais...**2009

IEC. **Overhead lines - Method for testing of conductors, IEC 62568**. [s.l: s.n.]. v. 2006

IEEE. Standardization of Conductor Vibration Measurements. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-85, n. 1, p. 10–22, 1966.

IEEE. **Guide for Aeolian Vibration Field Measurements of Overhead Conductors, Std 1368™-2006**. New York: [s.n.].

IEEE. **Guide for Aeolian Vibration Field Measurements of Overhead - IEEE Std 1368**. New York: [s.n.].

KALOMBO, R. **Evaluation of the fatigue resistance of power line conductors function of the H/w parameter**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2017.

KALOMBO, R. B. et al. Influence of the catenary parameter (H/w) on the fatigue life of overhead conductors. **Tribology International**, v. 108, n. November 2016, p. 141–149, 2017.

KALOMBO, R. B. et al. Fatigue performance of overhead conductors tested under the same value of H/w parameter. **Procedia Engineering**, v. 213, p. 346–358, 1 jan. 2018.

KALOMBO, R. B. et al. Experimental Study of the Fatigue Performance of Overhead Pure Aluminium Cables. **Procedia Structural Integrity**, v. 19, p. 688–697, 2019.

LÉVESQUE, F. et al. Experimental Study of Dynamic Bending Stiffness of ACSR Overhead Conductors. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 30, n. 5, p. 2252–2259, 2015.

LIENHARD, J. **Synopsis of Lift, Drag, and Vortex Frequency Data for Rigid Circular Cylinders**. [s.l.] Technical Extension Service, Washington State University, 1966.

MCGILL, P. B.; RAMEY, G. E. Effect of Suspension Clamp Geometry on Transmission Line Fatigue. **Journal of Energy Engineering**, v. 112, n. 3, p. 168–184, 1986.

Metals Handbook. Volume 12 ed. [s.l.] ASM International, 1987.

MINER, M. A. Cumulative Damage in Fatigue. **Journal of Applied Mechanics**, v. 12, p. A159–A164, 1945.

MIRANDA, T. et al. **Self-damping of conductors AAC, AAAC AND ACSR with respect of H/W Parameter**. 25th International Congress of Mechanical Engineering. **Anais...ABCM, 2019** Disponível em: <<http://abcm.org.br/anais-de-eventos/COB2019/1666>>

MIRANDA, T. B. **Influência do parâmetro H/w sobre o auto amortecimento de cabos condutores de energia**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2017.

NISHIOKA, K.; HIRAKAWA, K. Fundamental Investigations of Fretting Fatigue : (Part 2, Fretting Fatigue Testing Machine and Some Test Results). **Bulletin of JSME**, v. 12, n. 50, p. 180–187, 1969a.

NISHIOKA, K.; HIRAKAWA, K. Fundamental Investigations of Fretting Fatigue : (Part 5, The Effect of Relative Slip Amplitude). **Bulletin of JSME**, v. 12, n. 52, p. 692–697, 1969b.

NISHIOKA, K.; KENJI, H. Fundamental Investigations of Fretting Fatigue : Part 6, Effects of Contact Pressure and Hardness of Materials. **Bulletin of JSME**, v. 15, n. 80, p. 135–144, 1972.

OUAKI, B. et al. Fretting fatigue analysis of aluminium conductor wires near the suspension clamp: Metallurgical and fracture mechanics analysis. **The Journal of Strain Analysis for Engineering Design**, v. 38, n. 2, p. 133–147, 1 fev. 2003.

PAPAILIOU, K. O. Improved Calculations of Dynamic Conductor Bending Stresses using a Variable Bending Stiffness. **Cigre SC22**, v. 138, 1995.

PAPAILIOU, K. O. On the bending stiffness of transmission line conductors. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 12, n. 4, p. 1576–1583, 1997.

POFFENBERGER, J. C.; SWART, R. L. Differential Displacement and Dynamic Conductor Strain. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 84, n. 4, p. 281–289, abr. 1965.

RAWLINS, C. Fatigue of overhead conductors. In: ELECTRICAL POWER RESEARCH INSTITUTE (Ed.). . **Transmission Line Reference Book**. Palo Alto, CA: Electric Power Research

Institute, 1979.

RAYLEIGH, J. W. S. **The Theory of Sound**. 2nd. ed. [s.l.] Dover Publications, 1998.

SANDBERG, S. A new transmission-line suspension clamp. **Electrical Engineering**, v. 69, n. 5, p. 410–410, 1949.

TEBO, G. B. Measurement and control of conductor vibration. **Transactions AIEE Power Apparatus and Systems**, v. 60, p. 1188–1193, 1941.

VAN DYKE, M. **An Album of Fluid Motion**. 14th. ed. Stanford-CA: Parabolic Press, 1982.

VIEIRA, E. R. **Análise comparativa do efeito da fadiga por fretting nos fios de cabos condutores formados pelas ligas de alumínio 1120 e AA 6201**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2020.

VINGSBO, O.; SÖDERBERG, S. On fretting maps. **Wear**, v. 126, n. 2, p. 131–147, set. 1988.

ZASSO, A. et al. Pressure field analysis on oscillating circular cylinder. **Journal of Fluids and Structures**, v. 24, n. 5, p. 628–650, jul. 2008.

ZETTERHOLM, O. D. Bare conductors and Mechanical Calculation of Overhead Conductors. **CIGRÉ Session**, v. Report No., 1960.

ZHOU, Z. R. et al. Fretting Patterns in a Conductor–Clamp Contact Zone. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, v. 17, n. 6, p. 661–669, 1994a.

ZHOU, Z. R. et al. Fretting fatigue in electrical transmission lines. **Wear**, v. 173, n. 1–2, p. 179–188, 1994b.

ZHOU, Z. R. et al. Fundamental investigations of electrical conductor fretting fatigue. **Tribology International**, v. 29, n. 3, p. 221–232, 1996.

ZHOU, Z. R.; FAYEULLE, S.; VINCENT, L. Cracking behaviour of various aluminium alloys during fretting wear. **Wear**, v. 155, n. 2, p. 317–330, jun. 1992.

APÊNDICE I

Ensaio de fadiga em grampos elastomérico

Tabela A.1 – Dados brutos dos ensaios de fadiga do condutor CA 1120 montado no grampo elastomérico com carga de esticamento de 20% da carga de ruptura do condutor

| Ensaio | Tensão (MPa) | $f_{y_{max}}$ (mm/s) | Quebra 1 | Quebra 2 | Quebra 3 | Quebra 4 |
|--------|--------------|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 27,2 | 274,67 | 4.979.880 | 4.979.880 | 7.000.020 | 7.187.940 |
| 2 | 27,2 | 274,67 | 3.335.580 | 3.335.580 | 4.885.920 | 5.872.500 |
| 3 | 27,2 | 274,67 | 2.824.380 | 2.824.380 | 4.127.940 | 4.432.104 |
| 1 | 29,4 | 297,56 | 2.800.512 | 2.800.512 | 3.850.704 | 5.425.992 |
| 2 | 29,4 | 297,56 | 2.434.320 | 2.434.320 | 2.477.790 | 4.086.180 |
| 3 | 29,4 | 297,56 | 2.314.404 | 2.314.404 | 2.445.408 | 5.414.832 |
| 1 | 31,7 | 320,45 | 2.087.424 | 2.087.424 | 3.392.064 | 3.826.944 |
| 2 | 31,7 | 320,45 | 2.437.344 | 2.437.344 | 2.829.060 | 3.307.524 |
| 3 | 31,7 | 320,45 | 1.831.788 | 1.831.788 | 2.006.244 | 3.445.506 |

Tabela A.1 – Dados brutos dos ensaios de fadiga do condutor CA 6201 montado no grampo elastomérico com carga de esticamento de 20% da carga de ruptura do condutor

| Ensaio | Tensão (MPa) | $f_{y_{max}}$ (mm/s) | Quebra 1 | Quebra 2 | Quebra 3 | Quebra 4 |
|--------|--------------|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 27,2 | 314,4 | 2.389.524 | 2.606.112 | 2.884.446 | 4.399.398 |
| 2 | 27,2 | 314,4 | 1.720.602 | 1.941.192 | 2.823.552 | 3.441.204 |
| 3 | 27,2 | 314,4 | 2.187.648 | 2.552.256 | 2.871.288 | 3.554.928 |
| 1 | 29,4 | 340,7 | 1.698.966 | 2.112.228 | 2.341.818 | 2.479.572 |
| 2 | 29,4 | 340,7 | 1.502.550 | 1.845.990 | 2.189.430 | 2.318.220 |
| 3 | 29,4 | 340,7 | 1.780.122 | 2.189.496 | 2.462.412 | 2.729.842 |
| 1 | 31,7 | 366,9 | 1.637.496 | 1.682.982 | 1.773.954 | 2.137.842 |
| 2 | 31,7 | 366,9 | 1.102.950 | 1.235.304 | 1.808.838 | 2.294.136 |
| 3 | 31,7 | 366,9 | 780.192 | 1.190.288 | 1.256.976 | 1.473.696 |

Marcas formadas pelo contato entre fios do condutor

Nas Figuras A.1 a A.16 são apresentadas as imagens das marcas de contato formadas pelo contato dos fios da intermediária com os fios da camada externa e cuja análise é relatada no Capítulo 6. Em cada Figura abaixo a ordem das marcas de contato segue o exemplificado da Figura 6.2.

- **Grampo de suspensão metálico**

- Condutor CA 1120

- *Topo*

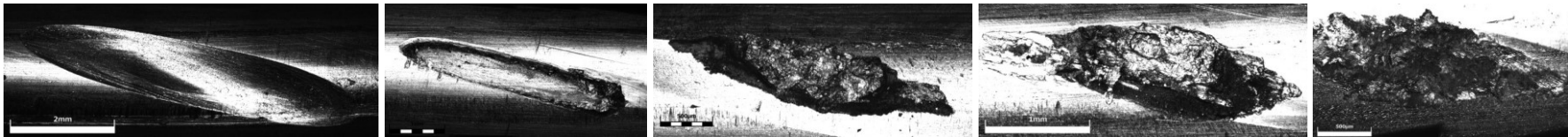


Figura A. 1 – Marcas de contato nos fios da camada intermediária. Grampo: Metálico. Condutor: CA 1120. Posição: Topo

- *Base*

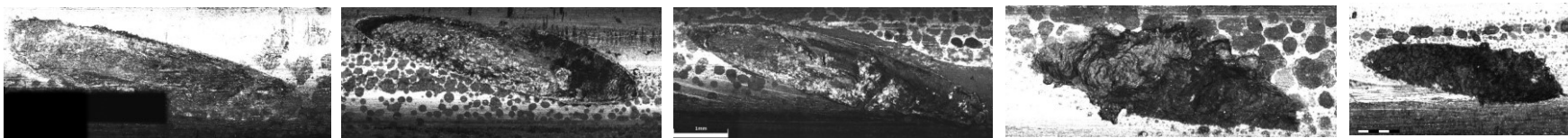


Figura A. 2– Marcas de contato nos fios da camada intermediária. Grampo: Metálico. Condutor: CA 1120. Posição: Base

- Condutor CAL 6201

- *Topo*

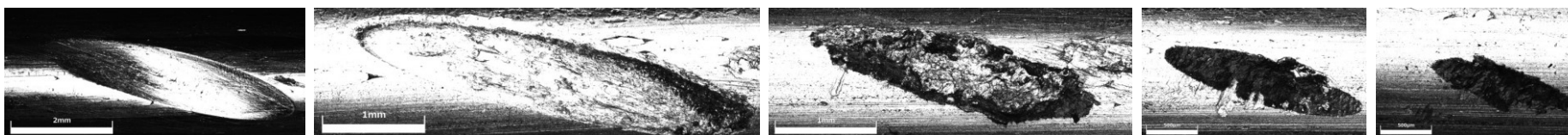


Figura A. 3 – Marcas de contato nos fios da camada intermediária. Grampo: Metálico. Condutor: CAL 6201. Posição: Topo

- *Base*

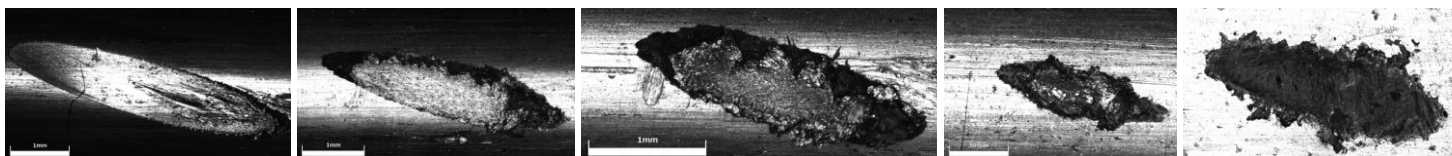


Figura A. 4 – Marcas de contato nos fios da camada intermediária. Grampo: Metálico. Condutor: CAL 6201. Posição: Base

- **Grampo de suspensão metálico com armadura**

- Condutor CA 1120

- *Topo*



Figura A. 5 – Marcas de contato nos fios da camada intermediária. Grampo: Metálico com armadura. Condutor: CA 1120. Posição: Topo

- *Base*

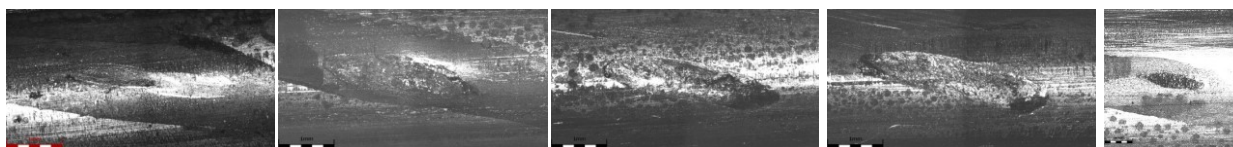


Figura A. 6 – Marcas de contato nos fios da camada intermediária. Grampo: Metálico com armadura. Condutor: CA 1120. Posição: Base

- Condutor CAL 6201

- *Topo*

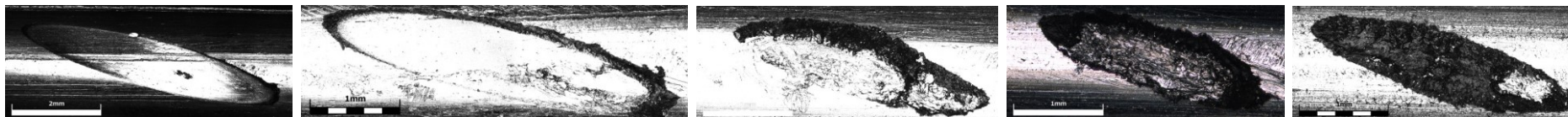


Figura A. 7 – Marcas de contato nos fios da camada intermediária. Grampo: Metálico com armadura. Condutor: CAL 6201. Posição: Topo

- *Base*

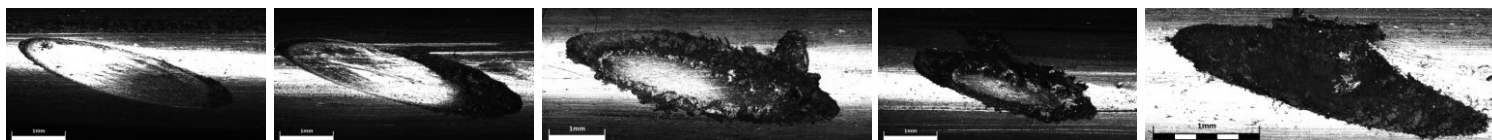


Figura A. 8 – Marcas de contato nos fios da camada intermediária. Grampo: Metálico com armadura. Condutor: CAL 6201. Posição: Base

- **Grampo de suspensão elastomérico**

- Condutor CA 1120

- *Topo*

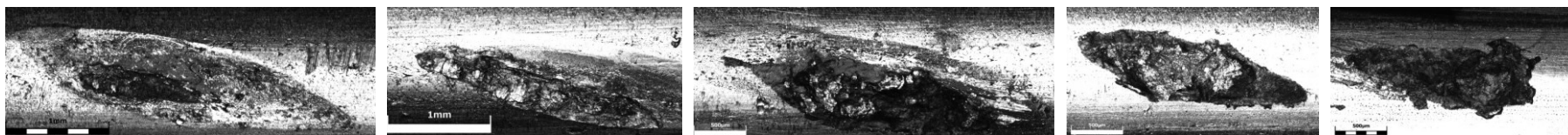


Figura A. 9 – Marcas de contato nos fios da camada intermediária. Grampo: Elastomérico. Condutor: CA 1120. Posição: Topo

- *Base*

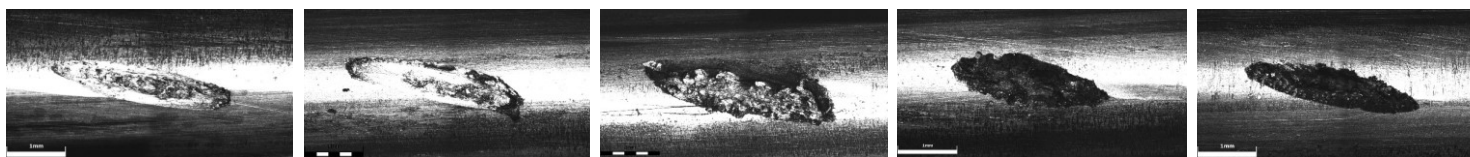


Figura A. 10 – Marcas de contato nos fios da camada intermediária. Grampo: Elastomérico. Condutor: CA 1120. Posição: Base

- Condutor CAL 6201

- *Topo*



Figura A. 11 – Marcas de contato nos fios da camada intermediária. Grampo: Elastomérico. Condutor: CAL 6201. Posição: Topo

- *Base*

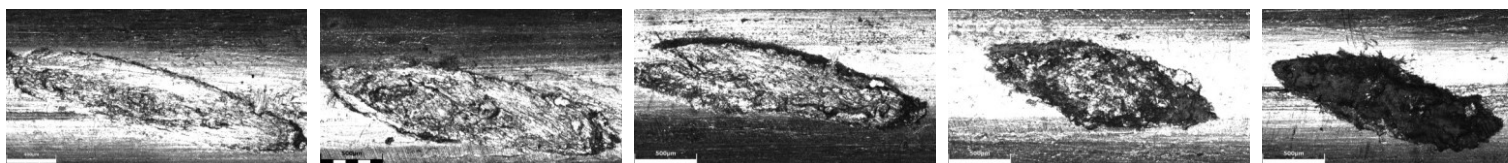


Figura A. 12 – Marcas de contato nos fios da camada intermediária. Grampo: Elastomérico. Condutor: CAL 6201. Posição: Base

- Grampo HAES

- Condutor CA 1120

- *Topo*

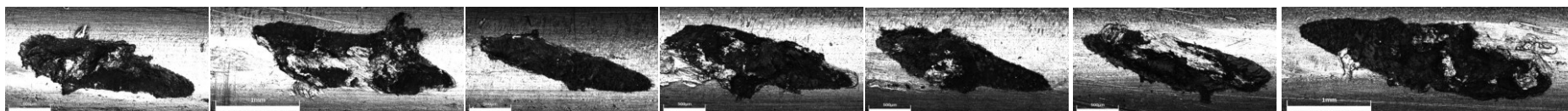


Figura A. 13 – Marcas de contato nos fios da camada intermediária. Grampo: HAES. Condutor: CA 1120. Posição: Topo

▪ *Base*

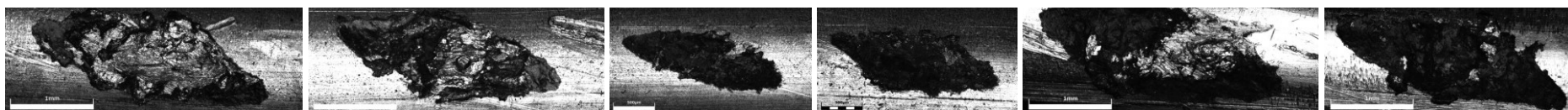


Figura A. 14 – Marcas de contato nos fios da camada intermediária. Grampo: HAES. Condutor: CA 1120. Posição: Base

○ Condutor CAL 6201

▪ *Topo*

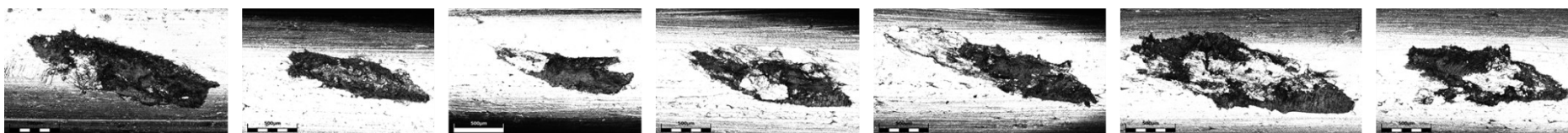


Figura A. 15 – Marcas de contato nos fios da camada intermediária. Grampo: HAES. Condutor: CAL 6201. Posição: Topo

▪ *Base*



Figura A. 16 – Marcas de contato nos fios da camada intermediária. Grampo: HAES. Condutor: CAL 6201. Posição: Base