ANÁLISE DE FALHA DE BALANCIM DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Fábio da Silva Coutinho

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas

FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

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

ANÁLISE DE FALHA DE BALANCIM DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Fábio da Silva Coutinho

Orientador: José Alexander Araújo
Coorientador: Luis Augusto Conte Mendes Veloso

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

BRASÍLIA/DF: 26/11/2024

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROGRAMA DE PÓSGRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

ANÁLISE DE FALHA DE BALANCIM DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

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

APROVADA POR:

_____

Prof. Cosme Roberto Moreira da Silva, D. Phil, (ENM-FT-UnB)
(Examinador Interno à UnB)

_____

Prof. André Luís Rodrigues Araújo, Ph.D., (IFB-Campus Estrutural)
(Examinador Externo à UnB)

BRASÍLIA/DF, 26/11/2024.

FICHA CATALOGRÁFICA

COUTINHO, FÁBIO DA SILVA
Análise de falhas de balancim de uma linha de transmissão de energia elétrica [Distrito Federal] 2024.
xvi, 93p.210x297mm (PPGCM/FT/Unb, Mestre, Ciências Mecânicas, 2024).
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas.

1.Balancim	2. Linhas de transmissão
3.Ferragens eletromecânicas	4. Carregamento

I. ENM/FT/UnB **II. Título (ENM.DM-11/2024)**

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

COUTINHO, F. S. (2024), Análise de falhas de balancim de uma linha de transmissão de energia elétrica. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas. Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas, Universidade de Brasília – Faculdade de Tecnologia, Brasília, DF, 72p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Fábio da Silva Coutinho

TÍTULO: Análise de falhas de balancim de uma linha de transmissão de energia elétrica.

GRAU: Mestre ANO: 2024

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

FÁBIO DA SILVA COUTINHO
fdscoutinho@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado as oportunidades para desenvolver meu conhecimento e força para alcançar mais esse objetivo, ao professor José Alexander Araújo, D. Phil, pelas orientações neste projeto/trabalho e apoio que foram cruciais para o desenvolvimento desse estudo, ao meu amigo José Luis Ragone Filho que é uma referência de ser humano, profissional e sempre acreditou no meu potencial mesmo nos momentos difíceis.

Aos meus pais pela confiança, amor, apoio e exemplos de vida.

Em especial, agradeço à minha família. Minha esposa e filhas que sempre me incentivaram, apoiaram e nos momentos de fraqueza me fizeram ter força para seguir em frente e enfrentar os desafios.

Dedico esse trabalho a minha família, aos meus pais, e ao Prof. José Alexander Araújo, D. Phil. que me fortaleceram durante todo o curso e em especial nesta pesquisa/dissertação.

RESUMO

ANÁLISE DE FALHAS DE BALANCIM DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Autor(a): Fábio da Silva Coutinho
Orientador(a): Prof. José Alexander Araújo, D. Phil.
Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas
Brasília, 2024.

Uma linha de transmissão possui, dentro de toda gama de materiais utilizados para sua construção, diversas ferragens eletromecânicas que suportam os cabos condutores, cabos para-raios e isoladores. Não é uma exceção, como em todo material, a possibilidade que algumas dessas ferragens apresentem falhas após alguns anos em operação. Os balancins do sistema de suspensão de cabos condutores são expostos a cargas em decorrência dos próprios cabos condutores, pressões de vento e esforços adicionais devido a angulação ao qual é instalado. Esses esforços podem fazer com que esses balancins, considerando os materiais utilizados na sua construção, apresentem falhas mecânicas. Neste trabalho foi realizado um estudo de caso de análise de falhas de balancins utilizados em um circuito de seis fases de uma linha de transmissão, onde cerca de 10% desse tipo de balancins apresentaram falhas mecânicas poucos anos após a instalação na linha. Para isso, foram realizados ensaios de laboratório em amostras retiradas do balancim para a caracterização do material, ensaios de microscopia da região fraturada e análise estrutural. Os ensaios de tração uniaxial e análises de composição química realizados indicam que o material atende às especificações de projeto. Por sua vez, os ensaios de microscopia não detectaram indícios de ruptura por fadiga, mas sim de uma ruptura dúctil o que está de acordo com a inspeção visual do balancim, onde são visíveis grandes deformações plásticas. Por fim, a verificação estrutural mostrou que a capacidade resistente do balancim, é superada em cerca de 1300% quando se considera o carregamento mais crítico de projeto. Desta forma, pode-se concluir que o projeto mecânico do balancim não atende às cargas especificadas em projeto.

Palavras-chave:

Balancim, ferragens eletromecânicas, análise de falha, linhas de transmissão.

ABSTRACT

ANALYSYS OF YOKE PLATE FAILURE OF AN ELETRIC POWER TRANSMISSION LINE

Author: Fábio da Silva Coutinho
Advisor: Prof. José Alexander Araújo, D. Phil.
Graduate Program in Mechanical Sciences
Brasília, 2024.

A transmission line comprises, within the entire range of materials used in its construction, various electromechanical hardware components that support the conductor cables, ground wires, and insulators. Like any material, there is a possibility that some of this hardware may exhibit failures after several years in operation. The yoke plates in the suspension system for conductor cables are exposed to loads caused by the conductors themselves, wind pressure, and additional stress due to the angle at which they are installed. These stresses can cause these yoke plates, depending on the materials used in their construction, to experience mechanical failures. This study presents a case analysis of yoke plate failures in a six-phase circuit of a transmission line, where approximately 10% of this type of yoke plate exhibited mechanical failures a few years after installation. Laboratory tests were conducted on samples taken from the yoke plates for material characterization, microscopy of the fractured region, and structural analysis. Uniaxial tensile tests and chemical composition analyses indicated that the material meets the design specifications. Microscopy tests did not reveal evidence of fatigue failure but rather a ductile rupture, which aligns with the visual inspection of the yoke plates showing significant plastic deformations. Finally, the structural verification demonstrated that the yoke plate's load-bearing capacity is exceeded by approximately 1300% under the most critical design load conditions. Thus, it can be concluded that the mechanical design of the yoke plate does not meet the specified design loads.

Keywords:

Yoke plate, electromechanical hardware, failure analysis, transmission lines.

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO **1**

1.1 OBJETIVO 3

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 4

2.REFERENCIAL TEÓRICO **6**

2.1 COMPONENTES DE UMA LINHA DE TRASMISSÃO 6

2.2 AÇÕES EXTERNAS 13

2.2.1 VENTOS EXTREMOS 14

2.2.2 VENTOS SINÓTICOS 15

2.2.3 VENTOS TROPICAIS 16

2.2.4 VENTOS NÃO SINÓTICOS 17

2.3 RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS 18

2.3.1 NORMA NBR 5422:2024 19

2.3.2 NORMA NBR 7095-21 21

2.3.3 NORMA ASCE 10-97 24

2.3.4 NORMA IEC 60826:2003 26

2.4 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS BALANCINS 28

3.MATERIAS E MÉTODOS **35**

3.1 METODOLOGIA EXPERIMENTAL 36

3.2 RESULTADOS 40

3.2.1 ANÁLISE QUÍMICA 40

3.2.2 ENSAIOS DE TRAÇÃO UNIAXIAL 42

3.2.3 ANÁLISES POR MEV 43

3.3 METODOLOGIA NUMÉRICA 57

4. CONCLUSÕES **67**

5. TRABALHOS FUTUROS **68**

6.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 69

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Limites de resistência mecânicas definidas pela carga de ruptura conforme NBR 7095 23

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas (médias) obtidas dos ensaios de tração.....42

Tabela 3.2 - Casos de carregamento considerados na análise 62

Tabela 3.3 - Esforços solicitantes na cantoneira superior direita para as combinações 1 a 3. Valores em kN e cm 64

Tabela 3.4 - Resultados da verificação de segurança da cantoneira superior esquerda 66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1-Mapa do sistema elétrico interligado nacional.....2

Figura 1.2-Fotografia de Balancins de Linhas de Transmissão no Brasil.....4

Figura 2.1-Exemplos de silhuetas de estruturas estaiadas 7

Figura 2.2-Exemplos de silhuetas de estruturas autoportantes.....7

Figura 2.3-Cabos condutores. (a) CAA – Cabo de alumínio com alma de aço; (b) Cabo de alumínio CA 8

Figura 2.4-Exemplos de ferragens de linhas de transmissão. (a) Grampo de suspensão. (b) Amortecedor *stockbridge*.....9

Figura 2.5-Exemplos de ferragens e acessórios de linhas de transmissão. (a) espaçador amortecedor. (b) esfera de sinalização.....10

Figura 2.6-Tipos de isoladores: Vidro, porcelana e poliméricos 10

Figura 2.7-Representação da distância de arco e distância de escoamento dos isoladores.....11

Figura 2.8-Exemplos de balancins. (a) Cadeia simples em “I” para três condutores. (b)Cadeia simples em “I” para quatro condutores. (c) Cadeia simples em ‘’I” para seis condutores 12

Figura 2.9-Exemplo de cadeia de isoladores. (a) Cadeia simples em “V” para

dois condutores. (b) Cadeia de ancoragem dupla 22

Figura 2.10-Exemplo de Balancins.....30

Figura 2.11-Exemplo de Balancins – Duplicador de ancoragem.....31

Figura 2.12-Exemplo de Balancins – Duplicador de ancoragem dupla.....31

Figura 2.13-Exemplo de Balancins – Triplicador e Quadruplicador de suspensão 32

Figura 3.1-Balancim com cadeia isoladora disposta em V. (a) Vista frontal. (b) Vista lateral 36

Figura 3.2- Geometria do balancim (dimensões em milímetros). (a) Vista lateral. (b) Vista frontal. (c) Detalhe L.....37

Figura 3.3- Desenho técnico e imagens do conjunto balancim para feixe expandido como recebido. (a) vista de frente do balancim com identificação das cantoneiras danificadas; (b) imagens das cantoneiras B1 e B2; (c) imagens das cantoneiras A1 e A2 ainda fixas ao balancim superior.....37

Figura 3.4-Fotografia da cantoneira do balancim.....38

Figura 3.5-Desenho com dimensões e tolerâncias de corpo de prova utilizado nos ensaios uniaxiais de tração 38

Figura 3.6-Máquina Universal de ensaio MTS de 100 KN para ensaios estáticos, com garras de pressão hidráulica 39

Figura 3.7-Microscópio Eletrônico de Varredura JEOL JSM 7100 *Field Emission*, usado nas análises de falha nas superfícies de fratura das cantoneiras metálicas.....40

Figura 3.8-Laudo da análise químicas da amostra retirada do balancim, demonstrando que a amostra analisada satisfaz à especificação química dos aços ASTM A 572 Grau 50.....41

Figura 3.9-Curva Tensão x Deformação para o ensaio 1.....42

Figura 3.10-Imagens das cantoneiras B1 e B2 43

Figura 3.11-(a) Imagens das cantoneiras B1 e B2 desmontadas. (b) e (c) Imagens das cantoneiras B1 e B2 apresentando as mesmas características, ou seja, falha na linha dos furos do lado do balancim superior. (d) Deformação plástica do lado oposto.....44

Figura 3.12-Imagens da preparação para exames por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras retiradas da cantoneira B2. (a) Imagem da cantoneira B2 destacando de onde foram retiradas as duas amostras identificadas como B2a e B2b. (b) detalhe das amostras cortadas e identificação das superfícies de falha analisadas. (c) Imagens das duas amostras posicionadas no suporte para análise no MEV.....45

Figura 3.13-Análise da amostra B2a na superfície de falha S1a. (a) Imagem da amostra com as duas superfícies de falha (S1a e S2a) apresentando a olho nu um estado de corrosão avançado. (b) imagem da extremidade da amostra na superfície de falha S1a. (c) ampliação mostrando marcas paralelas de planos cristalinos provavelmente oriundas da conformação da cantoneira 46

Figura 3.14-Análise química via espectroscopia da superfície de falha S1a. (a) Imagem da zona analisada. (b) Mapeamento da mesma zona com destaque do zinco (Zn) em verde e do ferro (Fe) em vermelho. Nota-se que nesta zona a camada de Zn está preservada. (c) Resultado da análise química apresentando produtos de corrosão pós-falha, identificados pelo alto teor de oxigênio 47

Figura 3.15-Análise da superfície de falha S1a. (a) Imagens das zonas analisadas (retângulos vermelho e azul); (b) zona do retângulo vermelho mostrando a preservação da camada de Zn; (c) zona do retângulo azul mostrando a integridade da camada de Zn com espessura constante ao longo da superfície 48

Figura 3.16-Análise da superfície de falha S2a. (a) Imagens das zonas analisadas (retângulos vermelho e azul); (b) zona do retângulo vermelho mostrando a preservação da camada de Zn. Observa-se a presença de produtos de corrosão, provavelmente gerados após a fratura; (c) zona do retângulo azul mostrando a preservação da camada de Zn com espessura constante ao longo da superfície 48

Figura 3.17-Imagens das cantoneiras A1 e A2 desmontadas. (a) Imagens das cantoneiras A1 e A2 apresentando as mesmas características, ou seja, falha em um dos furos do lado do balancim superior (f) e uma parte faltante do lado oposto (b) e (c). (d) e (e) mostram que as partes faltantes ficaram presas na estrutura lateral do balancim 49

Figura 3.18-Imagens da preparação para exames por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras retiradas da cantoneira A2. (a) Imagem da cantoneira A2 destacando a parte cortada para análise. A seta preta apresenta um possível início da falha. (b) Detalhe da amostra cortada A2 e identificação da superfície de falha analisada. (c) e (d) Imagens da amostra e da superfície de falha S1A2. (e) Amostra A1 após retirada da cantoneira A1 50

Figura 3.19-Análise da superfície de falha S1A2 da cantoneira A2. (a) Imagem da superfície S1A2 com retângulo vermelho indicando a zona de interesse. (b) Imagem da zona de interesse. Nota-se a preservação da camada de Zn. (c) e (d) Ampliação das zonas indicadas pelos retângulos amarelo e laranja destacando a presença de dimples, característicos de uma fratura dúctil. (e) Ampliação da zona indicada pelo retângulo azul mostrando a presença de produtos de corrosão, provavelmente oriundos da corrosão pós-falha 51

Figura 3.20-Análise da superfície de falha S1A2 da cantoneira A2. (a) Imagem da extremidade interna da superfície S1A2 provando a integridade da camada de Zn. (b) Imagem da extremidade externa, lado do possível início da falha. (c) Mesma zona observada com inclinação. (d) Ampliação da zona indicada pelo retângulo vermelho, observa-se que a camada de Zn está preservada. A superfície S1A2 apresentou uma camada de Zn totalmente preservada com espessura constante. A presença de dimples também foi observada em toda a superfície, mesmo nas extremidades perto da camada de Zn, indicando que esta parte da cantoneira sofreu uma ruptura dúctil 52

Figura 3.21-Análise da superfície de falha S1A1 da cantoneira A1. (a) Imagem da amostra A1 com indicação da superfície de interesse. (b) Imagem da extremidade externa, lado do possível início da falha. (c) Ampliação mostrando a integridade da camada de Zn. (d) Ampliação da zona indicada pelo retângulo vermelho. Observa-se que prevalece a presença de dimples 53

Figura 3.22-Análise da superfície de falha S1A1 da cantoneira A1. (a) Imagem da superfície S1A1 com retângulos indicando as zonas de interesse. (b) imagem da zona de interesse indicada pelo retângulo amarelo. Observa-se a presença de produtos de corrosão. (c) e (d) Ampliação das zonas indicadas pelos retângulos azul e vermelho destacando a presença de dimples, característicos de uma fratura dúctil. A superfície S1A1 apresenta dimples em toda a área não coberta por produtos de corrosão e sua camada de Zn está preservada em todo seu contorno 54

Figura 3.23-Análise da parte presa da cantoneira A1. (a) Esquema localizando a parte da cantoneira analisada. (b) e (c) Imagens das partes ainda presas na estrutura lateral do balancim. (d) Imagem das duas partes desmontadas. (e) Imagens das amostras cortadas para análise no MEV com identificação das superfícies de falha analisadas.....55

Figura 3.24-Análise da superfície de falha S1A1P da cantoneira A1. (a) e (b) Imagens das duas extremidades da superfície S1A1P com a camada de Zn preservada. Nota-se a presença de produtos de corrosão. (c) Ampliação da zona indicada pelo retângulo vermelho destacando a presença de dimples 56

Figura 3.25-Análise da superfície de falha S2A1P da cantoneira A1. (a) Imagem da extremidade da superfície S1A1P (lado do furo). (b) Ampliação da zona indicada pelo retângulo vermelho destacando a presença de dimples. (c) e (d) Imagens mostrando a camada de Zn totalmente preservada com espessura constante. Observa-se a presença de produtos de corrosão oriundos da corrosão pós-falha 57

Figura 3.26-Excentricidades nos nós de treliças.....58

Figura 3.27-Modelo numérico do balancim elaborado no software comercial SAP 2000.....59

Figura 3.28-Cargas atuantes no balancim 60

Figura 3.29-Orientações dos eixos locais em relação às abas da cantoneira 65

Figura 3.30-Verificação de segurança segundo os requisitos da ASCE 10-97.....65

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIAÇÕES

EDS - Every Day Stress

N - Número de ciclos

σ_u - Limite de resistência (MPa)

T - Temperatura

E - Módulo de elasticidade

Ve - Velocidade do escoamento (vento)

d - Diâmetro do condutor

Es - Módulo de elasticidade de aço

ns - Número de fios de aço

FN - Força normal

f - Frequência de vibração

fEI - Frequência de vibração considerando o efeito do EI

V - Vida remanescente

ACSR - Aluminum Conductor Steel Reinforced

CAA - Cabo de Alumínio com Alma de Aço

LVDT - Linear Variable Differential Transformer

Nnucle - Número de ciclos para nucleação da trinca

Nprop - Número de ciclos para propagação da trinca

Nrup - Número de ciclos para ruptura do material

SIN – Sistema Interligado Nacional

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

ONS – Operador Nacional do Sistema

HVAC – High Voltage Alternating Current

AT – Alta Tensão

EAT – Extra Alta Tensão

SIL – Surge Impedance Loading

MW – Megawatt

GW – Gigawatt

PCH – Pequenas Centrais Hidrelétricas

MMGD – Micro e MiniGeração Distribuída

LTHVDC – Long-Term High Voltage Direct Current

1.INTRODUÇÃO

Num país com dimensões continentais, como o Brasil, as linhas de transmissão exercem uma função primordial, pois, são responsáveis por transportar e transmitir toda a energia gerada nas diversas fontes de geração, chegando em lugares distantes e objetivando atender todos os consumidores. Essa condição particular ocorre, pois, no Brasil temos uma matriz energética diversificada composta por geração a Biomassa 7,2%, Eólica 12,8%, Térmica 12.2%, Solar 5,0%, Hidráulica 47%, PCH 3,4% e MMGD 12,4% que compõem o Sistema Interliga Nacional trazendo confiabilidade e resiliência no atendimento às demandas de energia elétrica no país. Conforme dados informados pelo Operador Nacional do Sistema – ONS no Seminário Internacional de Transmissão de Energia (2024), o Brasil possui, atualmente, 215 GW de capacidade instalada de energia elétrica gerada no Brasil.

As usinas geradoras estão espalhadas por todo território nacional e, na maioria das vezes, longe dos grandes centros de carga. As linhas de transmissão permitem atender regiões com demanda maior que a oferta de energia regional e mitigar riscos de escassez pela interligação de plantas de geração com diversidade locacional. Além disso, o sistema de transmissão permite reduzir a indisponibilidade de suprimento pelo aumento da diversidade de modos de geração com energias alternativas.

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

O sistema interligado nacional (SIN) constitui uma das maiores redes básicas de transmissão de energia do mundo. A importância da transmissão de energia elétrica fica evidente com a necessidade de aproveitamentos distantes dos centros consumidores e com a tendência da geração concentrada em poucas unidades de grande potência. Neste cenário, o Sistema Interligado Nacional assume caráter estratégico no aproveitamento das diversidades de geração e nos benefícios econômicos, conforme ilustrado na Figura 1.1.

- Território brasileiro
- Confiabilidade

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

As plantas geradoras são interconectadas por linhas de transmissão com capacidade suficiente para manter o fornecimento em emergências, sem comprometer a continuidade do fornecimento. O ganho de capital líquido, nesta redução de capacidade de geração, é bem maior que o gasto na construção das linhas de transmissão, para interconexão das fontes geradoras e redes de subtransmissão, existindo um potencial resultado de ganho líquido significativo para redução do custo da energia paga pelo consumidor.

O correto dimensionamento do projeto e a construção com ênfase na alta confiabilidade das linhas de transmissão podem representar ganhos de desempenho e menores custos de operação e manutenção. A utilização das ferragens eletromecânicas, corretamente, projetadas para as linhas de transmissão, como os balancins, aumentam a vida útil do sistema de transmissão, diminui a probabilidade de falha, falta de suprimento e, por sua vez, a perda na transmissão de potência transmitida.

Atualmente, apesar da melhoria na fiscalização em campo para aprimoramento das inspeções e comissionamento para aceitação das linhas de transmissão aéreas antes da energização, muitos itens verificados nesta etapa são feitos com inspeções visuais que não são suficientes para detectar nos balancins erros nos padrões dimensionados ou nos projetos. Mesmo sem a linha estar energizada e ainda não estando em pleno fluxo de energia, tais divergências na fabricação ou nos projetos representam significativos riscos na construção e, por sua vez, aumento de custo e de atrasos na entrega das expansões em decorrência da falta de possibilidade de energização e entrega do empreendimento para compor o SIN.

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

Após a energização de uma linha de transmissão de energia, a gravidade associada a queda de um cabo de uma linha de transmissão de energia ganha maiores proporções devido a presença da alta tensão. Do ponto de vista não apenas econômico, mas também social, a queda da linha energizada gera perdas significativas a Transmissora com aplicação da Parcela Variável que é uma penalidade imposta pelo órgão regulador do setor elétrico brasileiro, isto é, pela Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL.

Além disso, a paralisação de atividades sociais (como a paralisação de hospitais, escolas, universidades), provocadas pela possível queda de um cabo, poderia gerar danos irreparáveis à imagem da proprietária do empreendimento e ao setor elétrico interligado.

1.1 **OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo detalhado e sistemático para avaliar as causas das falhas observadas nos balancins que fazem parte do sistema de suspensão de uma linha de transmissão, de acordo com as cargas definidas na especificação de projeto. Para os estudos foram utilizados um modelo de balancim disponível no mercado e utilizado em linhas de transmissão em construção e operação. O modelo objeto dessa análise utiliza em sua construção, cantoneiras metálicas.

Após alguns anos de energização da linha, cerca de 10% dos balancins dessa linha apresentaram falhas estruturais. Nessa configuração de projeto, as cantoneiras superiores de vários desses balancins têm rompido próximo a região dos furos usados para fixação com as placas, Figura 1.2. Para isso, foram realizados ensaios de laboratório em amostras de material retirado das cantoneiras para caracterização do material, bem como ensaios de microscopia para analisar o tipo de fratura encontrada. Por fim, foi realizada uma análise estrutural das cantoneiras do balancim utilizando-se o software comercial SAP 2000 e as recomendações da norma ASCE 10-97 – *Design of Latticed Steel Transmission Structures*.

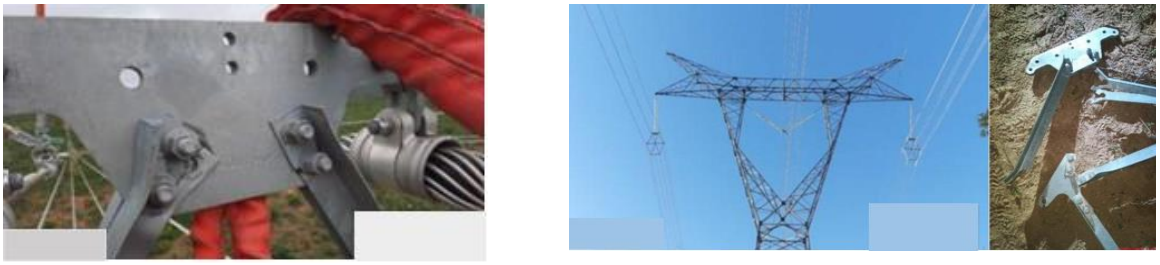


Figura 1.2 - Fotografia de Balancins de Linhas de Transmissão no Brasil (Fonte: Autoria própria, 2024)

1.2 **ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

O capítulo 1 faz a Introdução da dissertação e busca conceituar as dificuldades e necessidades que levaram a realização deste estudo, que são:

- A importância da transmissão de energia elétrica no cenário nacional;
- Os aspectos gerais da transmissão de energia elétrica.
- O SIN – Sistema Interligado Nacional; e
- As falhas observadas nos Balancins;

No capítulo 2 é feito um estudo detalhado do Referencial Teórico abrangendo os seguintes tópicos:

- Os componentes de uma linha de transmissão: são apresentados os principais materiais, cabos, ferragens e equipamentos para construção de uma linha de transmissão; e
- As ações externas: nesse tópico trata-se dos fenômenos atmosféricos com maior enfoque no vento, seus tipos e o impacto no desempenho dos balancins.
- As recomendações normativas: são apresentados os requisitos que nortearam essa tese contemplando normas nacionais e internacionais. Como o objeto de estudo, o balancim, é um dos componentes de uma linha de transmissão, foram analisados e verificados os requisitos normativos, não somente as normas pertinentes ao material em estudo como também, as normas relacionadas aos aspectos construtivos de uma linha de transmissão.
- Princípio de funcionamento dos balancins são apresentados os materiais, características técnicas, os tipos de ensaios e os modelos de balancins.

Com a necessidade de atendimento a novas demandas de energia com a transmissão de potência cada vez maiores, nesse capítulo também são abordados os novos aspectos necessários para construção dos balancins a fim de atender a esses novos requisitos.,

No capítulo 4 são abordados os Materiais e os Métodos de trabalho para o estudo de caso envolvendo as falhas do balancim. O estudo foi dividido em duas etapas.

Quais sejam:

- Primeira etapa: realização de medições para averiguação das dimensões contidas em laboratório e, com isso, a execução dos ensaios das amostras e resultados;
- Segunda etapa: análise estrutural, com foco nas cantoneiras, considerando os carregamentos de projeto e resultados.

No capítulo 5 são apresentadas as Discussões e Conclusões com sugestões de melhorias para aumentar a confiabilidade dos balancins para implantação e operação nas linhas de transmissão. Por fim, no capítulo 6 apresentam-se as Recomendações para Trabalhos Futuros que podem ser realizados nessa linha de pesquisa para aprimoramento dos estudos executados.

2.REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 COMPONENTES DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO

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

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

Assim, é importante destacar também que a adoção desse método é um artifício para reduzir o surgimento de efeito corona, minimizando assim, os impactos negativos que o acompanham. As ferragens eletromecânicas, como o balancim, são usadas para suportar os cabos condutores, fazer a sua conexão via cadeia de isoladores a torre e, em conjunto com os cabos para-raios, sistemas de amortecimento e todos os demais acessórios, comporem os materiais para construção de uma linha de transmissão.

As estruturas metálicas, também designadas, torres ou suporte, desempenham dupla função nas linhas de transmissão aéreas (Fuchs, 2015):

- Proporcionam os pontos de fixação dos cabos condutores através de sua estrutura isolante, garantindo as distâncias de segurança entre condutores energizados, entre esses e parte do próprio suporte e entre os condutores e o solo;
- Amarram, através das suas fundações, as linhas ao terreno, ao qual transmitem as forças resultantes de todas as solicitações a que são submetidos os

elementos que compõem a torre/suporte. Nas Figuras 2.1 e 2.2 estão mostrados tipos de torres utilizadas nas linhas de transmissão.

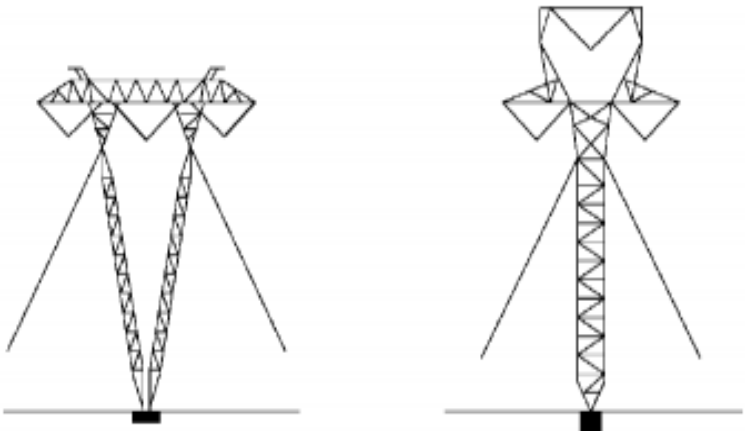


Figura 2.1 - Exemplos de silhuetas de estruturas estaiadas (Fonte: Castilho, 2019)

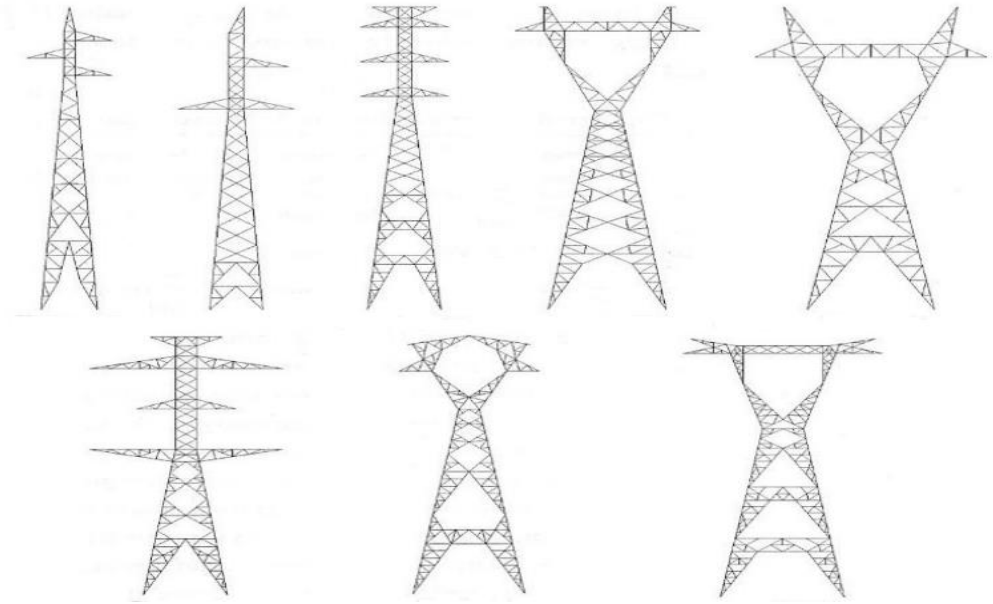


Figura 2.2 - Exemplos de silhuetas de estruturas autoportantes (Fonte: Autoria própria, 2024)

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

- CAA – Cabo de alumínio com alma de aço

  Composto por uma alma de aço formada de um ou mais fios envolvidos por uma ou mais coroas de fios de alumínio 1350, Figura 2.4-a.

- CA – Cabo de alumínio

  Composto por fios de alumínio 1350 encordoados em coroas concêntricas, Figura 2.4-b.

- CAL – Cabo de alumínio liga

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

- CALA – Cabo de alumínio liga com alma de aço

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

- ACAR – Cabo de alumínio reforçado com alumínio liga

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

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

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

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

  Composto por uma alma híbrida de fibra de carbono e vidro, encapsulados por resina epóxi, envolvida por uma ou mais coroas de fios trapezoidais de alumínio liga termorresistente, Figura 2.3-c.

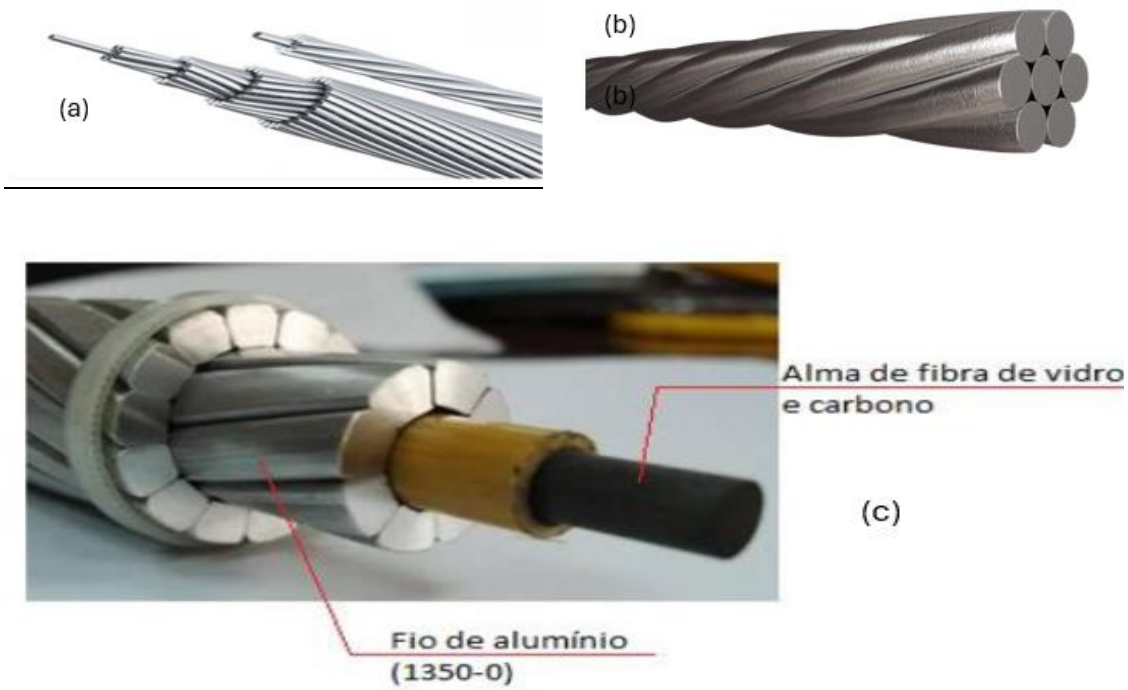


Figura 2.3 - Cabos condutores. (a) CAA – Cabo de alumínio com alma de aço (Fonte: INTELLI, 2019); (b) Cabo de alumínio CA (Fonte: Cordeiro, 2020); (c) Cabo ACCC (Fonte: Tavares, 2013)

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

Consoante a norma brasileira NBR-7095/81, estes componentes destinam-se a fixar, emendar, proteger eletricamente ou mecanicamente, reparar, separar, amortecer as vibrações, por exemplo, de para-raios ou cabos condutores, entre outras funções.

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

- Ferragem de cadeias (Figura 2.4);
- Ferragem de para-raios (Figuras 2.4 e 2.5);
- Acessórios para condutores e cabos (Figuras 2.4 e 2.5);
- Ferragens para estruturas elásticas (Figuras 2.4 e 2.5).

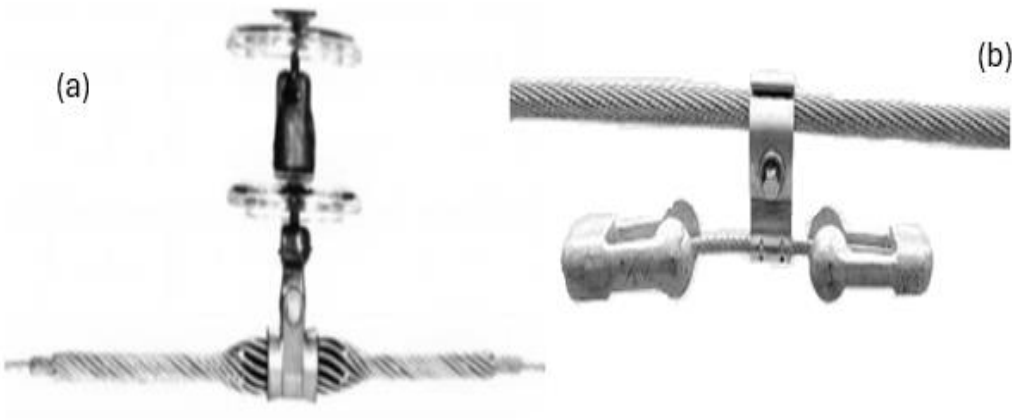


Figura 2.4 - Exemplos de ferragens de linhas de transmissão. (a) Grampo de suspensão. (b) Amortecedor *stockbridge* (Fonte: Salvi, 2021)

Figura 2.5 - Exemplos de ferragens e acessórios de linhas de transmissão. (a) espaçador amortecedor. (b) esfera de sinalização (Fonte: Autoria própria)

Como as torres são de aço, é necessário um equipamento que seja capaz de isolar o cabo da estrutura. O nome é intuitivo: isolador. Segundo Pavlik (1989), é um conjunto de disco de vidro, porcelana ou material polimérico que tem a função de impedir a passagem de corrente elétrica para a torre, Figura 2.6.

Figura 2.6 - Tipos de isoladores: Vidro, porcelana e poliméricos (Fonte: Autoria própria)

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

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

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

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

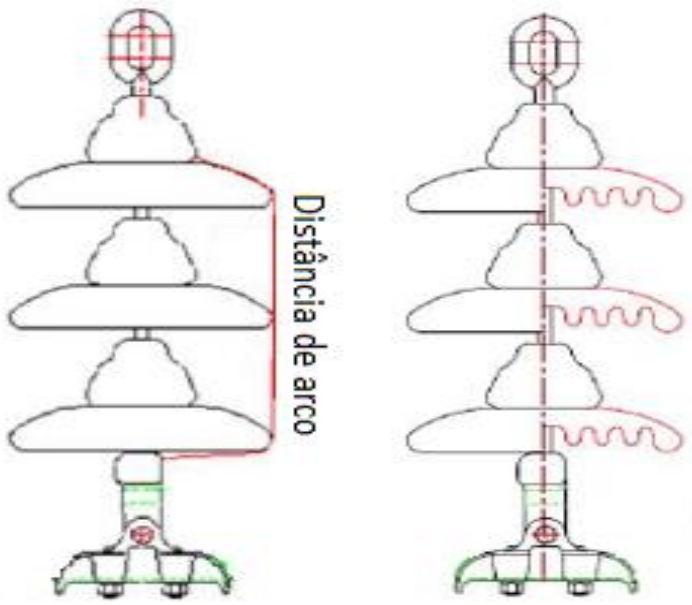


Figura 2.7 - Representação da distância de arco e distância de escoamento dos isoladores (Fonte: Autoria própria)

Em linhas de transmissão de 500 kV, tensão de operação aplicada ao balancim objeto desse estudo, a escolha entre os modelos disponíveis no mercado ou customizados pode depender das especificidades do projeto, das condições ambientais e das preferências do operador da linha em decorrências das facilidades de instalação e

manutenção. Os balancins podem ser diferentes entre si considerando as características construtivas e de projetos (requisitos elétricos e mecânicos) para linhas de maior tensão ou menor tensão e de suas particularidades. A título de ilustração, apresentam-se na Figura 2.8, exemplos típicos de balancins encontrados nas linhas de transmissão.

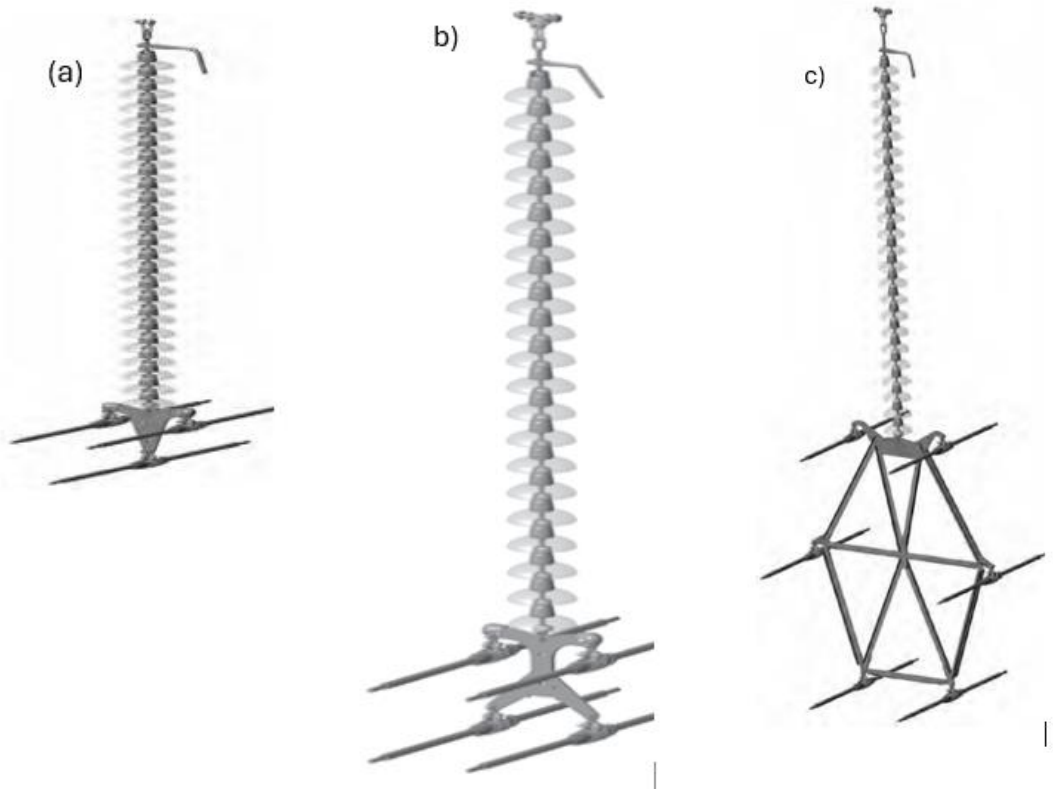


Figura 2.8 - Exemplos de balancins. (a) Cadeia simples em “I” para três condutores. (b)Cadeia simples em “I” para quatro condutores. (c) Cadeia simples em ‘’I’’ para seis condutores. (Fonte: PLP, 2019)

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

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

Considerando todo esse cenário, destaca-se então uma enorme preocupação com relação ao desempenho de ferragens eletromecânicas (balancins para sustentação dos cabos condutores e cadeias de isoladores) aplicadas em projetos de Linhas de Transmissão, principalmente, considerando a necessidade do aumento das potências transmitidas pelas linhas de transmissão e, por sua vez, o aumento dos feixes de condutores que requerem adequações dos balancins para atendimentos a diversas formações de feixes de condutores.

Ponto salutar que irá se aprofundar este estudo, tendo em vista, os potenciais impactos sistêmicos devido a toda importância que tem uma Linha de Transmissão dentro do Brasil. Também, suas respectivas ferragens eletromecânicas associadas, balancim, e instaladas nos projetos. Se caso não estiverem dimensionadas adequadamente, podem causar acidentes graves e problemas no SIN (Fuchs, 2015).

2.2 **AÇÕES EXTERNAS**

Antes de detalharmos as normas para a construção dos balancins, é essencial entender os diversos esforços que devem ser considerados em seu dimensionamento. Um dos principais agentes externos que afetam significativamente o desempenho dos balancins é o vento.

Durante a vida útil dos sistemas de linhas de transmissão, as variáveis principais que solicitam os componentes do sistema são fenômenos atmosféricos naturais, que causam mudanças nas condições atmosféricas nas regiões atravessadas pelas linhas. Essas variáveis geram solicitações mecânicas nos cabos das linhas aéreas, nas estruturas, nas cadeias de isoladores e nas ferragens associadas, que, por sua vez, transmitem esses esforços para as estruturas de fundação.

Nas estruturas de suporte de linhas de transmissão, as forças consideradas no projeto, associadas a esforços frequentes, são predominantemente causadas por fatores meteorológicos. Esses fatores geram pressões dinâmicas nos componentes mecânicos devido ao vento, variações de temperatura e, dependendo da região, podem causar o acúmulo de neve. Além disso, há forças que atuam ao longo de toda a vida da estrutura,

como o peso próprio da estrutura, dos cabos condutores e de proteção, cadeias de isoladores, ferragens eletromecânicas e equipamentos de fixação e montagem.

Em casos de ações de projeto excepcionais ou acidentais, cuja ocorrência é rara, mas que devem ser consideradas pelo projetista, há esforços unilaterais de grande intensidade. Esses esforços podem submeter os balancins a forças longitudinais ou transversais, resultantes da ruptura de um ou mais cabos ou do tombamento de estruturas adjacentes.

No Brasil, no projeto de cabos e estruturas de sistemas de linhas de transmissão aéreas, a ação predominante é a do vento. Existem vários fenômenos meteorológicos que produzem diferentes intensidades de velocidades de vento, que podem ser classificados em diferentes categorias. Os ventos extremos, de particular interesse, podem ser subdivididos em eventos sinóticos, não sinóticos e ciclones tropicais. A necessidade de identificar e separar os ventos extremos em classes foi reconhecida por Gomes e Vickery (1978).

2.2.1 **VENTOS EXTREMOS**

Os ventos consistem em movimentações de ar em relação à superfície terrestre, causados fundamentalmente pelo aquecimento solar não uniforme da atmosfera, principalmente a partir da energia solar absorvida pela crosta terrestre e irradiada para a atmosfera sob a forma de calor (Blessman, 2005). De forma geral, os movimentos ocorrem quando surgem diferenças de pressão entre pontos de elevações iguais (Simiu; Yeo, 2019).

Designam-se por tormentas (*storms*) os sistemas meteorológicos que originam campos de fluxos de vento de grande escala (ventos extremos), independentemente de seu mecanismo de formação (Blessman, 2005). Os campos de fluxos de vento de grande escala podem ser classificados quanto à origem em dois tipos principais de tormentas: tormentas ou ciclones extratropicais, de escala sinótica, e ciclones tropicais, não sinóticos (Simiu; Yeo, 2019).

Em meteorologia, ciclone indica um movimento circulatório de ar em torno de um centro de baixa pressão, independentemente de serem os ventos violentos ou não. No Brasil, são três fenômenos meteorológicos principais que geram ventos extremos:

ciclones extratropicais, tormentas TS e tornados, sendo que as tormentas TS são as responsáveis por ocasionar as maiores de velocidades de vento.

Para a engenharia estrutural, é de interesse conhecer a velocidade média do vento e as flutuações em torno dessa média. A velocidade média é determinada para intervalos de tempo entre 1 min e 1 hora. As flutuações em torno da média, de curta duração, são designadas por rajadas. Na prática, as rajadas são determinadas como médias sobre pequenos intervalos de tempo, da ordem de segundos.

2.2.2 **VENTOS SINÓTICOS**

Os ciclones extratropicais são classificados em ventos de escala sinótica, definida como a escala de sistemas migratórios de alta e baixa pressão da troposfera, com comprimentos de onda que variam entre 1000 km e 4000 km (American Meteorological Society, 2012).

Esse fenômeno se origina pelo contraste térmico entre duas massas de ar em superfícies frontais, quando uma massa de ar quente e uma massa de ar fria se encontram. Geralmente são eventos de longa duração com comportamento estacionário, ocorrendo em latitudes médias, correspondentes às áreas situadas entre 30° e 60° ao norte ou ao sul da linha do equador.

Diferentes terminologias são encontradas para esse fenômeno meteorológico: Tormentas EPS (*Extended Pressure Systems*), depressões frontais e ventos estacionários são termos frequentemente adotados para descrever ventos sinóticos, que envolvem a presença de sistemas frontais ou ciclones extratropicais (Vallis *et al*., 2019).

Esses ventos são caracterizados por apresentarem a melhor aderência aos modelos clássicos de camada limite atmosférica, em que o perfil de velocidade média do vento próximo a um terreno horizontalmente uniforme pode ser aproximado por uma lei logarítmica, ou uma lei potencial.

Os ciclones extratropicais originam os ventos fortes que apresentam o melhor equilíbrio dinâmico com a rugosidade da superfície terrestre. “São os ventos fortes mais bem estudados e servem de base para a maioria das normas que tratam das forças causadas pelo vento” (Blessmann, 2005, p. 24).

Grande parte das normas atuais voltadas para cálculo das ações do vento é baseada em ventos sinóticos. Nas normas brasileiras, nenhuma distinção é feita entre perfis de vento de ciclones tropicais e de tormentas extratropicais, apesar da necessidade de tal distinção.

2.2.3 **CICLONES TROPICAIS**

Os ciclones tropicais têm uma forma semelhante aos ciclones extratropicais, porém podem chegar a ter maiores dimensões (Blessmann, 2005, p. 27). Em geral, desenvolvem-se na região tropical em latitudes que variam entre 5° e 20°. São classificados como ciclones tropicais quando os ventos que ocorrem dentro da circulação do sistema sustentam velocidades com valor igual ou maior que 33 m/s, sobre um período de integração de 1 minuto, observados ou estimados na altura meteorológica padrão de 10 m em uma exposição desobstruída (American Meteorological Society, 2012).

A fonte de energia que alimenta a tormenta é obtida da água aquecida da superfície do oceano, dessa forma, quando a tormenta alcança o continente e avança caminho adentro, sua fonte de energia cessa e as velocidades dos ventos gradualmente diminuem (Simiu; Yeo, 2019).

Um ciclone tropical plenamente desenvolvido possui diferentes nomenclaturas conforme a região de formação (Blessman, 2005, p. 27):

a) furacão (*hurricane*) para os que ocorrem nos Estados Unidos da América, no golfo do México e no Brasil;

b) tufão (*typhoon*) no extremo oriente ou no Pacífico oeste, oceano Atlântico e mares da China;

c) willy-willy ou simplesmente ciclone na Austrália;

d) ciclone em Austrália, Bangladesh, Paquistão e Índia;

e) baguio nas Filipinas.

2.2.4 **VENTOS NÃO SINÓTICOS**

Os ventos não sinóticos de interesse para a engenharia estrutural são as tormentas TS, *down-burst* e os tornados. Esses fenômenos são de caráter local e apresentam ventos de origem convectiva provenientes de nuvens cumulunimbus maduras.

Tormentas TS (*Thunderstorms*), trovoadas, tormentas convectivas, *downburst*, ventos transitórios, tormentas localizadas de vento, e ventos não sinóticos estão entre as várias terminologias utilizadas por pesquisadores, e apesar de haver diferenças de nuances entre cada termo, eles são frequentemente utilizados alternadamente para descrever fluxos horizontais de ventos de tormentas convectivas severas (Vallis *et al*., 2019).

As tormentas TS apresentam fortes chuvas, devido à condensação do vapor de água contido no ar quente e úmido, que precipitam e arrastam o ar durante a queda, gerando correntes descentes de ar (*downdrafts*) que se espalham na superfície terrestre (Simiu; Yeo, 2019). Se as correntes de ventos descentes forem violentas, essas se denominam *downburst*.

As trovoadas, em algumas regiões situadas em latitudes temperadas, podem causar ventos com velocidade superiores às de ventos de origem ciclônica (Blessman, 2005, p. 25).

O termo *downburst* foi cunhado por Fujita em 1976, que o subclassificou em duas categorias, de acordo com a dimensão horizontal de ação do vento (Blessman, 2005):

- *Microburst*: os danos restringem-se a uma superfície com diâmetro de até 4 km do centro do jato de ar. O evento é de curta duração, em geral, não passando de 5 minutos, e as velocidades do vento podem chegar a valores em torno de 75 m/s.

- *Macroburst*: danos atingem uma distância maior que 4 km, podendo chegar a 10 km. Nesse caso, podem aparecer várias *microbursts* na área afetada. Duram por volta de 5 a 30 minutos, e as velocidades do vento são menos violentas, podendo chegar a 55 m/s.

Microburst foi definida por Fujita (1990) como tormentas anti-tornados, consistindo em colunas de ar descendentes em rotação lenta, que ao alcançarem o terreno explodem violentamente. O autor relata diferentes danos devidos à ação de *downbursts*,

podendo apresentar maiores probabilidades de danos estruturais em comparação a tornados. Também aponta o evento como um dos fatores que ocasionam quedas de aeronaves em procedimentos de pouso e decolagem.

Tornados são severas tormentas locais, caracterizadas por apresentar colunas de ar ascendentes que rotacionam em alta velocidade, semelhantes a vórtices e podem conter ventos superiores a 100 m/s (Simiu; Yeo, 2019).

2.3 **RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS**

No contexto Europeu, as publicações IEC 60826 (2017) e EN 50341-1 (2012) apresentam diretrizes para o projeto de diferentes tipos de sistemas de transmissão de energia elétrica, incluindo estruturas treliçadas. Na América do Norte, o manual técnico ASCE No. 74 (2009), sobre a prática em engenharia de torres de LTs, a NBR 5422 - Projeto de linhas aéreas de energia elétrica — Critérios técnicos e a norma ASCE 10 (2015), para o dimensionamento de estruturas, são as principais referências sobre o projeto de linhas de transmissão.

Os manuais técnicos apresentam recomendações e informações úteis para os engenheiros que buscam informações básicas e necessárias ao dia a dia da prática de projeto. Por outro lado, as normas, em geral, fixam as condições indispensáveis ao projeto de linhas de transmissão, fornecendo um procedimento específico para o cálculo das forças de vento que atuam sobre estruturas treliçadas, cadeias de isoladores, ferragens eletromecânicas e cabos condutores, assim como metodologias de cálculo para dimensionamento das estruturas das torres.

Apesar de as normas americanas e europeias apresentarem diferenças quanto às bases teóricas empregadas na metodologia de projeto, a IEC 60826 (2017), a EN 50341-1 (2012) e a ASCE 10 (2015) sugerem implicitamente a modelagem da torre de forma isolada, com as cargas externas aplicadas aos pontos de fixação dos componentes mecânicos, entre eles, o balancim.

Os balancins, como já foi dito, fazem parte da cadeia de isoladores e, por sua vez, são expostos às mesmas solicitações mecânicas dos isoladores que lhes são transmitidas pelos cabos condutores. Essas são compostas por três tipos (Fuchs, 1992):

- Forças verticais: Surgem do próprio peso dos cabos condutores. Nos países mais frios, essa força pode ser acrescida pelo peso da capa de gelo que surge na superfície do cabo;
- Forças horizontais axiais: No sentido dos eixos longitudinais das linhas, necessárias para que os cabos condutores se mantenham suspensos sobre o solo;
- Forças horizontais transversais: No sentido ortogonal aos eixos longitudinais das linhas devido á ação da pressão dos ventos sobre os próprios cabos condutores.

Esses esforços são transmitidos aos isoladores e, por sua vez, as estruturas metálicas (torres) que devem absorvê-los.

2.3.1 **NORMA NBR 5422:2024**

A NBR 5422:2024 foi atualizada, recentemente, e essa atualização representa um avanço significativo ao incorporar conceitos modernos e adaptá-los às particularidades do sistema elétrico brasileiro. A inclusão de novos critérios para o cálculo de balanço, ação do vento e uso de materiais resistentes reflete a evolução na engenharia de linhas aéreas, buscando sempre otimizar a segurança e a eficiência das redes de transmissão de energia elétrica.

Esses critérios geram carga mecânicas de trabalho que devem ser consideradas nos projetos de linhas de transmissão conforme descrito na NBR 5422.

- Os isoladores e as ferragens de uma linha de transmissão devem ser dimensionados para suportar as cargas máximas determinadas de acordo com a NBR 5422:2024;
- Nas condições de trabalho sem ação do vento, os isoladores e as ferragens não podem estar submetidos a uma carga superior a 40 % das suas cargas de ruptura nominais;
- Nas hipóteses de vento de 10 min para projeto, vento de 3 s para projeto e de construção e manutenção dos suportes, os isoladores e as ferragens não podem estar submetidos a uma carga superior a 60 % das suas cargas de ruptura nominais;

- Em caso de cadeia múltipla de isoladores, a carga total a que estará submetida esta cadeia deve ser dividida entre as pencas.

A NBR 5422:2024 traz atualizações importantes para diversos componentes, incluindo os balancins. Dentre os critérios e detalhes específicos sobre os requisitos construtivos dos balancins, segundo a norma, podemos destacar:

a) **Cálculo de Ângulos de Balanço e Balanço Assíncrono:** Os balancins devem ser projetados considerando o ângulo de balanço dos cabos, incluindo o balanço assíncrono. Esta consideração é fundamental para a estabilidade das linhas aéreas, especialmente em linhas compactas, onde o espaço é limitado e os movimentos dos cabos precisam ser rigorosamente controlados.
b) **Distâncias Horizontais e Verticais:** A norma detalha as distâncias mínimas que devem ser mantidas entre os cabos e outros componentes da estrutura, considerando as condições de balanço. Essas distâncias são calculadas com base nas temperaturas obtidas pelo risco térmico e nas condições específicas de operação, garantindo que os cabos não entrem em contato uns com os outros ou com outros elementos da linha.
c) **Ação do Vento**: A influência do vento é considerada no dimensionamento dos balancins. A norma introduz o conceito de fator de turbulência para ajustar as medições de vento à realidade brasileira. Isso inclui a majoração dos ventos por região, considerando rajadas e micro explosões, o que influencia diretamente na resistência e na estabilidade dos balancins sob condições adversas de vento.
d) **Materiais e Durabilidade**: Os balancins devem ser construídos com materiais que garantam durabilidade e resistência à corrosão, especialmente considerando a exposição contínua às intempéries. A norma especifica os tipos de materiais adequados e os tratamentos necessários para prolongar a vida útil dos componentes
e) **Critérios de Instalação e Manutenção**: A instalação dos balancins deve seguir procedimentos específicos para garantir a correta fixação e alinhamento. Além disso, a norma destaca a importância da manutenção regular para detectar e corrigir desgastes ou danos, prevenindo falhas que poderiam comprometer a segurança da linha.

Esses requisitos são projetados para garantir que os balancins contribuam para a estabilidade e segurança das linhas aéreas de energia elétrica, atendendo às condições climáticas e operacionais específicas do Brasil.

2.3.2 **NORMA NBR 7095**

Para fins de entendimento sobre a utilização dos balancins e sua participação como item componente das ferragens eletromecânicas, ferragens de linha aérea ou ferragens eletrotécnicas, cabem as seguintes definições:

- As ferragens de linha aérea são dispositivos metálicos, com função mecânica e/ou elétrica, utilizados em linhas aéreas (NBR 7095).
- As ferragens eletrotécnicas são utilizadas em linhas de transmissão e em subestações de (AT) e (EAT), para fins de fixação, emenda, proteção elétrica ou mecânica, reparação, separação, amortecimento de vibrações etc., de condutores ou de cabos para-raios (NBR 7095).

O termo genérico "ferragem eletrotécnica" compreende:

a) ferragens de cadeia;
b) ferragens de proteção elétrica;
c) grampos e luvas;
d) pesos adicionais;
e) ferragens para condutores e cabos para-raios.

Os balancins compõem as ferragens da cadeia de isoladores dotada de elementos de engate, que permite ligações articuladas (NBR 7095):

a) entre os componentes da cadeia de isoladores;
b) entre a cadeia e o suporte;
c) grampo passante reto - tipo especial de grampo passante, caracterizado por ter o corpo sensivelmente retilíneo;
d) grampo preformado - grampo de ancoragem constituído por uma alça preformada e ferragens apropriadas para fixação de engates tipo olhal ou bola.

A cadeia de isoladores é o conjunto flexível, articulado, formado por ferragens de cadeia, grampos e pencas de isoladores, com a finalidade de ligar mecanicamente o condutor (simples, ou em feixe) ao suporte, assegurando o isolamento elétrico entre eles. As cadeias podem ser simples ou múltiplas de suspensão, ancoragem ou transposição (NBR 7095), Figura 2.9.

Figura 2.9 - Exemplo de cadeia de isoladores. (a) Cadeia simples em "V" para dois condutores. (b) Cadeia de ancoragem dupla (Fonte: PLP, 2019)

As características dos materiais recomendados para construção das ferragens eletromecânicas, conforme NBR 7095 são:

a) ferragens de cadeia: aço-carbono (forjado ou laminado), ferro fundido (maleável ou nodular);

b) grampos e luvas: alumínio, liga de alumínio, aço forjado, ferro fundido (maleável ou nodular), liga de cobre;

c) parafusos, porcas, arruelas: aço-carbono, liga de alumínio;

d) cupilha: latão, bronze fosforoso, aço inoxidável;

e) chifre, anéis, raquetes: alumínio, aço;

f) armaduras: material compatível com o cabo ao qual se destinam.

Quanto às características construtivas das ferragens eletromecânicas contemplando, então, os balancins, segundo a NBR 7095, devem atender:

- As ferragens devem apresentar superfícies lisas e uniformes, sem imperfeições, evitando-se quinas vivas e pontas. As cabeças dos parafusos e as porcas devem ser rebaixadas, com chanfro de 30º; as pontas dos parafusos devem ser arredondadas ou ter chanfro de 45º;

- As ferragens de cadeia, como também os componentes dos grampos e acessórios fabricados de material ferroso, devem ser zincadas a quente, de acordo com a NBR 6323. O zinco empregado para revestimento deve ser de qualquer um dos tipos especificados na NBR 5996 e não deve conter um teor de alumínio maior do que 0,01 %.;
- As formas das ferragens devem permitir uma distribuição gradativa e uniforme de esforços mecânicos, condizentes com as cargas aplicadas em serviço. Mudanças bruscas de curvaturas e pontos de concentração de tensões mecânicas ou de gradiente elétrico devem ser evitados;
- As ferragens devem apresentar facilidade para montagem e desmontagem com ferramentas usuais;
- As ferragens devem ser projetadas para permitir os trabalhos com ferramentas de linha viva;
- Nas fixações por parafusos, devem ser previstos meios que evitem seu afrouxamento devido à vibração, através do emprego de arruelas de pressão, contraporcas, contrapino, ou outros dispositivos adequados;
- O torque de aperto dos parafusos deve ser obrigatoriamente indicado;
- Não é permitido o uso de solda na fabricação das ferragens submetidas a esforços mecânicos;
- As ferragens de cadeia são caracterizadas pela resistência mecânica à tração. Ficam estabelecidas as classes de resistência mecânica definidas pela sua carga de ruptura, conforme apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1- Limites de resistência mecânicas definidas pela carga de ruptura conforme NBR 7095

kN	(kgf)	Diâmetro do pino do isolador (mm)
80	8000	16
120	12000	16
160	16000	20
240	24000	24

Nota: Para os fins desta Norma, considera-se 1 kgf = 10 N.

Algumas ferragens de cadeia devem ter sua resistência mecânica definida como um múltiplo das classes acima estabelecidas, em função da posição dessas ferragens na cadeia. A título de exemplo, um balancim de ligação de duas pencas de isoladores de 240 kN (24000 kgf) deve ter resistência mecânica de 480 kN (48000 kgf), conforme as recomendações da NBR 7095.

2.3.3 **NORMA ASCE 10-97**

A norma ASCE 10-97 tem como escopo a aplicação em estruturas de transmissão treliçadas de aço e especifica requisitos para o projeto, fabricação e testes de membros e conexões para instalações elétricas e estruturas de transmissão. Esses requisitos são aplicáveis a perfis de aço laminados a quente e formados a frio.

Essas normas, como a ASCE 10-97 e a ASCE 10-15, passaram por várias atualizações para refletir avanços tecnológicos, novas descobertas em engenharia e melhorias nas práticas de projeto. Dentre os pontos de melhoria e mudanças entre as versões ASCE 10-97 e ASCE 10-15, podemos destacar:

Atualizações de Códigos de Material e Padrões de Referência:

- A ASCE 10-15 inclui referências a códigos de material e padrões de construção mais recentes que foram atualizados e revisados desde a publicação da ASCE 10-97. Isso garante que os projetos estejam alinhados com os métodos de análise e critérios de design mais atuais.

Clarificação e Atualização de Requisitos de Projeto:

- A ASCE 10-15 traz maior clareza em certos requisitos de projeto, incluindo a definição e uso de fatores de segurança e métodos de análise. Isso ajuda a reduzir ambiguidades e proporciona orientações mais precisas para os engenheiros.

Incorporação de Novos Métodos de Análise:

- A norma mais recente incorpora métodos de análise aprimorados, especialmente no que diz respeito ao comportamento de estruturas sob cargas

dinâmicas, como ventos e terremotos. Isso reflete um melhor entendimento dos efeitos dessas cargas nas estruturas de linhas de transmissão.

Melhorias em Requisitos de Resistência e Estabilidade:

- A ASCE 10-15 pode incluir critérios de resistência e estabilidade mais rigorosos ou ajustados para melhorar a segurança e a confiabilidade das estruturas. Isso pode incluir mudanças nos cálculos de resistência dos materiais e nas análises de estabilidade global da estrutura.

Incorporação de Lições Aprendidas e Pesquisas Recentes:

- Experiências passadas, falhas documentadas e novas pesquisas influenciaram a revisão de certos aspectos das normas. A ASCE 10-15 pode refletir mudanças baseadas em lições aprendidas e descobertas de novas pesquisas em engenharia de estruturas.

Considerações para Novos Materiais e Tecnologias:

- Com o avanço dos materiais e tecnologias, a ASCE 10-15 pode ter incorporado orientações para o uso de novos tipos de materiais ou técnicas de construção que não eram comuns ou não existiam na época da ASCE 10-97.

Atualizações em Práticas de Instalação e Construção:

- Mudanças nas práticas de instalação e construção, como novos métodos de fabricação ou montagem de componentes, são refletidas na ASCE 10-15, garantindo que as práticas de projeto estejam de acordo com as melhores práticas de construção atuais.

Essas melhorias ajudam a garantir que as estruturas de linhas de transmissão sejam projetadas com segurança, eficiência e durabilidade, levando em conta os avanços e mudanças ocorridos na engenharia estrutural desde a última revisão da norma.

Os componentes da estrutura (treliças, conexões etc.) são selecionados para resistir a cargas calculadas de projeto em tensões aproximando-se de escoamento, flambagem, fratura ou qualquer outra condição limite especificada nesta norma.

Nesse contexto e considerando as características construtiva do balancim, objeto desse estudo, podemos considerar dentro da norma os requisitos para que seja garantida a segurança estrutural, os membros submetidos a esforços de tração e flexão, bem como, o método LFRD que é a sigla para *Load and Resistance Factor Design* que em língua portuguesa pode ser traduzida para Projeto por Fatores de Carga e Resistência. Nesse método de segurança estrutural, utilizam-se fatores de segurança tanto para as cargas (ações estruturais) quanto às resistências dos materiais.

Segundo a ASCE 10-97, para Tensão Axial e Flexão, tem-se:

A excentricidade da carga nas barras angulares é prevista na seção 3.10.2. Outros membros submeteram à tensão axial e à flexão devem ser proporcionais para satisfazer a seguinte equação:

$$\frac{P}{P_a} + \frac{M_x}{M_{ax}} + \frac{M_y}{M_{ay}} \leq 1 \tag{2.1}$$

Onde:

- P, é o esforço axial de tração;
- P_a é a carga admissível à tração;
- M_x e M_y são os momentos fletores em torno dos eixos x e y, respectivamente;
- M_{ax} e M_{ay} são os momentos admissíveis em relação aos eixos x e y, respectivamente.

2.3.4 **NORMA IEC 60826:2003**

A norma IEC 60826:2003, intitulada "*Loading and strength of overhead transmission lines*," fornece diretrizes para o projeto de linhas de transmissão aérea, abordando a determinação de cargas e a verificação de resistência das estruturas. A norma é amplamente utilizada para garantir a segurança e a confiabilidade dessas infraestruturas, levando em consideração diferentes fatores ambientais e operacionais.

1. Cálculo da Carga Transversal do Vento

A carga transversal do vento em uma estrutura de linha de transmissão é determinada considerando os seguintes aspectos:

a) **Pressão do Vento de Referência**: A pressão de vento de referência é uma medida básica da força do vento, geralmente expressa em Pascal (Pa), que é utilizada para calcular a carga de vento sobre os elementos da linha.
b) **Coeficiente Aerodinâmico**: Este coeficiente leva em consideração a forma dos objetos e sua orientação em relação ao vento. Diferentes elementos, como cabos e torres, possuem diferentes coeficientes aerodinâmicos.
c) **Área de Exposição**: Refere-se à área projetada de cada componente da linha de transmissão exposta ao vento.

A fórmula geral para calcular a carga de vento é:

$$F_w = C_d \cdot A \cdot P_r F \qquad (2.2)$$

Onde:

- Fw é a força do vento;
- C_d é o coeficiente de arrasto aerodinâmico;
- A é a área de exposição do objeto;
- $P_r F$ é a pressão do vento de referência.

2. Fatores Majoradores de Carga

A norma IEC 60826 também define fatores majoradores de carga para considerar variáveis que podem influenciar a resistência das estruturas de linhas de transmissão. Esses fatores incluem:

a) **Fator de Confiabilidade (γ_f):** Este fator leva em conta a importância da estrutura e a necessidade de garantir um nível de confiabilidade adequado.

b) **Fator de Conversão de Vento (γ_w)**: Ajusta a pressão do vento para diferentes regiões e altitudes, considerando variações climáticas.

c) **Fator de Sazonalidade (γ_s)**: Considera as variações sazonais das condições climáticas, como mudanças na direção e intensidade do vento ao longo do ano.

3. Considerações Adicionais

A IEC 60826:2003 também aborda métodos para determinar as cargas causadas por outras ações ambientais, como gelo, neve e temperatura, além de considerar combinações de cargas e seus efeitos conjuntos na estrutura.

Esses elementos e fatores são combinados para garantir que as estruturas de linhas de transmissão sejam projetadas com segurança e eficácia, considerando a variabilidade das condições ambientais e a necessidade de alta confiabilidade.

2.4. **PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS BALANCINS**

A partir do que foi tratado nos capítulos anteriores, verifica-se que os balancins aplicados na sustentação dos cabos condutores desses projetos são elementos das linhas de transmissão, importantíssimos, para atender as especificidades de formação dos diversos tipos de feixes de cabos condutores. Este tipo de ferragens eletromecânica compõem a cadeia de isoladores que se destinam a suportar os cabos condutores e conectá-los às estruturas (torres).

No conjunto, a sua concepção e projeto são de suma importância, mesmo em seus mínimos detalhes, podendo afetar a durabilidade dos cabos ou constituir-se em fortes fontes de corona de corona com a consequente rádio interferência ou interferências em recepção de TV. Assim, as modernas ferragens eletromecânicas e seus acessórios são projetadas de forma a não possuírem pontas, rugosidades, irregularidades superficiais, nas quais poderão ocorrer gradientes de potencial superiores aos gradientes iniciadores de eflúvios de corona. Por outro lado, os materiais que têm contato com os cabos condutores de alumínio e suas ligas devem ser compatíveis eletroliticamente com os mesmos para que não ocorra corrosão galvânica (Fuchs,1992).

Os balancins são utilizados para fazer a conexão entre as cadeias de isoladores e os cabos condutores, quando esses são compostos por feixes de mais de um cabo condutor, e são responsáveis por suportar os grampos de suspensão (Fuchs,1992).

As cadeias de ferragens, que são projetadas para suportar os cabos condutores e transmitir às estruturas (torres, postes etc.) todos os esforços recebidos destes, são compostas por elementos que compõem o conjunto tendo cada uma a sua característica funcional e construtiva.

Dentro da confecção do projeto para fabricação das ferragens, podem-se destacar os principais tópicos (PLP,2022). Quais sejam:

Materiais:

- Elementos de Conexão – Aço Forjado SAE 1040/45;
- Elementos de Proteção – Alumínio, Aço ou Ferro Nodular;
- Balancim e Chapa de Extensão – Aço Laminado;
- Grampos – Aço Forjado SAE 1040/45 e Liga de alumínio;

Características técnicas:

- Os grampos são projetados para proteger o cabo contra os efeitos de fadiga, abrasão e descargas elétricas;
- Elementos de conexão isentos de cantos vivos;
- Elementos de aço com proteção à corrosão através de galvanização a quente e com possibilidade de serem fabricados em aço inoxidável;
- Podem ser desenvolvidas para projetos dedicados;
- Podem ser projetadas para tensões de 69 a 1000 kV;
- Podem ser projetadas para feixes singelos ou múltiplos, com espaçamento convencional ou expandido;
- Possibilidade de instalação em linha viva por meio de equipamentos normais para esta atividade

Ensaios de tipo:

- Arco de Potência;
- Ciclo Térmico (para Grampo de Ancoragem);
- Escorregamento;
- Resistência à Ruptura;
- RIV / Corona;
- Verificação de Zincagem;
- Visual e Dimensional.

Dados para Projetar as Cadeias:

- Tensão da linha;
- Datasheet do cabo condutor;
- Datasheet dos isoladores e/ou padrões de engate;
- Quantidade de condutores por fase;
- Espaçamento entre subcondutores;
- Direção do feixe para 2 condutores por fase (horizontal ou vertical);
- Desenhos dos arranjos;
- Detalhe de conexão à torre;
- Especificação dos ensaios de tipo.

Nas Figuras 2.10 a 2.13 estão mostrados modelos de balancins usualmente encontrados nas linhas de transmissão.

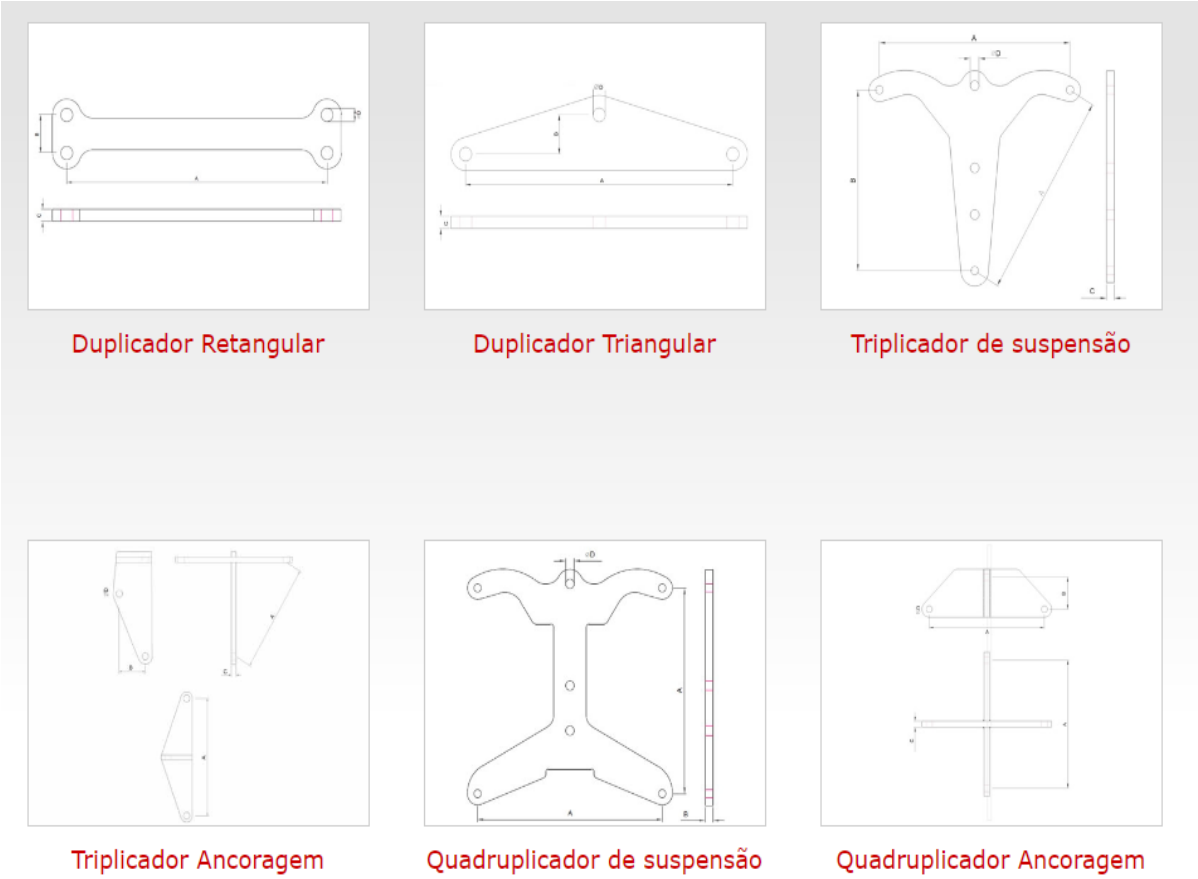


Figura 2.10 - Exemplo de Balancins (Fonte: SADEL, 2024)

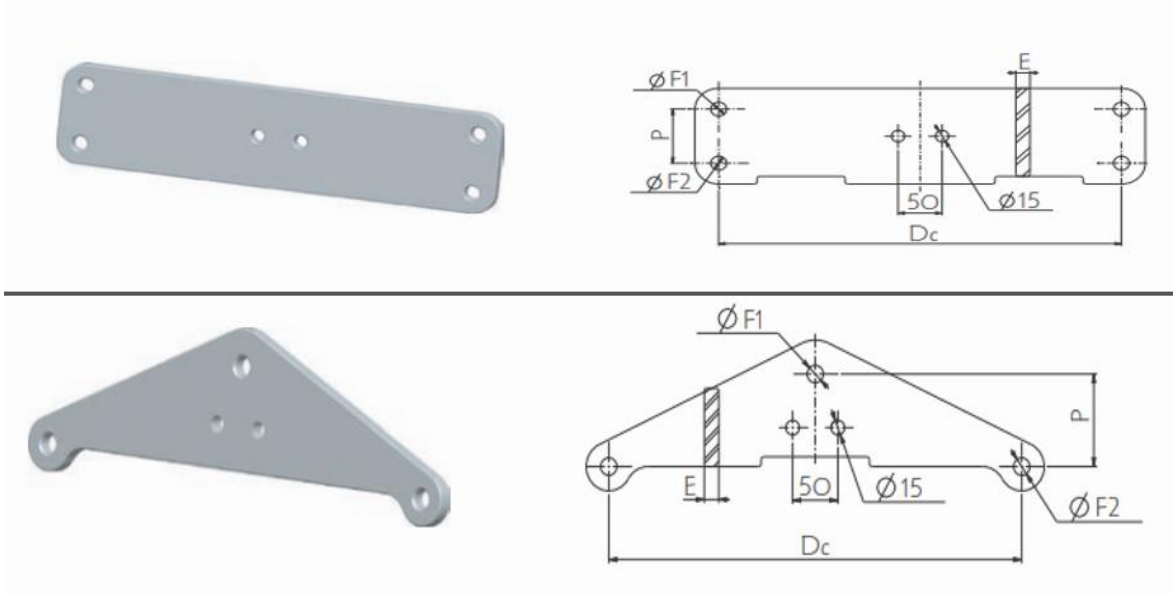


Figura 2.11 - Exemplo de Balancins – Duplicador de ancoragem (Fonte: FORJASUL, 2021)

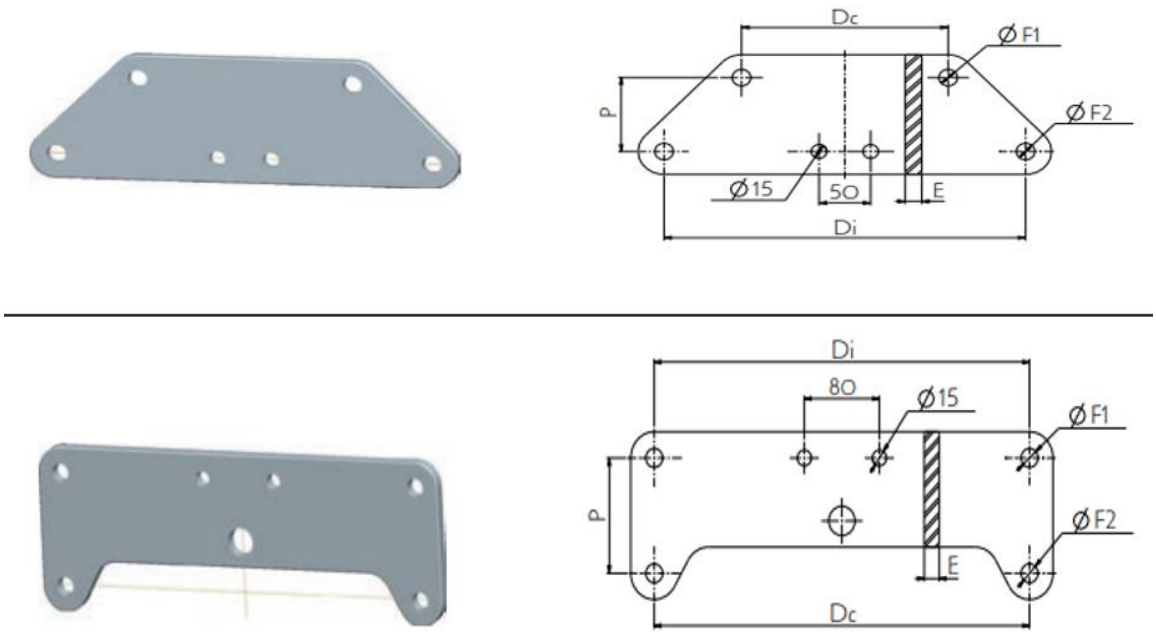


Figura 2.12 - Exemplo de Balancins – Duplicador de ancoragem dupla (Fonte: FORJASUL, 2021)

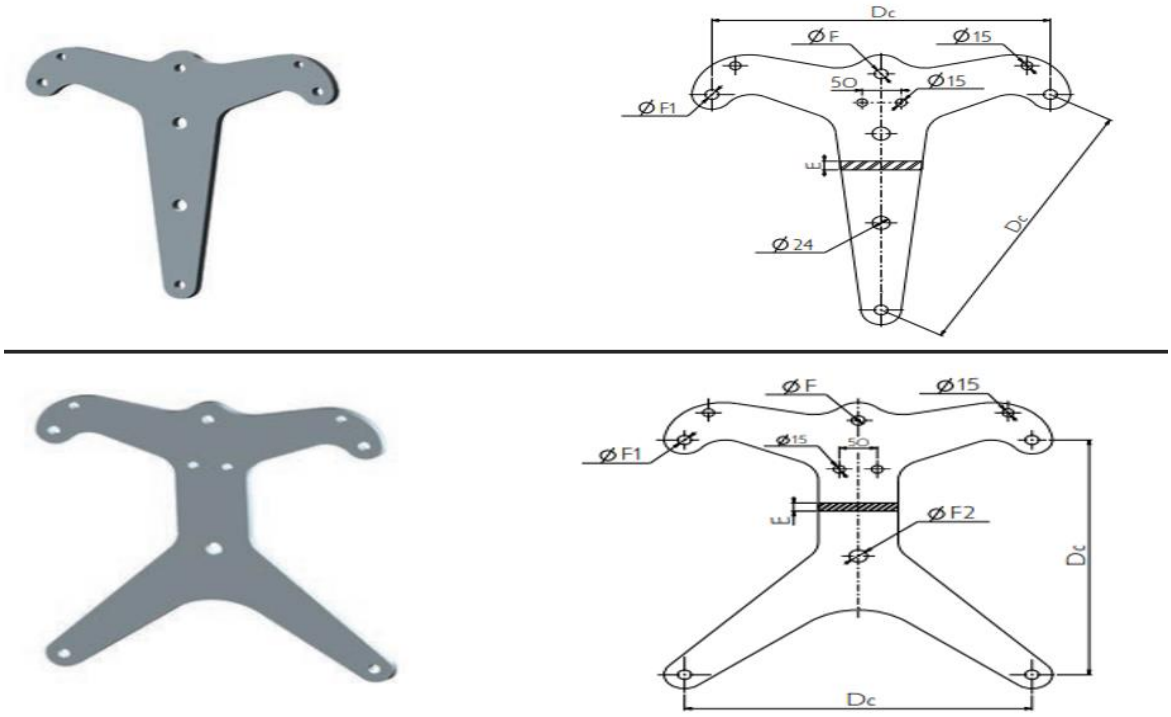


Figura 2.13 - Exemplo de Balancins – Triplicador e Quadruplicador de suspensão (Fonte: FORJASUL, 2021)

Com a evolução dos projetos de linhas de transmissão para atendimento as novas demandas de potência em todo mundo, os materiais e demais insumos para construção dos sistemas de transmissão tiveram que se adequar as novas configurações e, dessa forma, atender as novas cargas estabelecidas em decorrência do crescimento populacional, comercial, industrial etc.

Nesse contexto, os balancins também sofreram as alterações nas suas características para atender aos novos projetos, principalmente, as novas configurações de feixes de condutores das linhas de transmissão de potência natural elevada ou de SIL elevado.

Linhas de transmissão com SIL elevado (*Surge Impedance Loading*, ou Carga de Impedância Característica) referem-se à capacidade de uma linha de transmissão de energia elétrica para transportar potência sem que ocorra perda ou ganho significativo de tensão ao longo do percurso. O SIL é um parâmetro crítico no projeto e operação de sistemas de transmissão, especialmente em sistemas de alta tensão (*Energy KnowledgeBase*, 2024).

Principais pontos sobre linhas de transmissão com SIL elevado:

1. **Definição de SIL**: O SIL é definido como a carga (em megawatts) que faz com que a potência reativa gerada pela linha de transmissão (devido à capacitância) seja igual à potência reativa consumida pela linha (devido à indutância). Quando a linha opera no SIL, a tensão ao longo da linha é mantida constante, ou seja, não há queda ou elevação de tensão significativa.

2. **Impedância Característica**: A impedância característica da linha é um parâmetro que depende das características físicas da linha, como a configuração dos condutores, a altura dos condutores em relação ao solo e as características do meio envolvente (como a permissividade elétrica).

3. **Vantagens do SIL Elevado**: Linhas de transmissão projetadas para operar com um SIL elevado têm maior eficiência, pois podem transportar mais energia com menores perdas de transmissão e sem a necessidade de compensação reativa adicional. Isso também minimiza os problemas de estabilidade e oscilação de tensão.

4. **Impactos no Sistema Elétrico**: Operar uma linha de transmissão acima de seu SIL pode resultar em quedas de tensão significativas ao longo da linha, enquanto operar abaixo do SIL pode causar elevações de tensão. Ambas as condições podem levar a problemas de estabilidade e segurança na operação do sistema.

5. **Aplicações**: Linhas de transmissão com SIL elevado são particularmente relevantes em sistemas de transmissão de longa distância e em sistemas de transmissão em corrente alternada de alta tensão (HVAC). Isso é especialmente importante em países com grandes distâncias entre centros de geração e consumo, como o Brasil.

O conceito de SIL elevado é essencial para otimizar o desempenho e a estabilidade das linhas de transmissão, garantindo que a energia elétrica seja entregue de maneira eficiente e segura ao longo de grandes distâncias.

A partir dessas novas condições, os fabricantes, projetistas e fornecedores desenvolveram diversos modelos de balancins para atendimento a linhas de transmissão

com feixes com mais de quatro condutores (condição mais usual no Sistema Interligado Nacional – SIN) e com seis condutores.

Projetos de balancins para feixes de seis condutores são componentes críticos em sistemas de transmissão de energia elétrica de alta tensão, especialmente em linhas que utilizam múltiplos condutores para reduzir as perdas e aumentar a capacidade de transmissão (Cigré,2005)

Principais aspectos do projeto de balancins para feixes de seis condutores:

1. **Configuração do Feixe**: Os feixes de seis condutores são organizados em arranjos que maximizam a eficiência elétrica e mecânica. A configuração mais comum é a de forma hexagonal, onde os condutores são espaçados igualmente ao redor de um ponto central.

2. **Design dos Balancins**: O balancim é um componente mecânico que conecta os condutores do feixe e os suspende dos isoladores. No caso de feixes de seis condutores, o balancim deve ser projetado para garantir uma distribuição de carga uniforme entre todos os condutores, minimizando oscilações e evitando tensões excessivas em qualquer ponto do feixe.

   O material do balancim deve ser resistente à corrosão e à fadiga, já que ele precisa suportar condições ambientais adversas e cargas mecânicas significativas ao longo do tempo.

3. **Considerações Eletromagnéticas**: Um dos desafios no projeto de balancins para feixes de seis condutores é minimizar os efeitos indutivos e capacitivos que podem afetar a performance da linha. O design deve assegurar que a configuração dos condutores não cause interferências eletromagnéticas excessivas ou descargas de coroa.

4. **Aspectos Mecânicos e Dinâmicos**: Os balancins devem ser robustos o suficiente para suportar as forças dinâmicas geradas por ventos fortes, tempestades ou vibrações causadas por ressonâncias naturais. A otimização do peso e da resistência mecânica é crucial para garantir a longevidade do sistema.

   Os balancins também precisam facilitar a manutenção e inspeção da linha, permitindo que técnicos acessem e trabalhem nos condutores com segurança.

5. **Normas e Regulamentações**: O projeto de balancins deve estar em conformidade com normas técnicas internacionais, como as da IEC (*International Electrotechnical Commission*) e da IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), que especificam os requisitos de desempenho e segurança para componentes de linhas de transmissão.

Os Balancins para feixes de seis condutores são amplamente utilizados em linhas de transmissão de extra-alta tensão (EHV) e ultra-alta tensão (UHV), onde a eficiência e a capacidade de transmissão são cruciais para atender a demandas energéticas crescentes (*Design of a New Spacer Damper for Bundle Power Transmission Lines - Scientific.net*, 2013).

3.MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do trabalho foi elaborada de forma a conduzir um estudo de caso de análise de falhas do balancim utilizado em um circuito de seis fases de uma cadeia de suspensão em forma de V em uma linha de transmissão, onde cerca de 10% desse tipo de balancins apresentaram falhas mecânica poucos anos após a instalação na linha.

As falhas observadas concentram-se, predominantemente, nas cantoneiras metálicas presentes nesse balancim que apresentavam fraturas na extremidade superior próximo aos furos. Uma vez que esse trabalho tem propósito puramente acadêmico, informações que possam identificar as empresas relacionadas ao problema aqui estudado, foram propositalmente omitidas.

O estudo de caso foi dividido em duas etapas. Na primeira etapa foram realizadas medições do balancim para averiguação das dimensões contidas em laboratório e posteriormente, ensaios de laboratório em amostras retiradas das cantoneiras para caracterização do material e inspeção microscópica para identificação do tipo de falha.

Por fim, foi realizado uma análise estrutural do balancim, tendo-se como objeto de estudo as cantoneiras, empregando o software estrutural SAP 2000 e as recomendações normativas da ASCE 10-97- *Design of Latticed Steel Transmission Structures*, considerando os carregamentos prescritos no projeto do balancim.

3.1 **METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

O balancim objeto do estudo é utilizado como dispositivo de suporte de seis cabos condutores de energia tipo CAL 838 MCM em sistema de suspensão com cadeia isoladora em V, Figura 3.1.

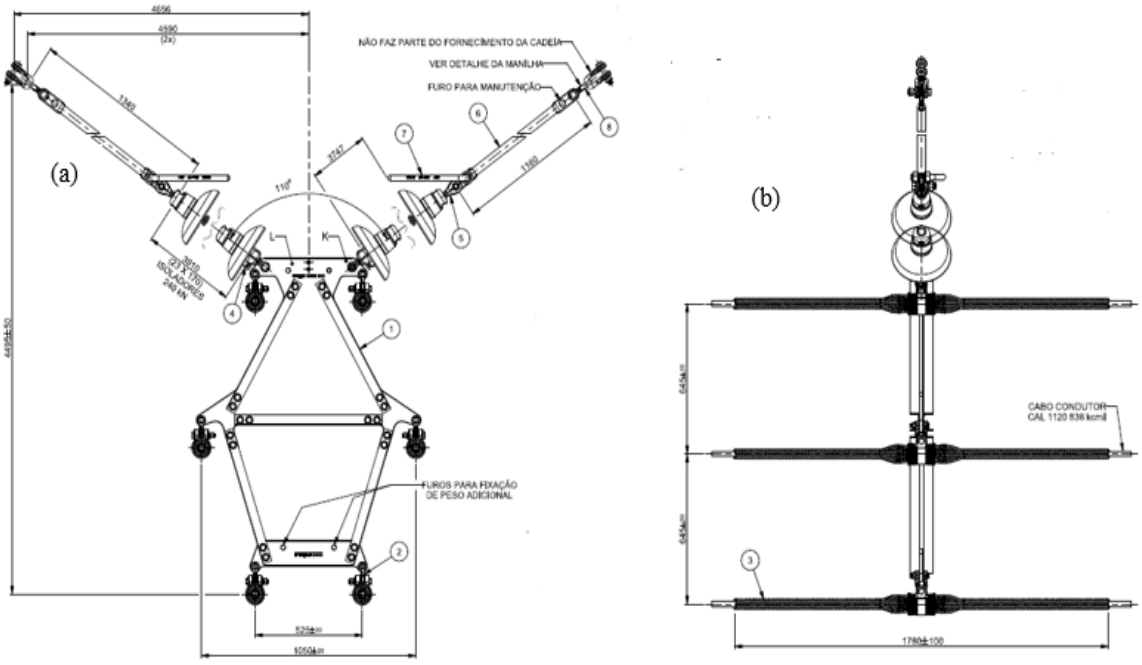


Figura 3.1 - Balancim com cadeia isoladora disposta em V. (a) Vista frontal. (b) Vista lateral (Fonte: Ferragens e Acessórios: Especificação Técnica, 2017).

O balancim é constituído por chapas metálicas de 19 mm de espessura conectadas por cantoneiras de abas iguais de 45 mm de largura e 3 mm de espessura galvanizadas a quente, Fig. 3.2. Esses elementos são perfis de chapas dobradas a frio em aço tipo ASTM A572 grau 50 que apresenta tensão de escoamento $f_y = 345\ MPa$ e tensão de ruptura $f_u = 450\ MPa$. A conexão das cantoneiras às chapas metálicas é feita por meio de dois parafusos por extremidade, com diâmetros de 15 mm e aperto inicial com torque de 7,6 kgf.m.

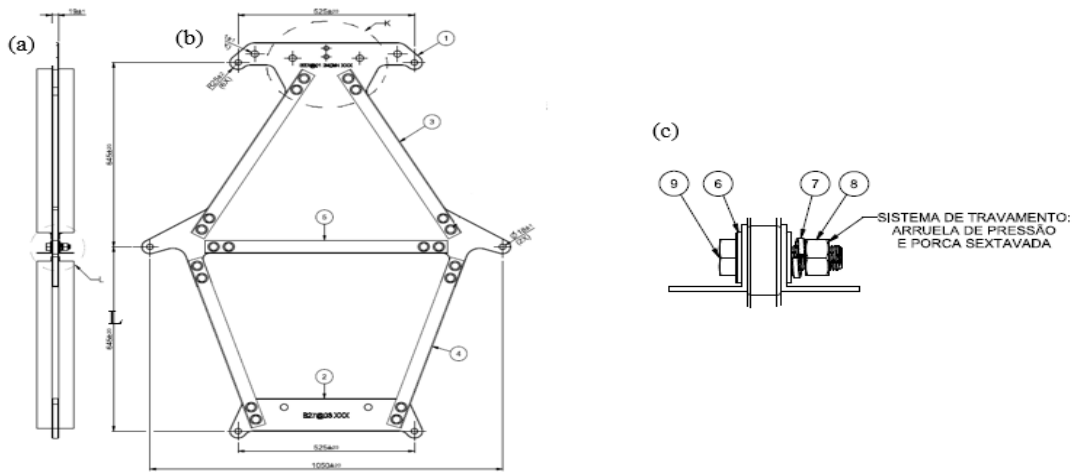


Figura 3.2 - Geometria do balancim (dimensões em milímetros). (a) Vista lateral. (b) Vista frontal. (c) Detalhe L (Fonte: Acessórios: Especificação Técnica, 2017).

Um exemplar do balancim danificado foi enviado ao Grupo de Fratura, Fadiga e Materiais da Universidade de Brasília (GFFM/UnB) para realização de ensaios de laboratório. Na Figura 3.3 está mostrado o desenho técnico do balancim e as cantoneiras avariadas.

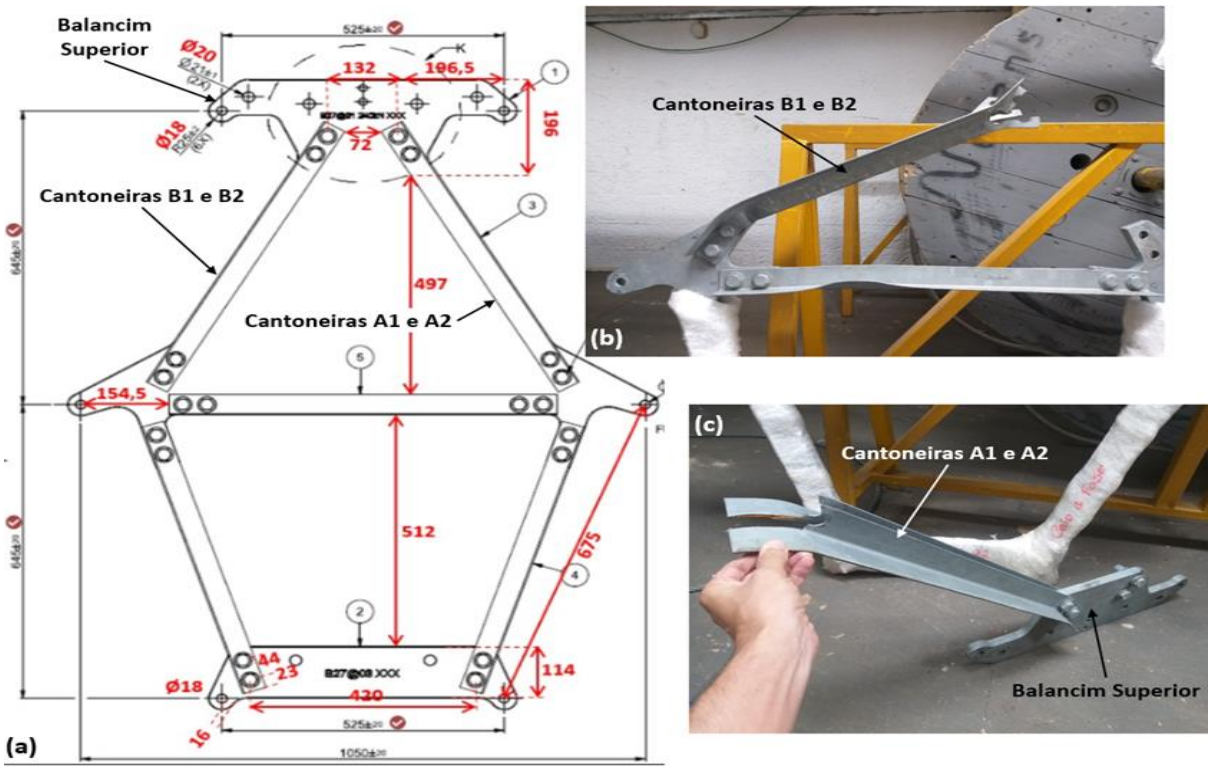


Figura 3.3 - Desenho técnico e imagens do conjunto balancim para feixe expandido como recebido. (a) vista de frente do balancim com identificação das cantoneiras danificadas; (b) imagens das cantoneiras B1 e B2; (c) imagens das cantoneiras A1 e A2 ainda fixas ao balancim superior (Fonte: GFFM/UnB, 2024)

Para a caracterização das propriedades mecânicas do material foram realizados ensaios de tração uniaxial em dois corpos de provas obtidos através da usinagem de uma cantoneira íntegra do balancim, Figura 3.4. As dimensões dos CPs foram baseadas nas recomendações da Norma ASTM E8, conforme desenho apresentado na Figura 3.5.

Figura 3.4 – Fotografia da cantoneira do balancim (Fonte: Autoria própria, 2024)

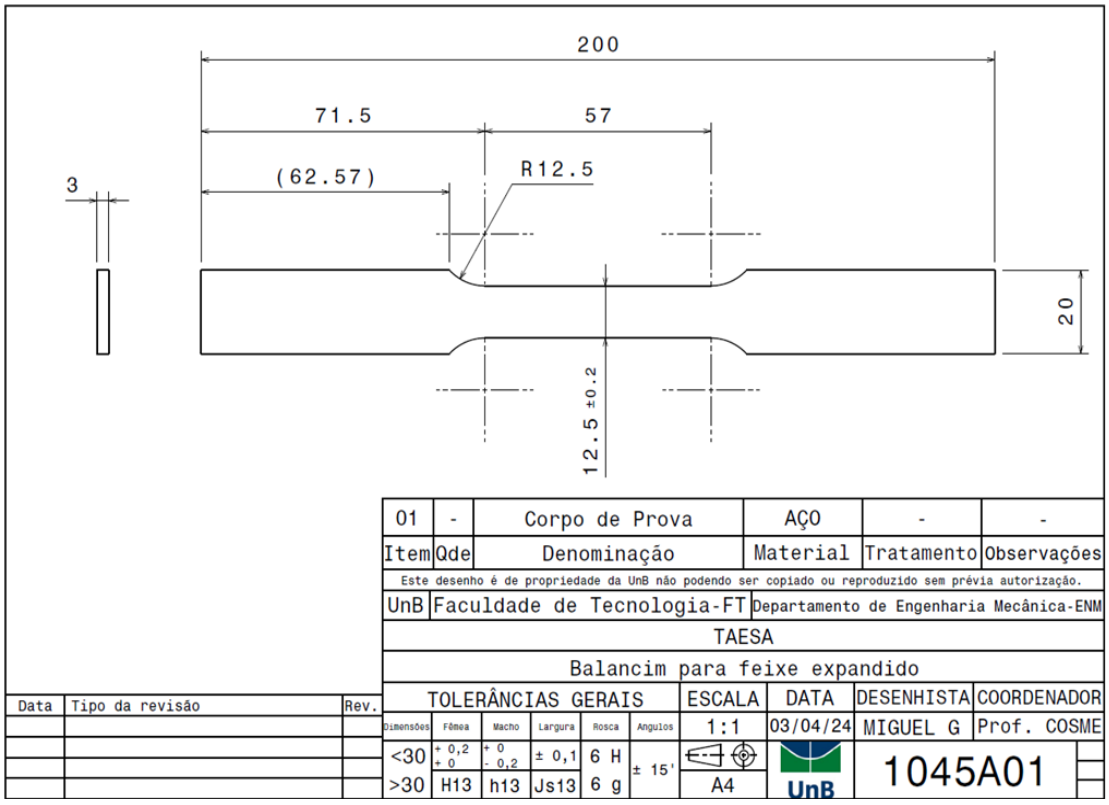


Figura 3.5 - Desenho com dimensões e tolerâncias de corpo de prova utilizado nos ensaios uniaxiais de tração (Fonte: Autoria própria, 2024)

Os ensaios de tração foram realizados de acordo com a Norma ASTM E8, utilizando-se máquina universal MTS 810 com capacidade de carga de até 100 kN. A Figura 3.6 mostra visão geral da MTS 810 e, ao lado, vista em detalhes de um espécime instalado entre suas garras com o extensômetro tipo clip gage posicionado para medição das deformações do CP.

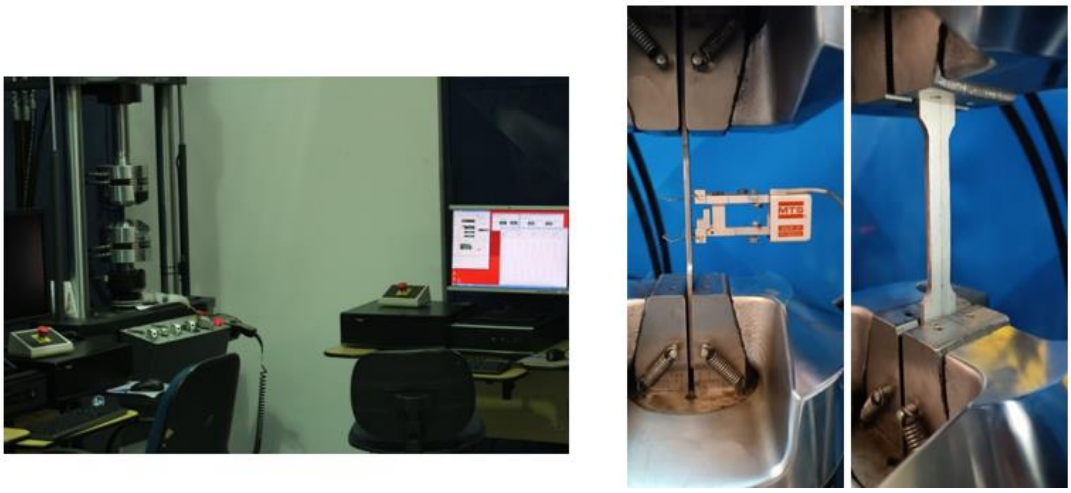


Figura 3.6 - Máquina Universal de ensaio MTS de 100 KN para ensaios estáticos, com garras de pressão hidráulica (Fonte: Autoria própria, 2024)

As análises químicas foram efetuadas em amostra retirada da cantoneira. Utilizou-se o procedimento analítico “Espectrometria de Emissão Ótica” conforme prescrito na Norma ASTM A751. Estas análises foram realizadas no Laboratório TORK Controle Tecnológico de Materiais LTDA, uma vez que a UnB não dispõe de infraestrutura necessária para a realização desse teste.

Por sua vez, visando identificar e estudar as superfícies de fratura, assim como a qualidade da camada galvanizada das amostras recebidas, utilizou-se nesta análise um microscópio eletrônico de varredura JEOL JSM 7100 FA *Field Emission* (Figura 3.7) com analisador EDS, velocidade de aceleração até 30 KV e resolução garantida de 3 nm com 15 KV e 4 Nano amperes.

Figura 3.7 – Microscópio Eletrônico de Varredura JEOL JSM 7100 *Field Emission*, usado nas análises de falha nas superfícies de fratura das cantoneiras metálicas (Fonte: Autoria própria, 2024)

3.2 **RESULTADOS**

3.2.1 **ANÁLISE QUÍMICA**

O laudo referente à análise química, emitido pela empresa TORK Controle Tecnológico de Materiais, demonstra que a composição química da peça analisada atende à prevista para os aços de baixo carbono microligados ASTM 572 - Grau 50, conforme ilustrado na Figura 3.8.

Os aços microligados são desenvolvidos a partir de aços de baixo carbono com pequenas adições de manganês (até 2%) e outros elementos com percentuais ainda menores (nióbio) visando maiores resistências mecânicas que aços de baixo carbono idênticos, mantendo ductilidade e soldabilidade. É possível neste caso um acréscimo da carga unitária da estrutura, tornando possível uma diminuição proporcional da seção, ou seja, o emprego de seções mais leves. Pode-se também elevar a relação do limite de escoamento/limite de resistência à tração, sem perda apreciável da ductilidade.

TORK
Controle Tecnológico de Materiais Ltda.

Ensaios ABNT NBR ISO/IEC 17025
CRL 0056

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: 24045262 AQSP – Rev.1 Fl. 1/1

Empresa interessada : **COSME ROBERTO MOREIRA DA SILVA**
Quadra Sqn, 304 - Bloco B/ Apt 402 - Asa Norte - Brasília / DF

Pedido de ensaio : 299341

Natureza do trabalho : **ANÁLISE QUÍMICA**

Indicações fornecidas pelo interessado sobre o material ensaiado:

RECEBIMENTO/DATA.....: 16/04/2024 - Entregue no Laboratório Tork SP

QUANTIDADE.....: 01 Amostra de Chapa

REF. DO CLIENTE.....: E-mail de 16/04/2024

PROPOSTA TORK Nº.....: 2404015MLE-Rev.1

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)

Carbono	(C)	0,21
Silício	(Si)	0,20
Manganês	(Mn)	1,28
Fósforo	(P)	0,026
Enxofre	(S)	0,025
Cromo	(Cr)	0,08
Níquel	(Ni)	0,06
Molibdênio	(Mo)	0,01
Cobre	(Cu)	0,36
Nióbio	(Nb)	0,01

A amostra analisada satisfaz a especificação química da liga de aço carbono Gr. 50, conforme a norma ASTM A 572 / A 572M, ed. 16.

INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES

1. Procedimentos Tork: séries P-200 e P-300.
2. Procedimento analítico utilizado: Emissão Óptica.
3. A amostra foi ensaiada conforme: ASTM A 751, ed. 21.
4. Local do Ensaios: Rua Cruzeiro, 419 - Barra Funda - São Paulo / SP - Laboratório: Químico.
5. Revisão 1: Conforme solicitação do cliente via e-mail de 22/04/2024, foi acrescentado o valor do elemento Nióbio (Nb) e alterada a declaração de conformidade, sendo que esta revisão cancela e substitui o Relatório de Ensaio Nº 24045262AQSP.
6. Regra de Decisão: Declaração de conformidade sem considerar a incerteza.

Data dos Ensaios: 18 de Abril de 2024.
Emissão do Relatório: São Paulo, 25 de Abril de 2024.

Eng. Bruno Ozi S. R. de Oliveira – CREA 2605628078
Signatário Autorizado

Eng. Leopoldo Rosalin de Oliveira – CREA 0600318910
Gerente Técnico do Laboratório Tork SP

Laboratório de Ensaio acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL 0056.

Os resultados apresentados no presente documento têm significação restrita e se aplicam somente ao objeto ensaiado ou calibrado. A sua reprodução só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

RAQ-4 - Rev.0 **TORK Controle Tecnológico de Materiais LTDA.** KA

TORK SP: Rua Cruzeiro, 419 - CEP 01137-000 - Tel./Fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br
TORK BARRA FUNDA: Rua Dr. Ribeiro de Almeida, 203 - CEP: 011370-020 - Tel./Fax: (11) 3392-3902 - e-mail: tork@laboratorios-tork.com.br

Figura 3.8 - Laudo da análise químicas da amostra retirada do balancim, demonstrando que a amostra analisada satisfaz à especificação química dos aços ASTM A 572 Grau 50 (Fonte: Autoria própria, 2024)

3.2.2 **ENSAIOS DE TRAÇÃO UNIAXIAL**

Os ensaios de tração uniaxial, realizados nas amostras selecionadas, permitiram a determinação dos limites de escoamento, limites de resistência e do módulo de elasticidade. A Figura 3.9 ilustra a curva tensão-deformação de engenharia para um dos espécimes ensaiados. A Tabela 3.1 apresenta os valores médios dos dois ensaios para o limite de escoamento, o limite de resistência a tração, o limite de ruptura e o módulo de elasticidade.

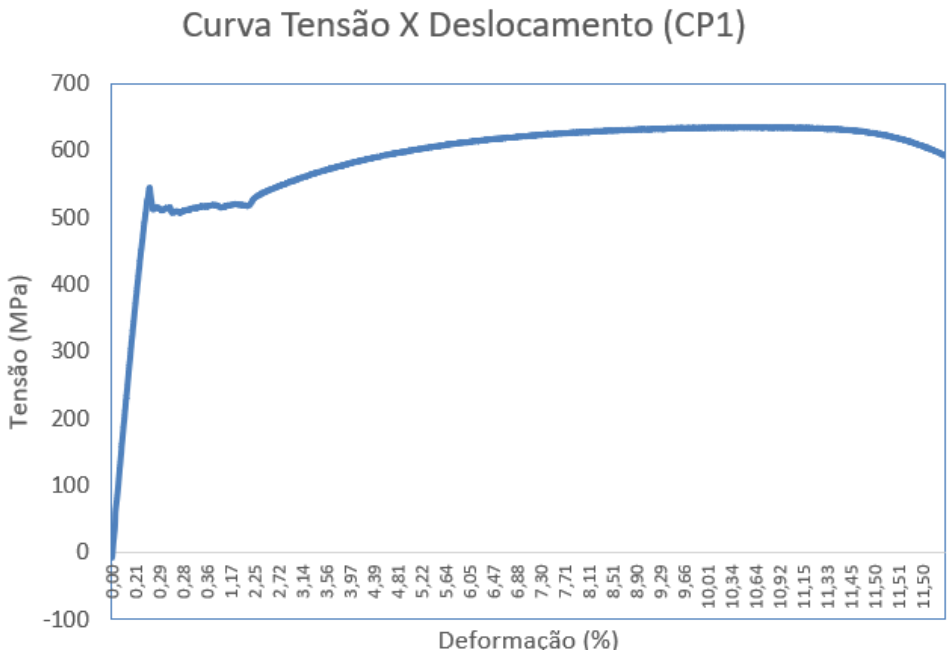


Figura 3.9 - Curva Tensão x Deformação para o ensaio 1 (Fonte: Autoria própria, 2024)

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas (médias) obtidas dos ensaios de tração

Limite de Escoamento (MPa):	476
Limite de Resistência à Tração (MPa):	615
Limite de Ruptura (MPa):	513
Modulo de Elasticidade (GPa)	200,5

3.2.3 **ANÁLISES POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA**

Foram realizados exames por microscopia eletrônica de varredura (MEV), visando avaliar a integridade da camada de galvanização e detectar possíveis mecanismos de fratura. A seguir, nas Figura 3.10 a 3.25 apresentam-se relatos fotográficos autoexplicativos por meio das imagens obtidas via MEV nas amostras analisadas.

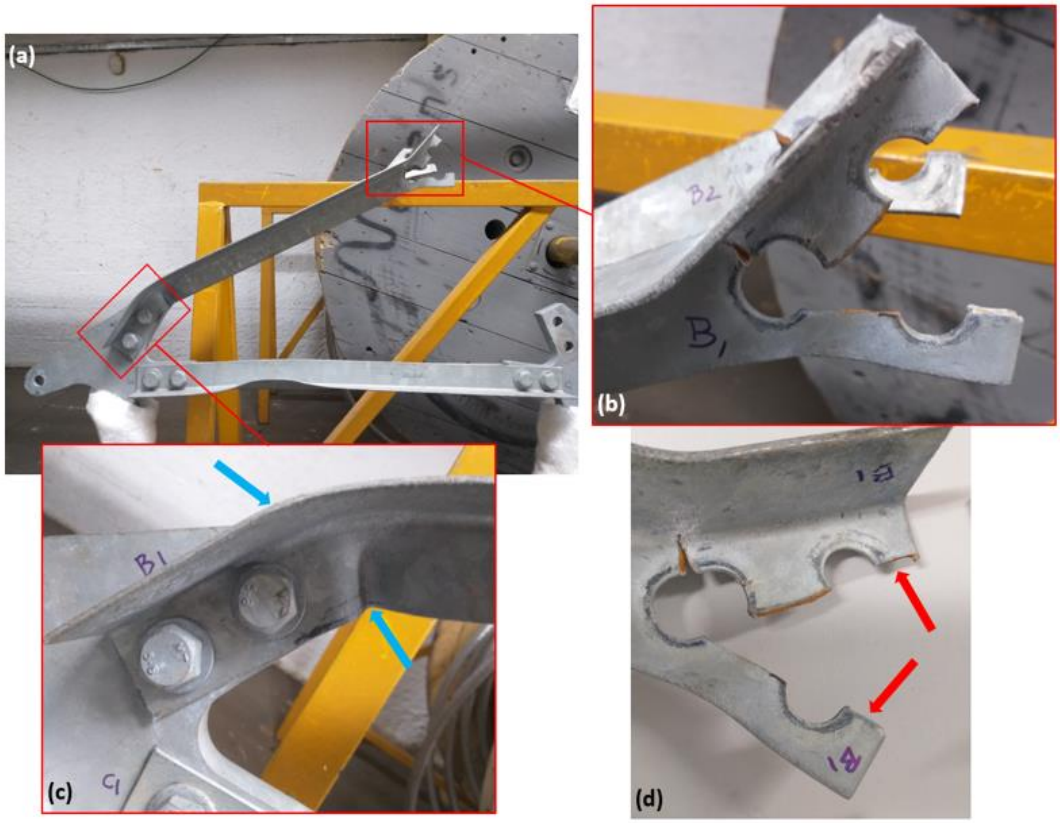


Figura 3.10 - Imagens das cantoneiras B1 e B2 (Fonte: Autoria própria, 2024)

A figura 3.10 (a) mostra as cantoneiras do lado B1. Observa-se que as cantoneiras não estão mais parafusadas ao balancim superior. A figura 3.10 (b) detalhe das extremidades do lado do balancim superior. Nota-se que as duas cantoneiras se abriram na linha dos dois furos que a fixam ao balancim superior. A figura 3.10 (c) mostra detalhes das extremidades opostas das cantoneiras (ainda parafusadas à estrutura lateral do balancim). Observa-se que as duas cantoneiras sofreram uma importante deformação plástica (setas azuis); a figura 3.10 (d) detalhe da cantoneira B1 na extremidade normalmente presa ao balancim superior. As setas vermelhas indicam um provável início da falha.

Figura 3.11 - (a) Imagens das cantoneiras B1 e B2 desmontadas. (b) e (c) Imagens das cantoneiras B1 e B2 apresentando as mesmas características, ou seja, falha na linha dos furos do lado do balancim superior. (d) Deformação plástica do lado oposto (Fonte: Autoria própria, 2024)

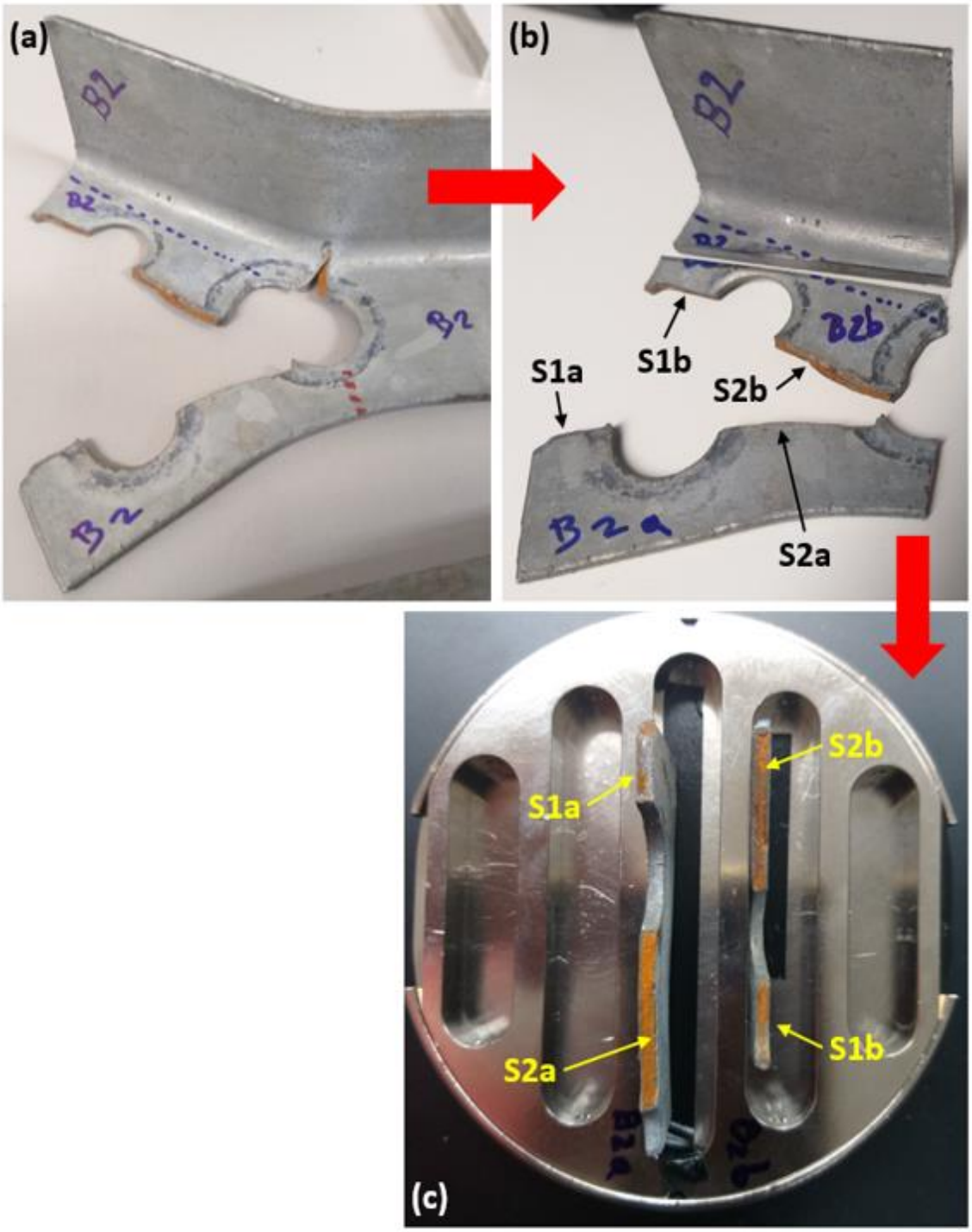


Figura 3.12 - Imagens da preparação para exames por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras retiradas da cantoneira B2. (a) Imagem da cantoneira B2 destacando de onde foram retiradas as duas amostras identificadas como B2a e B2b. (b) detalhe das amostras cortadas e identificação das superfícies de falha analisadas. (c) Imagens das duas amostras posicionadas no suporte para análise no MEV (Fonte: Autoria própria, 2024)

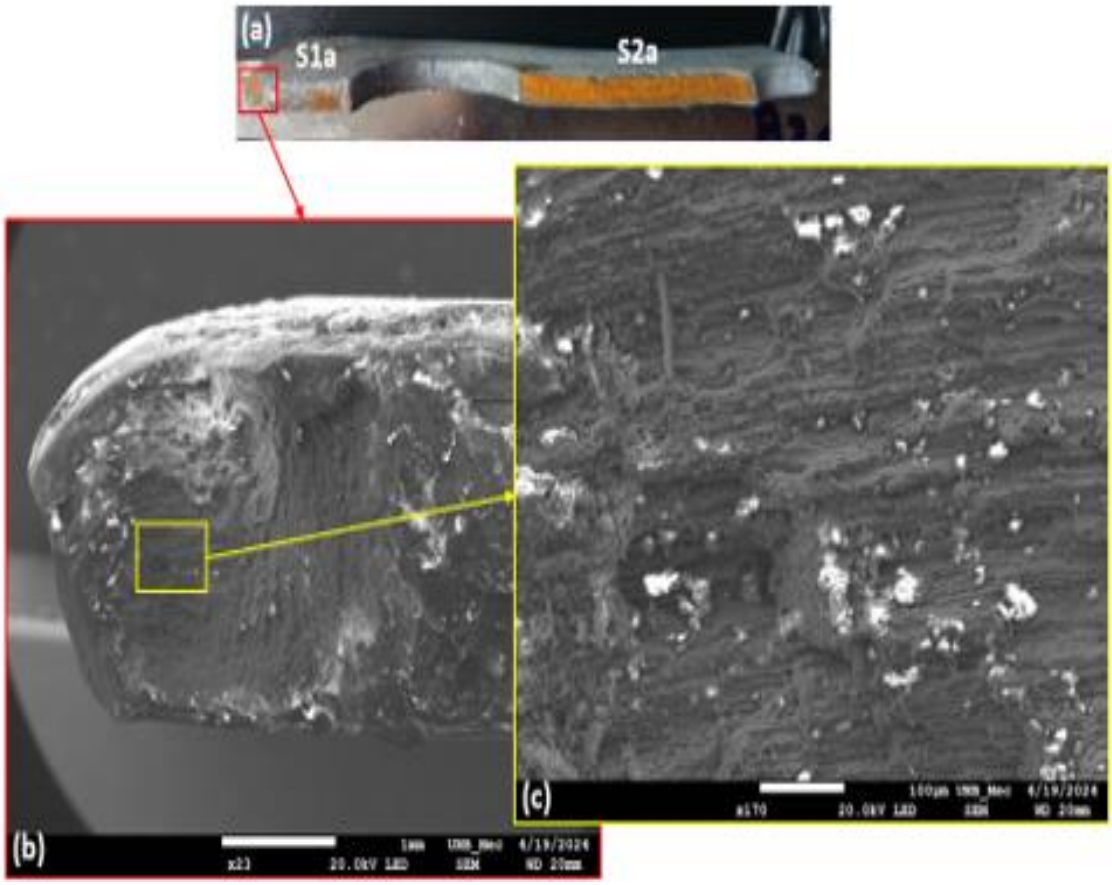


Figura 3.13 – Análise da amostra B2a na superfície de falha S1a. (a) Imagem da amostra com as duas superfícies de falha (S1a e S2a) apresentando a olho nu um estado de corrosão avançado. (b) imagem da extremidade da amostra na superfície de falha S1a. (c) ampliação mostrando marcas paralelas de planos cristalinos provavelmente oriundas da conformação da cantoneira (Fonte: Autoria própria, 2024)

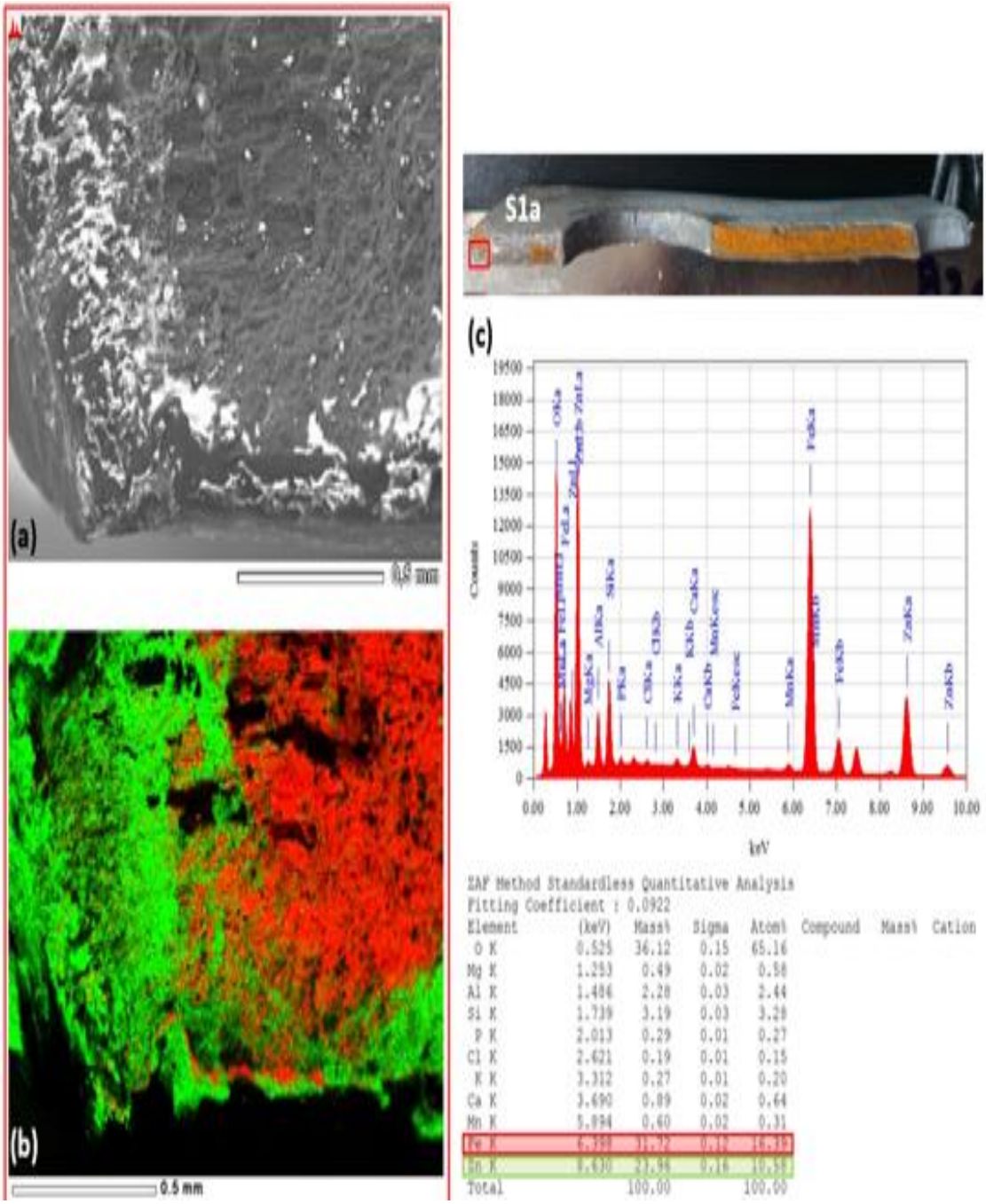


Figura 3.14 - Análise química via espectroscopia da superfície de falha S1a. (a) Imagem da zona analisada. (b) Mapeamento da mesma zona com destaque do zinco (Zn) em verde e do ferro (Fe) em vermelho. Nota-se que nesta zona a camada de Zn está preservada. (c) Resultado da análise química apresentando produtos de corrosão pós-falha, identificados pelo alto teor de oxigênio (Fonte: Autoria própria, 2024)

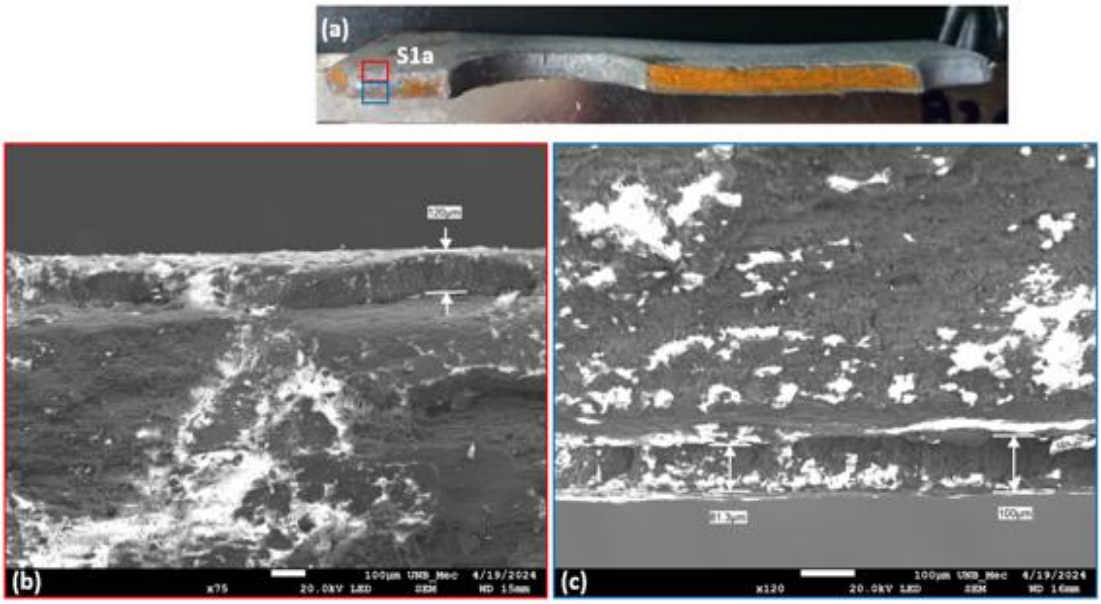


Figura 3.15 - Análise da superfície de falha S1a. (a) Imagens das zonas analisadas (retângulos vermelho e azul); (b) zona do retângulo vermelho mostrando a preservação da camada de Zn; (c) zona do retângulo azul mostrando a integridade da camada de Zn com espessura constante ao longo da superfície (Fonte: Autoria própria, 2024)

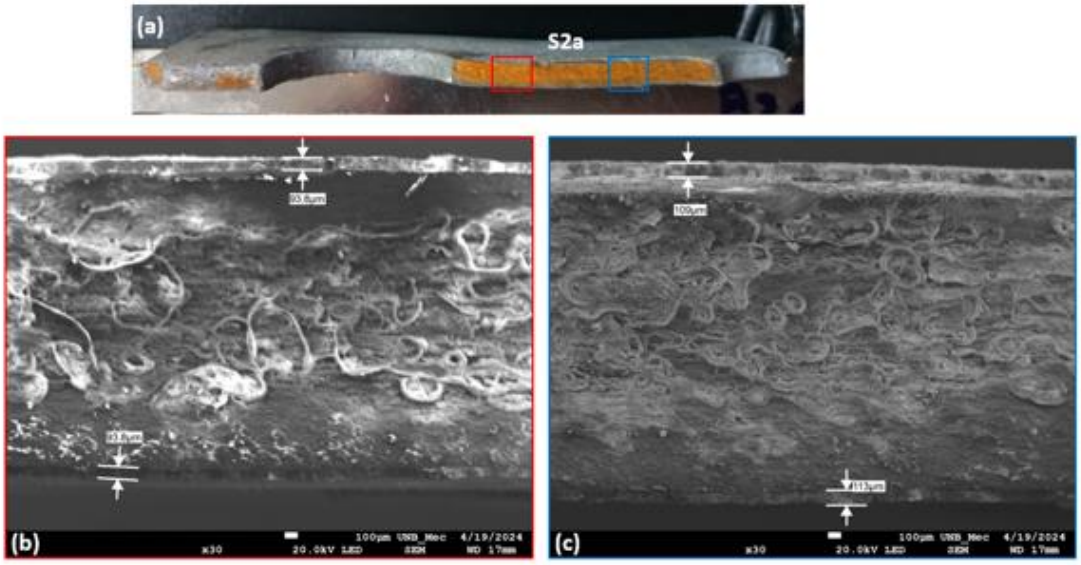


Figura 3.16 - Análise da superfície de falha S2a. (a) Imagens das zonas analisadas (retângulos vermelho e azul); (b) zona do retângulo vermelho mostrando a preservação da camada de Zn. Observa-se a presença de produtos de corrosão, provavelmente gerados após a fratura; (c) zona do retângulo azul mostrando a preservação da camada de Zn com espessura constante ao longo da superfície (Fonte: Autoria própria, 2024)

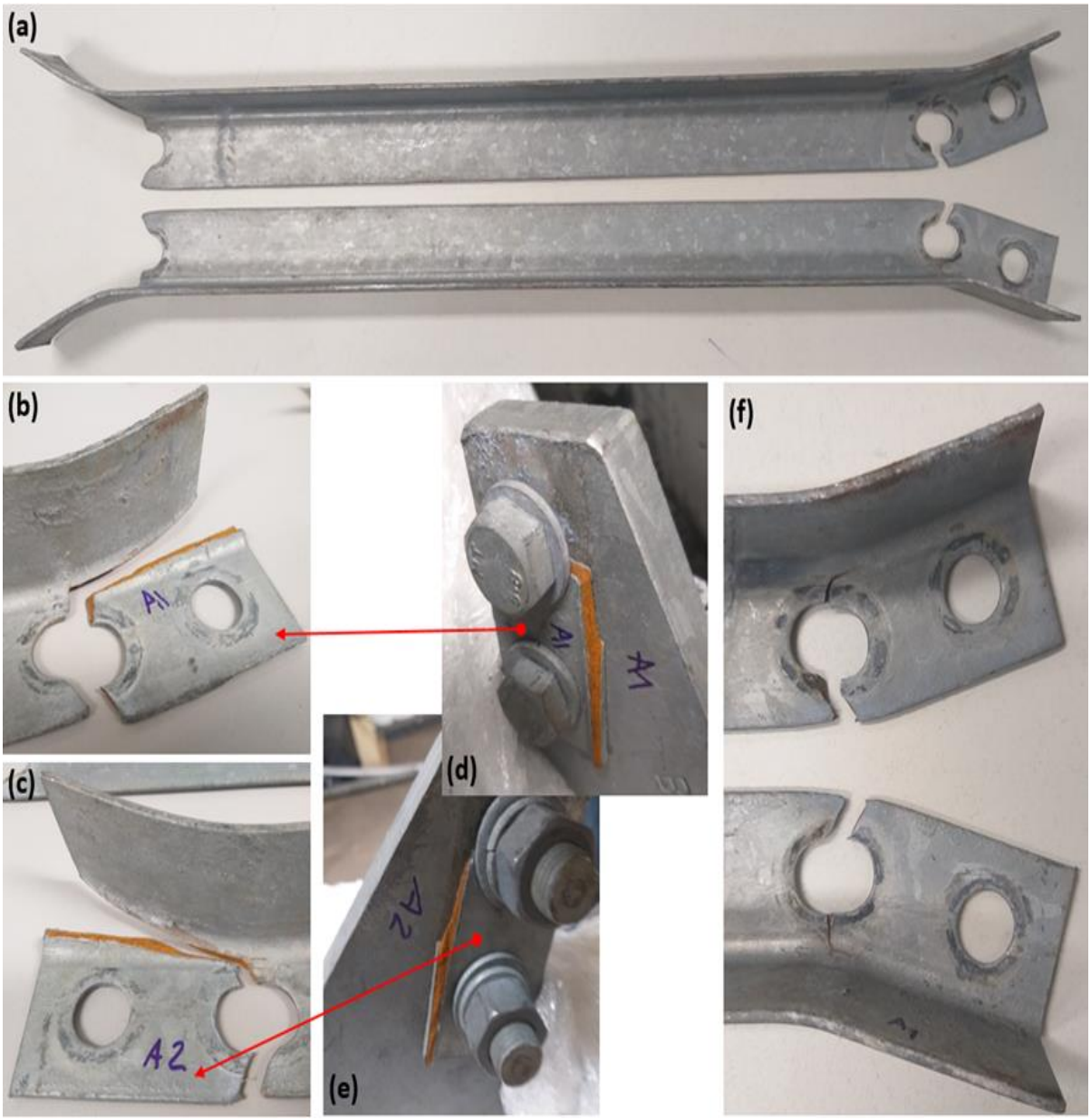


Figura 3.17 - Imagens das cantoneiras A1 e A2 desmontadas. (a) Imagens das cantoneiras A1 e A2 apresentando as mesmas características, ou seja, falha em um dos furos do lado do balancim superior (f) e uma parte faltante do lado oposto (b) e (c). (d) e (e) mostram que as partes faltantes ficaram presas na estrutura lateral do balancim (Fonte: Autoria própria, 2024)

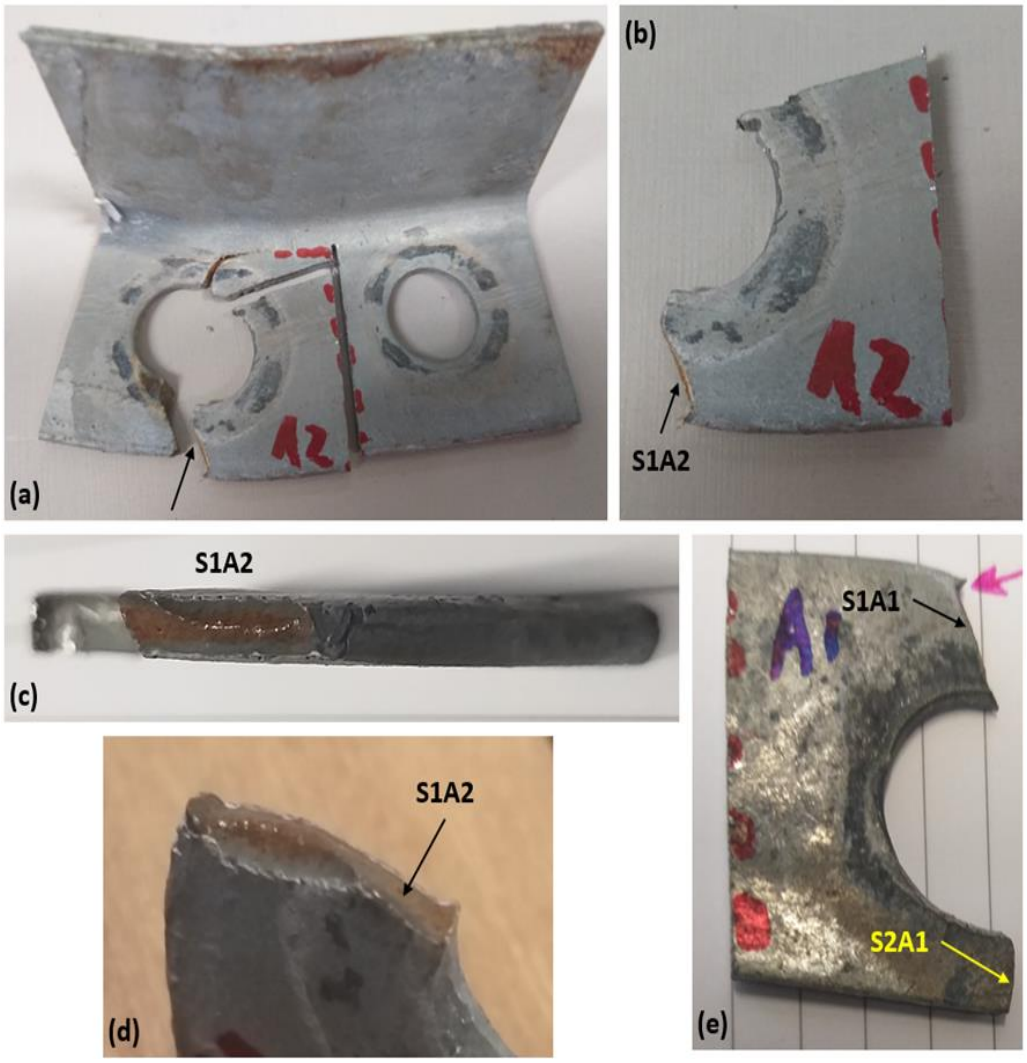


Figura 3.18 - Imagens da preparação para exames por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras retiradas da cantoneira A2. (a) Imagem da cantoneira A2 destacando a parte cortada para análise. A seta preta apresenta um possível início da falha. (b) Detalhe da amostra cortada A2 e identificação da superfície de falha analisada. (c) e (d) Imagens da amostra e da superfície de falha S1A2. (e) Amostra A1 após retirada da cantoneira A1(Fonte: Autoria própria, 2024)

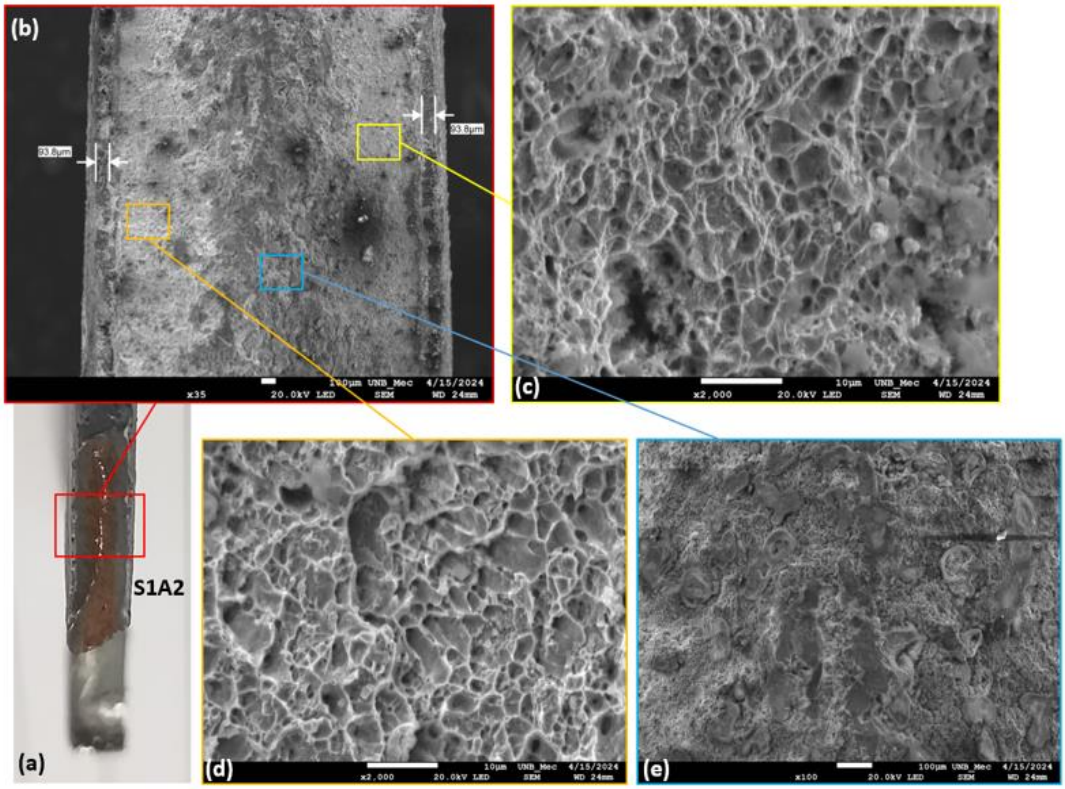


Figura 3.19 - Análise da superfície de falha S1A2 da cantoneira A2. (a) Imagem da superfície S1A2 com retângulo vermelho indicando a zona de interesse. (b) Imagem da zona de interesse. Nota-se a preservação da camada de Zn. (c) e (d) Ampliação das zonas indicadas pelos retângulos amarelo e laranja destacando a presença de dimples, característicos de uma fratura dúctil. (e) Ampliação da zona indicada pelo retângulo azul mostrando a presença de produtos de corrosão, provavelmente oriundos da corrosão pós-falha (Fonte: Autoria própria, 2024)

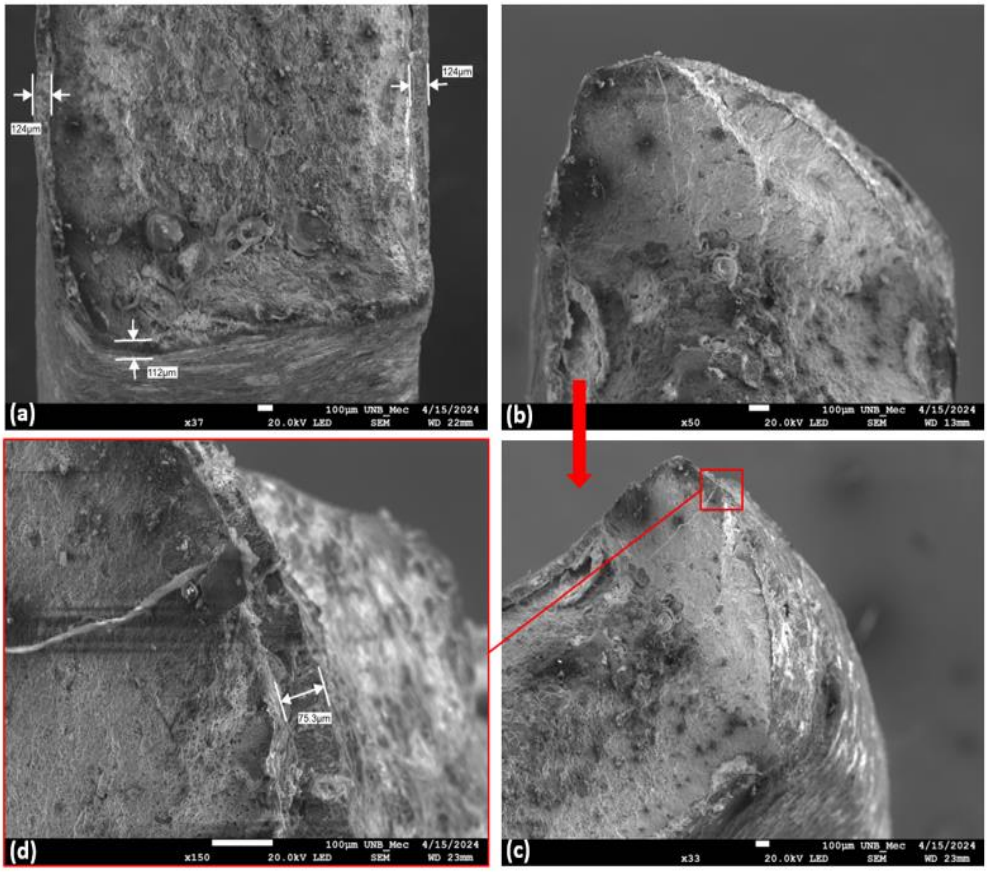


Figura 3.20 - Análise da superfície de falha S1A2 da cantoneira A2. (a) Imagem da extremidade interna da superfície S1A2 provando a integridade da camada de Zn. (b) Imagem da extremidade externa, lado do possível início da falha. (c) Mesma zona observada com inclinação. (d) Ampliação da zona indicada pelo retângulo vermelho, observa-se que a camada de Zn está preservada. A superfície S1A2 apresentou uma camada de Zn totalmente preservada com espessura constante. A presença de dimples também foi observada em toda a superfície, mesmo nas extremidades perto da camada de Zn, indicando que esta parte da cantoneira sofreu uma ruptura dúctil (Fonte: Autoria própria, 2024)

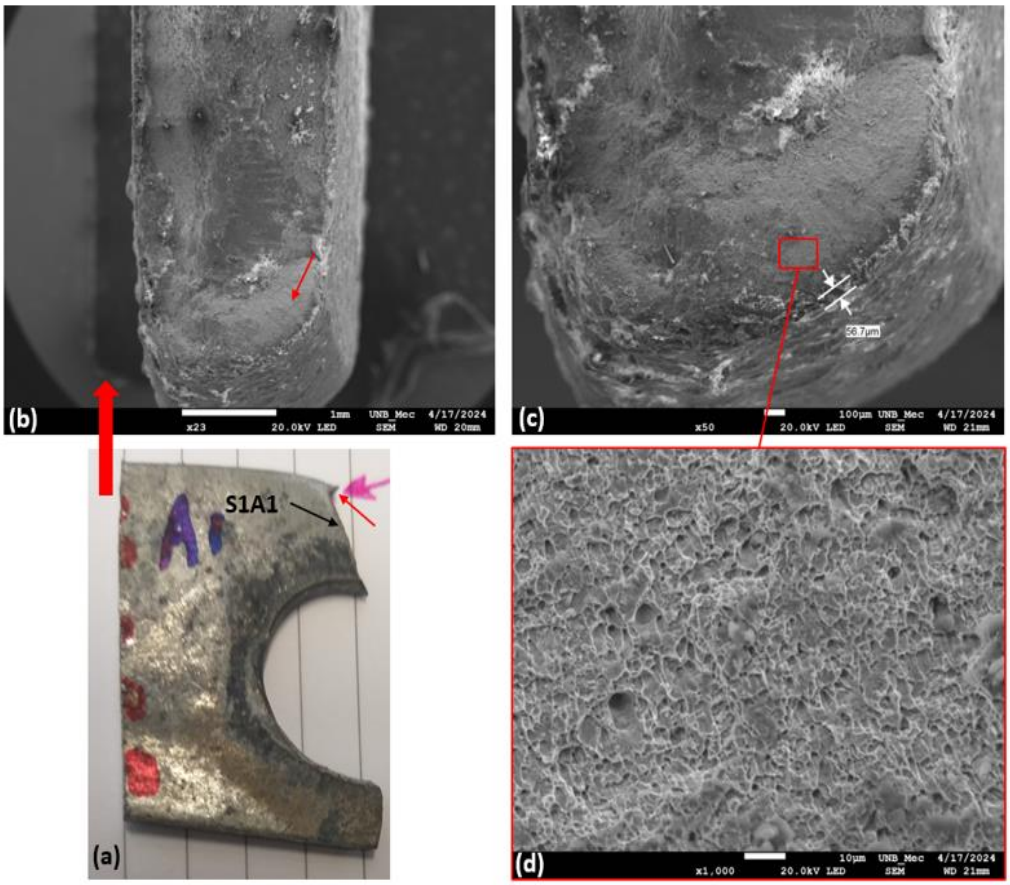


Figura 3.21 - Análise da superfície de falha S1A1 da cantoneira A1. (a) Imagem da amostra A1 com indicação da superfície de interesse. (b) Imagem da extremidade externa, lado do possível início da falha. (c) Ampliação mostrando a integridade da camada de Zn. (d) Ampliação da zona indicada pelo retângulo vermelho. Observa-se que prevalece a presença de dimples (Fonte: Autoria própria, 2024)

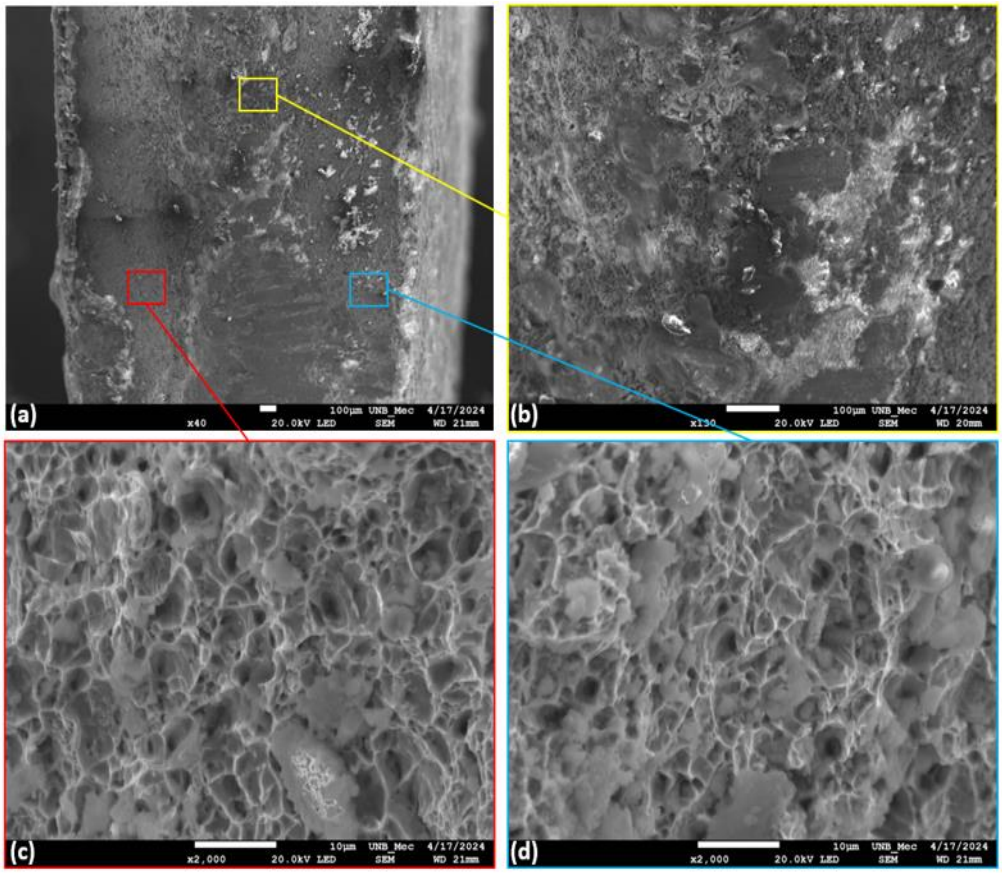


Figura 3.22 - Análise da superfície de falha S1A1 da cantoneira A1. (a) Imagem da superfície S1A1 com retângulos indicando as zonas de interesse. (b) imagem da zona de interesse indicada pelo retângulo amarelo. Observa-se a presença de produtos de corrosão. (c) e (d) Ampliação das zonas indicadas pelos retângulos azul e vermelho destacando a presença de dimples, característicos de uma fratura dúctil. A superfície S1A1 apresenta dimples em toda a área não coberta por produtos de corrosão e sua camada de Zn está preservada em todo seu contorno (Fonte: Autoria própria, 2024)

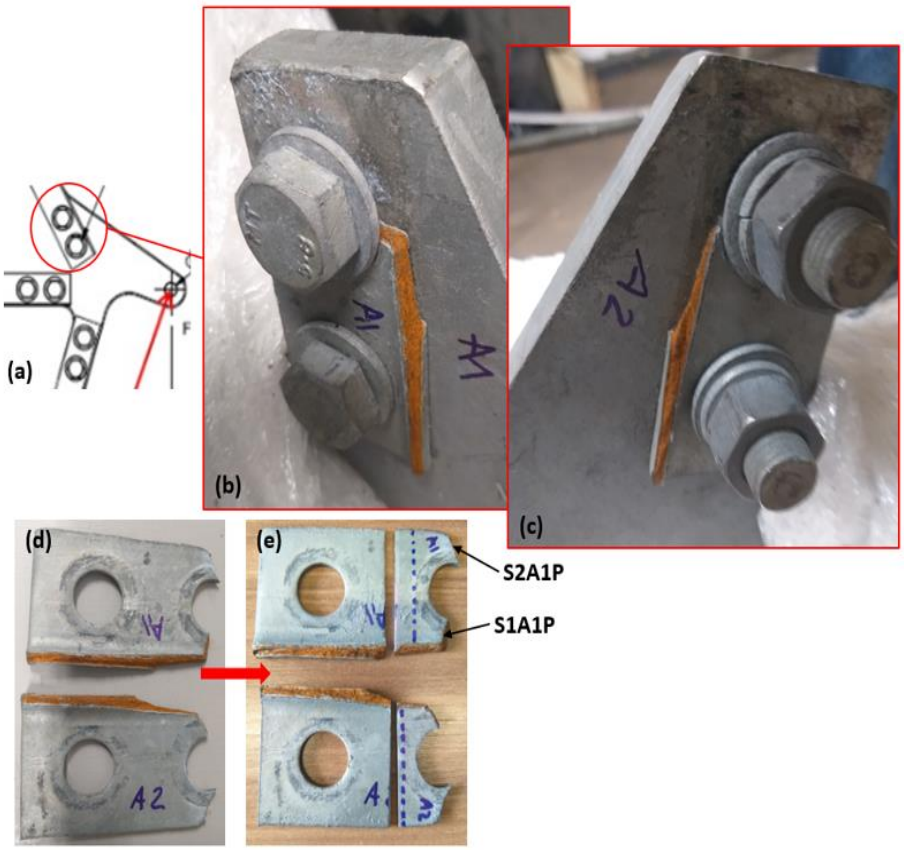


Figura 3.23 - Análise da parte presa da cantoneira A1. (a) Esquema localizando a parte da cantoneira analisada. (b) e (c) Imagens das partes ainda presas na estrutura lateral do balancim. (d) Imagem das duas partes desmontadas. (e) Imagens das amostras cortadas para análise no MEV com identificação das superfícies de falha analisadas (Fonte: Autoria própria, 2024)

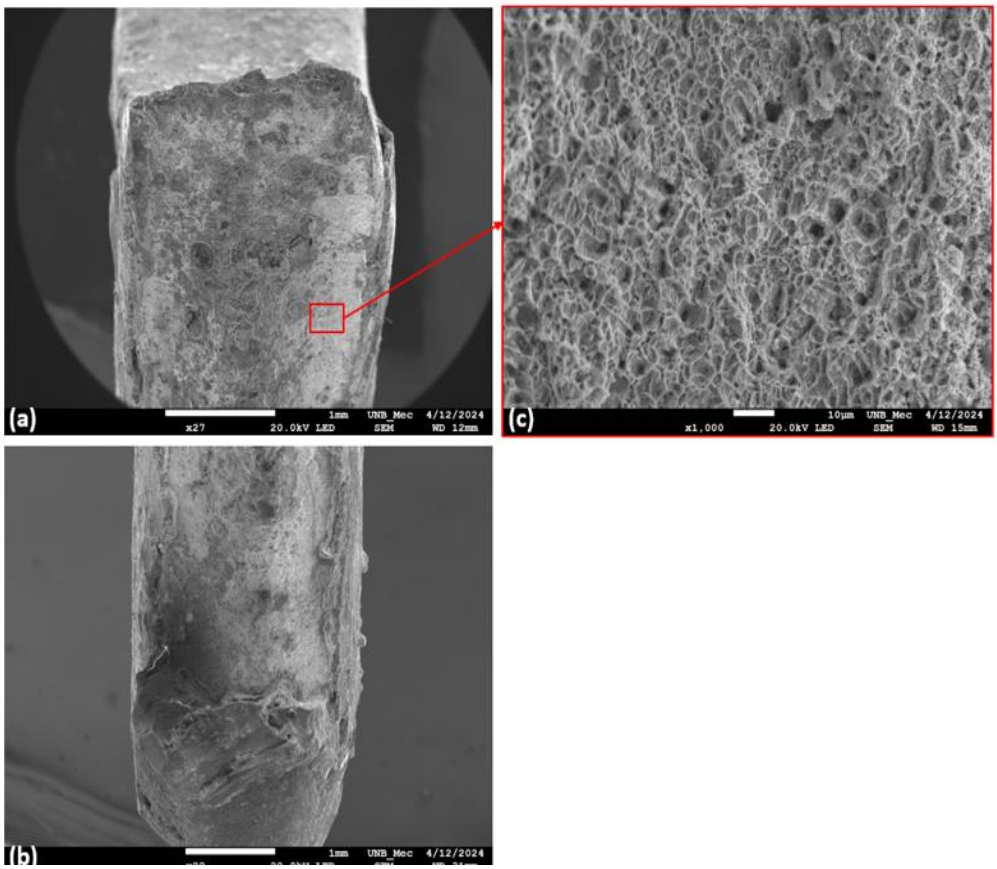


Figura 3.24 - Análise da superfície de falha S1A1P da cantoneira A1. (a) e (b) Imagens das duas extremidades da superfície S1A1P com a camada de Zn preservada. Nota-se a presença de produtos de corrosão. (c) Ampliação da zona indicada pelo retângulo vermelho destacando a presença de dimples (Fonte: Autoria própria, 2024)

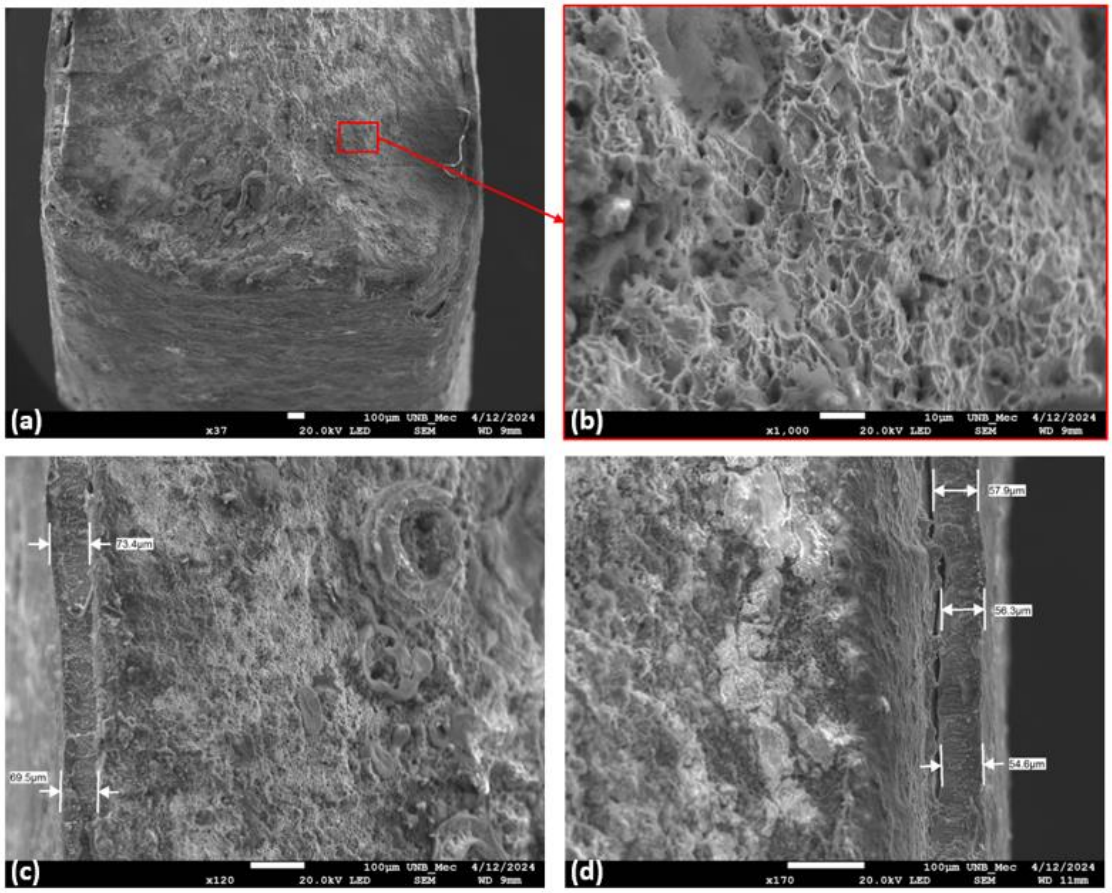


Figura 3.25- Análise da superfície de falha S2A1P da cantoneira A1. (a) Imagem da extremidade da superfície S1A1P (lado do furo). (b) Ampliação da zona indicada pelo retângulo vermelho destacando a presença de dimples. (c) e (d) Imagens mostrando a camada de Zn totalmente preservada com espessura constante. Observa-se a presença de produtos de corrosão oriundos da corrosão pós-falha (Fonte: Autoria própria, 2024)

3.3 **METODOLOGIA NUMÉRICA**

Em geral as estruturas de linhas de transmissão, em especial as torres, são dimensionadas considerando um modelo de treliça (ideal), onde as barras estão submetidas unicamente a esforços axiais de tração ou compressão. Esses esforços solicitantes são comparados com os esforços resistentes calculados seguindo as recomendações de normas técnicas, tais como as normas do ASCE e AISC (Robert e Lemelin, 2005). Uma hipótese frequentemente usada é que as barras se encontrem em um mesmo ponto, formando um sistema de forças concorrentes.

Entretanto, raramente as torres são fabricadas dessa maneira, Figura 3.26. Quando um nó de treliça não é articulado, surgirá tensões secundárias nas barras que podem levar a falha prematura da torre (Knight e Santhakumar, 1993). Na literatura técnica, apesar do termo tensões secundárias ser utilizada de maneira vaga (Karol *et al.*,1986), em geral está associado a tensões de flexão nas barras devido a continuidade das barras da treliça com conexões de nós concêntricos. Uma prática de análise mais acurada para esses tipos de estruturas, consiste utilizar elementos de viga para representar as barras de torres levando-se em conta os efeitos da continuidade das barras, nós excêntricos, entre outros efeitos (Kitiporncha, *et al.*, 1990 e Kang *et al.*, 2007).

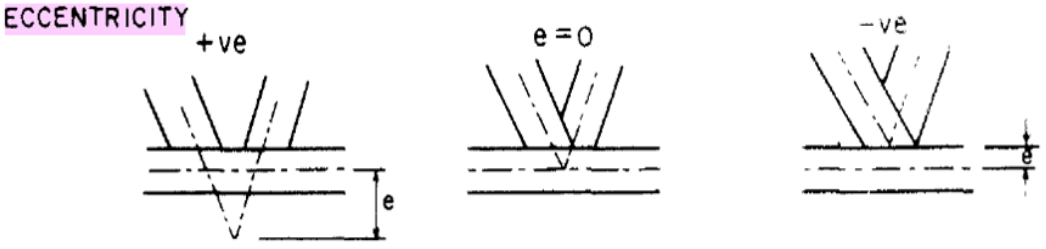


Figura 3.26 - Excentricidades nos nós de treliças (Fonte: Karol *et al*., 1986).

Para a realização das análises foram considerados os carregamentos de projeto especificados na especificação técnica do projeto da linha. A geometria do modelo foi baseada nos desenhos técnicos do projeto do balancim e o modelo foi elaborado no software comercial SAP 2000. A verificação estrutural foi baseada nos critérios recomendados pela ASCE 10-97- *Design of Latticed Steel Transmission Structures*.

Como condições de contorno, as extremidades das cantoneiras superiores foram consideradas engastadas na chapa superior do balancim, Figura 3.27. Uma vez que os condutores são apoiados diretamente sobre a chapa superior, não havendo transferência de esforços para as cantoneiras que são o objeto do estudo, considerou-se no modelo somente quatro pontos de aplicação de carga.

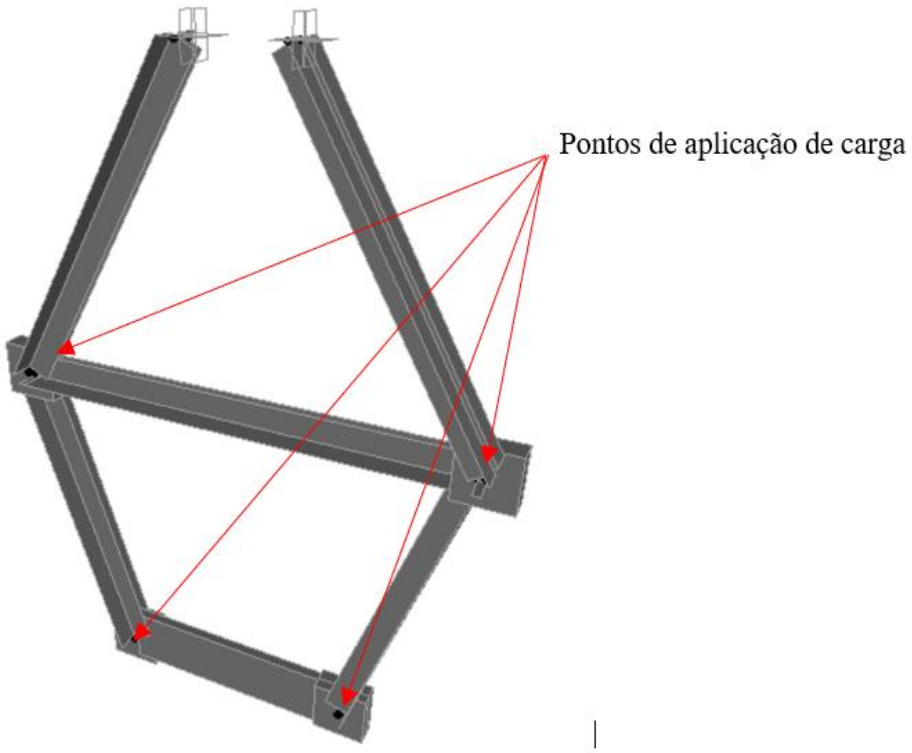


Figura 3.27 - Modelo numérico do balancim elaborado no software comercial SAP 2000 (Fonte: Autoria própria, 2024)

Os cabos condutores são assumidos como simplesmente apoiados no balancim. Dessa forma, em cada um dos seis pontos de fixação dos condutores consideram-se como ações de projeto, as cargas verticais (V), transversais (T) e longitudinais (L) que são transmitidas pelo cabo condutor ao balancim, Figura 3.28.

As cargas verticais decorrem do peso-próprio do condutor considerando o vão médio entre os vãos de vante e ré. As cargas transversais são decorrentes das forças de arrasto do vento sobre o condutor ou pelo ângulo formado pelo desalinhamento entre torres. Por sua vez, as cargas longitudinais são decorrentes de tensões desiguais no condutor nos vãos de vante e ré ou pela quebra do condutor em um dos vãos adjacentes ao balancim, (Labegalini *et al*., 1992).

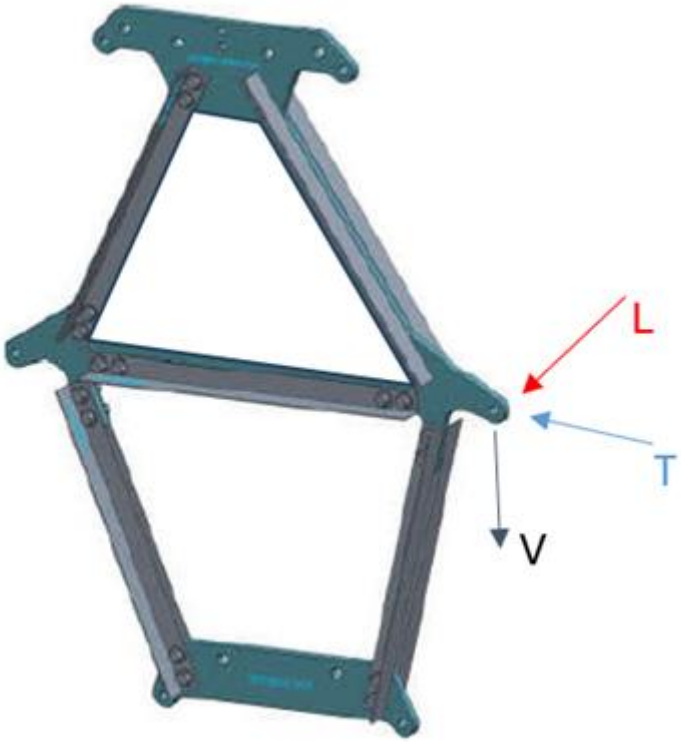


Figura 3.28 - Cargas atuantes no balancim (Fonte: Acessórios: Especificação Técnica, 2017 - modificado).

O esforço transversal gerado no cabo devido ao arraste do vento pode ser calculado levando em conta a pressão dinâmica que o vento exerce sobre o cabo. A pressão dinâmica do vento sobre o cabo pode ser estimada pela Eq.3.1.

$$p_0 = \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \tag{3.1}$$

Onde:

- p_0 é a pressão dinâmica do vento;
- ρ é a densidade do ar; e
- V é a velocidade do vento na direção perpendicular à linha.

Multiplicando a pressão dinâmica gerada pelo vento pelo coeficiente de arraste de cilindros (C_d= 1,17), e pelo diâmetro do cabo, D, e pela soma de metade do comprimento do vão posterior e metade do comprimento do vão anterior, ambos conectados ao balancim, obtém-se a carga transversal que o vento exerce sobre cada cabo, conforme a Eq. 3.2.

$$q_t = p_0 \times C_d \times D \times \frac{a_1+a_2}{2} \tag{3.2}$$

Onde:

- q_t é a carga transversal do vento sobre o cabo;
- p_0 é a pressão dinâmica do vento;
- C_d é o coeficiente de arraste de cilindros;
- D é o diâmetro do cabo;
- $\frac{a1+a2}{2}$ soma de metade do comprimento do vão posterior e metade do comprimento do vão anterior

Considerando a densidade do ar de 1,225 kg/m³, diâmetro do cabo de 26,78 mm e o comprimento médio dos vãos de 511 m, e regimes de vento com velocidades de 7 m/s que correspondem a um valor de velocidade de vento frequente, capaz de gerar vibrações eólicas nos cabos condutores, de 22,22 m/s (vento básico de projeto, T=50 anos 10 min 10 m cat. B) e 30,56 m/s (vento extremo, T=250 anos 10 min 10 m cat. B), (IEC 60826, 2003 e Projeto Básico: Dados Climatológicos, Velocidade do Vento e Carregamentos Devidos ao Vento, 2017) , as cargas transversais que cada cabo exerce sobre o balancim serão de 0,48 kN, 0,84 kN e 9,16 kN, respectivamente.

É importante observar que as equações utilizadas aqui para o cálculo da carga transversal do vento, não levam em conta fatores majoradores de carga, conforme definidos na norma IEC 60826 (2003). Caso esses fatores fossem considerados, essas cargas transversais seriam ainda maiores.

Por sua vez, as especificações de projeto definem que o balancim deverá suportar cargas verticais de 40 kN e cargas longitudinais de 0,84 kN em cada ponto de fixação dos

cabos condutores. Com isso, as análises realizadas neste trabalho consideram três casos de carregamento, conforme apresentado na Tab. 3.2.

Tabela 3.2 - Casos de carregamento considerados na análise

Caso	Carga vertical	Carga transversal	Carga longitudinal
1	40 kN	9,16 kN	-
2	40 kN	0,84 kN	0,84 kN
3	40 kN	0,48 kN	-

A norma ASCE 10-97 fornece os requisitos para o projeto de estruturas de transmissão elétricas em treliça de aço autoportantes e estaiadas, (ASCE 10-97, 1997). É aplicada tanto para perfis laminados a quente quanto os formados a frio. Essa norma possui como filosofia de cálculo o método LFRD que é a sigla para *Load and Resistance Factor Design*, que em língua portuguesa pode ser traduzida para Projeto por Fatores de Carga e Resistência.

Nesse método de segurança estrutural, utilizam-se fatores de segurança tanto para as cargas (ações estruturais) quanto às resistências dos materiais. Nesse caso, as cargas (ações) são em geral majoradas por coeficientes de majoração das ações para cobrir as incertezas e variabilidades das ações enquanto as resistências dos materiais são minoradas por fatores de segurança para levar em conta a variabilidade dos materiais.

Esse método é uma evolução do método ASD - *Allowable Stress Design* ou Projeto por Tensões Admissíveis que considera os valores de cargas nominais e a aplicação de um único coeficiente de segurança global diretamente sobre as resistências.

Segundo a ASCE 10-97 (1997), para que seja garantida a segurança estrutural, os membros submetidos a esforços de tração e flexão devem satisfazer a seguinte inequação:

$$\frac{\boldsymbol{P}}{\boldsymbol{P_a}} + \frac{\boldsymbol{M_x}}{\boldsymbol{M_{ax}}} + \frac{\boldsymbol{M_y}}{\boldsymbol{M_{ay}}} \leq \mathbf{1} \tag{3.3}$$

Onde:

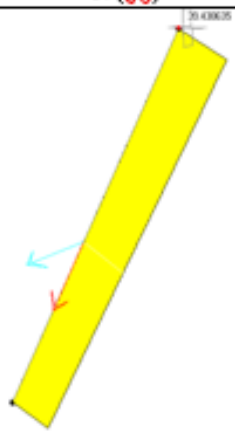
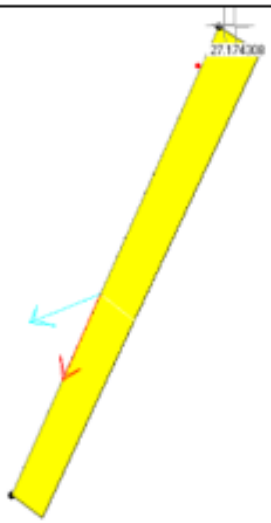
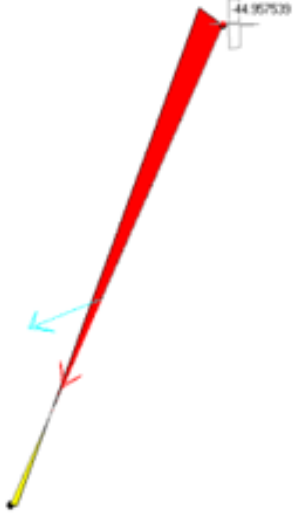
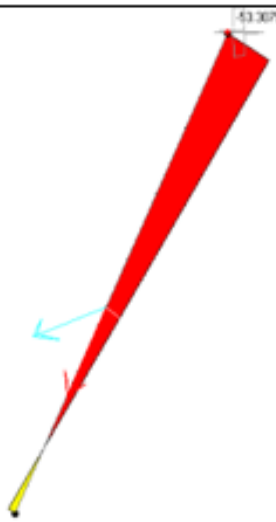
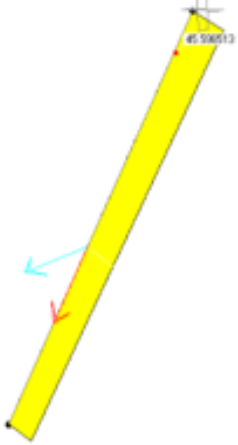
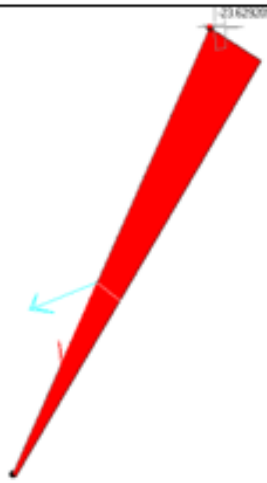
- P, é o esforço axial de tração;
- P_a é a carga admissível à tração;
- M_x e M_y são os momentos fletores em torno dos eixos x e y, respectivamente;

- M_{ax} e M_{ay} são os momentos admissíveis em relação aos eixos x e y, respectivamente.

3.3.1 **RESULTADOS**

Na Tabela 3.3 estão apresentados os solicitantes na cantoneira superior esquerda, para os casos de carregamento de 1 a 3. A orientação dos eixos 2-2 e 3-3 em relação as abas da cantoneira, em torno das quais agem os momentos es M22 e M33, está mostrada na Fig. 3.29. Nesse caso, pode-se tomar os eixos x e y como os eixos locais 2-2 e 3-3, mostrados na Figura3.29. Conforme mencionado anteriormente, a ASCE 10-97 utiliza o método LFRD, onde as cargas são majoradas por coeficientes de segurança. Entretanto, por simplicidade e como exercício didático, para efeitos de verificação admitiu-se coeficientes de majoração unitários. Nesse caso, se a não for atendida a verificação de segurança para as ações com valores nominais, a verificação de segurança seria ainda mais rigorosa.

Tabela 3.3 - Esforços solicitantes na cantoneira superior direita para as combinações 1 a 3. Valores em kN e cm

	N (kN)	M_y (M22) (kN.cm)	M_y (M33) (kN.cm)
Caso 1			
Caso 2			
Caso 3			

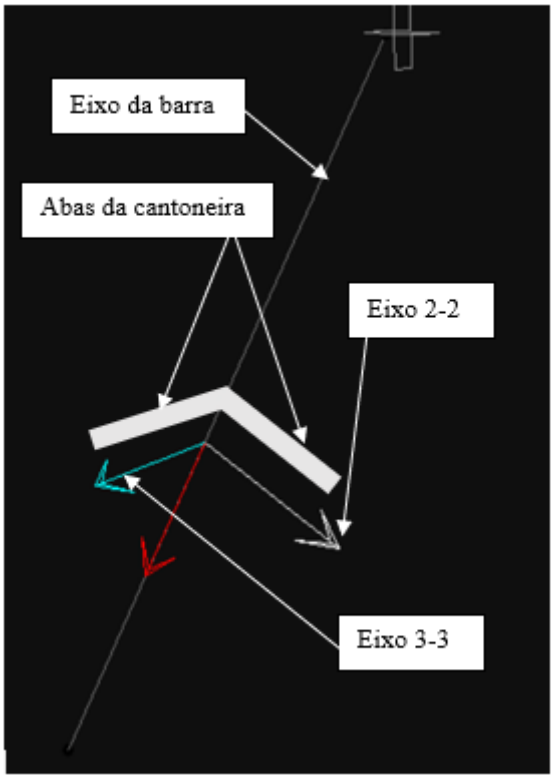


Figura 3.29 - Orientações dos eixos locais em relação às abas da cantoneira

A Figura 3.30 mostra um panorama da verificação de segurança das cantoneiras do balancim, segundo os requisitos da ASCE 10-97 para os carregamentos apresentados na Tab. 3-2. As barras em vermelho indicam que o índice de capacidade resistente dado pela Eq. 3.3 é maior que um, ou seja, a solicitação é maior que a resistência, não satisfazendo a condição de segurança.

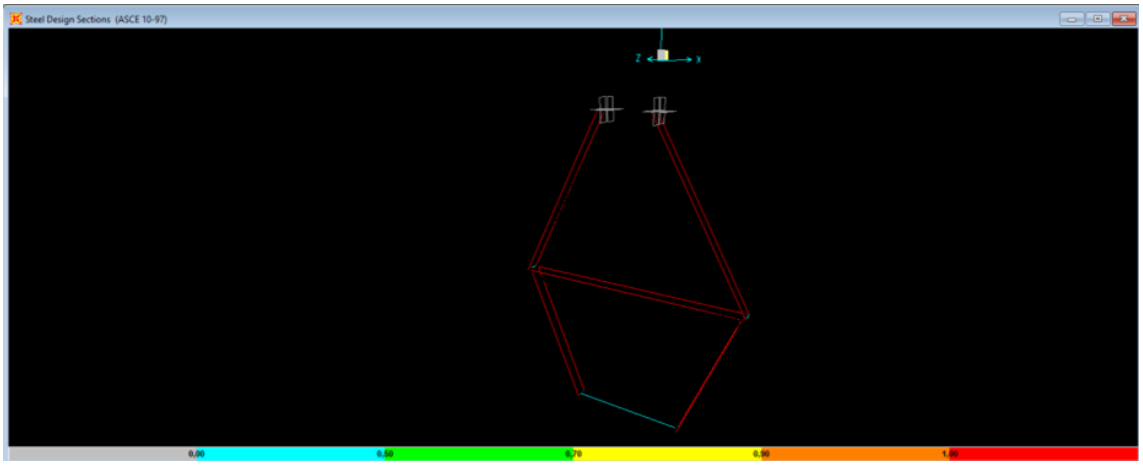


Figura 3.20 - Verificação de segurança segundo os requisitos da ASCE 10-97

Na Tabela 3.4 estão detalhados os resultados dos resultados da verificação de segurança da cantoneira superior esquerda pelo SAP 2000, considerando os carregamentos apresentados na Tabela 3.2

Tabela 3.4 - Resultados da verificação de segurança da cantoneira superior esquerda

Caso	Influência do esforço axial (P/P_a)	Influência total da flexão (M/M_a)	Total $\left(\frac{P}{P_a}+\frac{M}{M_a}\right)$
1	0,41	13,89	14,29
2	0,65	1,21	1,87
3	0,47	0,49	0,96

Dos resultados apresentados na Tabela 3.4, verifica-se que somente o carregamento do caso 3 atende a condição de segurança normativa. No caso 1 de carregamento a capacidade resistente é superada em cerca de 1300%, enquanto no caso 2 de carregamento, a capacidade resistente da cantoneira é superada em 87%. Esses resultados são condizentes com outras análises realizadas pelos autores cujos resultados ainda não foram publicados.

4. CONCLUSÕES

As cantoneiras examinadas no presente trabalho foram enquadradas na especificação dos aços ASTM A 572 Grau 50, conforme laudo de análises químicas apresentado neste relatório. Foram atendidos os requisitos em termos de uso de aços de baixo carbono micro ligados nos diversos componentes do conjunto balancim para feixe expandido, visando uso de materiais com resistências mecânicas superiores aos aços carbono comuns, permitindo acréscimo de carga unitária da estrutura. O mapeamento composicional elementar, efetuado com o uso de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) revelou a distribuição homogênea de cada elemento nas amostras, com acentuado depósito de produtos de corrosão nas superfícies de fratura.

As camadas galvanizadas apresentaram-se com espessuras homogêneas, indicando não ter havido penetração de óxidos metálicos antes da ruptura final das peças. Infere-se, portanto, que esses produtos de corrosão se originaram em data posterior às fraturas, possivelmente por exposição atmosférica.

Observou-se também nas cantoneiras examinadas, a nível macroestrutural, a presença de deformações plásticas. Os exames microscópicos nas superfícies de fratura revelaram a predominância de cavidades (dimples), que revelam um mecanismo de fratura dúctil, possivelmente causada por cargas em serviço superiores aos limites de escoamento das cantoneiras utilizadas.

Os ensaios de tração uniaxial, realizados na UnB nos CPs possibilitaram a determinação dos limites de escoamento, limites de resistência e alongamento específico percentual. As propriedades mecânicas obtidas estavam acima daquelas do material especificado no projeto ASTM A 572 Grau 50. Dessa forma, verifica-se o atendimento do material no quanto às propriedades requeridas em projeto.

Por outro lado, a análise estrutural mostrou que considerando as cargas especificadas em projeto, as cantoneiras do balancim não atendem às condições de segurança, segundo as recomendações normativas. Esse fato se dá em razão das elevadas tensões de flexão nas cantoneiras exatamente na região de ligação das cantoneiras com o balancim superior. As análises mostraram que a capacidade resistente da cantoneira é superada em cerca de 1300% quando se considera o carregamento mais crítico de projeto. Esses resultados justificam as falhas observadas em campo.

5.TRABALHOS FUTUROS

A ruptura de balancins de linhas de transmissão de alta voltagem constitui uma falha estrutural grave, inclusive com a possibilidade de causar vítimas fatais entre os trabalhadores envolvidos no empreendimento ou entre moradores da região. Pode ainda provocar danos a patrimônios móveis e imóveis e a morte de animais. Em condição não energizada é o impacto provocado pela queda dos cabos, ferragens e eventualmente de outras estruturas como torres que podem provocar estes danos e fatalidades. Após a energização da linha, a gravidade associada a queda de um cabo de uma linha de 500 kV provocado pela quebra de balancins, ganha maiores proporções devido a presença da alta tensão.

Do ponto de vista não apenas econômico, mas também social, a queda da linha energizada gera perdas significativas a Transmissora com aplicação da Parcela Variável, Multas etc. A paralisação de atividades sociais (como a paralização de hospitais, escolas, universidades etc.), seja em nível regional ou nacional, provocadas pela possível queda de um cabo poderia gerar danos irreparáveis a imagem da proprietária do empreendimento.

Tendo em vista a criticidade dos problemas que poderiam eventualmente ser provocados pela quebra de balancins, um melhor entendimento do funcionamento mecânico e dos projetos dessa ferragem, importantíssima, na composição de uma linha de transmissão é de suma importância. Neste sentido propõe-se abaixo alguns temas/ações para a continuidade desta pesquisa:

- Construção de aparato experimental para ensaios mecânicos em balancins construídos com cantoneiras de aço dobradas a frio considerando as tensões de flexão nessas ferragens;
- Realização de análise dos projetos de balancins construídos com cantoneiras utilizando os máximos esforços de peso e vento atuantes sobre os cabos da linha de transmissão;
- Realização de simulações numéricas capazes de produzir balancins como treliça real e não como treliça ideal;
- Análise dos esforços nos elementos sólidos para verificação do cisalhamento ocorridos nos pontos de fixação.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas e Técnicas. NBR 16637: Fios de alumínio-liga, de seção circular, para fins elétricos – Requisitos de desempenho. ABNT, Rio de Janeiro, 2017.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5422: Projeto de linhas aéreas transmissão de energia elétrica. Rio de Janeiro, 1985.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8449: Dimensionamento de cabos para-raios para linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. Rio de Janeiro, 1984.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. ASCE 10-97: Design of Latticed Steel Transmission Structures. Reston, VA: ASCE, 1997.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Anexo 2.2: Características e requisitos técnicos das Instalações de Transmissão, 2019.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Base de Preços de Referência ANEEL - Ref.06/2020. Orçamento de Linha de Transmissão: relatório técnico, Brasília, 2020.

ASCE 10-15 – *Design of lattice steel transmission structures*. "State of the Art Survey on Spacers and Spacer Dampers" publicado pela CIGRÉ em 2005.

CAMARGO, C. Transmissão de energia elétrica: aspectos fundamentais. Florianópolis: Editora da UFSC, 2006.

CASTILHO, N. Torres de estrutura de uma Linha de Transmissão, 2019. Disponível em: <https://portalmaisenergia.com.br/torres-de-estrutura-de-uma-linha-de-transmissao/> Acesso em: 21 de março. de 2024.

CHAVES, Thaís Abrahim. Avaliação do impacto nas perdas elétricas do sistema interligado nacional dada a presença de usinas hidrelétricas de pequeno porte nos sistemas de distribuição. 2019. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/2062> . Acesso em: 14 de abr. de 2024.

CIGRÉ. SC22-WG04, Guide for Endurance Tests of Conductors inside Clamps, Electra, No 100, May 1985.

CORDEIRO. Cabos de Alumínio NU CA, 2020. Disponível em: <https://www.cordeiro.com.br/cabos-eletricos/cord-nu-cabos-de-aluminio-nu-ca/> Acesso em: 16 de jan. de 2024.

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

ELIAS, K. M.; FAKURY, R. H.; GRILO, L.F. Torre de transmissão de energia elétrica: um novo olhar e possibilidades para o cenário de transmissão brasileiro. Congresso Latino-Americano da Construção Metálica, 7., 2016, São Paulo. Anais do Sétimo Congresso Latino-Americano da Construção Metálica [...]. São Paulo: [s. n.], 2016.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano decenal de expansão de energia de 2021, 2012.

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

FABRI, A. B. F., BRAMETAL. Parecer técnico balancim tipo 560bat27 com e sem reforço - cargas do requisito, 2023

FERRAGENS E ACESSÓRIOS: Especificação Técnica, 2017, pp1-72

FUCHS, R. D. Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas. 3. ed. Uberlândia: EDUFU, 2015. v. 2.

GARCIA, M.A. Concepção, fabricação e avaliação de um dispositivo de fadiga por fretting em fios de alumínio de cabos condutores. – Brasília: ENM/UnB, 2019.

GENE, S. N. Suppression of corona on EHV transmission line with bundled: conductors and spacers, 2004.

GONÇALVES, D.N.; RODRIGUES, M.A.P.; MONTEZUMA, L.R. Gestão de Interligações do SIN por Indicadores de Desempenho. X STPC - Seminário Técnico de Proteção e Controle, 2010.

IEC. 60826 *Design criteria of overhead transmission lines*. Third edition, 2003, pp 1-243.

IEC. 60826 Design Criteria of Overhead Transmission Lines. Third edition, 2003, pp 1-243.

IEC. IEC TR 61328:2017 Live working - Guidelines for the installation of transmission and distribution line conductors and earth wires - Stringing equipment and accessory items, 2017.

IEEE. Standard 524-2016 - IEEE Guide for the installation of overhead transmission line conductors. Institute of Electrical and Eletronics Engineers, Inc, New York, 2016.

IEEE. Std 1368™Guide for Aeolian Vibration Field Measurements of Overhead Conductors, 2006.

INTELLI. Condutor de Alumínio com Alma de Aço Revestido de Alumínio, 2019. Disponível em: <https://www.intelli.com.br/produtos/fios--cabos--de-aluminio/aluminio-nu-com-alma/condutor-de-aluminio-com-alma-de-aco-revestido-de-aluminio/139/> Acesso em: 16 de jan. de 2024.

JTE. RT. l0.09.0003 - Projeto básico: dados climatológicos, velocidade do vento e carregamentos devidos ao vento - leilão ANEEL 013/2015 2° etapa– lote 17 linha de transmissão 500 kV Bom Jesus da Lapa II – Janaúba 3 c1 cs e linha de transmissão 500 kV Janaúba 3 – Pirapora 2 c1 cs, 2017, pp. 1-123.

JTE.ET.l0.59.0001.01 - Ferragens e acessórios especificação técnica - leilão ANEEL 013/2015 – lote 17 linha de transmissão 500kV Bom Jesus da Lapa II – Janaúba 3 c1 cs e linha de transmissão 500kV Janaúba 3 – Pirapora 2 c1 cs - ferragens e acessórios especificação técnica, 2017, pp1-72

JUNG, J. G. Fundações superficiais de linhas de transmissão submetidas a esforços de tração: comparação entre métodos de previsão de capacidade de carga. 2009. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Florianópolis, p. 01-60, 2009.

KANG, W; ALBERMANI, F; KITIPORNCHAI, S; LAM, H. *Modeling and Analysis of Lattice Towers with More Accurate Models*. Advanced Stell Construction, 2007, Vol.3, N. 2, pp. 565-582.

KITIPORNCHAI, S., ALBERMANI, F.G.A. AND CHAN, S.L. *Elasto-plastic Finite Element Models for Angle Steel Frames*. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1990, Vol. 116, No.

10, pp. 2567-2581.

KNIGHT, G.M.S. AND SANTHAKUMAR, A.R., *Joint Effects on Behavior of Transmission Tower*s. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1993, Vol. 119, No. 3, pp. 698-712.

KOROL, R.M., RUTENBERG, A. AND BAGNARIOL, D. *On Primary and Secondary Stresses in Triangulated Trusses*. Journal of Constructional Steel Research, 1986, Vol. 6, No. 2, pp. 123-142.

LABEGALINI, P. R. *et al*. Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão. 2. ed. São Paulo: Blucher, 1992.

LABEGALINI, P. R; LABEGALINI, J. A; FUCHS, R. D; ALMEIDA, M. T. Projeto Mecânico das Linhas Aéreas de Transmissão. 2º Edição, Editora Bluscher, 1992.

MME – Ministério de Minas e Energia. Fontes de energia renováveis representam 83% da matriz elétrica brasileira. Governo do Brasil, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/01/fontes-de-energia-renovaveis-representam-83-da-matriz-eletrica-brasileira>. Acesso em: 20 de out. de 2024.

MUGHRABI, H. Specific features and mechanisms of fatigue in the ultrahigh-cycle regime. International Journal of Fatigue, v. 28, no. 11, pp. 1501–1508, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2005.05.018>. Acesso em: 14 de abr. de 2024.

NAMETALA, C. A. L.; MARTINS, P. E. T. Modelagem multicritério aplicada às linhas de transmissão compactas suportando múltiplos circuitos. Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 12., 2017, Curitiba. Anais da XII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica [...]. Curitiba: [*s. n.*], 2017.

NAMETALA, C. A. L.; MARTINS, P. E. T. Modelagem multicritério aplicada às linhas de transmissão compactas suportando múltiplos circuitos. *In*: Conferência Brasileira Sobre Qualidade Da Energia Elétrica, 12., 2017, Curitiba. Anais da XII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica [...]. Curitiba: [*s. n.*], 2017.

NERI, Thiago Fernandes. Proteção de Perda de Sincronismo – Aplicação e Avaliação no Sistema Interligado Nacional Brasileiro/Thiago Fernandes Neri – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015. XVIII, 171p.: il.; 29,7 cm. Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2015. Disponível em: pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2015063003.pdf Acesso em: 14 de abr. de 2022.

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

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

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

PEREIRA, A. J. L.; BATALHA, R. M. S.; P. DA COSTA JUNIOR, P.; ANDRADE, J. S. Comportamento elétrico de feixes de condutores em linhas aéreas de energia. Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, 16, 2018, Uberlândia, p. 1.

PLP. Energia/Transmissão, Catálogo de Produtos 2019. Disponível em:< https://plp.com.br/wp-content/uploads/2019/12/catalogo_transmissao.pdf> Acesso em: 13 de jul. de 2024.

PROJETO BÁSICO: Dados Climatológicos, Velocidade do Vento e Carregamentos Devidos ao Vento, 2017, pp. 1-123.

ROBERT, V. AND LEMELIN, D.R., *Flexural Considerations in Steel Transmission Tower Design*. Proceedings of the "Electrical Transmission in a New Age" Conference of ASCE, Omaha, Nebraska, USA, 2002, pp. 148-155.

SANTIAGO, N. H. Linhas aéreas de transmissão. 1983, Departamento de Eletrotécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro.

SANTOS, Alexandre; FERNANDES, João; FELCHAK, Leonardo. Comparative study of transmission towers with different heights aiming at the structural evaluation of isolated and conventional cormules by means of computational modeling. Brazilian Journal of Developmente, v. 6, n. 8, 2020. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/15884>. Acesso em: 01 de abr. de 2024.

SILVA, Pietro; SHINOHARA, Armando. Inspeção da degradação nos isoladores de compósito de linhas de transmissão através de ensaios não destrutivos. 2009. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/9846>. Acesso em: 12 de abr. de 2024.

STEPHAN, J. C. S. Reforços em fundações de suportes de linhas de transmissão: a experiência da Eletrosul. Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 18, 2005.

STEVENSON, W. Elementos de análise de sistemas de potência. 2ed., Nova York: McGraw Hill, 1986.

TARBOSA, Felipe; SILVA, Alex. Utilização de feixe expandido de condutores alicados a linhas de transmissão na classe de 500kV. Revista Eng. Elé., TEC-USU, R.J., v. 4, n. 1, 2021.

TAVARES, N. T. S. Condutores aéreos de elevada capacidade –Avaliação de up-rating – Dimensionamento elétrico e mecânico. 2013. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores Major Energia) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2013.

TEXPI. Catálogo de isoladores de vidro de suspensão. Campo Largo: [*s. n.*], 2020. 11 p.

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

VIEIRA, Erick; FERREIRA, Jorge; ARAUJO, José. Análise comparativa da resistência à fadiga por fretting entre os cabos condutores feitos de liga de alumínio 900 MCM e 823 MCM. Matéria, Rio J., v. 26, n. 1, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/rKZ83ydvFQZZrz6nsnCP9Tw/?format=html&lang=pt> Acesso em: 11 de abr. de 2024.

ZAMBELLI, J.; YAEGASHI, M.; CARVALHO, D. Prova de Carga à Tração em Tubulões Curtos: Caso 01 Tubulão Revestido com Manilha e Caso 02 Tubulão sem Revestimento. 9º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia 3ª Feira da Industria de Fundações e Geotecnia SEFE 9 –, São Paulo, Brasil ABEF, 4 a 6 de junho de 2019. Disponível em: <https://pvista.proevento.com.br/qe/subpaper/upload/594950_207_SEFE2019_Prova_de_Carga_a_Tracao_Tubuloes_Entrega_MH_JVZ.pdf>. Acesso em: 11 de abr. de 2024.