

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia

**PREVISÃO DE VIDA E ANÁLISE DE FALHAS EM CABOS
CONDUTORES DE ENERGIA ELÉTRICA SUBMETIDOS À
VIBRAÇÕES RANDÔMICAS**

Rennielson do Amaral Costa

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

Brasília
2025

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia

**PREVISÃO DE VIDA E ANÁLISE DE FALHAS EM CABOS
CONDUTORES DE ENERGIA ELÉTRICA SUBMETIDOS À
VIBRAÇÕES RANDÔMICAS**

Rennielson do Amaral Costa

Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Cosme Roberto Moreira da Silva

Brasília
2025

**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia**

**PREVISÃO DE VIDA E ANÁLISE DE FALHAS EM CABOS
CONDUTORES DE ENERGIA ELÉTRICA SUBMETIDOS À
VIBRAÇÕES RANDÔMICAS**

Rennielson do Amaral Costa

Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre.

Trabalho aprovado. Brasília, 27 de agosto de 2025:

Prof. Dr. Cosme Roberto Moreira da Silva,
UnB/FT/ENM
Orientador

Prof. Dr. Jorge Luiz de Almeida Ferreira,
UnB/FT/ENM
Examinador interno

Prof. Dr. Rodrigo Camargo Gomes,
IFG/Valparaíso
Examinador externo

Agradecimentos

Primeiramente, expresso minha profunda gratidão a Deus por conceder-me a força e a perseverança indispensáveis, por guiar meus caminhos e por jamais ter permitido que eu desistisse de meus propósitos.

Minha mais profunda gratidão é direcionada à minha família. O apoio de vocês foi fundamental na construção desta jornada, com motivação, incentivo e suporte incondicional aos meus estudos.

Ao Prof. Dr. e Orientador Cosme, meu profundo agradecimento pela oportunidade de ingressar neste projeto. Seu apoio, a confiança depositada e toda a sua orientação foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas de laboratório Remy, Ricardo, Marcelo, Felipe e Paul, agradeço imensamente pela parceria, pelo ambiente de trabalho colaborativo e pelo auxílio incondicional na realização dos ensaios experimentais. Sou grato pelo constante aprendizado proporcionado. Um agradecimento especial a Remy, por sua disponibilidade em sanar dúvidas, pelo treinamento na operação e pela assistência no desenvolvimento da metodologia. Desejo-lhe êxito em sua nova jornada profissional. À colega Mayla, agradeço pelas inúmeras dúvidas sanadas desde o início desse mestrado.

Meus agradecimentos também se estendem ao Prof. Dr. José Alexander Araújo, por todo o conhecimento transmitido sobre Fadiga em Cabos Condutores e na excelente gestão do projeto.

Por fim, mas não menos importante, registro minha gratidão à Transmissoras Brasileiras de Energia (TBE) pelo patrocínio do projeto de P&D, que possibilitou a realização deste trabalho.

Resumo

A crescente demanda energética no Brasil e a vasta extensão do Sistema Interligado Nacional (SIN) tornam a confiabilidade das linhas de transmissão de energia elétrica um desafio crítico. Os cabos condutores, componentes de alto custo e vulneráveis, são frequentemente submetidos a vibrações eólicas que induzem fadiga e, em particular, o fenômeno de fadiga por fretting, ocasionando falhas catastróficas e interrupções no fornecimento de energia. Diante dessa problemática, este trabalho teve como objetivo principal prever a vida útil e analisar as falhas em cabos condutores de energia elétrica submetidos a vibrações randômicas, utilizando dados experimentais obtidos com um vibrógrafo instalado em bancada de ensaio.

Para tal, foram realizados testes em laboratório com o cabo CAL 838 MCM - Liga 1120 na bancada do Laboratório de Cabos da Universidade de Brasília (UnB), simulando condições de carregamento aleatório através de um shaker eletromecânico e utilizando o sistema de aquisição de dados VIBREC 500. As estimativas de vida à fadiga foram realizadas utilizando a regra de Palmgren-Miner. Para isso, as amplitudes de tensão foram calculadas a partir dos dados de amplitude e frequência coletados a 123 mm do Último Ponto de Contato (UPC). Estes dados foram processados por um algoritmo de previsão de vida à fadiga, que aplicou um fator de correção para o ponto de referência de 89 mm do UPC. Complementarmente, foram conduzidas análises fractográficas das fraturas por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), investigando os mecanismos de falha.

Os resultados demonstram que o modelo de previsão de vida baseado na Curva S-N do Lab. Cabos apresentou maior acurácia em relação à vida experimentalmente verificada, especialmente em amplitudes mais elevadas. Em contraste, a curva S-N do CIGRÉ mostrou-se mais conservadora, subestimando a vida útil real. As análises de falha macroscópica revelaram acúmulo de óxido de alumínio e silício no grampo. Microscopicamente, observou-se que as falhas internas, concentradas no topo dos cabos, foram mais frequentes em ensaios com amplitude variável, com a presença de marcas de fretting e dimples equiaxiais, indicando predominantemente carregamento por tração.

As descobertas deste estudo validam a eficácia do monitoramento por vibrógrafos, o que fundamenta o aprimoramento das estratégias de manutenção preditiva e do projeto de linhas de transmissão. Sugere-se a expansão da base de dados experimentais e a investigação de outras ligas para aprimorar ainda mais a compreensão e a previsão de falhas por fadiga em cabos condutores.

Palavras-chave: Fadiga por fretting. Cabos condutores. Previsão de vida. Vibrações Randômicas. Vibrógrafos.

Abstract

The growing energy demand in Brazil and the vast extension of the National Interconnected System (SIN) make the reliability of electrical power transmission lines a critical challenge. Conductor cables, high-cost and vulnerable components, are frequently subjected to aeolian vibrations that induce fatigue and, particularly, the phenomenon of fretting fatigue, leading to catastrophic failures and power supply interruptions. Facing this problem, this work aimed to predict the service life and analyze failures in electrical power conductor cables subjected to random vibrations, using experimental data obtained with a vibrograph installed on a test bench.

For this purpose, laboratory tests were performed with the CAL 838 MCM - Liga 1120 cable on the test bench of the Cables Laboratory at the University of Brasília (UnB), simulating random loading conditions through an electromechanical shaker and using the VIBREC 500 data acquisition system. Fatigue life estimations were carried out using the Palmgren-Miner rule. To this end, stress amplitudes were calculated from amplitude and frequency data collected at 123 mm from the Last Point of Contact (UPC). This data was processed by a fatigue life prediction algorithm, which applied a correction factor for the 89 mm reference point of the UPC. Additionally, fractographic analyses of the fractures were conducted using Scanning Electron Microscopy (MEV), investigating the failure mechanisms.

The results demonstrate that the life prediction model based on the Lab. Cables S-N curve showed greater accuracy compared to the experimentally verified life, especially at higher amplitudes. In contrast, the CIGRÉ S-N curve showed to be more conservative, underestimating the actual service life. Macroscopic failure analyses revealed the accumulation of aluminum and silicon oxides in the clamp. Microscopically, it was observed that internal failures, particularly concentrated at the top of the cables, were more frequent in tests with variable amplitude, with the presence of fretting marks and equiaxial dimples, predominantly indicating tensile loading.

The findings of this study validate the effectiveness of vibrograph monitoring, providing a basis for the improvement of predictive maintenance strategies and transmission line design. It is suggested to expand the experimental database and to investigate other alloys to further enhance the understanding and prediction of fatigue failures in conductor cables.

Keywords: Fretting Fatigue. Conductor Cables. Life Prediction. Random Vibrations. Vibrographs.

Lista de figuras

Figura 1.1	Composição atual e projeção, até 2027, das linhas que formam o Sistema Interligado Nacional - SIN - (ANEEL; ONS, 2024)	15
Figura 1.2	Atual extensão da rede básica de transmissão, que forma o Sistema Interligado Nacional - SIN, e projeção para 2028 - (ANEEL; ONS, 2024)	16
Figura 1.3	a) Marcas de <i>fretting</i> e quebras nos fios provocadas por trincas iniciadas nesses locais; b) Demonstrativo de quebra completa em um cabo provocado por fadiga. com adaptações(Cloutier; Leblond, 2011)	18
Figura 2.1	Nucleação das trincas em material sujeito a esforço cíclico. (Garcia <i>et al.</i> , 2000)	22
Figura 2.2	Trinca formada no processo de fadiga. (com adaptações)(Stephens <i>et al.</i> , 2000)	22
Figura 2.3	Diferentes formas de falha nos fios condutores.	23
Figura 2.4	Representação da fratura por fadiga. (Hill, 1980)	23
Figura 2.5	Formação das estrias na fratura de fadiga. (Garcia; Spim; Santos, 2012)	24
Figura 2.6	Fotografia em MEV mostrando os estágios de nucleação, propagação e fratura final em um fio de cabo condutor.	24
Figura 2.7	Oscilações de esteira induzida: sub-vão e giro do feixe. (EPRI, 2006)	26
Figura 2.8	Velocidade média anual dos ventos no Brasil. (CEPEL, 2017)	27
Figura 2.9	Esteiras de Von Kármán (Bernitsas, 2009)	28
Figura 2.10	Regime de escoamento sobre um corpo cilíndrico liso (Lienhard <i>et al.</i> , 1966)	29
Figura 2.11	Principais tipos de vibração em cabos condutores de energia elétrica. (EPRI, 2006)	29
Figura 2.12	Procedimentos empregados para obter a curva S-N: (a) método convencional e (b) método da tensão constante. com adaptações (Garcia; Spim; Santos, 2012)	31
Figura 2.13	Amplitude de tensão (S) conforme o logaritmo do número de ciclos até a falha (N) para: (a) metais ferrosos e (b) metais não ferrosos. com adaptações (Callister, 2016)	32
Figura 2.14	CIGRÉ <i>Safe Border Line</i> (CIGRE, 1979)	35
Figura 2.15	Grampo de suspensão usado em uma linha de transmissão - com modificações (Fuchs, 2015)	36
Figura 2.16	a) Vista isométrica de um cabo condutor de energia. / b) Área onde há contato entre os fios e o grampo de suspensão. - (Rocha, 2016)	37
Figura 2.17	Vista isométrica de um cabo CAL 838 MCM - Liga 1120 - (Alubar, 2023)	38
Figura 2.18	Componentes de uma linha de transmissão de energia. - (Labegalini <i>et al.</i> , 1992)	38
Figura 2.19	Formatos de grampos de suspensão mais usados. - (EPRI, 2006)	39
Figura 2.20	Áreas de contato entre o cabo e o grampo, na montagem. - com modificações (Fadel <i>et al.</i> , 2012)	40

Figura 2.21	Ilustração esquemática do problema de contato entre dois corpos cilíndricos (correspondente a dois fios de camadas diferentes) (Fadel, 2010) .	41
Figura 2.22	Marcas de <i>fretting</i> geradas pelo contato entre os fios que formam o cabo condutor - (MEV).	41
Figura 2.23	Regra de Palmgren–Miner para o acúmulo de dano linear. Adaptado de (Miner, 1945).	43
Figura 2.24	Exemplo de curva S–N, destacando ciclos de ruptura e ciclos de operação para diferentes níveis de tensão. Adaptado de (Santos, 2018).	44
Figura 2.25	Técnica de contagem de ciclos <i>Rainflow</i> : (a) método tradicional; (b) exemplo da detecção de dois ciclos completos. Adaptado de (Lima, 2023).	45
Figura 2.26	Fluxograma ilustrando a integração entre a contagem de ciclos (<i>Rainflow</i>), a curva S–N e a regra de Palmgren–Miner, na previsão da vida em fadiga.	46
Figura 2.27	Classificação de processos aleatórios (Bendat; Piersol, 1971).	47
Figura 2.28	Exemplo de processo aleatório contínuo (Newland, 1993).	48
Figura 2.29	Comparação entre carregamentos: (a) determinístico (constante) e (b) randômico (Johannesson, 1999).	48
Figura 3.1	Influência do parâmetro H/w na severidade vibracional.	51
Figura 3.2	Diagrama esquemático de montagem cabo/grampo de suspensão) (Rocha, 2016)	52
Figura 3.3	Microscópio Ótico (Aspden <i>et al.</i> , 2015)	56
Figura 3.4	Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	57
Figura 3.5	Formato das microdepressões em maneiras diferentes de carregamento (ASM, 2002)	58
Figura 4.1	Imagem ilustrativa da bancada de ensaios do Laboratório de Cabos do Grupo de Fadiga, Fraturas e Materiais (GFFM/UnB). (com adaptações de (Rocha, 2016))	60
Figura 4.2	Grampo de suspensão: a) Conjunto: grampo de suspensão monoarticulado/cabo condutor; e b) parafuso em formato <i>U</i> do grampo - com adaptações (Fadel, 2010).	61
Figura 4.3	Montagem grampo de suspensão - Vista lateral.	62
Figura 4.4	VIBREC 500 instalado no Laboratório de Cabos da UnB: (a) vista lateral com suporte de fixação; (b) vista traseira com tampa aberta, destacando os conectores; (c) posicionamento do sensor a 123 mm do último ponto de contato (UPC); (d) interface do software <i>Life 500</i> mostrando a posição do sensor LVDT, no conjunto experimental	63
Figura 4.5	Shaker eletromecânico Data Physics V400LT.	63
Figura 4.6	Equipamento de aquisição de sinais ADS 1800 - Lynx.	64
Figura 4.7	Controlador de vibração LDS LAS-200 e interface de software.	64
Figura 4.8	Fluxograma de execução das etapas experimentais.	65

Figura 4.9	Imagem mostrando: a) Imagem do equipamento experimental para detectar quebras; e b) diagrama ilustrando como medir o ângulo de rotação do condutor após a quebra de um fio. - (Lima, 2023)	66
Figura 4.10	Gráfico que possibilita a identificação das quebras dos fios - (Reinke, 2017)	67
Figura 4.11	Fluxograma do procedimento de coleta de amostras para análises de falha.	70
Figura 5.1	Curva S-N, levantada em laboratório, para o Cabo CAL 838 MCM - Liga 1120. (Lima, 2023)	74
Figura 5.2	Comparação entre a vida verificada experimentalmente (N_f) e a vida calculada (N_e), com parâmetros da Curva S-N do Lab. Cabos e CIGRÉ, em milhões de ciclos.	75
Figura 5.3	Correlação entre as classes de aceleração e variações relativas percentuais.	77
Figura 5.4	Marcas no grampo de suspensão, após o ensaio.	79
Figura 5.5	Marcas elípticas, de <i>fretting</i> , nas camadas internas.	79
Figura 5.6	Tipos de falhas encontradas nas amostras. a) tipo 45°; b) Quase Plana (QP); c) tipo V e d) tipo L.	80
Figura 5.7	Amostra do Ensaio F-08 com falha em fio interno.	81
Figura 5.8	Amostra do Ensaio F-09 com marcas de <i>fretting</i> na superfície. Evidências visuais do contato e movimento relativo entre fios, potenciais sítios de nucleação de trincas.	82
Figura 5.9	Micrografia da amostra do ensaio F-08 (2g), obtida em MEV. (a) Vista isométrica do condutor; (b) Vista superior do fio na região de topo; (c) Marca de contato fio-fio 1; (d) Marca de contato fio-fio 2.	83
Figura 5.10	Micrografias da amostra 1 do ensaio F-08 (2g), obtidas em MEV. (a) Vista superior da superfície de ruptura com zonas de propagação da trinca; (b) Marcas de praia; (c) Marca de contato fio-fio; (d) Dimples; (e) Zonas de propagação da trinca.	84
Figura 5.11	Micrografias do ensaio F-09 (1,25g), obtidas em MEV. (a) Zona de escorregamento do contato fio/fio; (b) Zona de adesão no contato fio/fio; (c) Combinação de zonas de escorregamento e adesão.	85
Figura 5.12	Micrografias do ensaio F-09 (1,25g), obtidas em MEV – Camada Externa. (a) Zona de escorregamento (tracejado vermelho) no contato fio/fio; (b) Zona de escorregamento (vermelho) e zona de adesão (amarelo).	85
Figura 5.13	Micrografias do ensaio F-09 (1,25g), obtidas em MEV – Camada Interna. (a) Zona de escorregamento e adesão no contato fio/fio; (b) Zona de adesão evidenciada.	86
Figura 5.14	Micrografias do ensaio F-10 (1,75g) – Formato de fratura tipo V. (a) Corpo de prova 1, seta amarela indicando início da trinca 1; (b) Corpo de prova 1, seta amarela indicando início da trinca 2; (c) Corpo de prova 2, vista frontal; (d) Corpo de prova 2, seta amarela indicando início da trinca.	87

Figura 5.15 Micrografias do ensaio F-10 (1,75g) – Dimples característicos de fratura dúctil. (a) Corpo de prova 1; (b) Corpo de prova 2. 88

Lista de tabelas

Tabela 1.1	Extensão das Linhas de Transmissão do SIN (Km) até 2023 e com Horizonte 2028, (com adaptações) (EPE, 2024)	17
Tabela 2.1	Características gerais e condições favoráveis dos tipos de vibração em cabos condutores de energia elétrica. Adaptado de (EPRI, 2006)	30
Tabela 2.2	Danos característicos dos tipos de vibração em cabos condutores de energia elétrica. Adaptado de (EPRI, 2006)	30
Tabela 2.3	Constantes CIGRÈ Safe Border Line (CSBL) (CIGRE, 1985)	35
Tabela 2.4	Principais tipos de cabos condutores de energia. (Fadel, 2010)	37
Tabela 3.1	Resumo das referências normativas empregadas.	50
Tabela 4.1	Propriedades técnicas do CAL/AAAC 838 MCM.	61
Tabela 5.1	Parâmetros dos Períodos de Análises dos Ensaios	73
Tabela 5.2	Estimativas das Previsões de Vida à Fadiga - cabo CAL 838 MCM Liga 1120.	75
Tabela 5.3	Variações relativas entre resultados experimentais e previsões de vida útil	77
Tabela 5.4	Falhas encontradas nos Ensaios de Fadiga.	81
Tabela 5.5	Síntese das falhas observadas nos ensaios	82

Lista de abreviaturas e siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTM	American Society for Testing and Materials
EDS	Everyday Stress
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPRI	Electric Power Research Institute
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
km	Quilômetro
kV	Quilovolt
mm	milímetro
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
P-S	Poffenberger-Swart
SIN	Sistema Interligado Nacional

Lista de símbolos

Símbolos romanos

β	ângulo de vibração do condutor
σ_a	tensão alternada ou amplitude de tensão
<i>Hz</i>	Hertz
<i>m</i>	metro
<i>s</i>	segundo
<i>D</i>	diâmetro do condutor
F_s	frequência de desprendimento dos vórtices da esteira
<i>K</i>	constante de Poffenberger-Swart
<i>Re</i>	número de Reynolds
<i>U</i>	velocidade de escoamento livre do ar
<i>v</i>	viscosidade cinemática do fluido

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	CENÁRIO ENERGÉTICO NACIONAL	15
1.2	VIBRAÇÕES EÓLICAS E MECANISMOS DE FADIGAS EM CONDUTORES	17
1.3	ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO E LACUNAS NA LITERATURA	18
1.4	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	19
1.5	OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS	19
1.6	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	20
2	FUNDAMENTOS DA FADIGA EM CABOS CONDUTORES	21
2.1	CONCEITOS GERAIS DE FADIGA DE MATERIAIS	21
2.2	OSCILAÇÕES EM CABOS CONDUTORES AÉREOS DE ENERGIA ELÉTRICA	25
2.2.1	TIPOS DE VIBRAÇÕES EM CABOS CONDUTORES	25
2.3	CURVA S-N E SEUS PARÂMETROS	31
2.3.1	FATORES QUE INFLUENCIAM A CURVA S-N	33
2.3.2	CIGRÉ SAFE BORDER LINE - CSBL	34
2.4	FATORES QUE INFLUENCIAM A FADIGA	35
2.4.1	FADIGA POR <i>FRETTING</i>	40
2.4.2	CARREGAMENTOS MECÂNICOS	42
2.5	TEORIA DO DANO CUMULATIVO E MÉTODO DE CONTAGEM DE CICLOS	42
2.5.1	REGRA DE PALMGREN-MINER	42
2.5.2	MÉTODO DE CONTAGEM DE CICLOS RAINFLOW	45
2.6	INTRODUÇÃO AO CARREGAMENTO RANDÔMICO	46
3	NORMAS, PREVISÕES E INSTRUMENTAÇÃO APLICADA	50
3.1	NORMAS E CRITÉRIOS DE PROJETO	50
3.2	ABORDAGENS PRÁTICAS DE PREVISÃO DE VIDA ÚTIL	51
3.2.1	PARÂMETRO H/w	51
3.2.2	POFFENBERGER-SWART	52
3.3	ANÁLISE DE FALHAS	54
3.3.1	SELEÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS	55
3.3.2	ANÁLISE MACROSCÓPICA	55
3.3.3	ANÁLISE MICROSCÓPICA	56
3.3.4	MICROSCÓPIO ÓTICO	56
3.3.5	MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA	56
4	METODOLOGIA: MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	59
4.1	VISÃO GERAL DA METODOLOGIA ADOTADA	59

4.2	BANCADA EXPERIMENTAL E COMPONENTES UTILIZADOS	59
4.2.1	CABO CONDUTOR	60
4.2.2	FIXAÇÃO DO GRAMPO DE SUSPENSÃO	61
4.2.3	INSTALAÇÃO DO SUPORTE E DO VIBREC	62
4.2.4	DISPOSITIVOS DE EXCITAÇÃO E MEDIÇÃO	63
4.2.5	AQUISIÇÃO E CONTROLE DE DADOS	64
4.3	ARRANJO EXPERIMENTAL E PROTOCOLO DE ENSAIO	64
4.3.1	AQUISIÇÃO DE DADOS E INSTRUMENTAÇÃO	65
4.3.2	INSTALAÇÃO DE SENSORES	66
4.3.3	CONFIGURAÇÃO DO VIBRÓGRAFO	67
4.4	AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS	68
4.5	OBSERVAÇÕES COMPLEMENTARES	68
4.6	PROCEDIMENTO DE COLETA DE AMOSTRAS PARA ANÁLISE DE FALHA	69
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
5.1	INTRODUÇÃO GERAL AOS RESULTADOS	71
5.2	RESULTADOS DA PREVISÃO DE VIDA À FADIGA	71
5.2.1	DESCRIÇÃO DO ALGORITMO DE PREVISÃO DE VIDA	71
5.2.2	RESULTADOS NUMÉRICOS E GRÁFICOS	73
5.3	ANÁLISE DE FALHAS	78
5.3.1	ANÁLISE DE FALHA MICROSCÓPICA	83
5.3.2	ANÁLISE E DISCUSSÃO DA FALHA POR FADIGA SOB CARRE- GAMENTO ALEATÓRIO	88
5.4	FECHAMENTO ANALÍTICO	89
6	CONCLUSÕES	90
6.0.1	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	91
	Referências	92

A relação entre a grande extensão territorial do Brasil, sua progressiva demanda por energia elétrica ano após ano, e as grandes distâncias entre os centros geradores e os consumidores de energia, fazem com que o sistema de transmissão elétrica do Brasil seja apontado como um dos maiores do mundo (Rocha, 2016).

Devido ao aumento do consumo de energia elétrica no Brasil, a área de geração e distribuição de energia tem recebido substanciais investimentos. Baseado nos dados do Relatório Anual (2024) do Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, o SIN é constituído por um pouco mais de 171 mil quilômetros de linhas de transmissão, tendo como projeção um aumento de mais de 17% até o ano de 2028, que totalizará mais de 200 mil quilômetros, conforme Figura 1.2.

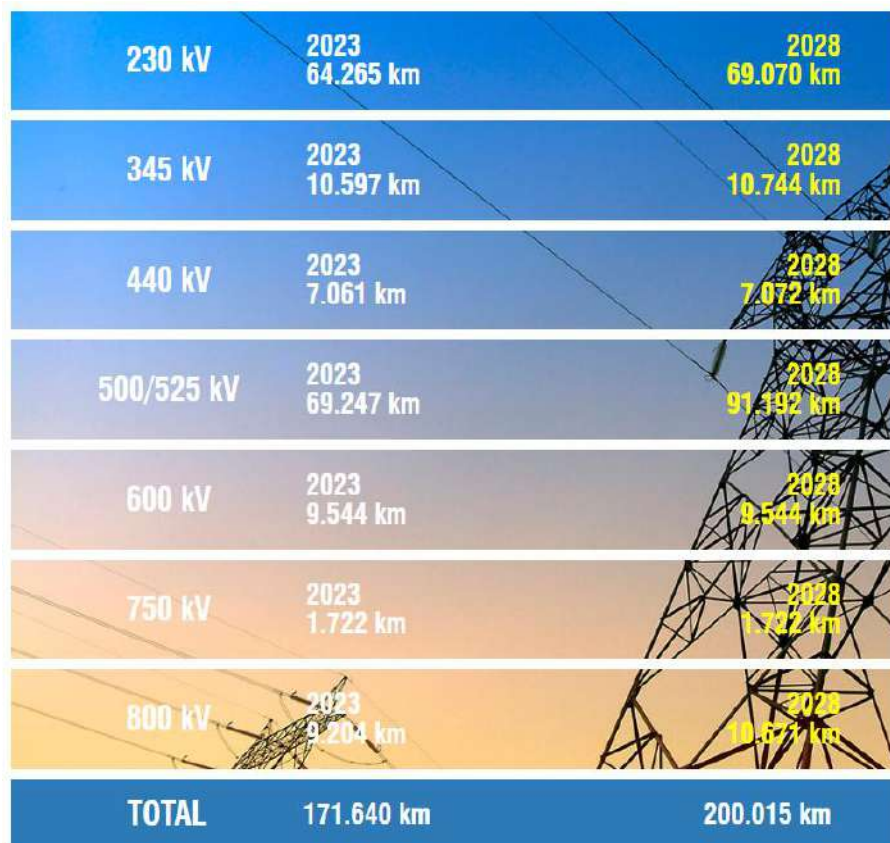


Figura 1.2 – Atual extensão da rede básica de transmissão, que forma o Sistema Interligado Nacional - SIN, e projeção para 2028 - (ANEEL; ONS, 2024)

Essa grande expansão deve-se ao fato de que grande parte das usinas hidrelétricas está situada longe dos grandes centros consumidores, necessitando assim de grandes extensões de linhas de transmissão (EPE, 2024), sendo considerada uma das maiores redes de transmissão de energia elétrica do mundo. Tal fato e evolução das linhas de transmissão, nos últimos cinco anos, encontra-se representado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Extensão das Linhas de Transmissão do SIN (Km) até 2023 e com Horizonte 2028, (com adaptações) (EPE, 2024)

FAIXA DE TENSÃO	2019	2020	2021	2022	2023	(2028)
230 KV	54.522	57.030	58.747	61.251	64.263	69.070
345 kV	9.523	9.553	9.562	9.721	10.597	10.744
440 kV	6.911	6.909	7.023	7.061	7.061	7.072
500/525 kV	51.319	54.584	61.022	66.979	69.247	91.192
600 kV	9.544	9.544	9.544	9.544	9.544	9.544
765 kV	1.722	1.722	1.722	1.722	1.722	1.722
800 kV	9.204	9.204	9.204	9.204	9.204	10.671
Total:	142.745	148.546	156.824	165.482	171.638	200.015

Tendo em vista a importância e robustez desse sistema integrado, identifica-se a importância de averiguar as chances de aumento da vida útil das linhas de transmissão elétrica existentes para suprir a demanda de fornecimento de energia de maneira ininterrupta, ressaltando que o cabo condutor destaca-se como o componente mais importante dessa rede de transmissão, pois além de importante papel desempenhado, corresponde a 40% dos custos de investimentos em construção de linhas de transmissão, segundo (Frontin *et al.*, 2010).

1.2 VIBRAÇÕES EÓLICAS E MECANISMOS DE FADIGAS EM CONDUTORES

Os cabos ficam expostos a dois tipos predominantes de cargas mecânicas: carga estática devido à força de tração, habitualmente equivale a 20% da carga máxima que o cabo suporta, e cargas dinâmicas resultantes da oscilação provocada pela ação dos ventos nas linhas de transmissão suspensas. A oscilação gerada pelo estímulo eólico submete o cabo a tensões repetitivas de flexão que, gradativamente, desgastam o material por meio de surgimento e propagação de trincas até que ocorra a ruptura. Esse padrão de falha é identificado como fadiga, porém, o processo de falha nos cabos é ainda mais complicado, pois abrange a manifestação de desgaste por fricção, conhecido como *fretting*.

O fenômeno de *fretting* surge quando há um movimento relativo ou repetitivo e de baixa amplitude entre superfícies que estão em contato. No contexto dos cabos condutores, as áreas que experimentam esse movimento repetitivo de atrito podem ser encontradas entre os fios que constituem o cabo, ou entre os fios e os componentes que estão fixados ao condutor ou que restringem seu movimento, como os suportes de suspensão e os espaçadores. O *fretting* induz danos superficiais nos fios do cabo, chegando na formação de trincas adicionais e acelerando o processo de fadiga. Conseqüentemente, o mecanismo de falha é identificado como fadiga por *fretting*, uma vez que esse fenômeno intensifica e acelera os efeitos da fadiga.

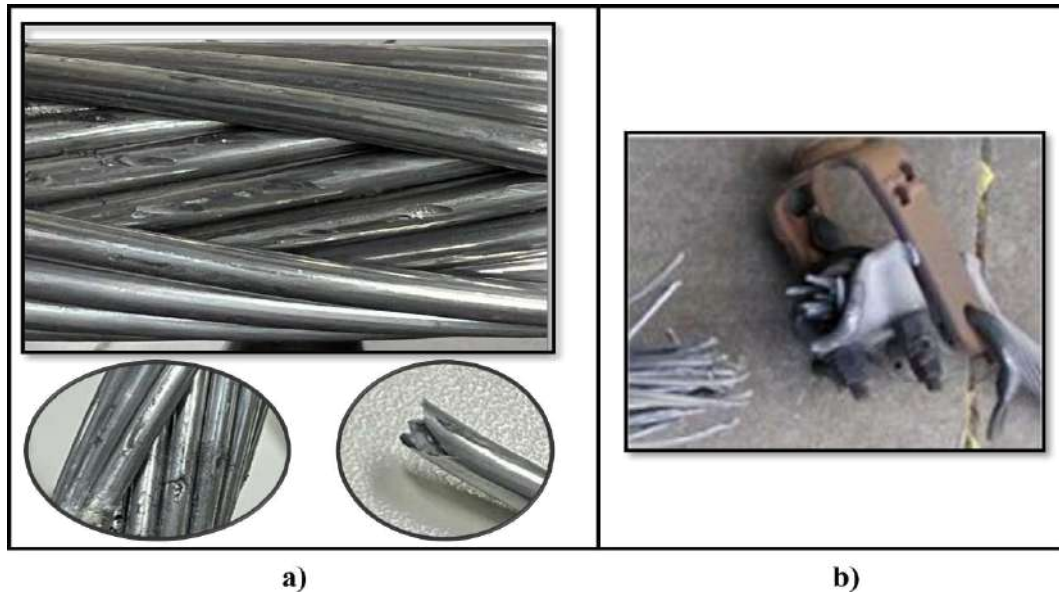


Figura 1.3 – a) Marcas de *fretting* e quebras nos fios provocadas por trincas iniciadas nesses locais; b) Demonstrativo de quebra completa em um cabo provocado por fadiga. com adaptações(Cloutier; Leblond, 2011)

O mecanismo de fadiga resultante do *fretting* ocasiona repetidas quebras nos filamentos dos cabos, levando à ruptura total do cabo, caracterizando uma falha de grandes proporções (Figura 1.3-b). Esse evento, por sua vez, desencadeia a interrupção do fluxo de energia elétrica e acarreta consideráveis danos econômicos, como o ocorrido em 2001, quando cerca de 67 milhões de habitantes das áreas mais produtivas do país ficaram sem o fornecimento de energia por muitas horas, causado por uma quebra por fadiga em uma linha de transmissão do estado de São Paulo (Frontin *et al.*, 2010).

1.3 ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO E LACUNAS NA LITERATURA

Diversos estudos nacionais e internacionais investigaram o fenômeno da fadiga em cabos submetidos à ação de vibrações eólicas. No entanto, grande parte dessas pesquisas apresenta abordagens limitadas ao comportamento de cabos específicos ou condições simplificadas de carregamento.

O estado da arte evidencia que:

- A maioria dos estudos ainda adota análises experimentais sob carregamentos de amplitude constante, enquanto condições de campo envolvem amplitudes variáveis;
- Há lacunas quanto à correlação entre os modos de fratura observados e os parâmetros de vibração medidos experimentalmente;

- Poucos trabalhos abordam técnicas de monitoramento contínuo, capazes de prever a vida útil em serviço a partir de dados de vibração coletados em campo.

Dessa forma, verifica-se a necessidade de ampliar o entendimento do fenômeno, correlacionando resultados experimentais, análises fractográficas e métodos preditivos.

1.4 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

A relevância deste estudo está vinculada à importância estratégica do SIN para o desenvolvimento econômico e social do Brasil. A avaliação da vida em fadiga de cabos condutores sob vibrações eólicas contribui para:

- aumentar a confiabilidade das linhas de transmissão de energia elétrica;
- reduzir custos de manutenção e substituição de cabos;
- fornecer subsídios técnicos para normas e diretrizes de operação.

Além disso, a pesquisa busca preencher lacunas na literatura científica ao propor uma abordagem experimental e analítica que integra o monitoramento contínuo das vibrações com a análise fractográfica dos fios rompidos. Enquanto a fractografia descreve os mecanismos de falha e o histórico do processo de fratura, o monitoramento fornece dados de carregamento em serviço, e os modelos de previsão de vida útil permitem quantificar a durabilidade remanescente. A correlação entre esses elementos possibilita compreender não apenas como a ruptura ocorreu, mas também quais condições a antecederam e como elas afetam a vida em fadiga dos cabos.

1.5 OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS

Diante da problemática apresentada, este trabalho tem como objetivo geral prever a vida útil e analisar as falhas em cabos condutores de energia elétrica submetidos a vibrações randômicas, a partir de dados experimentais obtidos com um vibrógrafo instalado em bancada de ensaio no Laboratório de Cabos da UnB. Essa análise será realizada a partir de um algoritmo de previsão de vida à fadiga, empregando a matriz de frequência e de deslocamento (pico a pico) registrados no ponto 123 mm, distante do último ponto de contato (UPC), do cabo CAL 838 – MCM – Liga 1120, através de ensaios randômicos. Com isso, espera-se um planejamento mais eficaz de manutenção e substituição, aumentando a confiabilidade e a segurança das redes elétricas.

Além disso, será feita uma comparação detalhada entre os resultados obtidos com os dados da Curva S-N do CIGRÉ e do Lab. Cabos. Esse comparativo visa aprofundar a compreensão das complexidades das vibrações nos cabos condutores e aprimorar a capacidade de prever danos causados pela fadiga, contribuindo assim para o avanço do conhecimento nessa área de pesquisa.

Para chegar ao resultado pretendido no objetivo geral, é possível evidenciar os seguintes objetivos específicos que estão inseridos no propósito do trabalho:

- **A)** Realizar uma revisão bibliográfica aprofundada sobre os mecanismos de falha de fadiga por *fretting* em cabos condutores de energia elétrica;
- **B)** Realizar ensaios experimentais com amplitudes variáveis de flexão, simulando condições randômicas de carregamento mecânico, utilizando o sistema de aquisição de dados do VIBREC;
- **C)** Conduzir ensaios de fadiga até a falha, realizando análise de falhas por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);
- **D)** Aplicar um algoritmo de previsão de vida útil à fadiga, comparando os resultados experimentais ($N_f^{10^6}$) com os valores estimados ($N_e^{10^6}$), com base em curvas S-N obtidas do laboratório e das normas do CIGRÉ.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

- **Capítulo 1:** Introdução, abrangendo panorama da transmissão, problemática da fadiga, estado da arte, justificativa, objetivos e estrutura.
- **Capítulo 2:** Revisão da literatura, abordando fundamentos teóricos, comportamento em fadiga e métodos de monitoramento.
- **Capítulo 3:** Normas aplicáveis, instrumentação e técnicas de ensaio.
- **Capítulo 4:** Metodologia experimental.
- **Capítulo 5:** Resultados obtidos e discussões.
- **Capítulo 6:** Conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTOS DA FADIGA EM CABOS CONDUTORES

Neste capítulo são discutidos os conceitos fundamentais que embasam a pesquisa, incluindo os princípios da fadiga em materiais metálicos, os mecanismos de degradação por vibração eólica e as metodologias clássicas de previsão de vida em fadiga. Também são revisados estudos da literatura e critérios técnicos consolidados, que servirão de base para as análises desenvolvidas.

2.1 CONCEITOS GERAIS DE FADIGA DE MATERIAIS

De acordo com a norma da *American Society for Testing and Materials (ASTM)* (ASTM, 1823), fadiga é definida como um processo progressivo e localizado de alteração estrutural que ocorre em materiais submetidos a tensões ou deformações dinâmicas, resultando na formação e propagação de trincas até a fratura completa após determinado número de ciclos.

A fadiga é um fenômeno de grande relevância, pois responde por aproximadamente 90% das falhas em componentes metálicos (Callister, 2016). Essas falhas são particularmente críticas, uma vez que ocorrem de forma repentina, sem sinais prévios, e em níveis de tensão inferiores ao limite de resistência à tração do material.

Embora os conceitos sejam gerais e aplicáveis a diferentes componentes metálicos, eles são especialmente importantes no estudo de cabos condutores em linhas de transmissão, onde a fadiga está diretamente associada às vibrações induzidas pelo vento. Para compreender melhor esses casos específicos, é necessário apresentar a sequência de estágios que caracteriza o processo de fadiga nos materiais.

O processo de fadiga pode ser dividido em três estágios principais: (1) *nucleação da trinca*, (2) *propagação da trinca* e (3) *ruptura final*. Essa divisão é essencial para relacionar a evolução do dano nos materiais com as falhas observadas em fios de cabos condutores.

- **Estágio 1: Nucleação da trinca**

As trincas nucleadas são imperceptíveis a olho nu, com extensão da ordem de poucos grãos, surgindo em regiões onde as tensões locais atingem valores máximos (Shigley; Mischke, 2005). Elas se iniciam geralmente na superfície do componente, em pontos de concentração de tensão, como inclusões, fronteiras de grão, defeitos internos e bandas de deslizamento.

Na Figura 2.1 é ilustrada a nucleação de trincas em materiais submetidos a esforços cíclicos. Nos fios de cabos condutores, essa nucleação ocorre, com frequência, nos pontos de

contato dentro do grampo de suspensão, onde há elevadas tensões de contato associadas ao *fretting*.

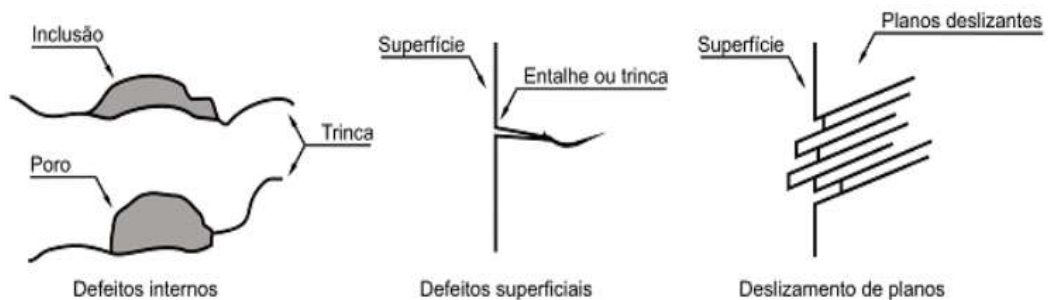


Figura 2.1 – Nucleação das trincas em material sujeito a esforço cíclico. (Garcia *et al.*, 2000)

• Estágio 2: Propagação da Trinca

No segundo estágio, as trincas tornam-se macroscópicas (Shigley; Mischke, 2005). A cada ciclo de tensão, a extremidade da trinca sofre alterações que impulsionam sua propagação, geralmente em direção perpendicular à tensão de tração aplicada (Callister, 2016; Stephens *et al.*, 2000).

A Figura 2.2 mostra uma trinca desenvolvida durante o processo de fadiga, destacando as diferenças em relação ao estágio inicial, especialmente quanto ao comprimento e ao mecanismo predominante de propagação: tensão cisalhante no estágio 1 e tensão normal no estágio 2.

Nos cabos condutores, esse estágio é caracterizado pela propagação gradual da trinca ao longo dos fios, podendo ser identificada em análises fractográficas.

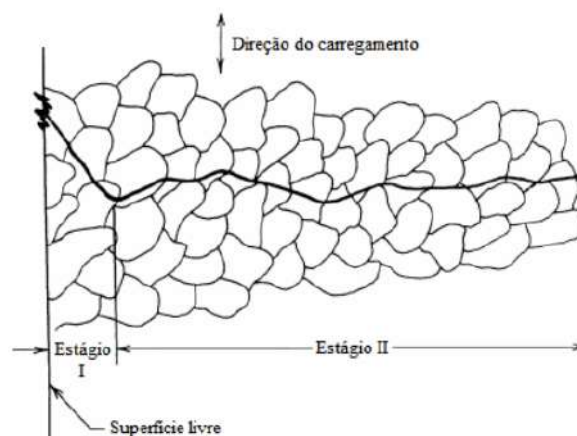


Figura 2.2 – Trinca formada no processo de fadiga. (com adaptações) (Stephens *et al.*, 2000)

• Estágio 3: Fratura Final

Quando a trinca atinge um tamanho crítico, o material remanescente não é capaz de suportar as cargas, levando à ruptura súbita. Essa fratura por fadiga assemelha-se à falha em

materiais frágeis, ocorrendo de forma abrupta e sem sinais prévios (Garcia; Spim; Santos, 2012).

A Figura 2.3 apresenta diferentes formas de falha nos fios de cabos condutores de energia elétrica, relacionadas à fratura final.

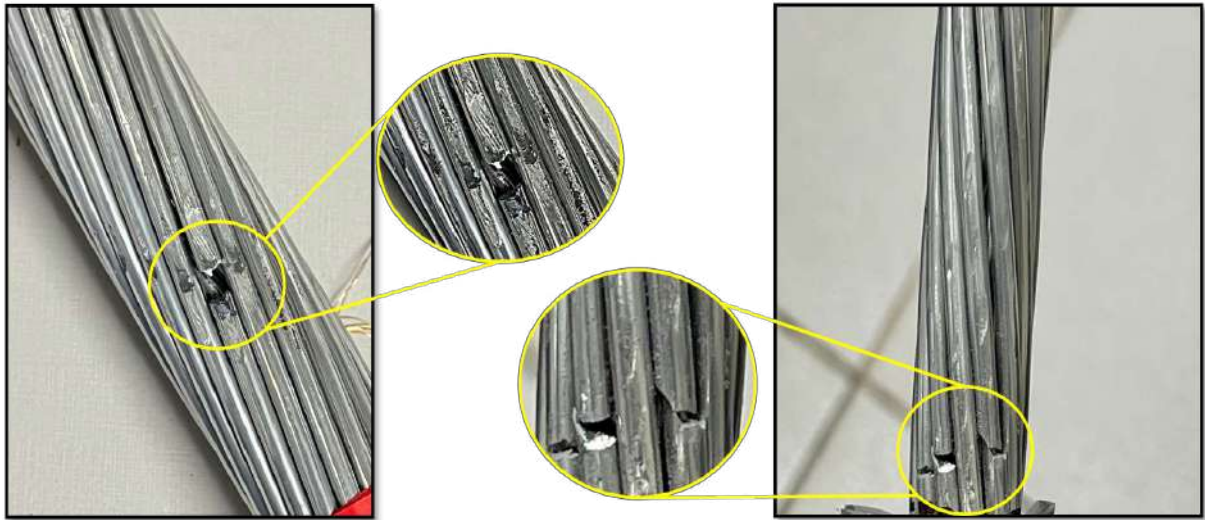


Figura 2.3 – Diferentes formas de falha nos fios condutores.

Segundo Garcia (Garcia *et al.*, 2000), a propagação da trinca em fadiga deixa indícios característicos na macroestrutura da fratura, conhecidos como marcas de praia. Essas marcas aparecem como semicírculos concêntricos, permitindo a identificação do ponto inicial da falha. A Figura 2.4 exemplifica a superfície fraturada no processo de fadiga.

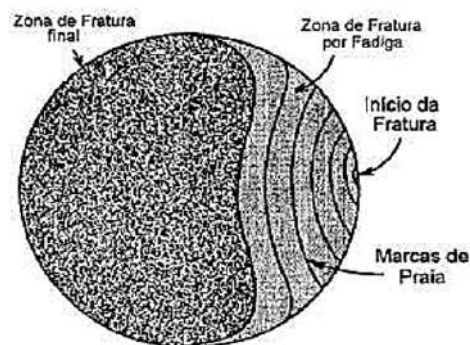


Figura 2.4 – Representação da fratura por fadiga. (Hill, 1980)

As marcas de praia refletem as condições de carregamento: faixas claras estão associadas a menores tensões, enquanto faixas escuras indicam níveis mais elevados (Garcia; Spim; Santos, 2012). Dentro delas, podem ser observadas estrias microscópicas, visíveis apenas em microscópio eletrônico, que representam o avanço da trinca em cada ciclo de tensão (Callister, 2016). A Figura 2.5 ilustra esse fenômeno.

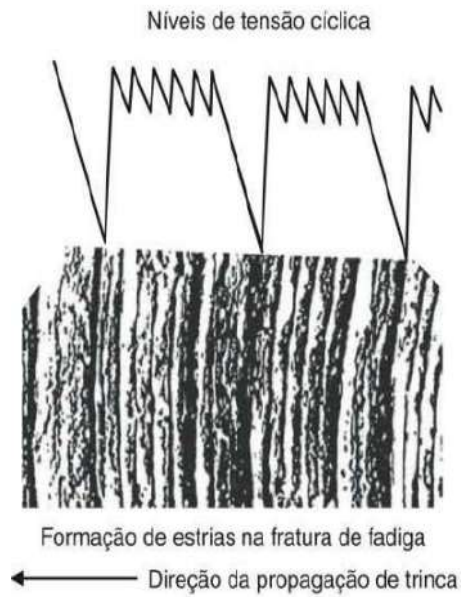


Figura 2.5 – Formação das estrias na fratura de fadiga. (Garcia; Spim; Santos, 2012)

Ao atingir o comprimento crítico, a trinca leva ao rompimento súbito do componente. A Figura 2.6 apresenta a análise em microscopia eletrônica de varredura (MEV) de um fio de cabo condutor, evidenciando as diferentes regiões associadas aos estágios de nucleação, propagação e fratura final.

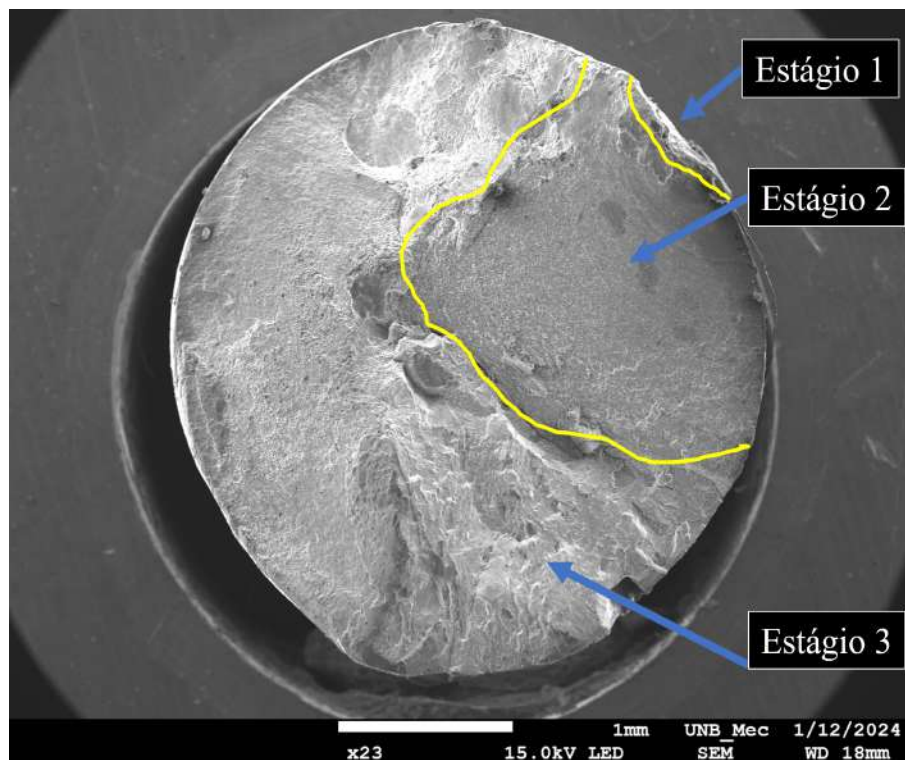


Figura 2.6 – Fotografia em MEV mostrando os estágios de nucleação, propagação e fratura final em um fio de cabo condutor.

De forma geral, a falha por fadiga em cabos condutores ocorre em regiões de concentração de tensões, como descontinuidades geométricas, marcas superficiais de fabricação, em pontos de contato submetidos a pressões elevadas, como no caso do *fretting*, Subseção 2.4.1. Esses aspectos são determinantes para a vida útil de cabos submetidos a vibrações eólicas e constituem a base para os estudos desenvolvidos neste trabalho.

2.2 OSCILAÇÕES EM CABOS CONDUTORES AÉREOS DE ENERGIA ELÉTRICA

A fadiga em cabos condutores ocorre principalmente em razão das vibrações induzidas pelo vento, que provocam flexões repetidas e geram tensões cíclicas nos fios externos, desencadeando o processo de fadiga. Esses esforços, ao longo do tempo, podem iniciar e propagar trincas até a ruptura do material. Assim, compreender os mecanismos de oscilação é essencial para evitar falhas prematuras, seja pelo correto projeto da linha ou pela adoção de dispositivos mitigadores, como *dampers* e espaçadores.

2.2.1 TIPOS DE VIBRAÇÕES EM CABOS CONDUTORES

Os ventos podem induzir três tipos principais de oscilações em cabos condutores. Essas oscilações podem ser classificadas de acordo com as trajetórias de movimento dos condutores, com as faixas de amplitude e frequência associadas, ou ainda pelo mecanismo físico de excitação provocado pelo escoamento do ar. Assim, os movimentos mais relevantes são tradicionalmente descritos na literatura como oscilações induzidas por galope, oscilação de esteira e vibração eólica (CIGRE, 1979).

- **Galope:**

É uma forma de vibração que ocorre em condutores simples ou em feixes, geralmente associado à presença de gelo. Manifesta-se, com maior frequência, quando ventos moderados a fortes incidem lateralmente sobre cabos recobertos por uma camada de gelo assimétrica, a qual modifica o perfil aerodinâmico e favorece a instabilidade. Suas principais características incluem ocorrência sob ventos de maior intensidade (aproximadamente entre 6 e 25 m/s), frequência muito baixa (tipicamente inferior a 1 Hz) e amplitudes elevadas, que podem atingir metros. O fenômeno pode ser iniciado tanto pela alteração da seção transversal provocada pelo gelo quanto, na ausência dele, em condutores de grande diâmetro (acima de 40 mm), quando a direção do vento coincide com a orientação dos traços superficiais dos fios. O galope representa um risco elevado, podendo causar ruptura abrupta do cabo ou descargas elétricas disruptivas (*flashover*), caso os condutores se aproximem excessivamente durante a oscilação. No Brasil, é considerado raro, sendo registrado apenas em situações pontuais, especialmente em linhas de transmissão que utilizam esferas de sinalização.

- **Oscilação de esteira induzida:**

A oscilação de esteira induzida ocorre em linhas com condutores agrupados em feixe, quando o cabo à montante perturba o escoamento do vento, formando vórtices que excitam o cabo à jusante. Esse fenômeno pode se manifestar de duas formas principais:

1. **Oscilação de sub-vão:** caracterizada pelo movimento descoordenado dos cabos individuais do feixe;
2. **Oscilação de giro:** ocorre quando todo o feixe se movimenta como um único corpo, girando em torno de seu eixo.

Esses movimentos podem gerar esforços adicionais nos espaçadores e nos pontos de fixação, acelerando o desgaste mecânico e aumentando as solicitações sobre os condutores.

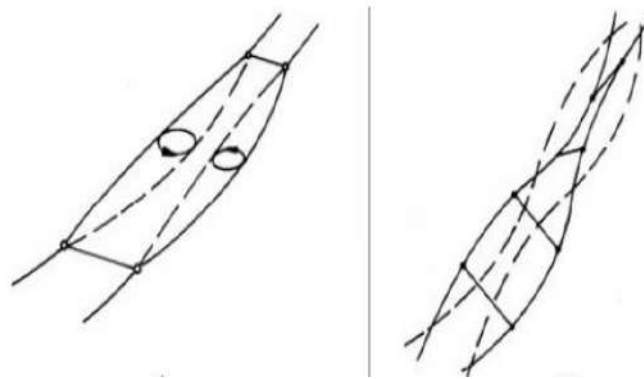


Figura 2.7 – Oscilações de esteira induzida: sub-vão e giro do feixe. (EPRI, 2006)

- **Vibração Eólica:**

Esse fenômeno ocorre sob ventos de baixa intensidade (1 a 7 m/s), produzindo vibrações de alta frequência (3 a 150 Hz) e de pequena amplitude, normalmente inferiores ao diâmetro do condutor. Embora discretas, essas vibrações são particularmente críticas, pois expõem os cabos a milhões de ciclos de flexão ao longo da vida operacional, tornando-se o principal agente responsável pela fadiga.

A Figura 2.8 ilustra a velocidade média dos ventos no Brasil, que se concentra entre 3,5 e 4 m/s — exatamente na faixa mais crítica para a ocorrência desse tipo de vibração. Por essa razão, a vibração eólica deve ser considerada com atenção especial no dimensionamento e no monitoramento das linhas de transmissão.

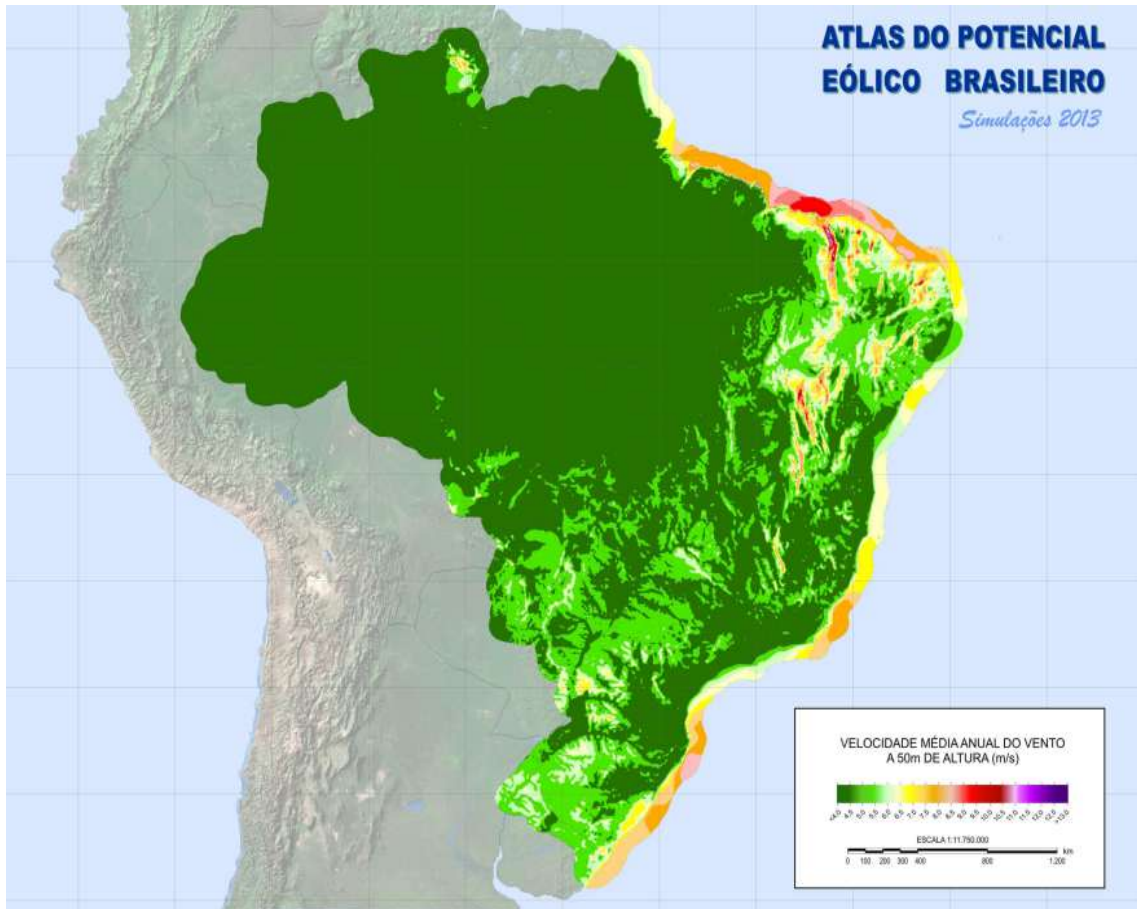


Figura 2.8 – Velocidade média anual dos ventos no Brasil. (CEPEL, 2017)

O mecanismo físico associado está relacionado ao desprendimento periódico de vórtices provocados pelo vento nas regiões superior e inferior do condutor. Esse processo gera um desequilíbrio de pressões aerodinâmicas, induzindo oscilações perpendiculares ao escoamento do ar. Tais oscilações originam as chamadas *esteiras de von Kármán*, caracterizadas pela repetição regular dos vórtices, conforme mostrado na Figura 2.9. A manutenção desse padrão alternado é sustentada pela continuidade do escoamento, podendo representar um fator decisivo na redução da vida útil dos cabos (CIGRE, 1979).



Figura 2.9 – Esteiras de Von Kármán (Bernitsas, 2009)

Para analisar a formação de vórtices, duas propriedades são de extrema importância: o número de Reynolds - (Eq. 2.1) - e o número de Strouhal - (Eq. 2.2) . O aparecimento de esteiras de vórtices está associado às peculiaridades do escoamento que o fluido desenvolve (laminar, turbulento ou transiente), ao qual desempenha um regime (comportamento) que pode ser representado pelo número adimensional de Reynolds, que é definido pela relação entre as forças inerciais e as forças viscosas no escoamento do material.

$$Re = \frac{U \cdot D_c}{\nu} = \frac{\text{efeitos inerciais}}{\text{efeitos viscosos}} \quad (2.1)$$

Onde: **Re** é o número de Reynolds; **U** é a velocidade de escoamento livre do ar, (m/s); **ν** representa a viscosidade cinemática do fluido ($1,51 \cdot 10^{-5} m^2/s$ para o ar a 20°C) e **D_c** é o diâmetro do condutor.

O número de Strouhal é descrito como:

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

de modo que f_s indica a frequência de despreendimento dos vórtices da esteira, em Hz, e **U** a velocidade de escoamento. Estudos experimentais possibilitam traçar uma relação entre os números de Strouhal e Reynolds para determinado perfil de escoamento. A Figura 2.10 demonstra os diferentes regimes de escoamento e a formação dos vórtices por meio de um material cilíndrico.

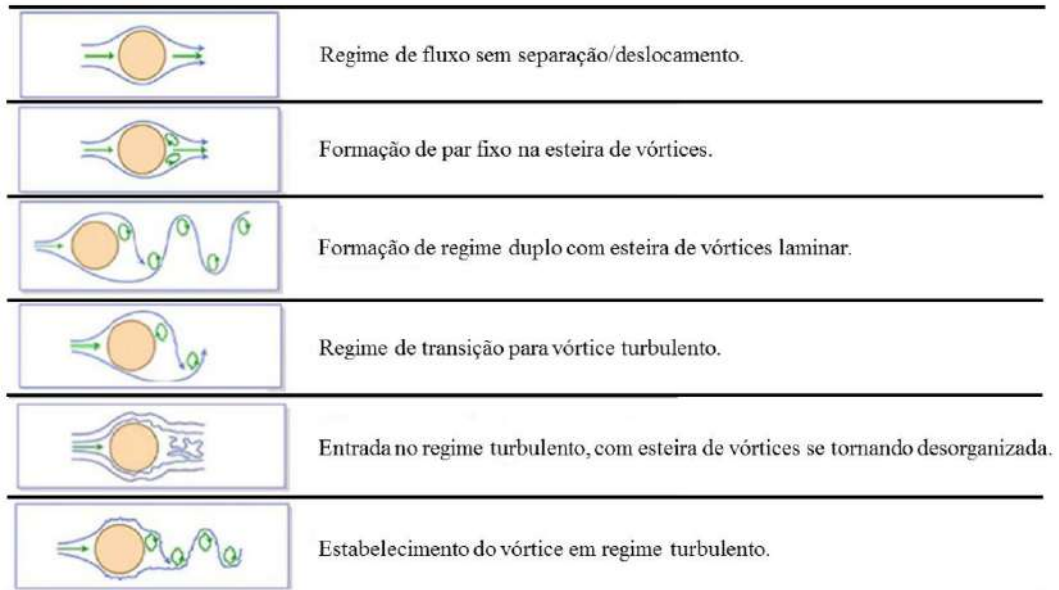


Figura 2.10 – Regime de escoamento sobre um corpo cilíndrico liso (Lienhard *et al.*, 1966)

A análise da fadiga em cabos condutores, apresentada na Seção 2, mostra que o surgimento de trincas está diretamente ligado às solicitações cíclicas geradas pelo vento. Três fenômenos principais se destacam: **vibração eólica**, **galope** e **oscilação de esteira**, cada um com frequência, amplitude, condições de ocorrência e danos característicos, fundamentais para compreender os mecanismos de falha em linhas de transmissão.

A Figura 2.11 ilustra esses fenômenos. Para facilitar a leitura, a Tabela 2.1 apresenta suas características gerais e condições de ocorrência, enquanto a Tabela 2.2 reúne os aspectos de dano associados.

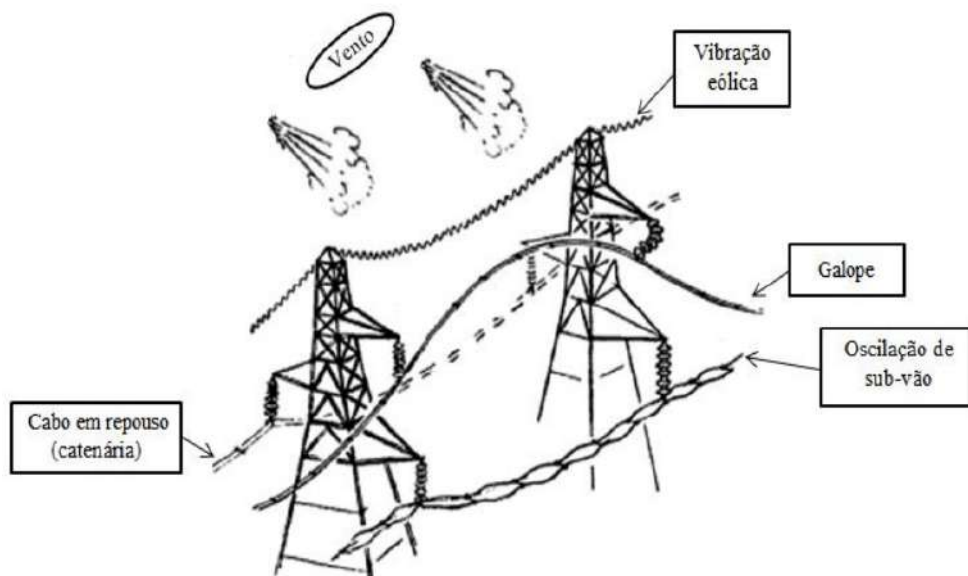


Figura 2.11 – Principais tipos de vibração em cabos condutores de energia elétrica. (EPRI, 2006)

Tabela 2.1 – Características gerais e condições favoráveis dos tipos de vibração em cabos condutores de energia elétrica. Adaptado de (EPRI, 2006)

Características / Condições	Vibração eólica	Galope	Oscilação de esteira induzida
Tipos de linhas de transmissão afetadas	Todos	Todos	Limitado às linhas com condutores agrupados em feixe
Faixa de frequência (Hz)	3 – 150	0,08 – 3	0,15 – 10
Faixa de amplitude (pico-a-pico) de vibração (em diâmetros do condutor)	0,01 – 1	5 – 300	Oscilação de corpo: 0,5 – 80 Oscilação sub-vão: 0,5 – 20
Condições favoráveis	Vibração eólica	Galope	Oscilação de esteira induzida
Característica do vento	Estável	Estável	Estável
Velocidade do vento (m/s)	1 – 7	7 – 18	4 – 18
Condição de superfície do condutor	Livre ou coberta com camada uniforme de gelo	Coberta por camada assimétrica de gelo	Livre e seca
Condições de projeto que afetam o movimento	Tração do cabo, auto amortecimento, uso de <i>dampers</i> e armadura (<i>armor rods</i>)	Razão entre as frequências naturais vertical e de torção, ângulo de mergulho e condições de suporte	Separação dos subcondutores, inclinação do feixe, arranjo dos subcondutores e distância entre espaçadores

Tabela 2.2 – Danos característicos dos tipos de vibração em cabos condutores de energia elétrica. Adaptado de (EPRI, 2006)

Aspectos de dano	Vibração eólica	Galope	Oscilação de esteira induzida
Tempo para dano severo se desenvolver	3 meses a 20 anos ou mais	1 a 48 horas	1 mês a 8 anos ou mais
Causas diretas do dano	Fadiga do metal devido à tensão normal cíclica de flexão	Elevados carregamentos dinâmicos	Impacto dos cabos ou alto desgaste nos pontos de fixação
Componentes da linha mais afetados	Cabos condutores e cabos para-raios	Condutores, elementos de fixação, isoladores e estrutura da torre	Elementos de suspensão, espaçadores, <i>dampers</i> e os cabos

A compreensão detalhada desses mecanismos fornece a base necessária para a avaliação da vida em fadiga dos cabos, permitindo a correta interpretação das curvas S–N e de seus parâmetros característicos, abordados na próxima seção.

2.3 CURVA S-N E SEUS PARÂMETROS

A curva S-N, também conhecida como curva de Wöhler (em homenagem a August Wöhler, que a desenvolveu para o projeto de resistência à fadiga), é um diagrama que relaciona a tensão aplicada ao número de ciclos necessários até a ruptura do material (Fadel, 2010).

O levantamento da curva S-N para cabos condutores é realizado por meio de ensaios de fadiga em amostras desses condutores. A amostra mencionada é submetida a testes vibratórios com parâmetros pré-definidos, como carga de tração, amplitude de tensão e deslocamento, entre outros. O ensaio continua até a ruptura de uma quantidade de fios conforme normas estabelecidas sobre o tema. O número de ciclos necessários para essas rupturas é registrado, obtendo assim cada ponto da curva S-N. Os parâmetros do ensaio são ajustados para obter a curva completa. O critério para encerrar o ensaio foi estabelecido pela (CIGRE, 1979), que considera que o condutor falha por fadiga quando o número de fios quebrados atinge três ou 10% do total de fios do cabo.

Para a obtenção desse gráfico, são necessários vários testes de laboratório, realizados conforme os seguintes procedimentos (Garcia; Spim; Santos, 2012):

- **Método padrão:** Neste procedimento, são testados poucos corpos de prova, aplicando-se uma determinada tensão abaixo de um valor mínimo. Se o primeiro corpo de prova atinge a vida útil preestabelecida, o segundo é testado com uma tensão maior, e assim sucessivamente. Os dados são ajustados por uma curva média mais conservadora.
- **Método da tensão constante:** Nesta técnica, utilizam-se valores espaçados para a tensão, onde vários corpos de prova são testados para cada nível de tensão. Os dados são plotados em uma curva média que engloba todos os pontos.

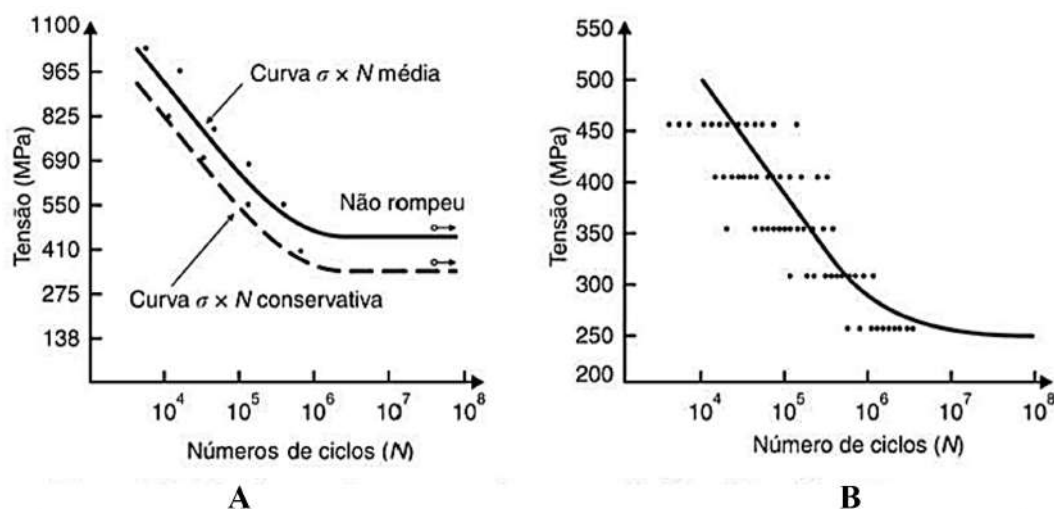


Figura 2.12 – Procedimentos empregados para obter a curva S-N: (a) método convencional e (b) método da tensão constante. com adaptações (Garcia; Spim; Santos, 2012)

No estudo de cabos condutores, os testes laboratoriais são conduzidos em um ambiente controlado, onde uma extremidade do cabo é presa a um grampo e conectada a um bloco fixo. A outra extremidade deve ser presa a um dispositivo adequado que permita a tração do condutor com a carga desejada (geralmente 18 a 20% do valor da carga de ruptura). Em seguida, utiliza-se um dispositivo agitador (*shaker*) para simular as vibrações do vento, controlando a frequência de vibração e a amplitude de flexão por meio de sensores fixados no cabo.

(CIGRE, 1985) faz algumas recomendações sobre esses testes:

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

Além disso, é importante destacar que a medição da amplitude de flexão é realizada em um ponto distante 89 mm do último ponto de contato entre o cabo e a braçadeira.

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

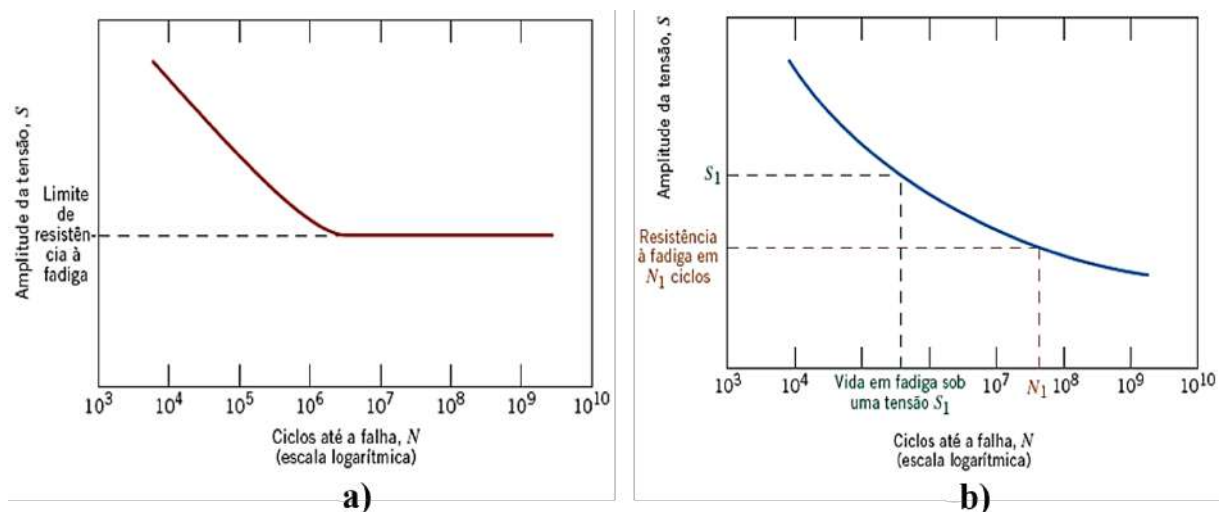


Figura 2.13 – Amplitude de tensão (S) conforme o logaritmo do número de ciclos até a falha (N) para: (a) metais ferrosos e (b) metais não ferrosos. com adaptações (Callister, 2016)

A partir da Figura 2.13, conclui-se que, quanto maior o valor da amplitude da tensão, menor será o número de ciclos que o elemento suportará antes de falhar. Além

disso, também é possível observar dois tipos de comportamentos que variam conforme o material analisado. No primeiro (Figura 2.13-a), observado em metais ferrosos, verifica-se que a curva S-N fica horizontal a partir de um determinado valor de tensão, denominado de limite de resistência à fadiga. Já o segundo comportamento (Figura 2.13-b), observado em ligas não ferrosas, não apresenta um limite de resistência à fadiga, visto que a curva continua sua tendência decrescente à medida que os valores de N aumentam. Para esses materiais, constata-se que a resposta à fadiga é dada por uma resistência à fadiga, definida como o valor de tensão no qual a falha ocorrerá após um determinado número de ciclos. Logo, deduz-se que, independentemente do valor da tensão, a falha por fadiga ocorrerá (Callister, 2016).

Além disso, outro parâmetro importante que pode ser obtido a partir da curva S-N é a vida em fadiga. Ela pode ser definida como o número de ciclos necessários para provocar a falha por fadiga sob um determinado nível de tensão (Callister, 2016).

2.3.1 FATORES QUE INFLUENCIAM A CURVA S-N

(Gomes, 2015) ressalta que os ensaios de laboratório realizados com os corpos de prova padronizados e em condições controladas não retratam a realidade de operação do elemento, visto que não consideram algumas variáveis, como o carregamento e a temperatura.

A curva S-N, construída a partir de dados coletados em ensaios de amostras padrão em um ambiente de laboratório controlado, pode não representar com precisão as características do componente em operação no campo. Para introduzir esses efeitos, deve-se utilizar alguns fatores (fatores de Marin) que multiplicam o limite de resistência à fadiga obtido em laboratório (σ), resultando no limite de resistência à fadiga estimado da peça (σ'), dado por (Garcia; Spim; Santos, 2012):

$$\sigma' = K_a \cdot K_b \cdot K_c \cdot K_d \cdot K_e \cdot K_f \cdot \sigma \quad (2.3)$$

em que os fatores K de modificação podem ser descritos como (Shigley; Mischke, 2005):

- **Fator de acabamento da superfície (K_a):** leva em conta a qualidade da superfície;

A superfície dos corpos de prova utilizados nos testes é estritamente monitorada, passando por polimento radial e axial para eliminar qualquer concentração de tensão. O papel do fator de condição superficial é ajustar a resistência à qualidade de acabamento do componente real, visto que, como discutido anteriormente, falhas tendem a começar na superfície, onde as tensões são tipicamente mais elevadas. Assim, o acabamento pode impactar significativamente na durabilidade em fadiga do componente mecânico real.

- **Fator de tamanho (K_b):**

Considera o tamanho do elemento. Para corpos cilíndricos, refere-se ao diâmetro da peça, enquanto que, para outras formas, deve-se usar o conceito de diâmetro efetivo;

- **Fator de carga (K_c):**

Leva em consideração o tipo de força aplicada, que pode ser de flexão rotativa, axial ou torcional;

- **Fator de temperatura (K_d):**

Considera a diferença entre a temperatura de operação do componente e a temperatura ambiente;

- **Fator de confiabilidade (K_e):**

Leva em conta a confiança esperada no limite de resistência à fadiga do componente. Quanto maior for o nível de confiança desejado, menor será o valor do coeficiente utilizado;

- **Fator de diversos efeitos (K_f):**

Leva em consideração vários fatores que podem afetar o limite de resistência à fadiga do componente, como concentradores de tensão, condições ambientais, tratamentos térmicos e tensões residuais.

2.3.2 CIGRÉ SAFE BORDER LINE - CSBL

Uma forma de caracterizar a durabilidade do material em relação à fadiga é através do uso da curva de Wöhler, também conhecida como curva S-N. De maneira geral, a resistência à fadiga da montagem cabo/grampo de suspensão é alcançada de maneira semelhante à utilizada para corpos de prova sólidos.

Devido à complexidade e aos altos custos associados aos testes de fadiga, o comitê da CIGRE recomendou uma linha de limite de segurança, conhecida como CIGRE Safe Border Line (CSBL), que ajuda as empresas envolvidas no desenvolvimento de linhas de transmissão a prever a vida útil do condutor sem a necessidade de realizar experimentos. A equação que representa a CSBL pode ser formulada da seguinte maneira:

$$\sigma_a = A \cdot N_i^b \quad (2.4)$$

onde σ_a representa a amplitude de tensão em MPa, N_i denota a vida à fadiga em número de ciclos para uma tensão específica; A e b são parâmetros do material cujos valores podem ser encontrados na Tab. 2.3. Na Fig. 2.14 é apresentado um exemplo das curvas CSBL geradas pela CIGRÈ.

Tabela 2.3 – Constantes CIGRÈ Safe Border Line (CSBL) (CIGRE, 1985)

Número de camadas de fios de alumínio do cabo condutor	$N < 2 \cdot 10^7$		$N > 2 \cdot 10^7$	
	A	b	A	b
1	730	-0.2	430	-0.168
>1	450	-0.2	260	-0.168

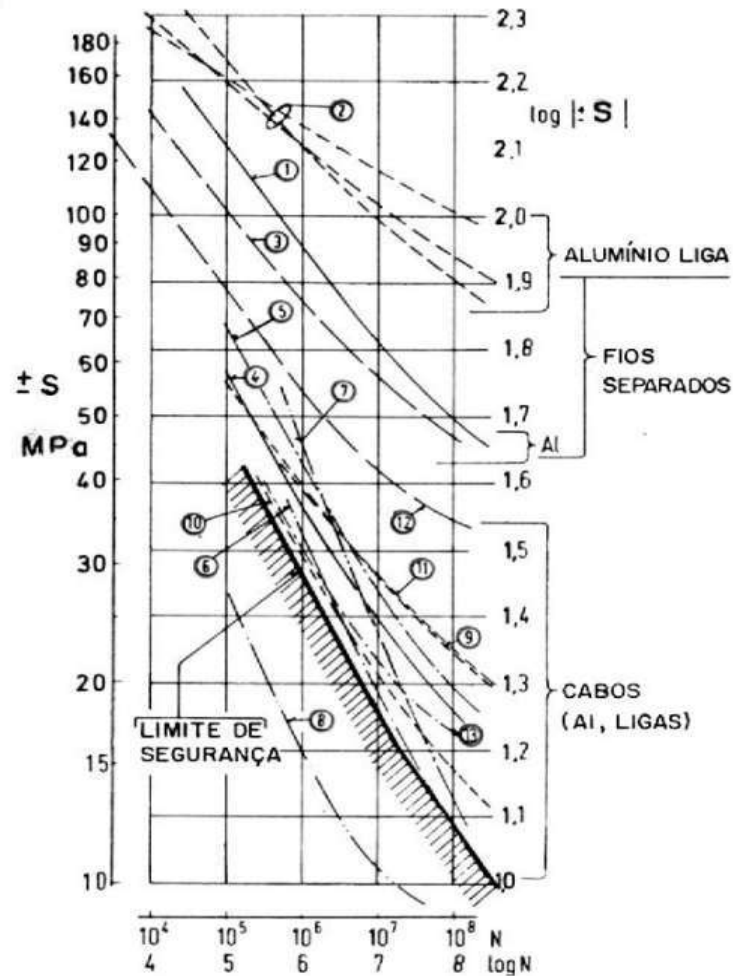


Figura 2.14 – CIGRÈ Safe Border Line (CIGRE, 1979)

2.4 FATORES QUE INFLUENCIAM A FADIGA

As quebras devido à fadiga nos fios dos cabos condutores acontecem nas proximidades dos pontos onde o movimento do cabo é limitado, especialmente nas áreas de suspensão (Figura 2.15). Nessas regiões, as tensões de flexão nos fios se tornam mais intensas, pois ocorre uma mudança acentuada na curvatura do cabo, e também há uma incidência ampliada de *fretting*, resultado do contato mais enérgico entre as superfícies, causado pelas restrições

aplicadas ao movimento. O fenômeno de *fretting* será detalhado na Subseção 2.4.1, em uma análise mais aprofundada.

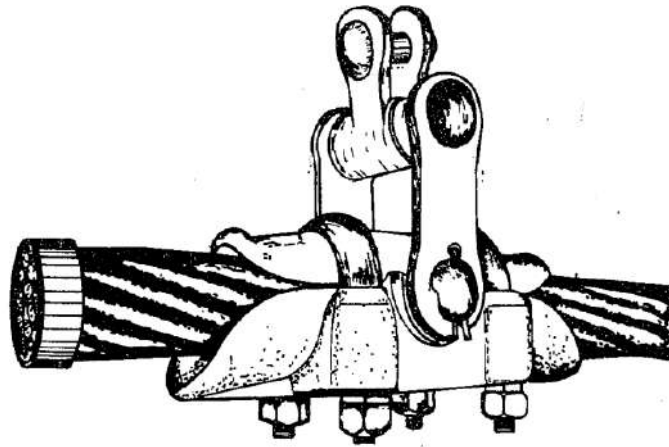


Figura 2.15 – Grampo de suspensão usado em uma linha de transmissão - com modificações (Fuchs, 2015)

Há inúmeras áreas em contato na montagem cabo/grampo suspensão que estão relacionadas ao acontecimento de *fretting*, para explicá-las será dada a seguir uma explicação sucinta sobre como os cabos condutores são dispostos e posteriormente colocado ao grampo de suspensão.

- **Cabo Conductor**

Os cabos são compostos por fios trançados e dispostos em camadas circulares concêntricas, com direções alternadas em relação ao fio central. Esse núcleo, junto a outros fios internos, constitui a alma do condutor, conforme ilustrado na Figura 2.16-a. No interior do grampo de fixação, o condutor é submetido a diferentes zonas de contato: entre os próprios filamentos e entre os elementos de montagem e os fios da camada externa. Essas regiões de interação, destacadas em vermelho na Figura 2.16-b, concentram tensões que influenciam diretamente os mecanismos de desgaste e fratura observados na análise fractográfica, possibilitando correlacionar a evolução da falha com as condições de carregamento monitoradas e os modelos de previsão de vida útil.

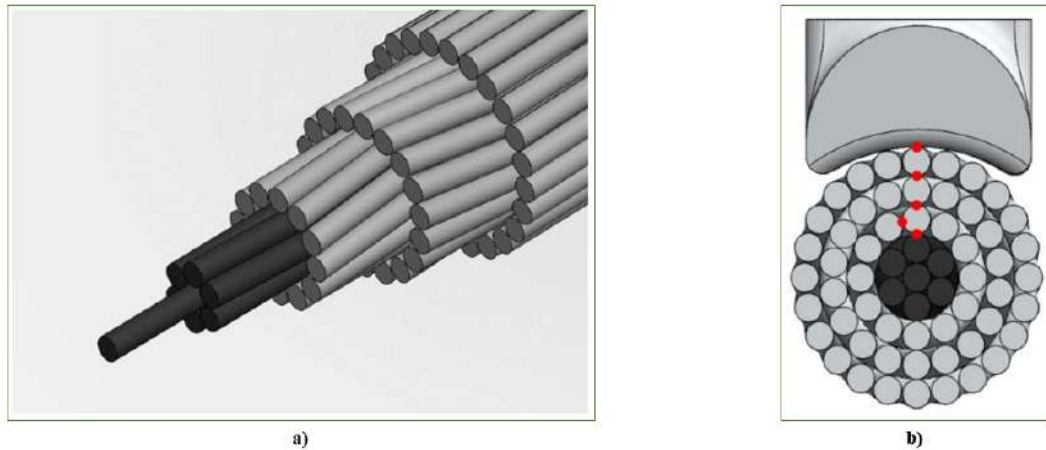


Figura 2.16 – a) Vista isométrica de um cabo condutor de energia. / b) Área onde há contato entre os fios e o grampo de suspensão. - (Rocha, 2016)

Os cabos condutores de energia elétrica são constituídos predominantemente por fios de alumínio ou de suas ligas, podendo conter fios de aço para conferir maior resistência mecânica. Na construção de linhas de transmissão, utilizam-se diferentes tipos de cabos, cada um com características específicas. Entre os mais comuns estão o Cabo de Alumínio Puro (CA), o Cabo de Alumínio Liga (CAL), o Cabo de Alumínio com Alma de Aço (CAA) e o Cabo de Alumínio Reforçado com Liga de Alumínio (ACAR), cujas principais nomenclaturas e propriedades são apresentadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Principais tipos de cabos condutores de energia. (Fadel, 2010)

Tipo de cabo condutor	Descrição
CA (AAC)	Cabos de Alumínio (All Aluminium Conductor)
CAA (ACSR)	Cabos de Alumínio com Alma de Aço (Aluminium Conductor Steel Reinforced)
CAL (AAAC)	Cabos de Alumínio Liga (All Aluminium Alloy Conductor)
ACAR	Cabos de Alumínio com Alma de Liga de Alumínio (Aluminium Conductor Alloy Reinforced)
TW	Fios Trapezoidais (Trapezoidal Wires)

É importante ressaltar que o cabo utilizado nesta pesquisa é o CAL (Cabo de Alumínio Liga) 838 MCM Liga 1120, conforme representado na Figura 2.17. Este tipo de cabo oferece diversas vantagens significativas, como uma excelente relação entre resistência, peso, alta resistência à tração, resistência à corrosão e baixas perdas elétricas. Além disso, sua aplicação é especialmente vantajosa devido à sua capacidade de suportar condições adversas e garantir uma transmissão eficiente de energia elétrica a longas distâncias. Essas características fazem dele uma escolha cada vez mais preferida para novos projetos de linhas de transmissão,

contribuindo para a eficiência e confiabilidade do sistema elétrico.

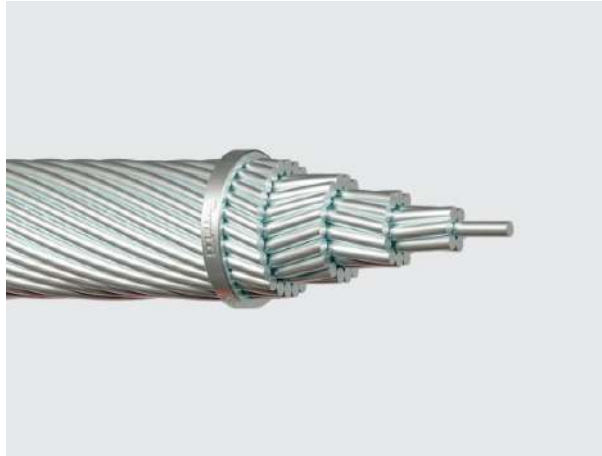


Figura 2.17 – Vista isométrica de um cabo CAL 838 MCM - Liga 1120 - (Alubar, 2023)

• Cabos e suas aplicações

Em um sistema de transmissão, os cabos condutores podem representar até 40% do custo inicial da infraestrutura (Frontin *et al.*, 2010). Eles suportam tanto cargas elétricas quanto mecânicas e ambientais ao longo de sua vida útil, requerendo, assim, um meticuloso trabalho de manutenção preventiva e preditiva. A linha de transmissão de alta tensão é primariamente composta pelos componentes listados a seguir, e ilustrados na Figura 2.18.

- Cabos condutores de energia elétrica;
- Componentes e estruturas isolantes;
- Suportes e suas bases fundamentais;
- Dispositivos de proteção ou para-raios;
- Sistemas de terra;
- Demais acessórios.

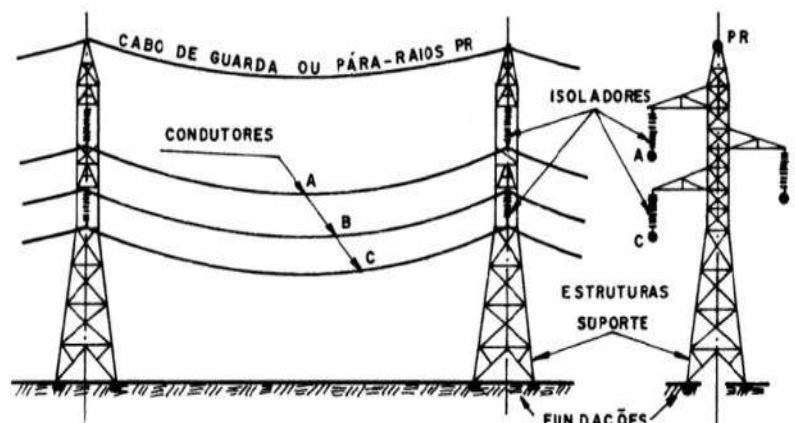


Figura 2.18 – Componentes de uma linha de transmissão de energia. - (Labegalini *et al.*, 1992)

O desempenho elétrico das linhas de transmissão de energia está diretamente relacionado às propriedades de seus componentes, como o material empregado, métodos de

fabricação e características geométricas. Conforme mencionado no livro de (Labegalini *et al.*, 1992), o transporte de energia elétrica por essas linhas é um serviço essencial dentro de um sistema elétrico, exigindo confiabilidade, eficiência e custo-benefício. Portanto, a avaliação da vida útil dos cabos condutores sob condições de fadiga de vento é fundamental tanto para novas instalações quanto para sistemas em operação, visando melhorar a capacidade de transporte e a segurança das linhas de transmissão.

De acordo com (Fonseca; Cimini, 2003), a rede de transmissão do sistema elétrico brasileiro é composta, em sua maioria, por infraestruturas com cerca de 20 anos de operação, tornando essencial uma avaliação da vida útil restante de seus elementos. A eventual ruptura por fadiga desses cabos poderia resultar na interrupção do fornecimento de energia elétrica para diversos setores de usuários, acarretando prejuízos significativos às concessionárias. Portanto, testes para determinar a resistência à fadiga dos cabos utilizados nas linhas de transmissão e análises das falhas são de extrema importância. A avaliação das superfícies de fratura desses condutores e a identificação precisa das causas das falhas permitirão reduzir a probabilidade de apagões causados pelo rompimento dos cabos devido à fadiga mecânica induzida por vibrações eólicas.

- **Grampo de Suspensão**

Os grampos de suspensão têm a função de apoiar os cabos nas torres de transmissão de forma segura, minimizando o risco de danos decorrentes de diferentes causas. Existem diversos modelos disponíveis 2.19, geralmente fabricados em material metálico resistente à corrosão e projetados com perfil suave, de modo a permitir a curvatura natural do cabo sem comprometê-lo. Além disso, esses dispositivos são articulados, o que possibilita acomodar os pequenos movimentos de vibração do condutor.

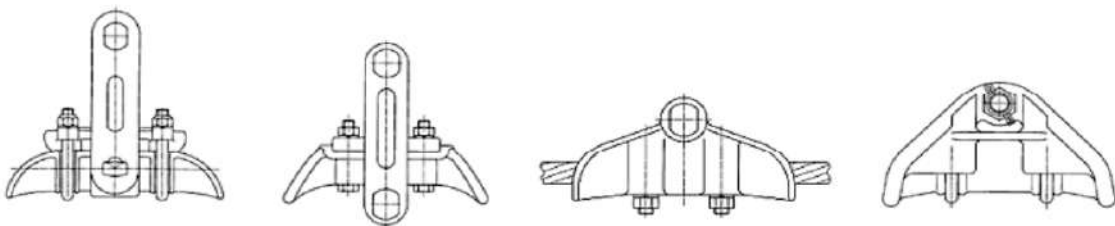


Figura 2.19 – Formatos de grampos de suspensão mais usados. - (EPRI, 2006)

- **Montagem cabo/grampo de suspensão**

Durante a instalação cabo/grampo, há interação entre as áreas dos fios, que podem ser compostos do mesmo material ou de variedades distintas de matéria-prima (como alumínio, ligas de alumínio ou aço). Também ocorre conexão entre as regiões dos fios e dos grampos, podendo ser na porção superior ou inferior do mesmo. Os pontos de contato na união cabo/grampo são ilustrados com maior detalhamento na Figura 2.20.

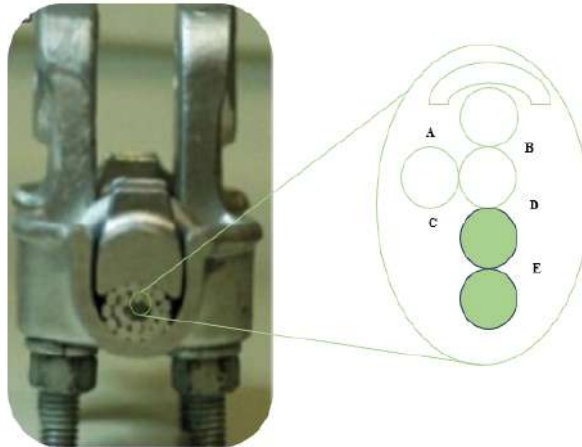


Figura 2.20 – Áreas de contato entre o cabo e o grampo, na montagem. - com modificações (Fadel *et al.*, 2012)

2.4.1 FADIGA POR *FRETTING*

A interação entre o cabo condutor e o grampo de suspensão cria um ambiente propício para o fenômeno de desgaste por *fretting*. A compressão entre as superfícies dos fios é gerada por duas fontes: a força resultante do cruzamento entre os próprios fios do cabo e a pressão exercida pelo grampo de suspensão durante a fixação. Adicionalmente, as vibrações eólicas causam forças de fricção que surgem quando os fios se movimentam ciclicamente. Essa combinação de forças normais compressivas e forças oscilatórias tangenciais resulta em sutis deslocamentos relativos entre as superfícies em contato, tipicamente na ordem de micrômetros. Esta condição é a premissa para a ocorrência do desgaste por *fretting*, que promove danos superficiais e serve como ponto de origem para a nucleação de trincas de fadiga

O movimento relativo entre as superfícies em contato, impulsionado por forças oscilatórias tangenciais, pode resultar em dois cenários distintos. O deslizamento total ocorre quando as forças tangenciais se igualam ou superam a força de atrito, enquanto o deslizamento parcial é estabelecido quando essas forças são menores. Em ambos os casos, as superfícies do material sofrem dano, o que promove a formação de pontos de concentração de tensão que podem dar origem a trincas. No cenário de deslizamento total, ocorre uma "competição entre abrasão e fadiga", em que a remoção de material pelo desgaste superficial pode mitigar o avanço das trincas, impedindo sua expansão. Em contrapartida, no cenário de deslizamento parcial, o dano nas superfícies em contato manifesta-se em um padrão elíptico, com duas zonas distintas: a zona de adesão e a zona de deslizamento. É nesta última, onde a nucleação e a propagação de trincas são facilitadas, que o material é submetido a cargas cíclicas, levando à falha do cabo por um processo conhecido como fadiga por *fretting*.

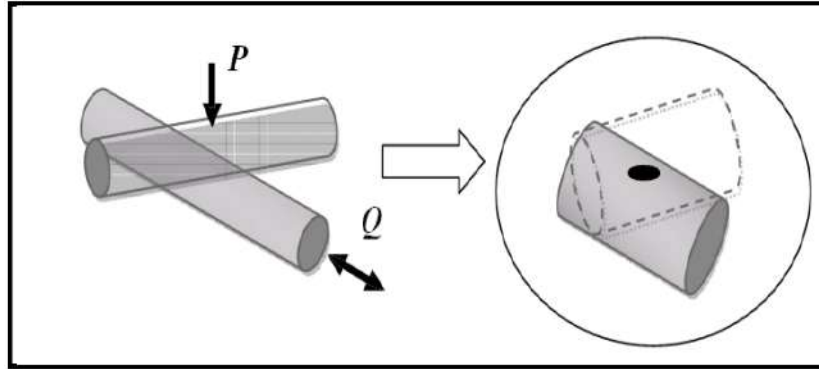


Figura 2.21 – Ilustração esquemática do problema de contato entre dois corpos cilíndricos (correspondente a dois fios de camadas diferentes) (Fadel, 2010)

O processo de *fretting*, nos fios de alumínio usados em cabos condutores, é instigado pelo desgaste do filme de óxido que cobre o alumínio, causada pela fricção entre fios (fio-fio) e entre fio - grampo. Inicialmente, as superfícies em atrito tendem a se unir. No entanto, com o passar do tempo, esses pontos de união se rompem devido ao movimento relativo entre eles. De acordo com (Azevedo *et al.*, 2009), esse processo origina resíduos, causando o acúmulo de material entre os objetos, resultante da ruptura da camada de óxido de alumínio, também conhecido como alumina (Al_2O_3), e a produção de partículas desse óxido. A contar desse estágio, o surgimento de micro-trincas se torna inevitável, podendo levar à deterioração do material caso essas trincas se espalhem da área do fio em direção à estrutura restante de alumínio. A Figura 2.22 ilustra marca de fretting, resultado do contato entre os fios.

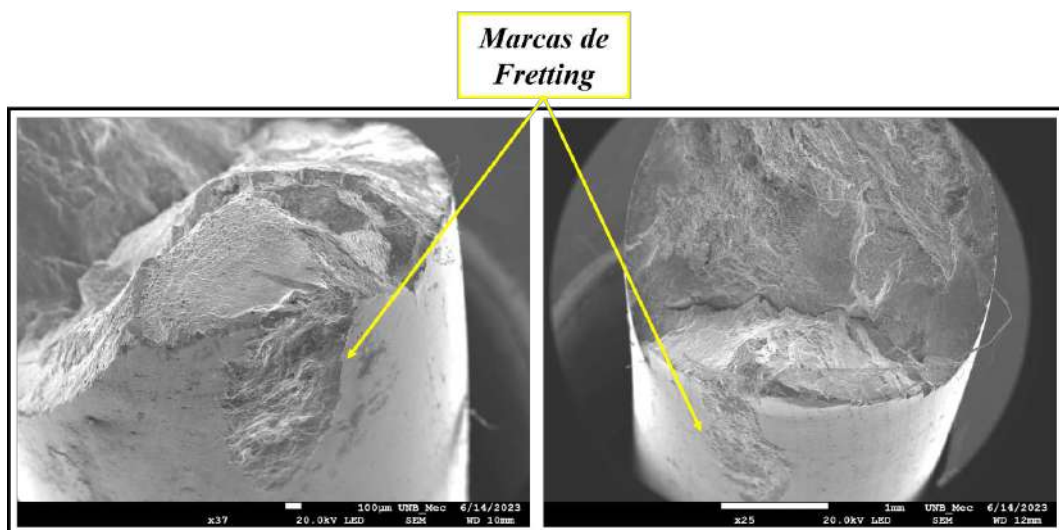


Figura 2.22 – Marcas de *fretting* geradas pelo contato entre os fios que formam o cabo condutor - (MEV).

2.4.2 CARREGAMENTOS MECÂNICOS

Para se determinar a expectativa de vida de um componente sujeito à fadiga, é fundamental conhecer a carga a que o material está submetido e o dano acumulado durante sua operação. Nesse contexto, distinguem-se dois regimes principais de carregamento: de amplitude constante e de amplitude variável.

2.4.2.1 CARREGAMENTOS DE AMPLITUDE CONSTANTE

Esse tipo de carregamento pressupõe que o componente está submetido a ciclos de tensão média com amplitude constante. Nesses casos, o diagrama tensão versus número de ciclos (curva S-N) constitui a melhor ferramenta para estimar o número de ciclos até a ocorrência da falha.

2.4.2.2 CARREGAMENTOS DE AMPLITUDE VARIÁVEL

Nos casos em que a carga aplicada ao longo do tempo apresenta amplitudes variáveis, a previsão de vida útil é feita por meio da divisão do histórico de carregamento em “blocos” de tensões, utilizando-se o método de contagem de ciclos conhecido como *Rainflow*. O resultado desse processo é expresso como um *Fator de Dano*, que corresponde a uma fração da vida consumida pelo componente. Assim, a falha ocorre quando $D = 1$. Por exemplo, se o valor calculado for $D = 0,20$, significa que 20% da vida do componente foi consumida. Essa abordagem baseia-se na hipótese de que a acumulação de dano é independente do nível de tensão.

No caso de cabos condutores de energia elétrica, a ação dos ventos provoca oscilações com amplitudes variáveis, que ao longo da vida útil resultam em diferentes níveis de dano. Dessa forma, sua vida útil pode ser prevista considerando-se o acúmulo de ciclos parciais provenientes desses blocos de carregamento.

2.5 TEORIA DO DANO CUMULATIVO E MÉTODO DE CONTAGEM DE CICLOS

2.5.1 REGRA DE PALMGREN-MINER

A ação dos ventos sobre as estruturas de transmissão gera vibrações, cuja intensidade está associada ao ângulo de incidência e à regularidade do escoamento. Em 1924, ([Palmgren, 1924](#)) apresentou o primeiro conceito de avaliação de prejuízos em rolamentos de esferas. Posteriormente, em 1937, ([Langer, 1937](#)) propôs um método linear para estimar danos em vasos de pressão e tubulações de aço. Finalmente, ([Miner, 1945](#)) expandiu o trabalho de Lan-

ger, consolidando a regra linear de acumulação de danos e demonstrando sua concordância com resultados experimentais.

A aplicação da regra de Palmgren–Miner, ilustrada na Figura 2.23, requer que o carregamento seja decomposto em blocos de ciclos equivalentes. O objetivo é prever quantos blocos de carga podem ser aplicados até a ocorrência da falha. Para essa decomposição de cargas irregulares em ciclos, empregam-se métodos de contagem, sendo o *Rainflow* (discutido na próxima subsecção) o mais utilizado.

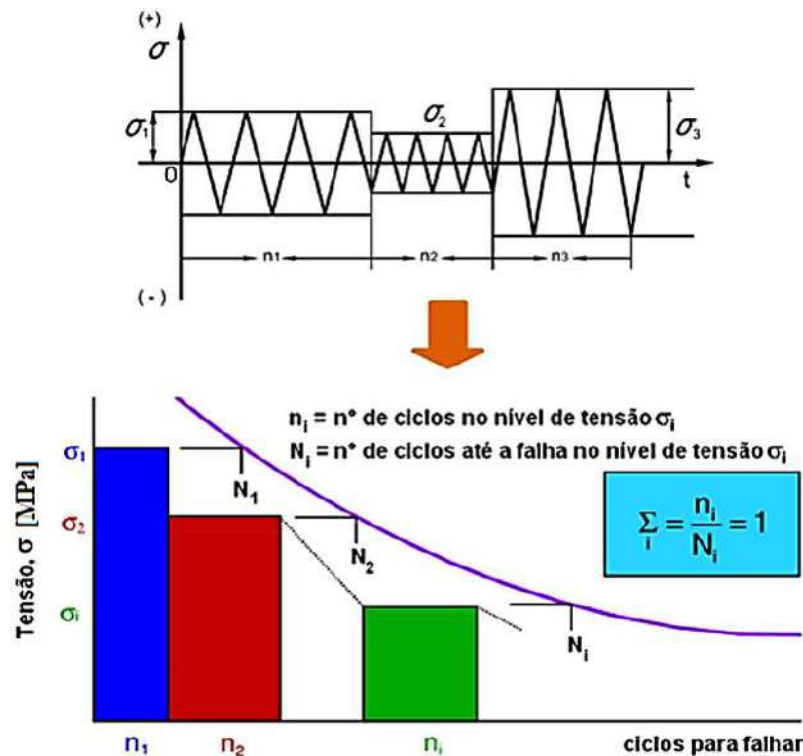


Figura 2.23 – Regra de Palmgren–Miner para o acúmulo de dano linear. Adaptado de (Miner, 1945).

Segundo a hipótese de Miner, a falha por fadiga ocorre quando a soma das frações de dano acumuladas atinge a unidade:

$$D = \sum_i D_i = \sum_i \frac{n_i}{N_{f,i}} \quad (2.5)$$

em que D é o dano acumulado, n_i o número de ciclos aplicados em um determinado nível de tensão e $N_{f,i}$ o número de ciclos suportáveis neste mesmo nível, obtido a partir da curva S–N.

Se o valor de D for estimado a partir de n_i extrapolados para um ano de operação, a vida útil V do condutor pode ser prevista por:

$$V = \frac{1}{\sum D} \text{ [anos]} \quad (2.6)$$

De acordo com (Henriques, 2006), a aplicação prática da regra envolve dois passos principais: (i) obter a curva de fadiga $S-N$ para o conjunto cabo/grampo, recorrendo à Curva de Segurança da CIGRÉ (*Safe Border Line*) caso não seja possível obtê-la em laboratório; e (ii) distribuir os ciclos $n_i(\sigma_i)$ em cada nível de tensão observado em campo, medidos por vibrógrafos e expressos em ciclos por ano.

Na Figura 2.24, exemplifica-se a relação entre ciclos de operação e ciclos de ruptura. Para uma amplitude S_1 , o número de ciclos até a falha seria $N_{f,1}$ caso não houvesse a presença de outros níveis de tensão. Assim, quando o condutor é submetido a n_1 ciclos em S_1 , considera-se que apenas uma fração do dano total é consumida:

$$D_1 = \frac{n_1}{N_{f,1}} \quad (2.7)$$

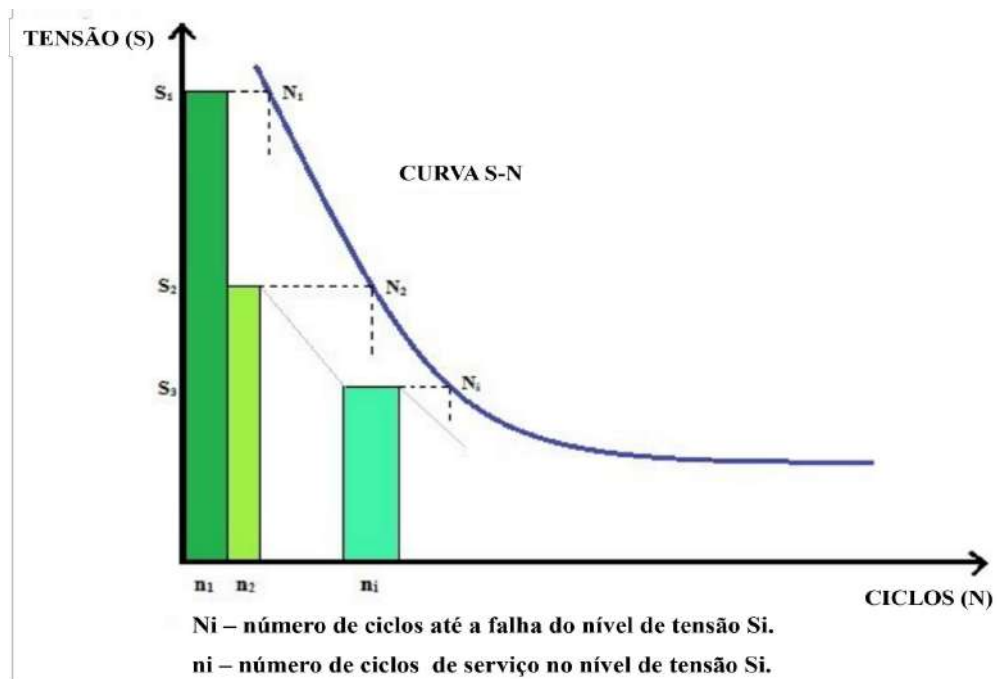


Figura 2.24 – Exemplo de curva $S-N$, destacando ciclos de ruptura e ciclos de operação para diferentes níveis de tensão. Adaptado de (Santos, 2018).

O dano total acumulado é então:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_{f,i}} \quad (2.8)$$

O valor de D é nulo para um componente íntegro e a falha é considerada quando $D \geq 1$. Ressalta-se que a regra de dano linear desconsidera tensões inferiores ao limite de fadiga. A viabilidade da aplicação do modelo a carregamentos aleatórios só se tornou possível graças a métodos de contagem de ciclos como o *Rainflow*.

2.5.2 MÉTODO DE CONTAGEM DE CICLOS RAINFLOW

De acordo com (Dowling, 2012), não havia consenso sobre a melhor forma de avaliar carregamentos com amplitudes altamente irregulares, de modo a aplicar a regra de Palmgren-Miner. Em 1968, no Japão, o professor T. Endo e colaboradores propuseram o método de contagem de ciclos *Rainflow*, baseado em algoritmos matemáticos que identificam pares de máximos e mínimos no histórico de carregamento, mesmo quando separados por pontos intermediários.

Na análise de sinais de amplitude variável, o *Rainflow* organiza o carregamento em blocos de tensão, informando o número de ciclos e a respectiva amplitude. O resultado é a construção de um histograma de faixas de tensão, que serve de base para a aplicação da regra de Miner na previsão da vida à fadiga (Lee, 2005; Lima, 2021; Dowling, 2012).

Conforme a norma (ATSM E 1049-85, 2017), o *Rainflow* tradicional, também chamado de método dos Três Pontos, utiliza três pontos consecutivos de um histórico $\sigma(t)$ para identificar a formação de ciclos, como mostrado na Figura 2.25. Sempre que um ciclo é fechado, ele é contabilizado e os pontos envolvidos são eliminados, até que todo o histórico seja processado.

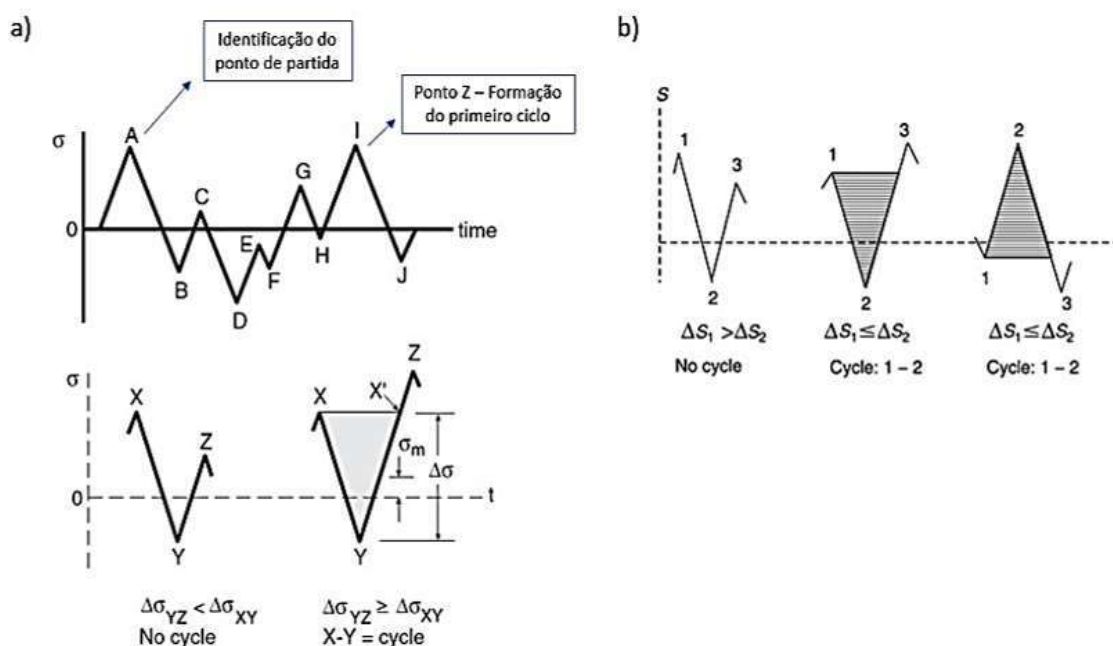


Figura 2.25 – Técnica de contagem de ciclos *Rainflow*: (a) método tradicional; (b) exemplo da detecção de dois ciclos completos. Adaptado de (Lima, 2023).

De acordo com as normas SAE e ASTM, o processo inicia pela identificação dos picos e vales do histórico de tensões, selecionando o valor de maior magnitude absoluta (pico mais alto ou vale mais baixo). Em seguida, aplica-se a regra dos três pontos, fechando ciclos sucessivamente até a completa decomposição do sinal.

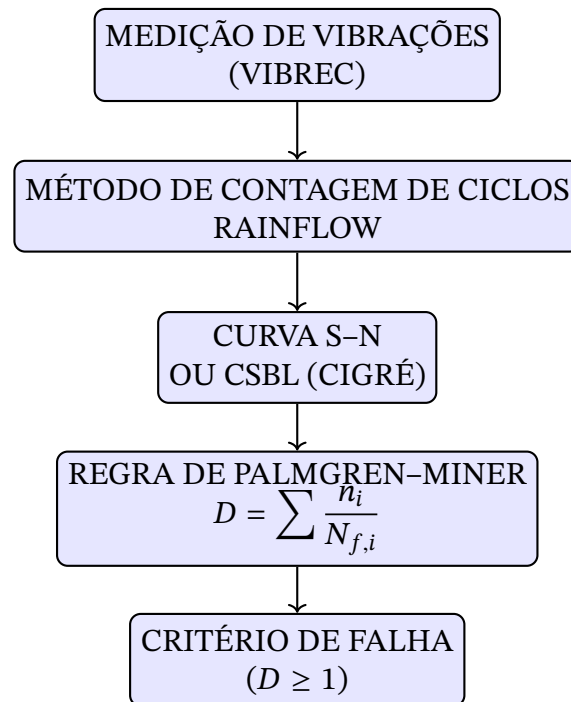


Figura 2.26 – Fluxograma ilustrando a integração entre a contagem de ciclos (*Rainflow*), a curva S–N e a regra de Palmgren–Miner, na previsão da vida em fadiga.

O processo de previsão de vida à fadiga em cabos condutores exige a integração entre **medição experimental**, **processamento dos sinais de vibração** e **modelagem matemática**. Primeiramente, o histórico temporal de tensões $\sigma(t)$ ou deformações $\epsilon(t)$ é adquirido em campo. Em seguida, o método de contagem de ciclos *Rainflow* transforma o sinal irregular em um conjunto de ciclos equivalentes (σ_a , σ_m , n_i). Esses ciclos são organizados em histogramas de faixas de tensão e, posteriormente, confrontados com a **curva S–N** do material, obtendo-se a vida teórica $N_{f,i}$ para cada nível de carregamento.

A etapa final consiste na aplicação da **regra de Palmgren–Miner**, que acumula os efeitos parciais por meio da soma $\sum(n_i/N_{f,i})$, resultando no dano total D . A falha é prevista quando $D \geq 1$.

O fluxograma da Figura 2.26 resume essas etapas, evidenciando a sequência entre aquisição de dados experimentais, análise estatística e aplicação dos critérios de fadiga.

2.6 INTRODUÇÃO AO CARREGAMENTO RANDÔMICO

A abordagem apresentada nas seções anteriores, fundamentada em curvas S–N e na regra de Palmgren–Miner associada ao método de contagem de ciclos *Rainflow*, embora prática e amplamente utilizada em engenharia, pode ser aprofundada com base na teoria de processos estocásticos. De acordo com (Bishop; Sherratt, 1989), um material pode estar submetido a carregamentos determinísticos (constantes ou previsíveis) ou a carregamentos aleatórios. A principal distinção entre esses dois casos é que, enquanto nos carregamentos

determinísticos é possível prever os estados futuros por meio de relações matemáticas, nos carregamentos aleatórios tal previsão não é viável, pois cada observação resulta de uma realização única do processo.

Um processo aleatório, também denominado estocástico, pode ser interpretado como um conjunto de amostras de fenômenos randômicos, e pode ser classificado como estacionário ou não-estacionário. Um processo estacionário é caracterizado por propriedades estatísticas invariantes no tempo, como média e variância. Além disso, processos estacionários podem ser ergódicos ou não-ergódicos. Um processo ergódico é aquele em que uma única realização $X(t)$ contém todas as informações estatísticas necessárias para descrevê-lo. Portanto, todo processo ergódico é estacionário, mas o inverso não é necessariamente verdadeiro (Bendat; Piersol, 1971; Pereira; Pais; Sales, 1986).

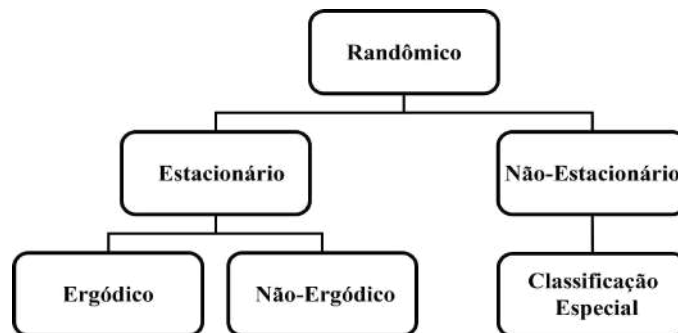


Figura 2.27 – Classificação de processos aleatórios (Bendat; Piersol, 1971).

De forma resumida, em processos ergódicos, a média, a variância e a função de autocorrelação podem ser determinadas a partir de uma única realização temporal, facilitando o uso de ferramentas estatísticas. Já em processos não-estacionários, essas propriedades variam ao longo do tempo, demandando técnicas mais complexas de análise (Haykin, 2001).

A Figura 2.28 ilustra um exemplo de processo aleatório contínuo, em que diferentes realizações do mesmo fenômeno apresentam trajetórias distintas, mas com características estatísticas comuns.

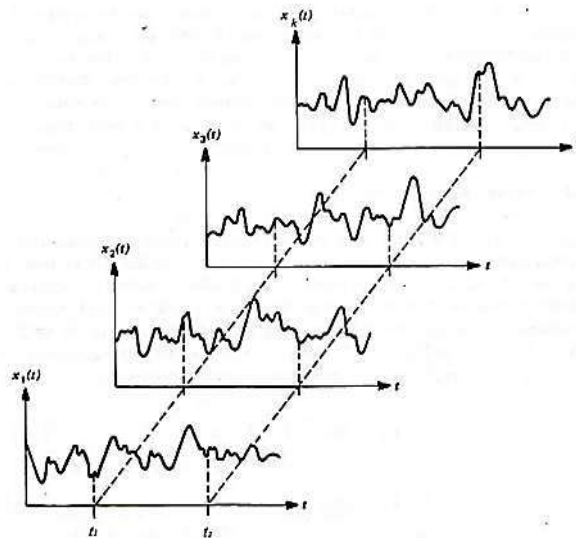


Figura 2.28 – Exemplo de processo aleatório contínuo (Newland, 1993).

Essa fundamentação é especialmente relevante para estruturas expostas a carregamentos ambientais, como cabos condutores de energia, pás de turbinas eólicas e plataformas offshore, nas quais o comportamento da amplitude de tensão varia continuamente em função da ação do vento, das ondas ou de outras excitações externas.

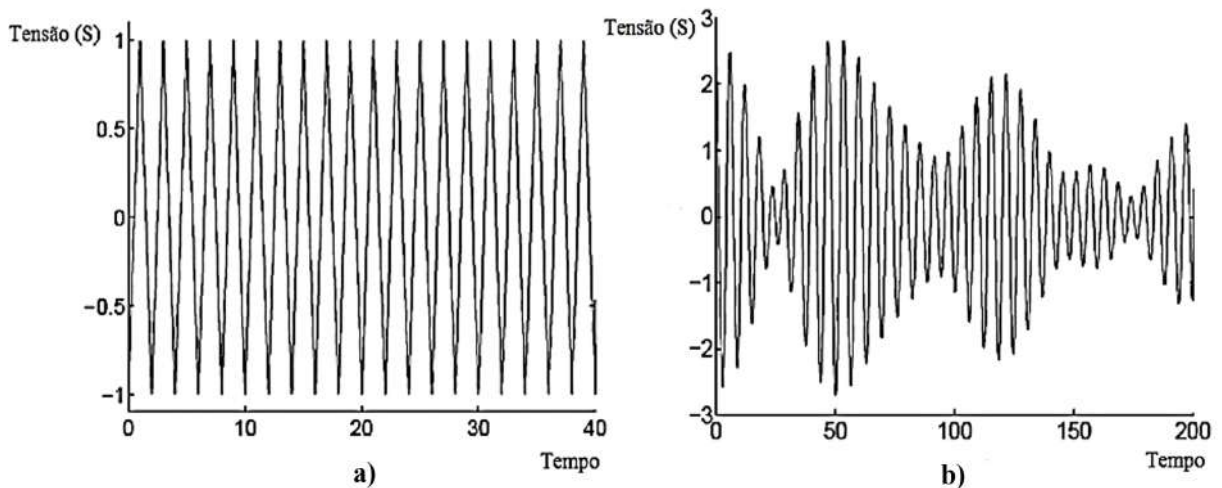


Figura 2.29 – Comparação entre carregamentos: (a) determinístico (constante) e (b) randômico (Johannesson, 1999).

A principal dificuldade em lidar com carregamentos randômicos é que eles não podem ser diretamente representados por curvas S–N tradicionais, que descrevem apenas relações entre tensões e número de ciclos em condições de amplitude constante (Bishop; Sherratt, 1989). Para superar essa limitação, considera-se que o dano por fadiga ocorre de forma cumulativa, até levar o componente à fratura. Nesse contexto, a aplicação da regra de

dano acumulativo, de Palmgren–Miner, constitui uma abordagem consolidada para prever a vida útil de componentes submetidos a carregamentos aleatórios (Lee, 2005).

3 NORMAS, PREVISÕES E INSTRUMENTAÇÃO APLICADA

Este capítulo reúne os fundamentos teóricos que sustentam a análise da fadiga em cabos condutores. São apresentadas as principais normas e critérios de projeto, como a IEC 61284 e as recomendações do CIGRÉ, incluindo o critério CSBL, amplamente utilizado para classificação da severidade vibracional. Em seguida, abordam-se critérios práticos de avaliação do carregamento, como o parâmetro H/w e a equação de Poffenberger-Swart, que permitem relacionar as condições de tração e de vibração aos esforços de flexão nos fios. Por fim, são discutidos os métodos de previsão de vida em fadiga, contagem de ciclos pelo método Rainflow, curvas S-N e a regra de Miner, que integram os critérios de carregamento às estimativas de durabilidade estrutural do condutor.

3.1 NORMAS E CRITÉRIOS DE PROJETO

As diretrizes normativas adotadas neste trabalho baseiam-se, principalmente, na *International Electrotechnical Commission - IEC 61284* (acessórios para linhas aéreas) e nas recomendações do CIGRÉ, com uso do critério *CIGRÉ Safe Border Line (CSBL)* como referência prática para severidade vibracional. Os fundamentos e a formulação do CSBL, incluindo constantes e curvas de referência, já foram apresentados no Capítulo 2 (Seção CSBL) (ver Tabela 2.3 e Figura 2.14).

Tabela 3.1 – Resumo das referências normativas empregadas.

Referência	Escopo	Uso neste trabalho
IEC 61284	Ensaio e requisitos para acessórios de linhas aéreas	Enquadramento de montagem cabo/grampo e critérios de avaliação
CIGRÉ	Recomendações para avaliação/mitigação de vibrações	Diretrizes de severidade e conduta em campo/laboratório
CSBL	Fronteira segura (frequência \times amplitude/diâmetro)	Classificação de severidade e confronto com medições

3.2 ABORDAGENS PRÁTICAS DE PREVISÃO DE VIDA ÚTIL

Nesta seção, os conceitos já fundamentados no Capítulo 2 (contagem de ciclos, curva S-N e regra de Miner) são empregados de forma aplicada, em conjunto com critérios de engenharia usados em linhas aéreas.

3.2.1 PARÂMETRO H/w

A razão H/w é definida como a proporção entre a carga de tração do condutor (H) e o peso por unidade de comprimento (w). Em linhas de transmissão, esse parâmetro é um indicador prático da severidade vibracional: maiores valores de H/w tendem a reduzir o autoamortecimento interno (deslizamento relativo entre fios), aumentando a suscetibilidade à vibração eólica. Em projeto, a avaliação de H/w auxilia na escolha da tração admissível, do vão, dos acessórios e de dispositivos de mitigação (como *dampers*), conectando a mecânica do cabo e da função de excitação, aos parâmetros da catenária.

Esses critérios representam a rigidez, a massa e, de forma implícita, o amortecimento efetivo do sistema, influenciando a região de *lock-in* e o número de ciclos consumidos ao longo do tempo, contribuindo para a formação de danos, sendo este um efeito indesejado.

A Figura 3.1 traz a relação da variação do parâmetro H/w e sua influência.

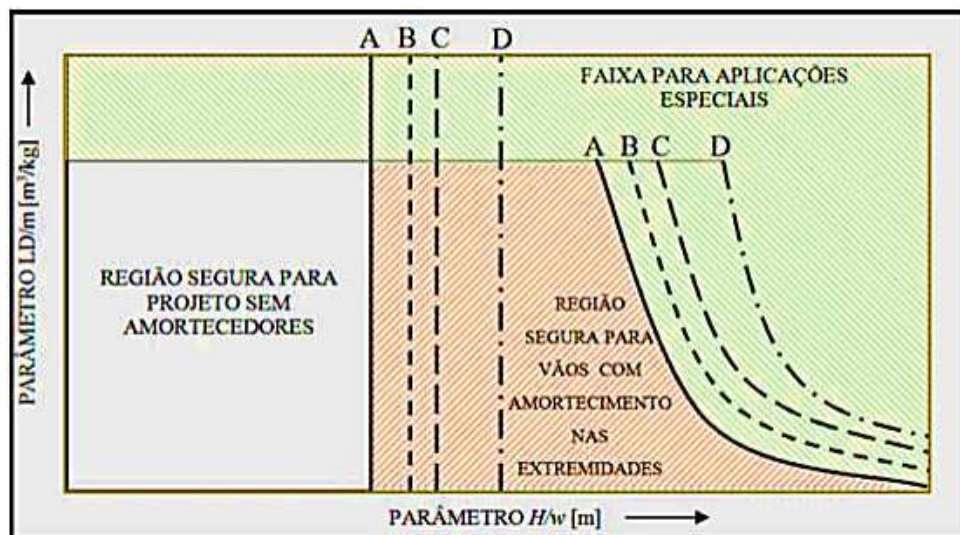


Figura 3.1 – Influência do parâmetro H/w na severidade vibracional.

3.2.2 POFFENBERGER-SWART

No ano de 1961, surgiu a necessidade de examinar os impactos das oscilações provocadas pelo vento nos cabos condutores. Isso levou à criação de um comitê, Força-Tarefa para a Padronização das Medições de Vibração de Condutores (Task Force on the Standardization of Conductor Vibration Measurements) pelo IEEE - *Institute of Electrical and Electronic Engineers*, cujo propósito era estabelecer um método normatizado para avaliar a intensidade das vibrações eólicas nos cabos condutores. Diversas abordagens para este fim foram consideradas, conectando a amplitude das oscilações do cabo a parâmetros que podem ser quantificados ou observados.

A amplitude de flexão é um parâmetro que pode ser medido em campo durante a operação de uma linha de transmissão. Esse aspecto motivou pesquisadores do grupo de estudos da *IEEE* a desenvolverem o método da amplitude de flexão, com o objetivo de verificar se a análise do movimento vibratório e do fenômeno de fadiga poderia ser correlacionada à medição das vibrações em um único ponto específico do cabo.

Após diversos estudos e experimentos com cabos condutores, verificou-se uma forte associação entre a amplitude de flexão e a tensão variável de flexão, medida em laboratório por meio de extensometria. Em 1965, J. C. Poffenberger e R. L. Swart deram uma contribuição de grande relevância ao aprofundar essa investigação. Os autores propuseram uma fórmula analítica capaz de relacionar a distorção dinâmica nas regiões de maior solicitação com a amplitude de curvatura observada nas imediações do grampo de suspensão.

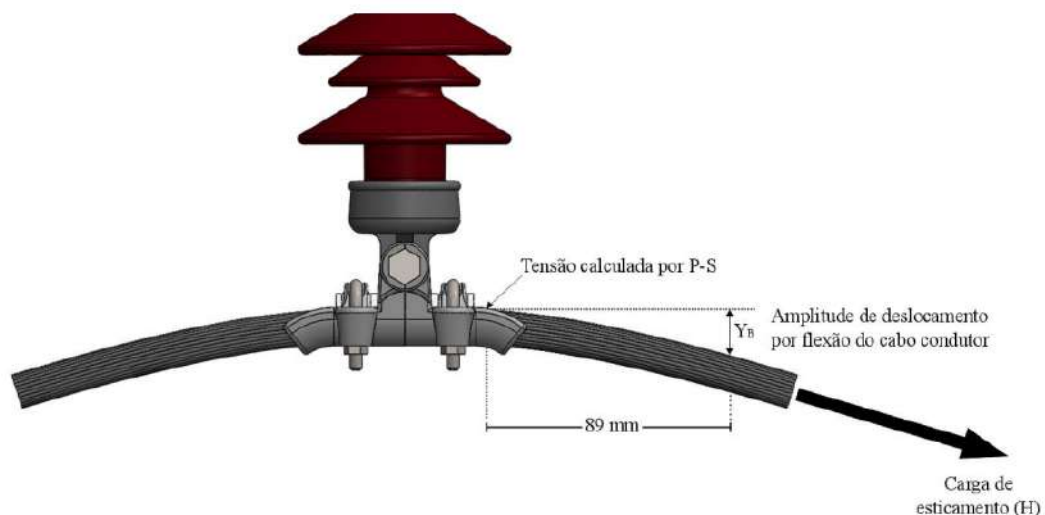


Figura 3.2 – Diagrama esquemático de montagem cabo/grampo de suspensão) (Rocha, 2016)

A relação proposta por Poffenberger–Swart (conhecida como equação P-S) foi desenvolvida a partir da aplicação da teoria da elasticidade e de princípios fundamentais da mecânica, considerando que o trecho do cabo próximo ao grampo de suspensão se comporta

de forma análoga a uma viga de *Euler*, levemente arqueada, submetida a um pequeno deslocamento vertical. A fórmula original foi estabelecida para o caso de condutores rigidamente fixados em grampos de suspensão convencionais (contato metal-metal), sem a utilização de hastes de armadura pré-formada (armor rods). A expressão matemática que relaciona o movimento vibratório do cabo à tensão dinâmica é apresentada a seguir:

$$\sigma_a = K \cdot Y_b \quad (3.1)$$

onde, σ_a é a tensão alternada de flexão (zero a pico) no fio da camada externa do cabo, no topo (ponto exatamente contrário ao UPC), Y_b é a amplitude de flexão (pico-a-pico) medida em um local x que de acordo com a normatização da IEEE, corresponde à distância de 89mm do UPC e K (N/mm^3) significa uma constante definida pela Equação 3.2.

$$K = \frac{E_a \cdot d \cdot p^2}{4(e^{-px} - 1 + px)} \quad (3.2)$$

onde d e E_a são o diâmetro da camada externa do cabo (em mm) e o módulo de elasticidade do cabo (em MPa), respectivamente. O parâmetro p pode ser definido pela Eq. (3.3):

$$p = \sqrt{\frac{H}{EI}} \quad (3.3)$$

O parâmetro H é a carga de esticamento aplicada ao condutor, esta carga gera uma tensão estática no cabo ao qual é chamada de *Everyday Stress* (EDS). O produto entre o módulo de elasticidade do material E e o momento da inércia I é chamado de rigidez à flexão do condutor ($N \cdot mm^2$), cujo, valor mínimo, geralmente aplicado, é determinado pela Equação 3.4:

$$EI_{min} = n_a E_a \frac{\pi \cdot d_a^4}{64} + n_s E_s \frac{\pi \cdot d_s^4}{64} \quad (3.4)$$

onde os parâmetros n_a , E_a e d_a são a quantidade, o módulo de elasticidade e o diâmetro (individual) de fios de alumínio, respectivamente, e n_s , E_s e d_s determinam a quantidade, o módulo de elasticidade e o diâmetro (individual) de fios de aço, respectivamente.

O cálculo da resistência à curvatura do cabo condutor de acordo com a Equação (3.4) pressupõe de maneira implícita que os fios do cabo exibem comportamento autônomo, uma suposição derivada da observação das marcas de *fretting* entre os componentes do cabo. O fenômeno de *fretting* sinaliza a possibilidade de que os fios possam manifestar certa medida de independência em seu funcionamento, visto que sua ocorrência implica em um deslocamento relativo entre as superfícies em contato. No entanto, é igualmente essencial que exista pressão entre essas superfícies, o que por sua vez impõe certas restrições ao movimento (especialmente nas proximidades do grampo de suspensão), resultando em um desvio da concepção de fios operando de maneira completamente autônoma (Gomes, 2015).

O que se nota, na verdade, é uma alteração da rigidez à curvatura do cabo causada pela complexidade na fabricação dos cabos (fios agrupados concentricamente em variadas camadas opostas). A movimentação dos fios, de forma conjunta ou independente, ocorrerá de acordo com a carga de tração que for aplicada no cabo condutor e com o nível de amplitude de flexão (Y_b) atribuído: se Y_b é baixo, os fios do cabo movimentam-se conjuntamente trazendo um comportamento para o condutor como um objeto único (união), com isso a resistência à flexão atinge seu valor limite (EI_{max}); nas situações em que é atribuída uma maior amplitude de flexão (Y_b), os fios do cabo condutor se comportam independentemente e a resistência à flexão desempenha o seu valor mínimo (EI_{min}) que pode ser abordado de acordo com a Equação 3.4.

Apesar das análises e simplificações que são feitas durante a derivação da equação Poffenberger-Swart, a sugestão de uma conexão linear entre a tensão dinâmica no fio do cabo e a extensão de curvatura no local situado a 89 mm do UPC demonstra uma notável coesão com os resultados obtidos em experimentos, o que contribui para a validação da fórmula. Esse respaldo levou à aceitação da equação, resultando em sua recomendação e posterior adoção como método padronizado pelo grupo de estudos do IEEE.

A fórmula de Poffenberger-Swart possibilitou uma percepção maior acerca dos parâmetros que induzem a tensão dinâmica nos fios que estão submetidos à flexão cíclica causadas pelas vibrações eólicas. De acordo com a Equação P-S (3.1), a tensão dinâmica é abalada especialmente pela carga de esticamento do cabo (EDS) e pela resistência à flexão que, conforme o comportamento do condutor, pode induzir diferenças entre os resultados experimentais e teóricos, causados pela sua variação.

Há a possibilidade de relacionar a tensão dinâmica alternada com outros parâmetros que indicam força de oscilação. Com isso, a fórmula P-S pode ser rescrita em formatos equivalentes da Equação 3.1, demonstradas abaixo (EPRI, 2006):

$$\sigma_a = \frac{d \cdot E}{2} \sqrt{\frac{H}{EI}} \beta \quad (3.5)$$

$$\sigma_a = \pi \cdot d \cdot E \cdot \sqrt{\frac{w}{EI}} f Y_{max} \quad (3.6)$$

onde β é o ângulo de vibração do condutor, w é a densidade linear do condutor, f [Hz] é a frequência e Y_{max} é a amplitude de vibração (0 a pico).

3.3 ANÁLISE DE FALHAS

A análise de falhas consiste no exame detalhado de amostras fraturadas, com o objetivo de compreender os mecanismos que levaram ao tipo específico de ruptura. Sua finalidade é identificar as causas e propor medidas que permitam solucionar o problema

ou, ao menos, reduzir os fatores que contribuem para a ocorrência de fraturas, aumentando assim a durabilidade dos componentes e sistemas. A fratura caracteriza-se pela separação completa do material em duas partes, resultante da propagação de uma trinca que se torna instável até atingir a ruptura total. Para esse estudo, a superfície fraturada é submetida a uma análise minuciosa, conduzida conforme o método estabelecido pela ASM, Volume 11 (2002) (ASM, 2002), que corresponde a

- Seleção e Identificação de amostras;
- Limpeza e caracterização da amostra;
- Verificação Macroscópica;
- Verificação Microscópica;
- Análise de tensões incluídas para determinar o modo de fratura.

3.3.1 SELEÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS

A preservação da superfície fraturada é fundamental para garantir a confiabilidade na determinação das causas da falha, evitando a perda de informações que podem ser essenciais ao processo. Para isso, a amostra deve ser devidamente identificada e acompanhada de registros detalhados, como: tipo de material, carga aplicada durante o ensaio, data da ocorrência, local exato da fratura, distância da quebra até a boca do grampo e até o último ponto de contato, entre outros parâmetros relevantes.

Uma vez selecionada, a amostra deve ser separada das demais e preparada para análise. Em alguns casos, pode ser necessária a limpeza para facilitar a observação macro e microscópica; no entanto, esse procedimento deve ser realizado com extremo cuidado, sendo vedado o uso de produtos químicos que possam alterar as características originais da superfície fraturada, a fim de evitar interpretações equivocadas quanto à origem da falha.

3.3.2 ANÁLISE MACROSCÓPICA

A análise macroscópica constitui a etapa inicial no processo de identificação das causas de uma fratura, realizada a olho nu, com auxílio de lupa ou de microscópio de baixo aumento (até cerca de 100 vezes). Nessa fase, são registrados dados fundamentais, como o comprimento e a morfologia da fratura, a localização das regiões de maior concentração de tensões, a presença de trincas secundárias e o trajeto de propagação da trinca, permitindo determinar seu ponto de início e de término. Esse tipo de exame fornece informações preliminares relevantes sobre o material fraturado, evidenciando características associadas a diferentes comportamentos (frágil ou dúctil) e auxiliando na classificação do modo de falha em função do tipo de carregamento aplicado.

3.3.3 ANÁLISE MICROSCÓPICA

Essa análise corresponde a uma abordagem mais aprofundada da fratura com a averiguação dos motivos mais específicos e, preferivelmente é feita por meio de microscópios com alta capacidade de aumento e maior capacidade de resolução, tais como os microscópios óticos e eletrônicos de varredura.

3.3.4 MICROSCÓPIO ÓTICO

Nos microscópios ópticos convencionais, o aumento útil atinge um limite prático de aproximadamente 2.000 vezes. Acima desse valor, a resolução da imagem é comprometida, dificultando a visualização de detalhes, uma vez que aumento e resolução não são conceitos equivalentes: enquanto o aumento corresponde à ampliação da imagem, a resolução expressa a capacidade de distinguir dois pontos muito próximos. Assim, um aumento excessivo sem resolução adequada resulta em imagens borradas e sem nitidez.

Para obter maior resolução, é necessário utilizar radiação com comprimento de onda menor que o da luz visível. Por essa razão, os microscópios eletrônicos empregam feixes de elétrons, que apresentam comprimento de onda significativamente reduzido, possibilitando a observação em escala nanométrica. Essa técnica é amplamente aplicada em análises fractográficas, como a caracterização de superfícies fraturadas (Figura 3.3).



Figura 3.3 – Microscópio Ótico (Aspden *et al.*, 2015)

3.3.5 MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA

O microscópio eletrônico de varredura (MEV), ilustrado na Figura 3.4, oferece maior profundidade de campo e ampliação quando comparado a um microscópio óptico. Essa capacidade permite análises mais detalhadas, como a espectroscopia dispersiva de energia de raios X (EDS) e a identificação do tipo de carga em um componente. O MEV opera com um feixe de elétrons que percorre a superfície da amostra em um padrão x-y. Conforme o feixe interage com o material, ele gera sinais que são coletados e convertidos em imagens.

Esses sinais fornecem informações detalhadas sobre a estrutura e a composição da amostra, revelando características invisíveis a outros tipos de microscopia.



Figura 3.4 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

Utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), é possível realizar uma análise detalhada das superfícies de fratura. O grande aumento do MEV permite a observação de características como as microdepressões (*dimples*), que são essenciais para entender o tipo de carregamento a que o material foi submetido. A Figura 3.5 ilustra claramente a relação entre o formato dessas microdepressões e os diferentes modos de fratura.

MODOS DE FRATURA E O FORMATO DOS DIMPLES

- **Modo I (Tração):** Caracterizado por um carregamento de tração, as microdepressões adquirem uma forma **equiaxial**, indicando que a força foi distribuída uniformemente.
- **Modo II (Cisalhamento):** Nesse modo, as microdepressões são mais **distendidas e oblongas**, refletindo um carregamento de cisalhamento.
- **Modo III (Cisalhamento Severo):** A forma dos dimples é ainda mais **alongada**, indicando um rompimento associado a um cisalhamento severo.

Essa análise é fundamental para entender como o material se comporta sob diferentes forças e para identificar possíveis pontos de falha.

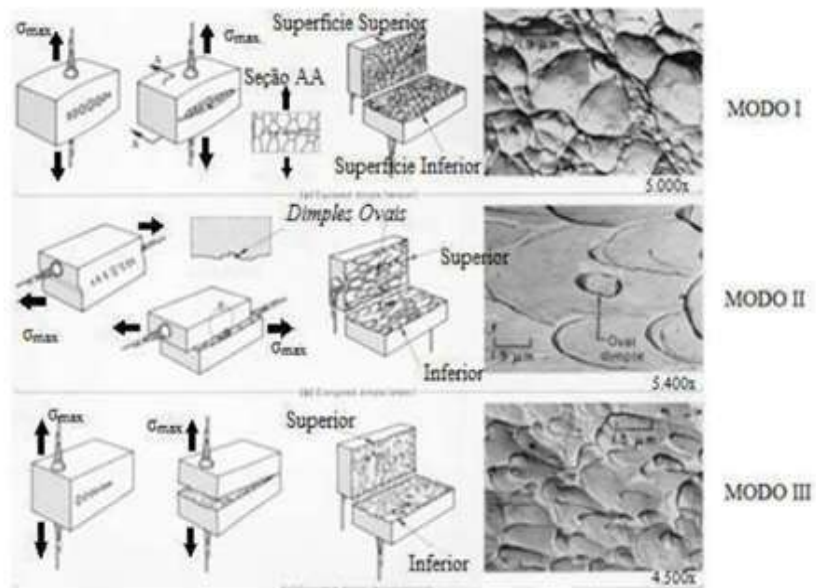


Figura 3.5 – Formato das microdepressões em maneiras diferentes de carregamento (ASM, 2002)

O MEV também revela o tipo de fratura. As fraturas dúcteis (também chamadas de maleáveis) são identificadas por uma deformação plástica significativa, que ocorre com um elevado gasto energético. A superfície da fratura dúctil geralmente brilha e possui uma área de seção transversal que, apesar da grande deformação, não se reduz drasticamente. Ao contrário, a fratura frágil apresenta pouca ou nenhuma deformação plástica e gasta pouca energia.

4 METODOLOGIA: MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são descritos os materiais, equipamentos e procedimentos experimentais empregados para a realização dos ensaios de fadiga. São detalhados a bancada de testes, o cabo utilizado, a instrumentação de monitoramento e o protocolo adotado para coleta e tratamento dos dados, garantindo a reprodutibilidade e a confiabilidade dos resultados.

4.1 VISÃO GERAL DA METODOLOGIA ADOTADA

O presente capítulo descreve os procedimentos experimentais utilizados para avaliar o comportamento em fadiga de cabos condutores submetidos a vibrações induzidas pelo vento. O objetivo central da metodologia é relacionar as condições de excitação aplicadas nos ensaios — frequência, amplitude e número de ciclos de vibração — com a degradação estrutural dos cabos, tanto nos fios externos quanto internos, de modo a possibilitar a estimativa de sua vida útil em operação.

Para alcançar esse objetivo realizaram-se ensaios em bancada de testes, com monitoramento contínuo por meio de sensores e sistema de aquisição de dados. As variáveis investigadas incluem a frequência de vibração, a amplitude de deslocamento, o número acumulado de ciclos e a ocorrência de falhas nos fios. A análise dos dados permitiu tanto a caracterização da resposta dinâmica do cabo como a validação de critérios normativos de fadiga estabelecidos por organismos internacionais (CIGRÉ, IEC).

4.2 BANCADA EXPERIMENTAL E COMPONENTES UTILIZADOS

Os ensaios foram realizados na bancada do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia (Lab.Cabos) da Universidade de Brasília (UnB). A bancada de testes, representada na Figura 4.1, possui aproximadamente 47 m de comprimento, dividida em vão ativo e passivo. O vão ativo se estende do grampo de suspensão até a roldana do bloco fixo 1, onde a amostra é submetida à vibração, podendo variar entre 31 e 41 m de comprimento, conforme a posição do bloco móvel. O vão passivo corresponde à região de ancoragem do cabo, fixado por grampos e tensionado por meio de uma talha de alavanca. O alinhamento entre o cabo, a roldana e o grampo de suspensão é essencial para o correto funcionamento do ensaio (Henriques, 2006).

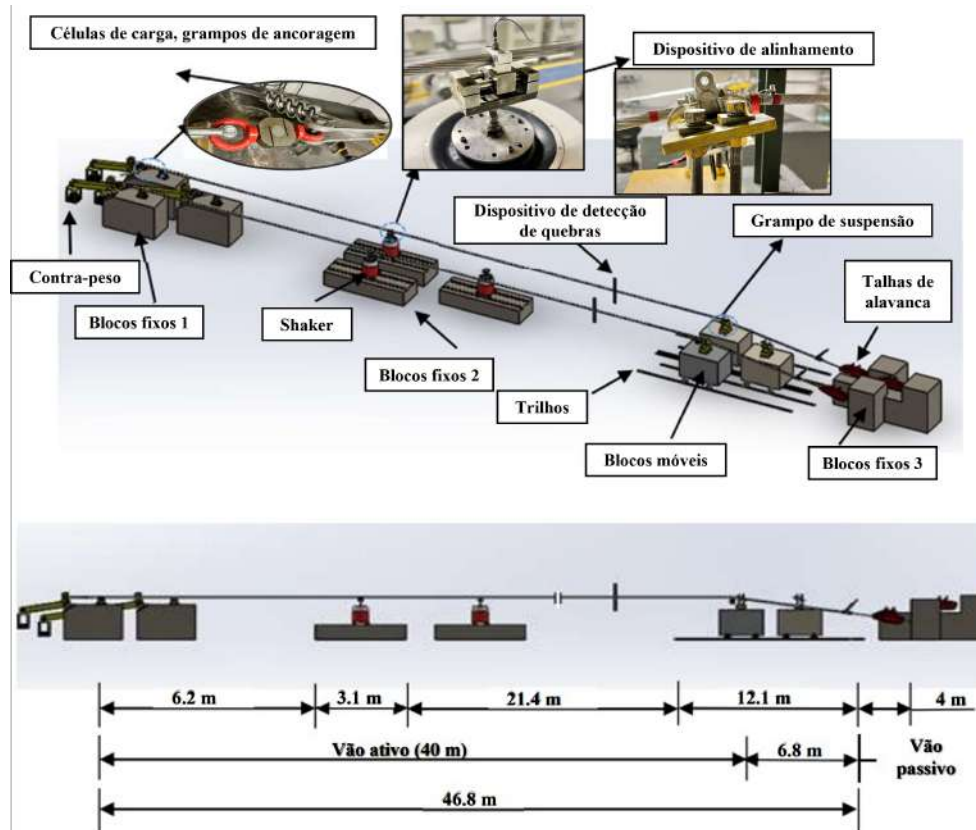


Figura 4.1 – Imagem ilustrativa da bancada de ensaios do Laboratório de Cabos do Grupo de Fadiga, Fraturas e Materiais (GFFM/UnB). (com adaptações de (Rocha, 2016))

4.2.1 CABO CONDUTOR

Neste estudo foi utilizado o cabo CAL/AAAC 838 MCM (Liga de Alumínio 1120), referido de forma simplificada como CAL 838 MCM. A Tabela 4.1 apresenta suas principais propriedades geométricas, mecânicas e construtivas. Ressalta-se que este cabo é constituído integralmente por fios de liga de alumínio, tanto na camada externa quanto nas camadas internas.

Tabela 4.1 – Propriedades técnicas do CAL/AAAC 838 MCM.

Descrição	Unidades	Dados
Liga de Alumínio	-	Liga 1120
Bitola	-	838 MCM
Diâmetro do Cabo	mm	26.78
Área da Seção Nominal do Cabo	mm ²	425.16
Densidade Linear do Cabo	kg/km	1170.9
Peso Linear do Cabo	N/m	11.49
Carga Nominal de Ruptura (RMC)	kgf	7394
Coefficiente de Poisson (ν)	-	0.33
Limite de escoamento (S_y)	MPa	245
Limite de Tração (S_{ut})	MPa	249
Módulo de Elasticidade (E_a)	GPa	68.9
Diâmetro do Fio (d_a)	mm	3.14
Número de Fios (n_a)	-	26
Dureza (Vickers)	HV	57

4.2.2 FIXAÇÃO DO GRAMPO DE SUSPENSÃO

O grampo de suspensão monoarticulado é o componente responsável por prender o cabo nas torres de linhas de transmissão. Ele é constituído por duas partes principais: o corpo e a tampa, ambos feitos em liga de alumínio de alta resistência mecânica, não magnética e altamente resistente à corrosão. Os elementos ferrosos, feitos de aço carbono, são galvanizados por imersão a quente para aumentar a durabilidade. Na Figura 4.2, são mostrados a geometria e os materiais do grampo monoarticulado.

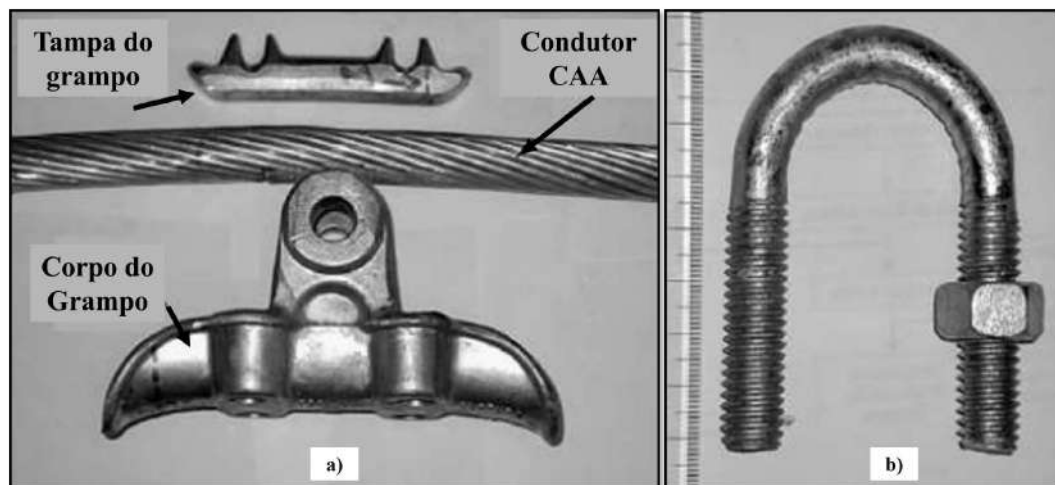


Figura 4.2 – Grampo de suspensão: a) Conjunto: grampo de suspensão monoarticulado/cabo condutor; e b) parafuso em formato U do grampo - com adaptações (Fadel, 2010).

O grampo de suspensão é instalado no bloco móvel, conforme Figura 4.3, que é apropriado para representar o mesmo ângulo de saída do cabo usado em Linha de Transmissão -

LT, que é tipicamente de 10° com o intuito de se obter resultados mais próximos à realidade.



Figura 4.3 – Montagem grampo de suspensão - Vista lateral.

Após instalar o grampo na bancada, é fundamental apertar os parafusos de fixação do cabo no grampo para impedir o deslizamento do cabo. A carga de aperto estabelecida para um uso adequado foi de 50 N.m, conforme pesquisa anterior, por (Fadel, 2010).

4.2.3 INSTALAÇÃO DO SUPORTE E DO VIBREC

O vibrógrafo, VIBREC 500, foi instalado em um suporte especialmente projetado e fabricado pelo Laboratório de Cabos da UnB (Fig. 4.4-a). Esse suporte garante robustez e estabilidade, permitindo medições confiáveis mesmo sob condições de vibração intensa e aleatória. A Fig. 4.4-b apresenta a vista traseira do equipamento com a tampa aberta, destacando a disposição dos conectores e a facilidade de acesso para ajustes.

Devido a limitações estruturais, o sensor foi posicionado a 123 mm do último ponto de contato (UPC), em vez da referência padrão de 89 mm (Fig. 4.4-c). Nesses casos, aplica-se o fator de correção definido pela Eq. 4.1, de modo a transportar os deslocamentos medidos para o ponto de referência:

$$f_d = \left(\frac{89}{x_b} \right)^2 \quad (4.1)$$

em que x_b é a distância real de instalação do sensor (mm). A correção é necessária porque a constante K , associada à seção de medição, é sensível à posição de coleta. Se não corrigida, pode superestimar ou subestimar as tensões de flexão, afetando a estimativa de vida útil do cabo. O valor de 89 mm, indicado pelo CIGRÉ, corresponde a uma região em que a vibração é dominada pela rigidez do condutor, minimizando efeitos inerciais.

O software *Life 500* foi configurado para gerenciar a coleta de dados por meio de intervalos de registro ajustados de forma a otimizar o uso da memória e da bateria, ainda que essa estratégia limite a captura de variações sazonais prolongadas de vento ou temperatura. A Fig. 4.4-d ilustra a posição do sensor LVDT, no conjunto experimental.

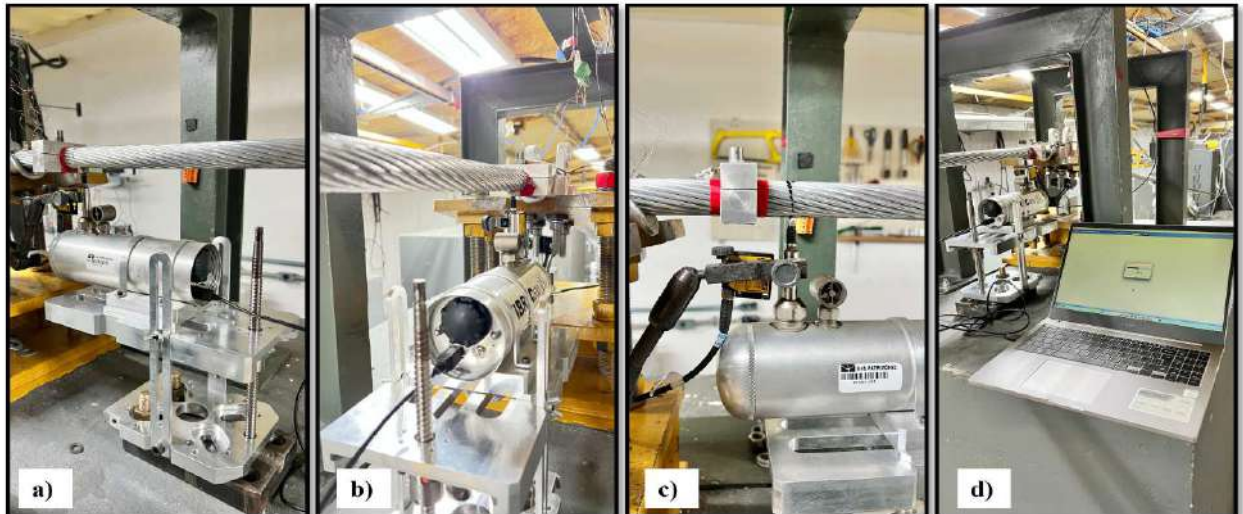


Figura 4.4 – VIBREC 500 instalado no Laboratório de Cabos da UnB: (a) vista lateral com suporte de fixação; (b) vista traseira com tampa aberta, destacando os conectores; (c) posicionamento do sensor a 123 mm do último ponto de contato (UPC); (d) interface do software *Life 500* mostrando a posição do sensor LVDT, no conjunto experimental

4.2.4 DISPOSITIVOS DE EXCITAÇÃO E MEDIÇÃO

O dispositivo de excitação utilizado foi o *shaker* eletromagnético Data Physics V400LT, mostrado na Figura 4.5. Este equipamento reproduz a vibração eólica simulando as condições reais em linhas de transmissão, provocando a fadiga no cabo. Ele possui limite de força senoidal de 4,6 kN, limite de força aleatória de 1,38 kN e deslocamento máximo de 25,4 mm (pico a pico).



Figura 4.5 – Shaker eletromecânico Data Physics V400LT.

4.2.5 AQUISIÇÃO E CONTROLE DE DADOS

Os sinais dos extensômetros, sensores de deslocamento a laser e sensores de temperatura foram captados pelo sistema de aquisição ADS 1800 (Fig. 4.6), composto por oito canais, resolução de 24 bits e frequência de amostragem de até 96 kHz. O dispositivo realiza a conversão A/D e transmite os dados via Ethernet para o computador, onde foram processados.



Figura 4.6 – Equipamento de aquisição de sinais ADS 1800 - Lynx.

O controle do teste foi feito pelo controlador de vibração LDS LAS-200 (Fig. 4.7), com oito canais de leitura conectados aos acelerômetros posicionados próximos ao UPC e ao *shaker*. O software de controle LDS SW BUNCLE Premier garante a manutenção das condições previstas, regulando o excitador em tempo real.

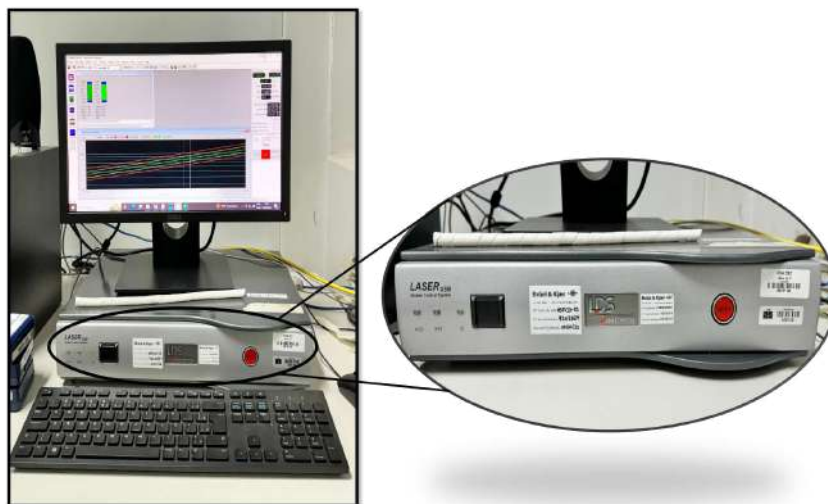


Figura 4.7 – Controlador de vibração LDS LAS-200 e interface de software.

4.3 ARRANJO EXPERIMENTAL E PROTOCOLO DE ENSAIO

Para proporcionar um entendimento claro e preciso da metodologia e dos procedimentos experimentais, apresenta-se a seguir um fluxograma (Fig. 4.8) que ilustra, de maneira

minuciosa, as principais etapas e processos seguidos neste trabalho. Essa representação visual facilita a compreensão das sequências e métodos adotados ao longo dos ensaios.

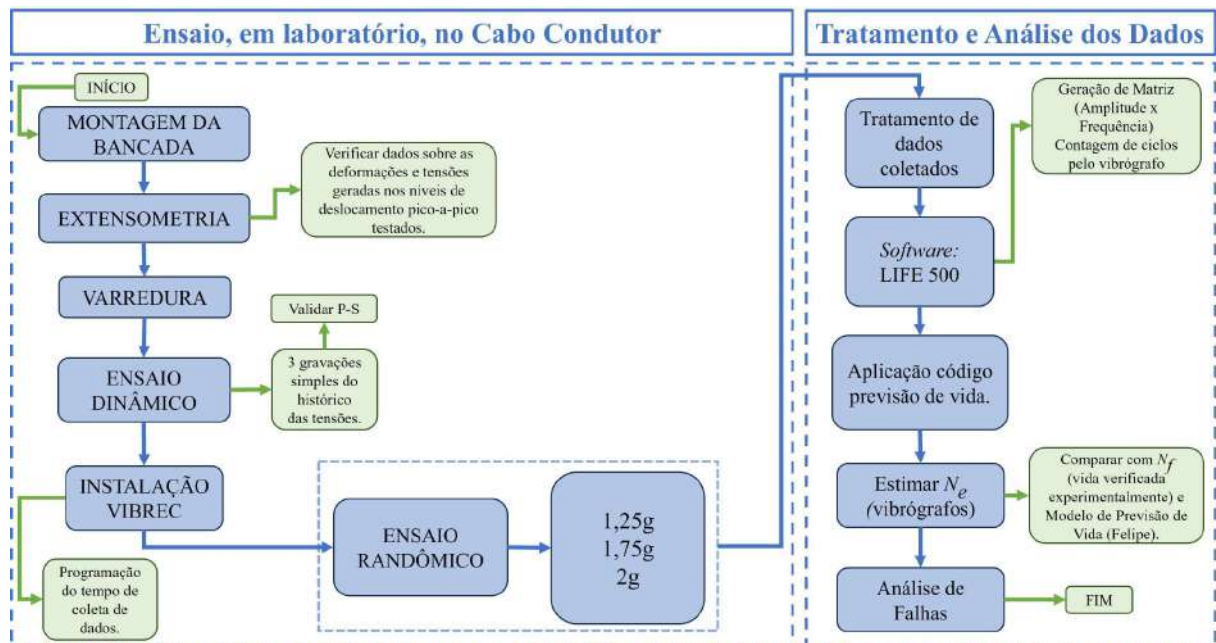


Figura 4.8 – Fluxograma de execução das etapas experimentais.

Os ensaios desta pesquisa foram conduzidos em colaboração com um colega de laboratório. O cabo condutor foi submetido a um regime controlado de vibração de natureza translacional, caracterizado por deslocamentos verticais perpendiculares ao seu eixo, induzidos pelo sistema vibratório da bancada de testes.

O carregamento aplicado foi exclusivamente de amplitude variável, com comportamento estocástico, de modo a simular as condições aleatórias de excitação induzida pelo vento em linhas de transmissão reais. Esse regime foi mantido de forma contínua ao longo de cada ensaio.

4.3.1 AQUISIÇÃO DE DADOS E INSTRUMENTAÇÃO

A aquisição dos sinais de resposta foi realizada pelo sistema **VIBREC 500**, que emprega internamente a **contagem de ciclos pelo método Rainflow**, consolidando o histórico de carregamento em uma matriz contendo número de ciclos, amplitudes equivalentes e distribuição de frequências. Assim, os dados utilizados nos algoritmos de previsão de vida foram obtidos diretamente do equipamento, sem etapas adicionais de filtragem ou condicionamento externo.

Cada ensaio teve duração entre 3 e 7 dias, garantindo a aplicação de milhões de ciclos de flexão ao condutor, suficientes para caracterizar os efeitos de fadiga em regime aleatório.

Após a instrumentação da bancada A e a calibração dos sensores, instalou-se o vibrômetro em seu suporte. Antes do início dos ensaios, realizou-se uma varredura de frequências a fim de identificar a frequência de excitação ideal para a amplitude de flexão estabelecida. Uma vez definida, iniciaram-se os ensaios e a coleta de dados.

As medições de deformação foram registradas por extensômetros, enquanto os deslocamentos foram monitorados por acelerômetros e por um sensor a laser instalado no cabo. Para cada condição de deslocamento, foram efetuadas três coletas de dados, cada uma com duração aproximada de 30 segundos. A partir desses dados, as tensões foram calculadas por meio da equação de Poffenberger–Swart (Eq. 3.1).

4.3.2 INSTALAÇÃO DE SENSORES

Com o grampo de suspensão devidamente fixado, garantido o não deslizamento do cabo, iniciou-se a instalação dos sensores utilizados no ensaio. Foram empregados dois acelerômetros: um acoplado ao *shaker*, para controle da vibração, e outro posicionado a 89 mm do último ponto de contato (UPC) entre o cabo e o grampo.

Para detectar a ruptura dos fios, utilizou-se um dispositivo específico composto por duas hastes fixadas ao condutor, presas por abraçadeira, e dois sensores a laser com faixa de medição de 16 a 120 mm, integrados ao sistema de aquisição de dados (Fig. 4.9).

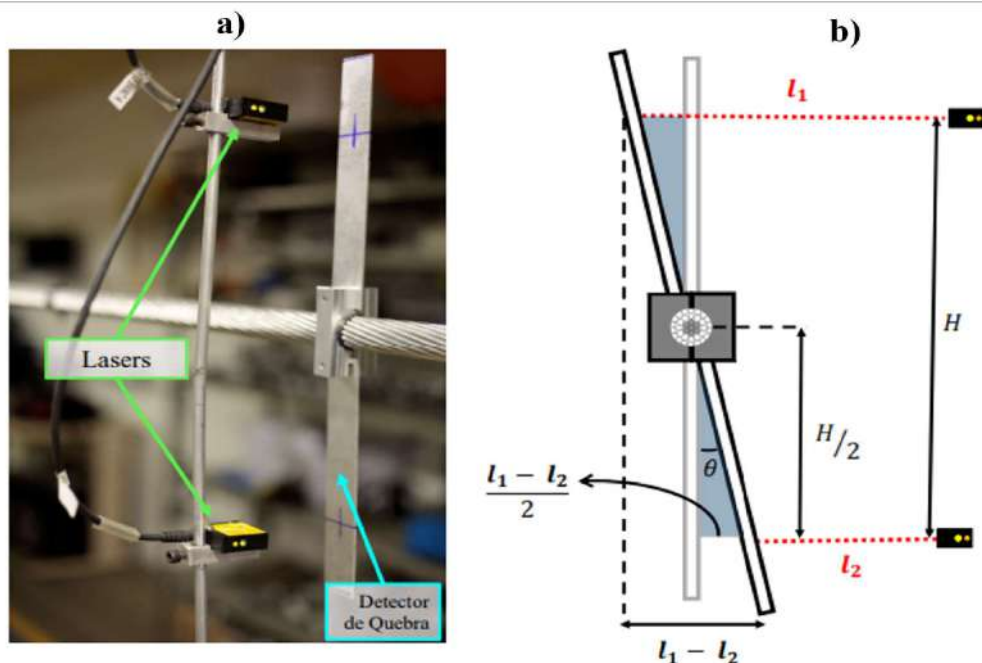


Figura 4.9 – Imagem mostrando: a) Imagem do equipamento experimental para detectar quebras; e b) diagrama ilustrando como medir o ângulo de rotação do condutor após a quebra de um fio. - (Lima, 2023)

Quando ocorre a ruptura de um fio, a carga que ele suportava é redistribuída entre

os fios remanescentes, gerando rotação do condutor. Nesse instante, os sensores a laser identificam a alteração na distância entre os feixes (l_1 e l_2) e a vareta de alumínio, permitindo calcular o ângulo de rotação do condutor pela Eq. 4.2. Assim, torna-se possível registrar a quantidade de ciclos de tensão acumulados até a falha do fio.

$$\theta = \arctan\left(\frac{l_1 - l_2}{H}\right) \quad (4.2)$$

onde l_1 e l_2 são as distâncias medidas pelos lasers e H a altura de referência do dispositivo.

O sistema registra automaticamente essas variações, exibindo os dados em gráficos (Fig. 4.10), o que facilita a identificação da ruptura e a contagem dos ciclos correspondentes. Ressalta-se que os ângulos medidos podem variar conforme a camada estrutural em que o fio se encontrava no momento da falha.

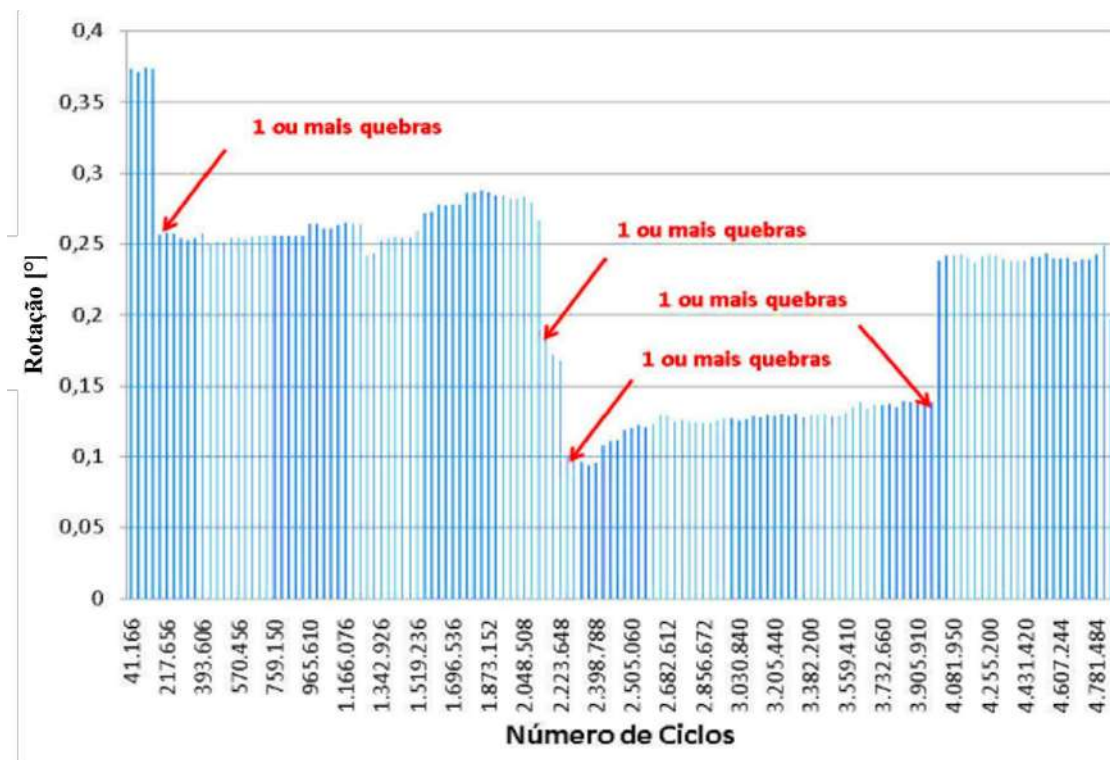


Figura 4.10 – Gráfico que possibilita a identificação das quebras dos fios - (Reinke, 2017)

4.3.3 CONFIGURAÇÃO DO VIBRÓGRAFO

O vibrógrafo foi configurado para coletar dados em períodos determinados, utilizando diferentes classes de aceleração do *shaker*. Nesse contexto, a “classe de aceleração” refere-se ao nível de aceleração imposto ao condutor, expresso em unidades de gravidade ($g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$). Seguindo a recomendação do CIGRÉ para ensaios de vibração, estabeleceu-se um intervalo de amostragem de 10 segundos a cada 15 minutos, resultando em um total acumulado de 960 segundos por dia de ensaio.

Ao término de cada período programado, os dados foram coletados pelo software **Life 500**, do próprio VIBREC. Em seguida, foram processados por um algoritmo computacional desenvolvido para previsão de vida do cabo. Esse processamento permitiu estimar $N_e^{10^6}$, que corresponde à vida útil calculada pelo modelo de acumulação de danos no domínio do tempo, a partir dos dados de amplitude versus frequência obtidos pelo VIBREC e dos parâmetros da curva S–N do Lab.Cabos e do CIGRÉ. Essa estimativa foi posteriormente comparada com $N_f^{10^6}$, que representa a vida útil experimental, expressa em milhões de ciclos até a ocorrência da primeira falha.

4.4 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS

A coleta de sinais foi realizada pelo VIBREC 500, configurado para registrar intervalos de 10 segundos de dados a cada 15 minutos. Essa estratégia permitiu reduzir significativamente o consumo de memória e de bateria, assegurando a viabilidade da instrumentação em campanhas experimentais prolongadas.

Durante cada janela de aquisição, os sinais de aceleração e deslocamento foram registrados em alta frequência de amostragem, garantindo a captura adequada da resposta dinâmica do condutor. Os dados brutos, imediatamente após a coleta, foram processados pelo próprio equipamento, por meio do algoritmo de contagem de ciclos *Rainflow*, consolidando o histórico de carregamento em uma matriz contendo número de ciclos, amplitudes equivalentes e distribuição de frequências.

Dessa forma, os resultados obtidos já representam uma versão tratada dos sinais medidos, não havendo etapas adicionais de filtragem ou condicionamento externo. As matrizes geradas pelo VIBREC serviram diretamente como entrada, no algoritmo, para o cálculo da vida em fadiga, em conformidade com os procedimentos recomendados pelo CIGRÉ para ensaios de vibração em condutores.

4.5 OBSERVAÇÕES COMPLEMENTARES

Algumas decisões metodológicas adotadas nesta pesquisa foram necessárias para compatibilizar as limitações práticas da bancada de ensaio com os requisitos normativos e de confiabilidade experimental.

A primeira decisão refere-se à **posição do sensor do VIBREC**, que foi instalada a 123 mm do último ponto de contato (UPC), em vez da distância de referência de 89 mm indicada pelo CIGRÉ. Essa alteração ocorreu por limitações estruturais de montagem, sendo aplicada a correção correspondente conforme a Eq. 4.1, de modo a manter a consistência com as normas internacionais.

Outra decisão metodológica diz respeito ao **uso de excitação exclusivamente de amplitude variável**, em regime contínuo, de forma a representar de maneira mais realista as condições estocásticas de vento em linhas aéreas. Embora ensaios com amplitude constante permitam maior controle experimental, optou-se pelo carregamento aleatório por oferecer maior representatividade física para a análise de fadiga.

Como limitação, destaca-se que os ensaios foram conduzidos em ambiente de laboratório, não contemplando variações ambientais de temperatura, umidade ou velocidade de vento típicas de campo. Ainda assim, o protocolo experimental foi estruturado de acordo com as recomendações do CIGRÉ e de trabalhos consolidados da literatura, assegurando a conformidade com os padrões técnicos e a reprodutibilidade dos resultados.

4.6 PROCEDIMENTO DE COLETA DE AMOSTRAS PARA ANÁLISE DE FALHA

Ao término de cada ensaio, todos os sensores foram removidos e as roldanas posicionadas para facilitar o manuseio do cabo. Em seguida, a boca do grampo foi marcada com fita vermelha para garantir a identificação correta. O braço de alavanca próximo à célula de carga foi então erguido com auxílio da corrente até próximo da horizontal (90°), em seguida, liberou-se *tifor*, localizado próximo às bobinas no vão passivo. Por fim, procedeu-se à abertura do grampo de ancoragem adjacente à célula de carga.

As etapas subsequentes de coleta da amostra estão organizadas no fluxograma da Fig. 4.11, que apresenta de forma resumida e sequencial o protocolo adotado.

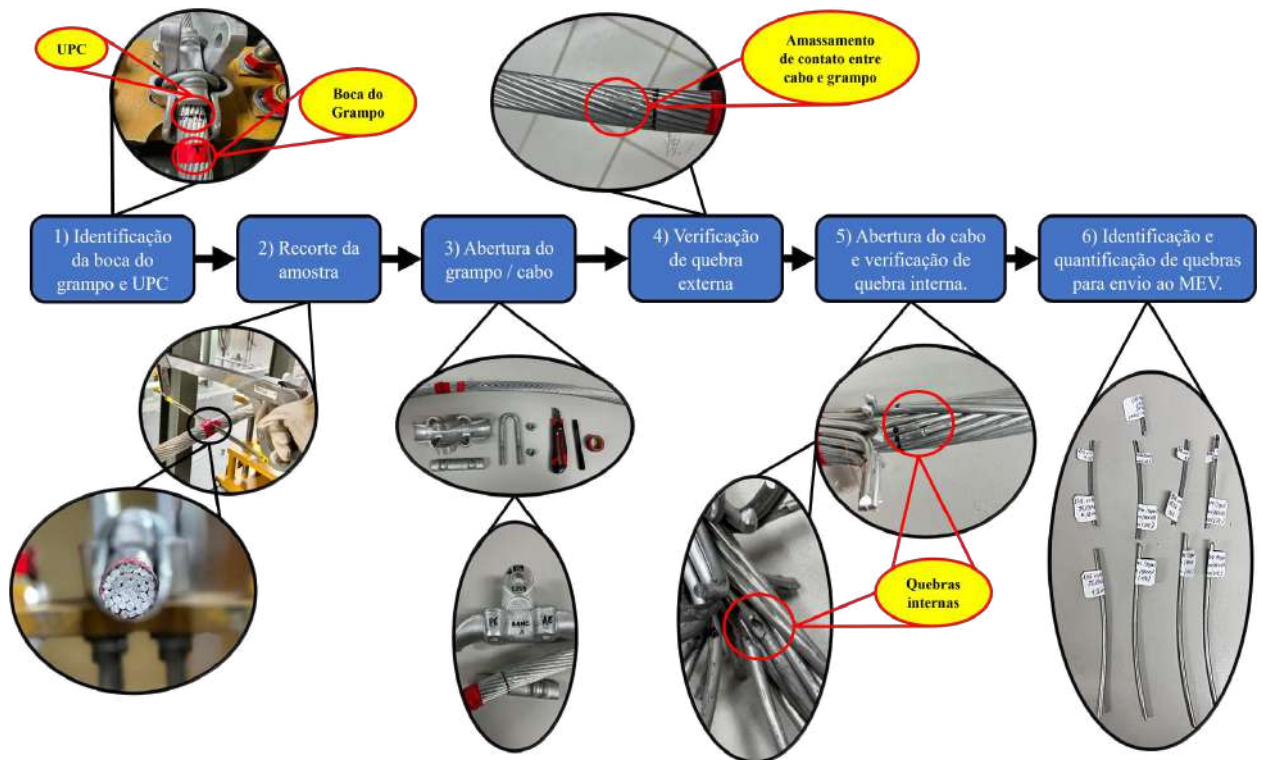


Figura 4.11 – Fluxograma do procedimento de coleta de amostras para análises de falha.

Primeiramente, identifica-se a posição da boca do grampo e do UPC (**Etapa 1**). Em seguida, o cabo é cortado em ambos os lados do grampo de suspensão (**Etapa 2**) e o grampo aberto para liberação total do cabo (**Etapa 3**). Na sequência, a extremidade correspondente ao vão ativo e ao vão passivo é marcada para referência posterior (**Etapa 4**).

Realiza-se então uma inspeção macroscópica para identificar possíveis quebras externas. Caso sejam encontradas, estas são coletadas e registradas individualmente. Se nenhuma quebra externa for observada, procede-se à abertura das camadas internas do cabo (**Etapa 5**).

Por fim, realiza-se a quantificação das falhas identificadas, registrando-se sua distância em relação à boca do grampo e ao UPC, bem como o formato da fratura (**Etapa 6**). As amostras são então encaminhadas ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), onde obtém-se imagens detalhadas para caracterização fractográfica.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta e analisa os resultados obtidos nos ensaios experimentais de fadiga realizados com o cabo CAL 838 MCM – Liga 1120. São discutidas tanto as previsões de vida, calculadas a partir dos dados do VIBREC e de modelos teóricos, quanto as falhas observadas nas amostras ensaiadas. A abordagem combina análise quantitativa e qualitativa, permitindo compreender a relação entre carregamento aleatório, mecanismos de degradação e durabilidade estrutural dos condutores.

5.1 INTRODUÇÃO GERAL AOS RESULTADOS

Esta seção reúne os resultados dos ensaios de fadiga realizados com o cabo CAL 838 MCM – Liga 1120, submetido a carregamento aleatório na bancada de testes do Laboratório de Cabos da Universidade de Brasília. O foco é avaliar a vida útil prevista a partir dos dados registrados pelo sistema VIBREC 500 e, de forma complementar, examinar os mecanismos de falha identificados nos fios rompidos.

Para melhor organização, os resultados estão estruturados em quatro blocos principais. Na Seção 5.1 é descrito o período de análise adotado para o processamento dos sinais coletados, destacando-se a distribuição dos ciclos de vibração em função da amplitude e da frequência. Na Seção 5.2, apresenta-se o modelo de previsão de vida baseado na regra de Palmgren-Miner, confrontando a vida estimada com as curvas S-N do Laboratório de Cabos e do CIGRÉ. Em seguida, na Seção 5.3, são discutidas as análises macroscópicas e microscópicas das superfícies de falha, realizadas por observação direta e por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Finalmente, na Seção 5.4, procede-se à discussão integrada dos resultados, relacionando a previsão de vida com os mecanismos de falha identificados sob carregamento aleatório.

Dessa forma, busca-se não apenas apresentar os dados experimentais, mas também interpretar criticamente os fenômenos observados, de modo a compreender a relação entre a previsão teórica de vida e o comportamento real do condutor em fadiga.

5.2 RESULTADOS DA PREVISÃO DE VIDA À FADIGA

5.2.1 DESCRIÇÃO DO ALGORITMO DE PREVISÃO DE VIDA

O processamento computacional desenvolvido em Python teve por objetivo estimar a vida em fadiga dos cabos a partir dos dados coletados pelo VIBREC. Nesta seção apresenta-se

o fluxo lógico do algoritmo, sem repetição das definições teóricas já tratadas nos Capítulos 2 e 3.

O procedimento pode ser resumido nas seguintes etapas:

1. **Definição de entradas:** são fornecidos, ao algoritmo, os parâmetros geométricos e mecânicos do cabo (número de fios, módulos de elasticidade, diâmetros e carga de ruptura), além da condição de esticamento (%EDS). Também são carregados os parâmetros das curvas $S-N$ do Lab.Cabos e do CIGRÉ e a taxa média de cruzamentos de nível (NSP) determinada pelo VIBREC.
2. **Cálculo da constante de Poffenberger-Swart (K_{PS}):** a partir das propriedades do cabo e da posição de medição, o algoritmo calcula o parâmetro de rigidez e, em seguida, a constante K_{PS} , necessária para converter deslocamentos medidos em amplitudes de flexão equivalentes.
3. **Formação da matriz de ciclos:** o histograma de deslocamentos pico a pico fornecido pelo VIBREC é processado, gerando a matriz de frequências de ocorrência $\{\Delta_i, n_i\}$ para cada classe de amplitude.
4. **Conversão para tensões alternadas:** cada deslocamento Δ_i é convertido em amplitude de tensão $\sigma_{a,i}$ utilizando-se a constante K_{PS} .
5. **Cálculo da vida em ciclos:** para cada classe, estima-se o número de ciclos até a falha ($N_{f,i}$) com base na curva $S-N$ selecionada. Em seguida, calcula-se o dano elementar $D_i = n_i/N_{f,i}$.
6. **Acúmulo de dano:** aplicando a regra de Palmgren-Miner, soma-se o dano total $D = \sum_i D_i$. A partir do número total de ciclos contabilizados (n_{tot}), a vida estimada é obtida por:

$$N_e = \frac{n_{tot}}{D}.$$

7. **Conversão ciclos-tempo:** por meio da taxa de cruzamentos NSP, converte-se a vida em ciclos para tempo em segundos, dias e anos.

Ao final, o algoritmo fornece como saídas:

- a previsão de vida em ciclos e em tempo (T_e), considerando tanto os parâmetros do Lab.Cabos quanto os do CIGRÉ;
- indicadores auxiliares de comparação entre resultados experimentais e preditivos.

Ressalta-se que toda a formulação matemática (curvas $S-N$, método de Miner, constante de Poffenberger-Swart e contagem de ciclos) já foi apresentada em seções anteriores; aqui se expõe apenas o encadeamento prático de sua implementação.

5.2.2 RESULTADOS NUMÉRICOS E GRÁFICOS

5.2.2.1 RESULTADOS DA COLETA DE DADOS COM O VIBREC

A metodologia de coleta de dados seguiu as recomendações do CIGRÉ, com o VIBREC programado para registrar 10 segundos de dados ativos a cada 15 minutos. Esta estratégia, embora não configure um monitoramento contínuo, é padronizada para otimizar o uso da bateria e da memória do dispositivo, sendo essencial para análises de longa duração.

Foram definidos três intervalos de análise distintos, cada um submetido a uma classe de aceleração específica do shaker, de modo a simular diferentes regimes de carregamento. A Tabela 5.1 apresenta a síntese dos parâmetros de cada ensaio, incluindo a aceleração aplicada e a duração total da coleta de dados.

Tabela 5.1 – Parâmetros dos Períodos de Análises dos Ensaio

Ensaio	Classe de Aceleração	Tempo de Duração (s)	Intervalo de Coleta
1	2g	2880	10 segundos, a cada 15 minutos
2	1,25g	6720	
3	1,75g	3840	

O primeiro intervalo de análise, com aceleração de 2g, durou aproximadamente 3 dias e resultou em 2880 segundos de registros. Apesar do período relativamente curto, os dados mostraram-se suficientes para caracterizar o regime dinâmico. O segundo intervalo, com aceleração de 1,25g, foi monitorado ao longo de 7 dias, totalizando 6720 segundos de gravação. Por fim, o terceiro intervalo foi conduzido sob aceleração de 1,75g, durante 4 dias, gerando 3840 segundos de registros.

5.2.2.2 DISCUSSÃO SOBRE OS PERÍODOS DE ANÁLISE

A análise da Tabela 5.1 evidencia diferenças significativas entre os três períodos de ensaio. O intervalo conduzido com aceleração de 1,25g se destaca por ter gerado a maior quantidade de registros (6720 s), o que proporciona maior robustez e confiabilidade na caracterização do regime vibratório. Em contrapartida, os ensaios conduzidos a 2g e 1,75g, com durações menores (2880 s e 3840 s, respectivamente), limitam a densidade de informação disponível, embora ainda permitam identificar tendências dinâmicas relevantes.

Outro aspecto a ser considerado é que o tempo de aquisição adotado (10 segundos de dados a cada 15 minutos) implica em uma amostragem discreta do carregamento. Isso significa que eventos transitórios ou variações rápidas do sinal podem não ter sido totalmente capturados, principalmente nos períodos mais curtos. Apesar disso, o método segue a recomendação do CIGRÉ e é adequado para estudos de longa duração, equilibrando autonomia do sistema e volume de dados.

A variação entre as classes de aceleração aplicadas demonstra o impacto direto da severidade do carregamento na duração dos ensaios: quanto maior a aceleração, mais rapidamente ocorreram as falhas, reduzindo a janela de observação. Essa relação confirma o caráter não linear da fadiga em cabos condutores, onde pequenas variações na intensidade vibratória resultam em diferenças expressivas na vida em ciclos.

5.2.2.3 RESULTADOS DO MODELO DE PREVISÃO DE VIDA

O modelo de previsão da vida em situações de fadiga aleatória, que se baseia em regras simples de acumulação de dano ao longo do tempo, depende de duas curvas de fadiga distintas:

- A curva de segurança do CIGRÉ (CSBL);
- A curva S-N levantada em laboratório por testes realizados em condições de carregamento de amplitude constante no Lab.Cabos.

Na Figura 5.1, é possível visualizar a curva S-N, levantada em laboratório, para o Cabo CAL 838-MCM Liga 1120. Esta curva foi utilizada como um dos parâmetros de entrada no algoritmo de previsão de vida à fadiga, servindo como referência para o cálculo do dano acumulado.

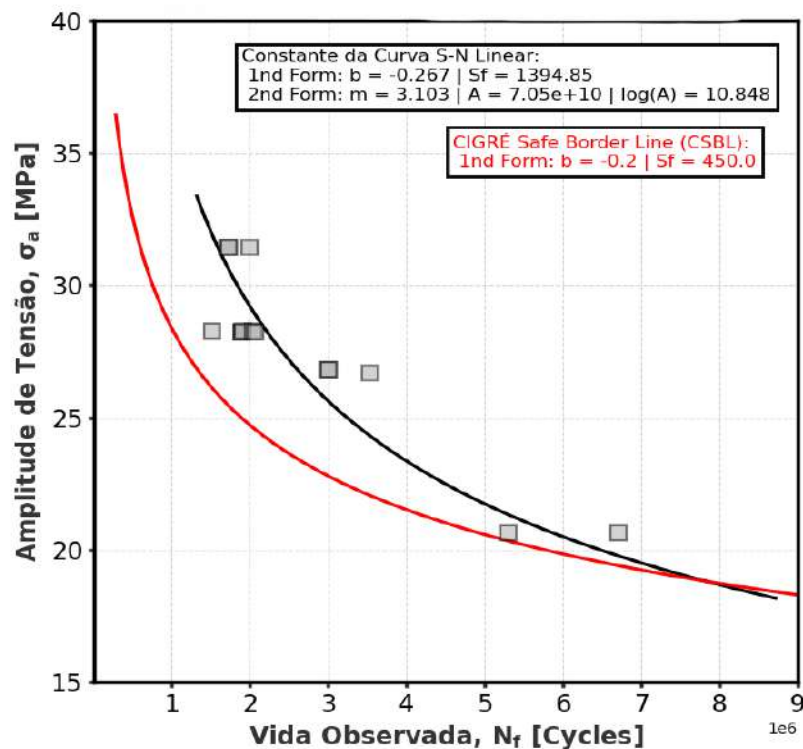


Figura 5.1 – Curva S-N, levantada em laboratório, para o Cabo CAL 838 MCM - Liga 1120. (Lima, 2023)

A Tabela 5.2 reúne os dados comparativos entre a vida experimental ($N_f^{10^6}$) e diferentes abordagens de previsão ($N_e^{10^6}$). É importante destacar que a primeira coluna de previsões, intitulada *Modelo de Previsão Curva S-N (Lab. Cabos)*, não corresponde ao método desenvolvido nesta pesquisa, mas sim a um **Modelo-Base**, proposto anteriormente pelo grupo de pesquisa. Esse modelo foi incluído como parâmetro adicional, de modo a enriquecer a comparação com o VIBREC aplicado às curvas do Lab. Cabos e do CIGRÉ.

Tabela 5.2 – Estimativas das Previsões de Vida à Fadiga - cabo CAL 838 MCM Liga 1120.

Acc. [g]	Ensaio	FALHA			
		$N_f^{(10^6)}$	Modelo-Base (Curva S-N Lab. Cabos)	VIBREC (Curva S-N Lab. Cabos)	VIBREC (Curva S-N CIGRÉ)
2g	F - 08	4,15	3,5	7,17	4,17
1,25g	F - 09	14,63	9,29	9,09	5,91
1,75g	F - 10	3,13	3,16	7,14	4,25

Na Figura 5.2, são apresentadas as estimativas de vida à fadiga para o cabo CAL 838 MCM Liga 1120. Observa-se que o modo de coleta de dados exerce influência nos resultados obtidos pelo Modelo-Base e pelo VIBREC, ainda que ambos utilizem a mesma curva S-N do laboratório. O Modelo-Base registra os ciclos por meio de um sensor a laser posicionado abaixo do UPC, enquanto o VIBREC, instalado em um suporte específico, precisou ser posicionado no chão de um dos blocos do laboratório devido a limitações estruturais, ficando a 123 mm do UPC. Embora ambos adotem os mesmos procedimentos de análise, contagem de ciclos pelo método *Rainflow*, equação de Poffenberger-Swart e regra de acúmulo de danos (*Miner*), a diferença na forma de coleta pode justificar as discrepâncias observadas entre as estimativas.

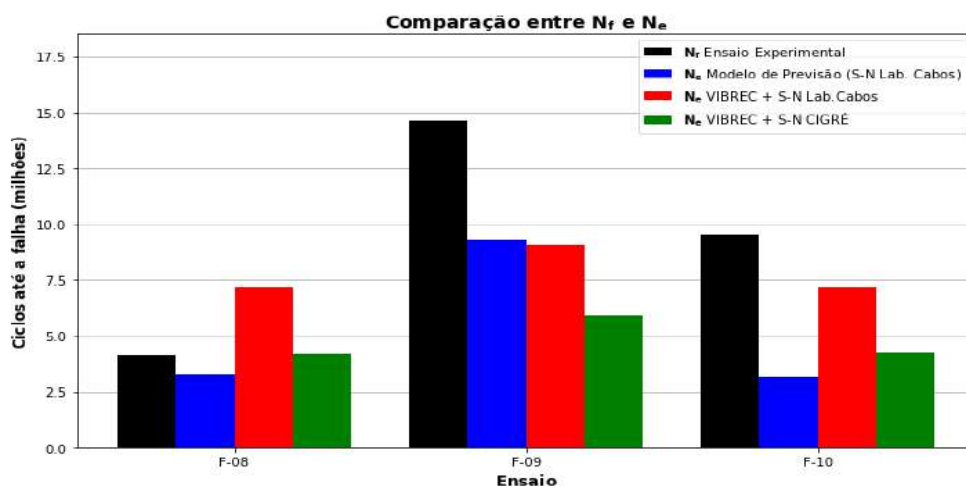


Figura 5.2 – Comparação entre a vida verificada experimentalmente (N_f) e a vida calculada (N_e), com parâmetros da Curva S-N do Lab. Cabos e CIGRÉ, em milhões de ciclos.

Além disso, observa-se que a curva do CIGRÉ apresenta boa cobertura dos resultados experimentais, englobando vidas muito curtas até aproximadamente 20 milhões de ciclos. Esse comportamento reforça seu papel como referência internacional, atuando como limite de segurança em análises de durabilidade de cabos condutores.

5.2.2.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DE PREVISÃO DE VIDA

A partir dos dados da Tabela 5.2 e da Figura 5.2, pode-se comparar as estimativas de vida à fadiga obtidas para os ensaios realizados.

No **Ensaio F-08**, a previsão feita com o VIBREC 500, associada à Curva S–N do Lab. Cabos, resultou em 7,17 milhões de ciclos, superestimando de forma significativa a vida experimental de 4,15 milhões de ciclos. Já o Modelo-Base, também baseado na Curva do Lab. Cabos mas sem o uso do VIBREC, estimou 3,5 milhões de ciclos, valor mais próximo do experimental, embora levemente conservador. Em contrapartida, a previsão fundamentada na Curva S–N do CIGRÉ indicou 4,17 milhões de ciclos, praticamente coincidente com o valor experimental, o que demonstra elevada aderência desse parâmetro às condições reais do ensaio.

No **Ensaio F-09**, a previsão com o VIBREC 500 e a Curva S–N do Lab. Cabos apresentou 9,09 milhões de ciclos, valor muito próximo ao obtido pelo Modelo-Base, também baseado na mesma curva, que resultou em 9,29 milhões de ciclos. Como o ensaio foi interrompido sem ocorrência de falha (*runout*), a proximidade entre os resultados reforça a coerência entre o comportamento experimental e os modelos de previsão, sugerindo que, em níveis mais baixos de excitação (1,25g), a Curva do Lab. Cabos fornece boas estimativas de durabilidade. Por outro lado, a previsão a partir da Curva S–N do CIGRÉ resultou em 5,91 milhões de ciclos, subestimando de forma acentuada a resistência real do cabo. Isso indica que, sob excitações menos intensas, a curva do CIGRÉ tende a assumir um caráter conservador, útil em termos de segurança estrutural, mas limitado em precisão.

No **Ensaio F-10**, conduzido com aceleração de 1,75g, a vida experimental foi de 3,13 milhões de ciclos. A previsão com o VIBREC 500 e a Curva S–N do Lab. Cabos atingiu 7,14 milhões de ciclos, caracterizando superestimação, ainda que dentro de discrepância moderada. Já a Curva do CIGRÉ forneceu 4,25 milhões de ciclos, levemente abaixo do experimental. O Modelo-Base, por sua vez, indicou 3,16 milhões de ciclos, praticamente idêntico ao valor experimental, evidenciando excelente acurácia nessa condição. Esses resultados sugerem que, para níveis intermediários de excitação, o modelo tradicional do Lab. Cabos mantém alta confiabilidade, enquanto a Curva S–N do CIGRÉ permanece conservadora, o que pode ser vantajoso em cenários onde a segurança estrutural é prioridade.

5.2.2.5 DISCUSSÃO QUANTITATIVA DOS ERROS

A Tabela 5.3, apresenta as variações percentuais entre a vida experimental (N_f) e a vida prevista (N_e) para os diferentes modelos avaliados. A análise quantitativa evidencia que o Modelo-Base, na Curva S-N do Lab.Cabos, apresentou o melhor desempenho no Ensaio F-10, com variação de apenas +0,95%, praticamente coincidente com o valor experimental. Já para o Ensaio F-08, o modelo fundamentado na Curva do CIGRÉ apresentou a menor variação, de apenas +0,48%, demonstrando elevada acurácia nessa condição de carregamento.

Tabela 5.3 – Variações relativas entre resultados experimentais e previsões de vida útil

Ensaio	Aceleração	Varição do Modelo-Base (Lab. Cabos)	Varição do Modelo com VIBREC (Lab. Cabos)	Varição do Modelo com VIBREC (CIGRÉ)
F-08	2g	-15,7%	+72,8%	+0,48%
F-09	1,25g	-36,6%	-38,1%	-59,6%
F-10	1.75g	+0,95%	+128,1%	+35,8%

Por outro lado, o modelo baseado nos dados do VIBREC 500 apresentou variações mais expressivas. No Ensaio F-08 (2g), a vida prevista superou a experimental em +72,8%, e no Ensaio F-10 (1,75g), a diferença chegou a +128,1%, indicando tendência de superestimação em regimes de maior excitação. Ainda assim, os valores permanecem dentro da *banda de dois*, considerada aceitável na literatura. Em contraste, no Ensaio F-09 (1,25g), todos os modelos foram conservadores, com variações negativas: -36,6% (Modelo-Base), -38,1% (Lab. Cabos com VIBREC) e -59,6% (CIGRÉ). Esse resultado pode estar relacionado à interrupção do ensaio por *runout*, o que evidencia a dificuldade de calibrar previsões em baixas excitações, onde predominam ciclos de menor amplitude.

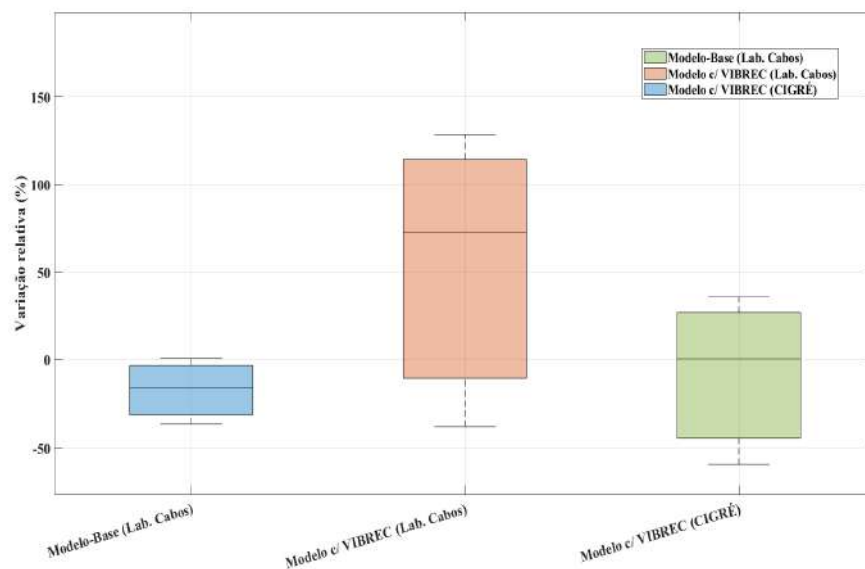


Figura 5.3 – Correlação entre as classes de aceleração e variações relativas percentuais.

A Figura 5.3 apresenta, em forma de *boxplot*, a distribuição das variações percentuais de vida prevista em relação à vida experimental para os diferentes modelos avaliados. Essa representação permite visualizar de maneira sintética a dispersão e a tendência central de cada modelo ao longo dos ensaios, complementando a Tabela 5.3, na qual estão descritos os valores individuais. Observa-se que, em condições de maior excitação (1,75g e 2g), os modelos tendem a convergir, ainda que com características distintas: a Curva do CIGRÉ manteve caráter conservador em 1,75g, mas mostrou excelente aderência em 2g; o Modelo-Base apresentou consistência em diferentes regimes, com variação mínima em 1,75g; e o modelo proposto com dados do VIBREC superestimou a vida em altas excitações. Vale destacar que, mesmo nos casos de maior superestimação, todas as previsões permaneceram dentro da chamada *banda de dois*, intervalo amplamente aceito na literatura de fadiga como critério de confiabilidade.

De modo geral, pode-se afirmar que:

- (i) o Modelo-Base, desenvolvido pelo grupo de pesquisa, apresentou maior consistência e aderência global, sobretudo em regimes intermediários e altos de excitação;
- (ii) a Curva S-N, do CIGRÉ, demonstrou "caráter conservador em baixas excitações" e excelente acurácia em regime de 2g, confirmando seu potencial como abordagem segura;
- (iii) a integração do VIBREC, embora útil para monitoramento em campo, mostrou-se suscetível a superestimações sistemáticas, indicando necessidade de ajustes ou calibração adicional para refletir adequadamente o acúmulo de dano sob carregamentos aleatórios.

Esses resultados reforçam que a acurácia de cada modelo depende diretamente da intensidade do carregamento, evidenciando regimes distintos de validade. Além disso, ressaltam a importância de validação experimental contínua, especialmente quando se busca transferir modelos laboratoriais para aplicações reais em campo.

5.3 ANÁLISE DE FALHAS

A inspeção a olho nu permitiu localizar e caracterizar as falhas, bem como observar o acúmulo de pó proveniente do atrito entre os fios e o grampo de suspensão. Essa etapa é essencial para reconhecer padrões visíveis, trincas, deformações e outros danos superficiais, que indicam regiões críticas do componente.

Conforme Figura 5.4, a análise macroscópica revelou acúmulo significativo de óxidos no grampo de suspensão, incluindo partículas compatíveis com (Al_2O_3) e possivelmente (SiO_2). Embora a literatura aponte a presença de silício em ligas associadas a grampos (Fadel, 2010), não foi realizada análise composicional direta nesta amostra, de modo que essa atribuição deve ser vista com cautela. Ainda assim, a presença desses óxidos sugere desgaste

por *fretting* ativo no contato fio/grampo, atuando como agente acelerador da nucleação de trincas. Em concordância, as fraturas apresentaram morfologias típicas de fadiga por *fretting*, com marcas de praia e dimples equiaxiais, predominando regimes de partial slip no F-09 e de gross slip nos ensaios F-08 e F-10, condizentes com os diferentes níveis de aceleração aplicados.

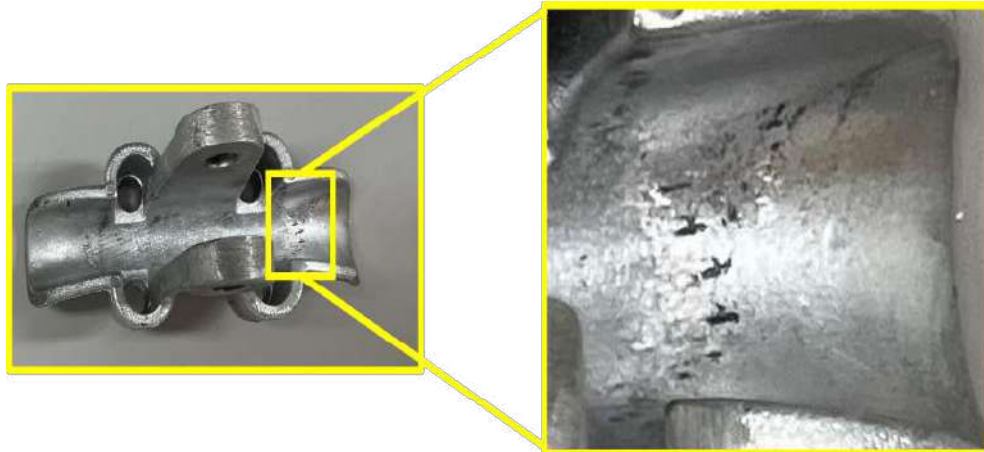


Figura 5.4 – Marcas no grampo de suspensão, após o ensaio.

As falhas em cabos tendem a se originar em regiões de maior atrito, evidenciadas por marcas elípticas de contato fio/fio (Fig. 5.5), frequentemente mais pronunciadas nas camadas internas.

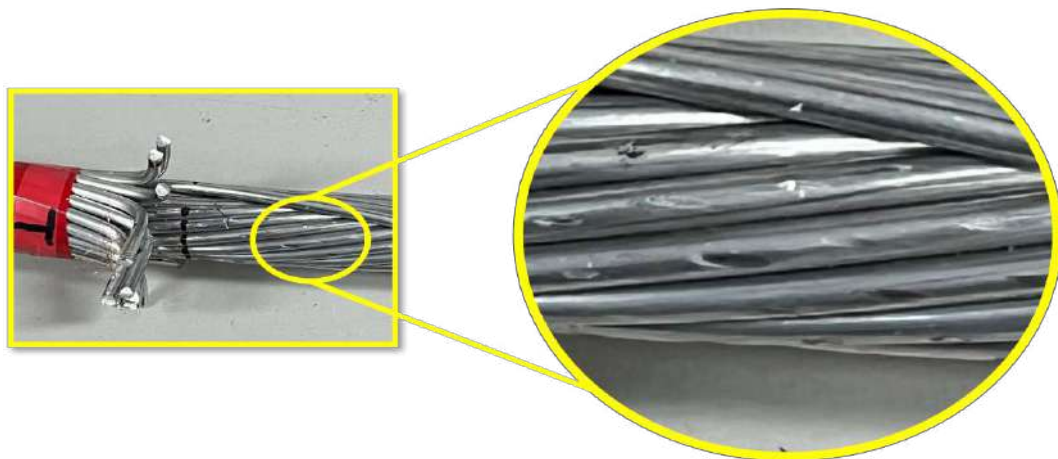


Figura 5.5 – Marcas elípticas, de *fretting*, nas camadas internas.

Para organizar as observações, a análise das falhas foi estruturada em três eixos:

- **(1) Posição** da falha em relação à boca do grampo de suspensão (distância e localização no perímetro do cabo);
- **(2) Camada** do cabo atingida: interna (I) ou externa (E);

- **(3) Morfologia** da fratura: tipos *L*, *V*, Quase-Plana (QP) ou 45°.

No critério de **posição**, as fraturas foram medidas a partir da boca do grampo no cabo CAL 838 MCM – Liga 1120, registrando-se também o quadrante: Topo (T) para falhas na parte superior e Base (B) para falhas na parte inferior.

Quanto à **camada**, o objetivo foi identificar onde as quebras se mostram mais frequentes (interna ou externa), evidenciando zonas de maior vulnerabilidade sob as condições de ensaio.

Por fim, a **morfologia** de ruptura foi classificada conforme a Figura 5.6, o que facilita a correlação entre o aspecto da fratura e o mecanismo predominante.

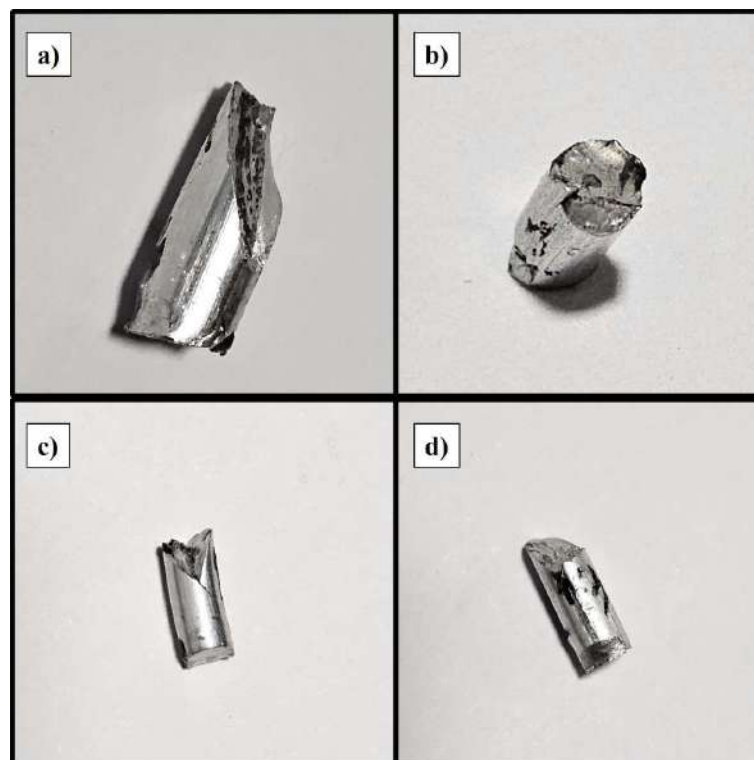


Figura 5.6 – Tipos de falhas encontradas nas amostras. a) tipo 45°; b) Quase Plana (QP); c) tipo V e d) tipo L.

De forma sucinta, os quatro padrões principais de fratura são:

- **Quase-Plana (QP):** trinca que evolui predominantemente em plano perpendicular à superfície do fio; em estágios finais pode haver mudança para inclinação próxima de 45°.
- **45°:** propagação inclinada a aproximadamente 45° em relação à superfície, compatível com planos de máxima tensão de cisalhamento.
- **Tipo V:** duas frentes de trinca que se iniciam em lados opostos e convergem, até que a seção remanescente não suporte a carga.

- **Tipo L:** trinca que se propaga de forma inclinada ou quase linear ao longo do fio, podendo encontrar outra trinca proveniente do lado oposto.

5.3.0.1 ANÁLISE QUANTITATIVA DAS FALHAS

Com base na Tabela 5.4, que resume as ocorrências de falhas em cada ensaio, é possível estabelecer uma correlação entre o nível de carregamento e o modo de falha. No **Ensaio F-09**, realizado com a menor aceleração (1,25g), não foi observada nenhuma fratura, indicando que o cabo resistiu ao carregamento cíclico por um longo período, atingindo o chamado *RunOut*. Em contrapartida, nos ensaios com acelerações mais elevadas, **F-08 (2g)** e **F-10 (1,75g)**, ocorreram rupturas.

Tabela 5.4 – Falhas encontradas nos Ensaios de Fadiga.

Ensaio	Aceleração	Número de Quebras	Localização da Quebra
F-08	2g	1	Interna (Topo)
F-09	1.25g	0	Nenhuma
F-10	1.75g	2	Internas

Um ponto de destaque, confirmado pela análise macroscópica, é que todas as falhas ocorreram na **camada interna** do cabo. No Ensaio F-08, a ruptura ocorreu na região superior (Topo), enquanto no Ensaio F-10 duas falhas também foram identificadas na camada interna. Essa concentração de quebras internas, sob amplitudes mais elevadas, sugere que a nucleação de trincas a partir de pontos de concentração de tensões internos constitui o mecanismo predominante, em contraste com o desgaste superficial esperado em carregamentos mais suaves e constantes. Isso reforça a hipótese de que a amplitude de carregamento influencia não apenas a vida útil do cabo, mas também o local e o modo de sua falha.

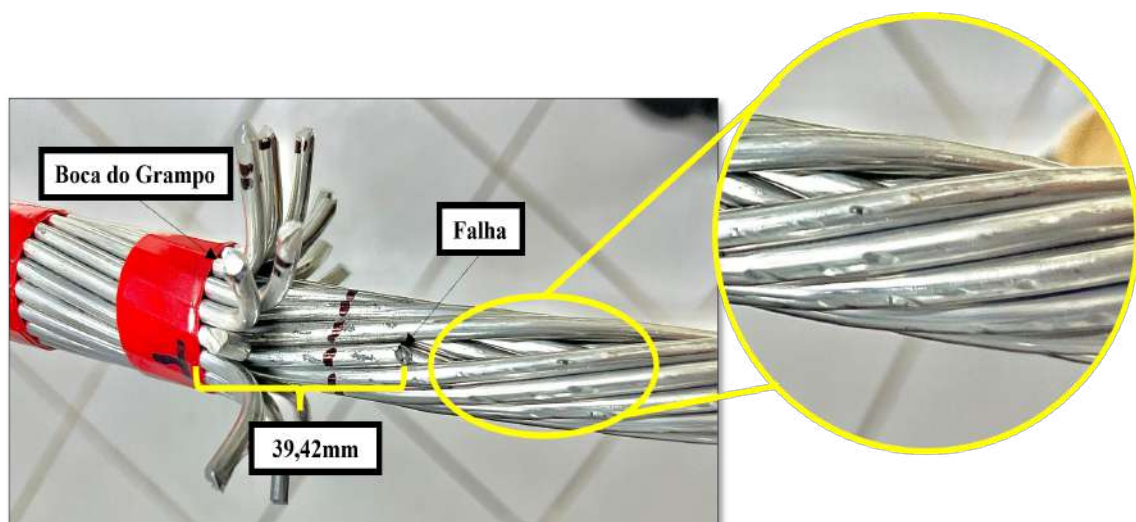


Figura 5.7 – Amostra do Ensaio F-08 com falha em fio interno.

Na Figura 5.7, observa-se a ruptura localizada no interior do grampo de suspensão, na parte superior do cabo, a aproximadamente 39,42 mm da boca do grampo. A presença de marcas de *fretting* ao redor da região de falha evidencia que o processo de degradação iniciou-se por desgaste de contato, evoluindo posteriormente para nucleação e propagação de trincas por fadiga.

A Tabela 5.5 sintetiza os tipos de fratura observados. O Ensaio F-08 apresentou uma ruptura do tipo 45° , característica de trincas que avançam em planos inclinados compatíveis com máximas tensões de cisalhamento. Já o Ensaio F-10 resultou em duas fraturas do tipo **V**, padrão no qual duas trincas iniciam em lados opostos e convergem até que a seção residual não suporte mais a carga. A ausência de rupturas no Ensaio F-09 confirma o seu enquadramento como *runout*, ainda que sinais de desgaste tenham sido identificados.

Tabela 5.5 – Síntese das falhas observadas nos ensaios

Ensaio	Aceleração	Localização	Tipo de Fratura	Fretting	Regime predominante
F-08	2g	Interna (Topo)	45°	Forte	Partial → Gross slip
F-09	1,25g	Nenhuma ruptura	–	Moderado (pó, marcas)	Partial slip
F-10	1,75g	Internas	V (2)	Intenso	Gross slip

Embora o Ensaio F-09 (1,25g) não tenha apresentado fraturas, a análise macroscópica revelou evidências claras de degradação, como amassamento entre fios e presença de pó (Fig. 5.8). Esses sinais indicam ocorrência de *fretting* mesmo em regimes de baixa amplitude. A análise microscópica, via MEV, confirmou a existência de zonas de escorregamento e adesão — características típicas desse fenômeno —, sugerindo que, com maior número de ciclos, poderiam evoluir para nucleação de trincas.

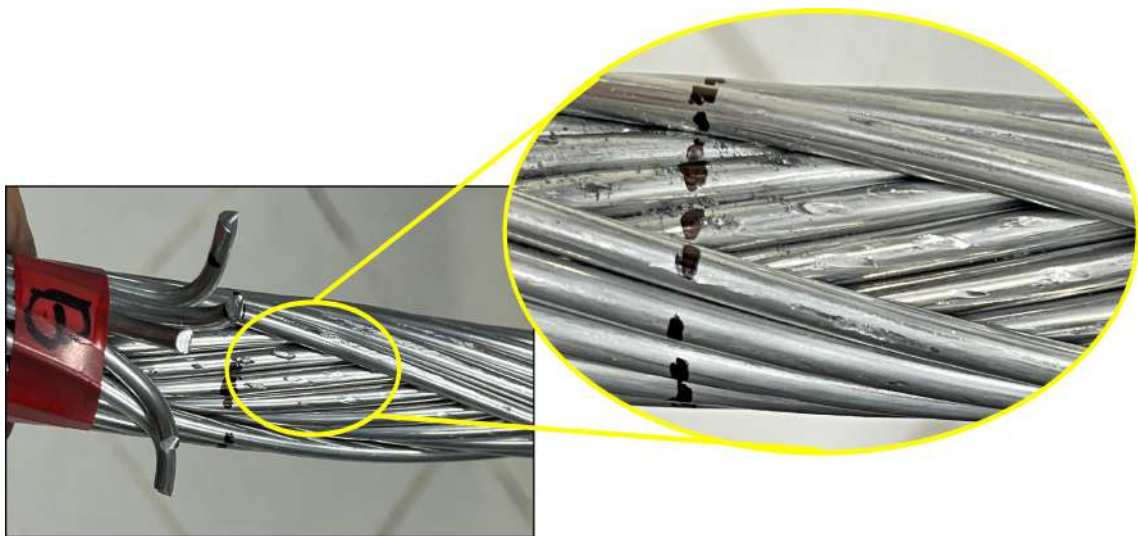


Figura 5.8 – Amostra do Ensaio F-09 com marcas de *fretting* na superfície. Evidências visuais do contato e movimento relativo entre fios, potenciais sítios de nucleação de trincas.

5.3.1 ANÁLISE DE FALHA MICROSCÓPICA

Após a etapa de análises macroscópicas, foram conduzidas análises microscópicas das superfícies de ruptura dos fios, utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). O objetivo foi examinar em detalhe os mecanismos de fratura e os efeitos associados ao fenômeno de *fretting*, de modo a complementar a interpretação global dos resultados experimentais.

Foram selecionadas amostras representativas dos três ensaios realizados com acelerações do *shaker* (Y_g) de 1,25g, 1,75g e 2g.

O **ensaio F-08**, conduzido com aceleração de 2g, foi realizado na bancada B do Laboratório de Cabos da UnB, entre os dias 09 e 13 de março de 2024, com EDS de 20% (1895 kgf). Nesse ensaio, foi identificada uma falha localizada na camada interna do condutor, na região do topo. A ruptura ocorreu a 12,96 mm do último ponto de contato e a 39,42 mm da boca do grampo, após aproximadamente 4,1 milhões de ciclos, em um total de 6,1 milhões aplicados. A fratura apresentou morfologia característica em ângulo de 45°.

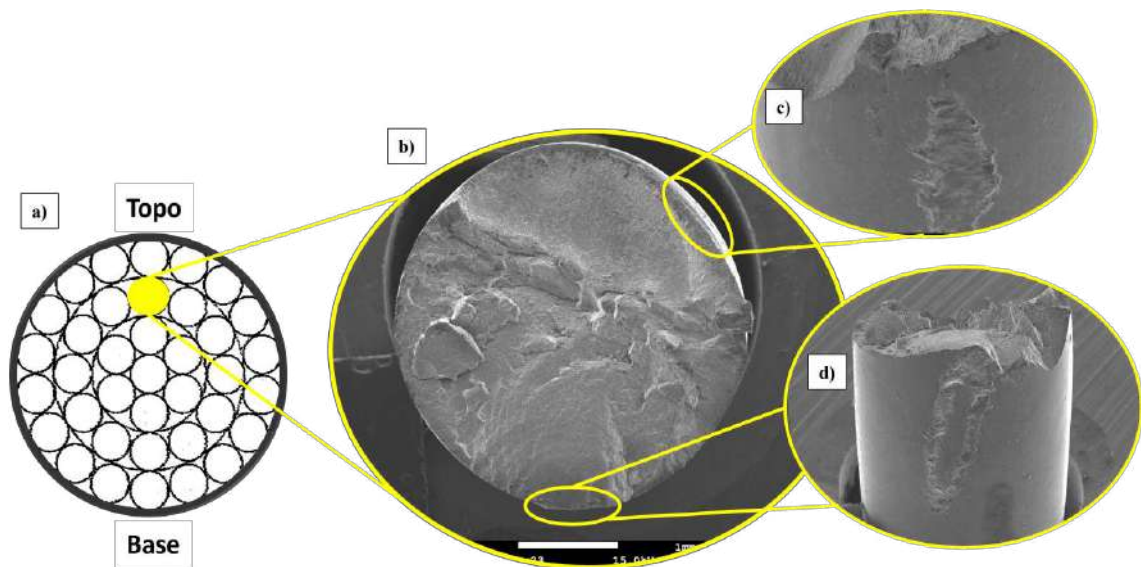


Figura 5.9 – Micrografia da amostra do ensaio F-08 (2g), obtida em MEV. (a) Vista isométrica do condutor; (b) Vista superior do fio na região de topo; (c) Marca de contato fio-fio 1; (d) Marca de contato fio-fio 2.

Na micrografia da Fig. 5.9, observa-se que a ruptura teve origem em uma falha interna no topo do condutor. Duas marcas de contato distintas foram identificadas:

- **Marca 1:** região de atrito contínuo entre fios adjacentes, associada a desgaste superficial típico do mecanismo de *fretting*. Embora visível, não se configurou como origem da fratura.
- **Marca 2:** região crítica, com sinais evidentes de propagação de trinca. Esta marca corresponde ao ponto inicial da falha por fadiga, cujo crescimento progressivo levou

à ruptura final do fio.

Na Fig. 5.10, é possível visualizar com maior clareza a área inicial de propagação da trinca, associada à marca de desgaste por *fretting*. A zona de crescimento apresenta características típicas de fadiga, tais como **marcas de praia** e, em menor escala, **estrias de fadiga**. As marcas de praia, de formato semicircular, convergem para o ponto de nucleação da trinca, evidenciando sua evolução ao longo do tempo. Já as estrias, mais difíceis de serem identificadas, aparecem entre as marcas de praia, indicando o avanço incremental da trinca ciclo a ciclo.

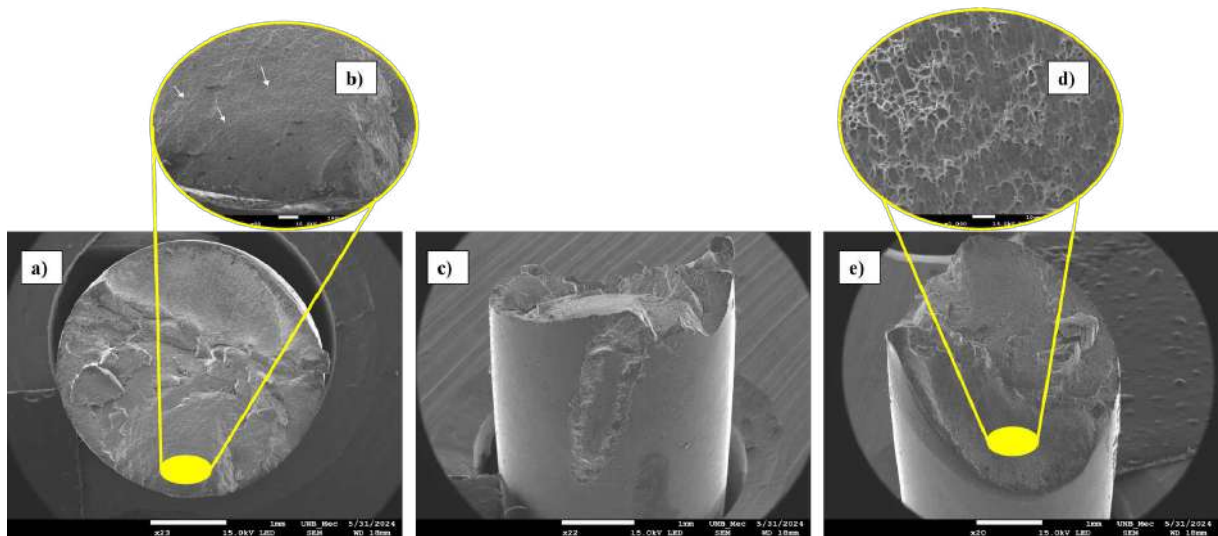


Figura 5.10 – Micrografias da amostra 1 do ensaio F-08 (2g), obtidas em MEV. (a) Vista superior da superfície de ruptura com zonas de propagação da trinca; (b) Marcas de praia; (c) Marca de contato fio-fio; (d) Dimples; (e) Zonas de propagação da trinca.

O **ensaio F-09**, submetido a uma aceleração de 1,25g, não apresentou fratura durante todo o período de teste. O cabo atingiu 14,63 milhões de ciclos sem evidências de falha estrutural, caracterizando o fenômeno conhecido como *RunOut*. Esse termo, amplamente utilizado em ensaios de fadiga, indica que o material suportou toda a carga cíclica aplicada até o limite estabelecido, sem ocorrência de rupturas, e que o ensaio foi interrompido antes da falha do componente.

Após a conclusão do teste, foram coletados segmentos da amostra para análises complementares em Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Fios das camadas externa e interna foram examinados, a fim de investigar indícios de degradação superficial, fissuras iniciais e marcas típicas de *fretting*, associadas ao contato fio-fio.

Na Fig. 5.11, observa-se nos fios da camada externa uma deformação localizada, descrita como “amassamento”, sugerindo degradação mecânica causada pelo contato repetitivo entre fios. Já na subfigura 5.11-b, nota-se uma marca elipsoidal na superfície, apontando para um ponto de concentração de tensões. Essa característica pode evoluir, em condições

de maior solicitação cíclica, para a nucleação de trincas e consequente desgaste por *fretting*.

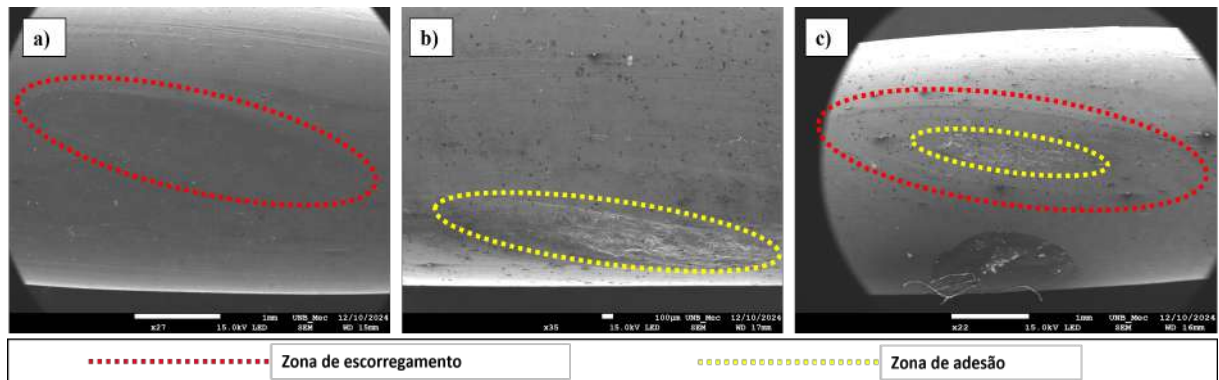


Figura 5.11 – Micrografias do ensaio F-09 (1,25g), obtidas em MEV. (a) Zona de escorregamento do contato fio/fio; (b) Zona de adesão no contato fio/fio; (c) Combinação de zonas de escorregamento e adesão.

Adicionalmente, algumas marcas de contato foram analisadas por meio de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), técnica acoplada ao MEV para caracterização química. Na Fig. 5.12, referente a um fio da camada externa, foram identificadas duas regiões distintas de escorregamento parcial: a zona de adesão (delimitada em amarelo, no centro da marca) e a zona de escorregamento (em vermelho).

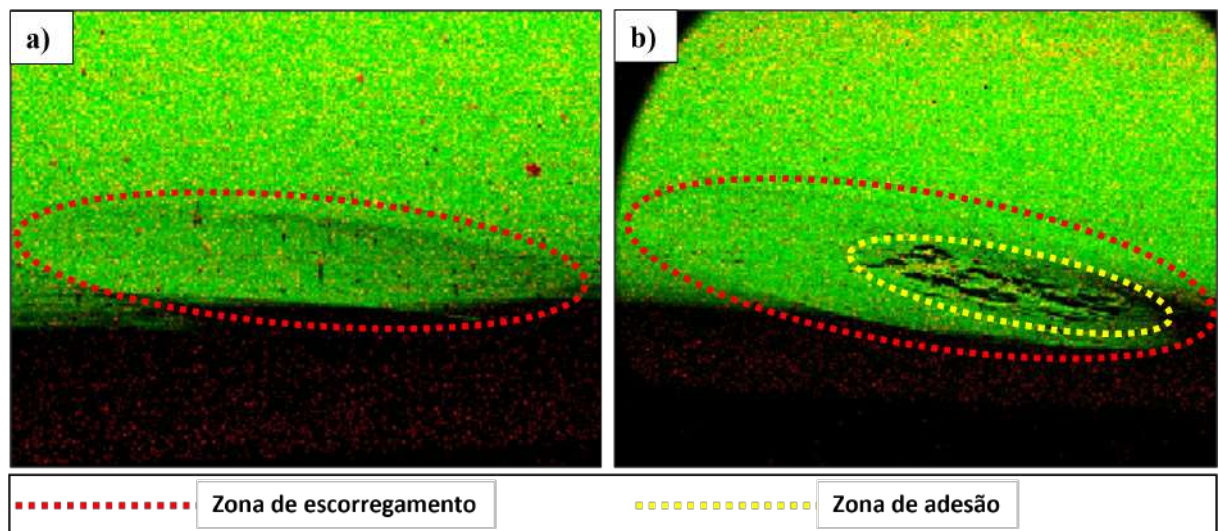


Figura 5.12 – Micrografias do ensaio F-09 (1,25g), obtidas em MEV – Camada Externa. (a) Zona de escorregamento (tracejado vermelho) no contato fio/fio; (b) Zona de escorregamento (vermelho) e zona de adesão (amarelo).

De forma análoga, a Fig. 5.13, referente à camada interna, evidencia com maior clareza as zonas de escorregamento. Na subfigura 5.13-a, identificam-se tanto a zona de escorregamento quanto a de adesão, enquanto na subfigura 5.13-b destaca-se apenas a zona de adesão. O mapeamento químico revelou uma concentração significativa de oxigênio

(31,30%), associada à formação de óxido de alumínio (Al_2O_3), resultante do desgaste por *fretting*. Essa presença de alumina foi observada exclusivamente nas marcas elipsoidais de *fretting*, conforme indicado em vermelho no EDS, corroborando estudos anteriores (Azevedo *et al.*, 2009; Reinke, 2017).

Segundo (Garcia, 2019), a ocorrência de oxidação em toda a área de contato não implica necessariamente fadiga por *fretting*, mas sim um regime de escorregamento total (*Gross Slip regime*), como constatado neste caso.

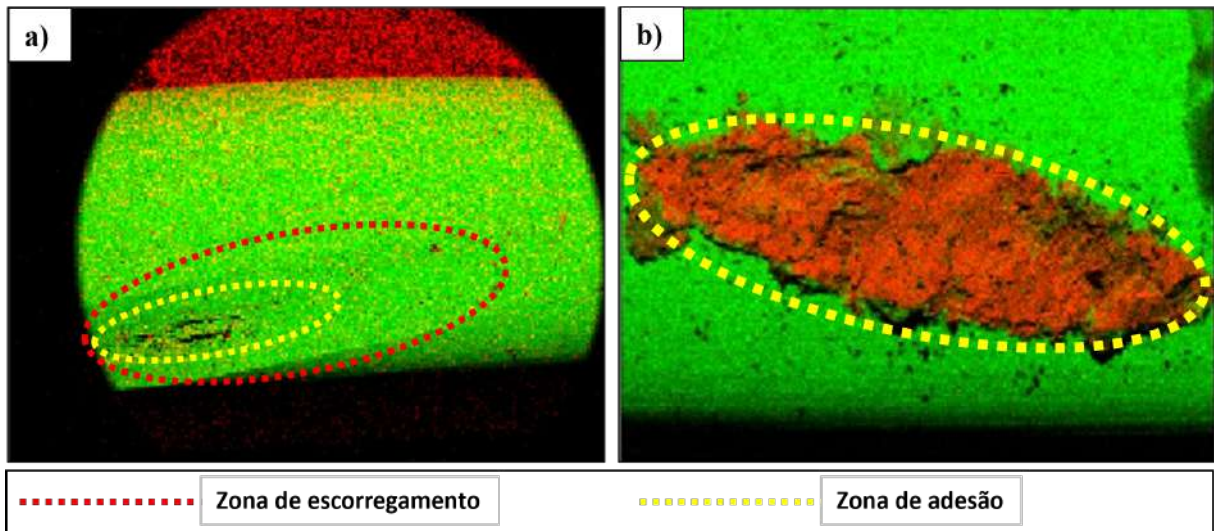


Figura 5.13 – Micrografias do ensaio F-09 (1,25g), obtidas em MEV – Camada Interna. (a) Zona de escorregamento e adesão no contato fio/fio; (b) Zona de adesão evidenciada.

Os resultados indicam que, mesmo na ausência de falhas estruturais (*RunOut*), mecanismos de degradação local já estão em curso. Essas evidências reforçam a hipótese de que regiões de contato fio-fio, marcadas por desgaste por *fretting*, podem atuar como potenciais sítios de nucleação de trincas em condições de carregamentos mais severos.

No **ensaio F-10**, realizado com aceleração do *shaker* de 1,75g, ocorreram duas quebras, ambas localizadas na camada interna do cabo. O formato de fratura identificado foi do tipo “V”, caracterizado pelo início da trinca a aproximadamente 45° em relação à superfície do fio, propagando-se até encontrar outra trinca proveniente de um ponto distinto ou até que a região central, entre ambas, não fosse mais capaz de suportar a carga aplicada. Na Fig. 5.14, as setas amarelas indicam os pontos de nucleação das trincas.

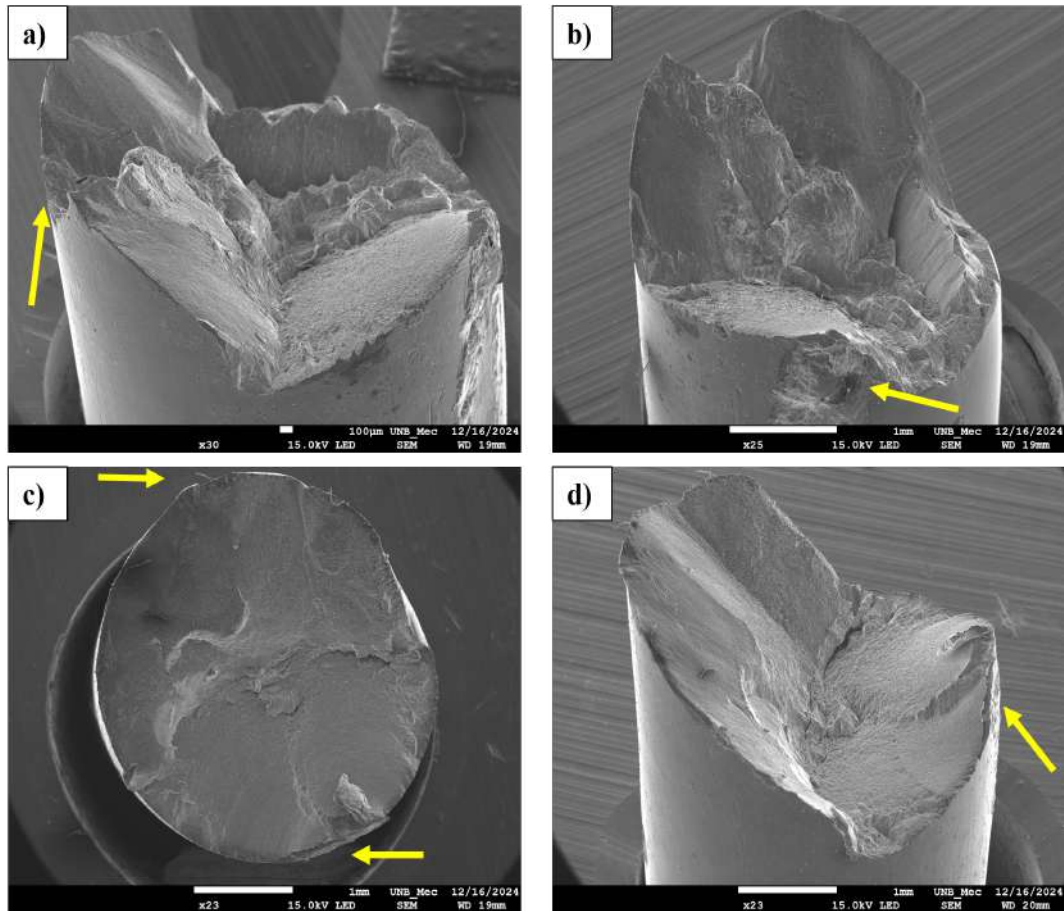


Figura 5.14 – Micrografias do ensaio F-10 (1,75g) – Formato de fratura tipo V. (a) Corpo de prova 1, seta amarela indicando início da trinca 1; (b) Corpo de prova 1, seta amarela indicando início da trinca 2; (c) Corpo de prova 2, vista frontal; (d) Corpo de prova 2, seta amarela indicando início da trinca.

A região final de fratura é marcada por uma superfície rugosa, associada à presença de microdepressões conhecidas como *dimples*. Essas estruturas são típicas de fraturas dúcteis e refletem a forma como o material foi carregado. Em cabos condutores, sujeitos a diferentes tipos de carregamentos e direções, nem sempre é possível determinar com precisão o mecanismo apenas pela morfologia dos *dimples*. Contudo, nas imagens obtidas, verificou-se que a maior parte apresenta formato equiaxial, sugerindo que o modo predominante de carregamento nessas áreas foi o de tração. As micrografias correspondentes estão apresentadas na Fig. 5.15.

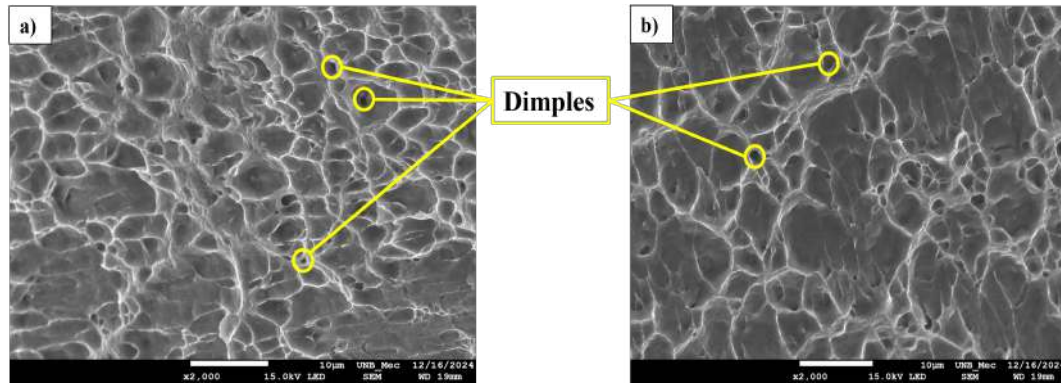


Figura 5.15 – Micrografias do ensaio F-10 (1,75g) – Dimples característicos de fratura dúctil. (a) Corpo de prova 1; (b) Corpo de prova 2.

A análise microscópica reforça a relevância do uso do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para compreender os mecanismos de falha em cabos condutores. O equipamento possibilitou ampliar significativamente as superfícies de fratura, revelando detalhes específicos dos *dimples* e permitindo identificar os microdefeitos que atuaram como pontos críticos na nucleação e propagação das trincas. Esses resultados são fundamentais para elucidar os mecanismos subjacentes de fratura e compreender a resistência do material em condições de carregamento cíclico.

5.3.2 ANÁLISE E DISCUSSÃO DA FALHA POR FADIGA SOB CARREGAMENTO ALEATÓRIO

Os resultados sugerem que a falha nos condutores pode estar associada à interação entre fadiga aleatória e desgaste por *fretting*. Em regimes de baixa aceleração (F-09), há indícios de que o contato fio–fio atuou predominantemente em *partial slip*, produzindo desgaste limitado e sem evidências marcantes de propagação de trincas. Já em níveis mais elevados (F-08 e F-10), os dados sugerem uma possível transição para *gross slip*, condição em que o movimento relativo entre fios é mais pronunciado, favorecendo a nucleação e a evolução de falhas internas.

É importante destacar a distinção entre *fretting wear* (desgaste abrasivo superficial, sem nucleação relevante) e *fretting fatigue* (desgaste acompanhado de nucleação e propagação de trincas). Os resultados obtidos sugerem que ambos os mecanismos podem coexistir, sendo que a falha final tende a se associar à fadiga por *fretting*, indicada pelas superfícies de fratura com marcas de praia e presença de dimples dúcteis. Há ainda indícios de que a propagação da trinca teve início na extremidade da marca elíptica, a partir da qual se desenvolveu o processo de fratura.

Em síntese, os ensaios realizados apontam que a severidade do carregamento (aceleração aplicada) exerce influência relevante no regime de *fretting* predominante e, por

consequência, na morfologia de falha. Essa correlação se mostra útil para a compreensão do comportamento dos condutores em campo e pode subsidiar estratégias futuras de monitoramento e mitigação.

5.4 FECHAMENTO ANALÍTICO

De forma integrada, os resultados obtidos neste trabalho permitem uma compreensão mais clara do comportamento em fadiga dos condutores analisados. O algoritmo empregado mostrou-se eficaz ao estimar a vida útil dos cabos sob vibração, apresentando boa convergência com os dados experimentais.

A comparação entre as curvas $S-N$ do Lab.Cabos e do CIGRÉ revelou tendências distintas: enquanto a curva laboratorial reproduziu de maneira mais fiel os ensaios realizados, a curva internacional apresentou caráter mais conservador, funcionando como um limite de segurança adicional. É importante destacar que os valores apresentados pelo CIGRÉ têm origem em ensaios padronizados conduzidos em temperatura ambiente, sob carregamento de amplitude constante, conforme estabelecido na *CIGRÉ Technical Brochure 273 (CIGRÉ Study Committee B2, 2005)*. Essa padronização assegura a comparabilidade internacional, mas também explica o caráter conservador da curva, já que não contempla todas as variáveis ambientais e operacionais observadas em campo. Essa diferença destaca a relevância de calibrar modelos de previsão a partir de dados locais, evitando interpretações generalizadas que possam distorcer a avaliação da durabilidade em serviço.

As análises macroscópicas e microscópicas das superfícies fraturadas confirmaram que a fadiga de alto ciclo é o mecanismo predominante de falha, evoluindo gradualmente até a ruptura final por sobrecarga. Esse resultado não apenas reforça a validade do modelo de previsão empregado, mas também evidencia a relação direta entre amplitude de vibração, modos de fratura e progressão do dano. Assim, os achados convergem para uma interpretação consistente, em que simulação e observação experimental se complementam.

Do ponto de vista técnico, os resultados reforçam a importância de utilizar modelos ajustados à realidade nacional para orientar decisões de projeto e manutenção em sistemas de transmissão. Sob a ótica científica, o trabalho contribui para o aprofundamento da compreensão dos mecanismos de falha em condutores submetidos a vibrações induzidas pelo vento, oferecendo subsídios para o desenvolvimento de metodologias preditivas mais robustas.

Por fim, este fechamento analítico estabelece a base para o capítulo seguinte, no qual serão consolidadas as principais conclusões do estudo, com destaque para suas contribuições, limitações e perspectivas de continuidade em pesquisas futuras.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a precisão de modelos preditivos de vida à fadiga aplicados a cabos condutores submetidos a carregamentos dinâmicos, com ênfase no uso de dados obtidos por meio do sistema de monitoramento VIBREC 500. Para isso, foram conduzidos ensaios experimentais em diferentes níveis de aceleração, utilizando metodologia controlada de excitação, coleta de dados em tempo real e posterior análise de falha. Os resultados experimentais foram então comparados com estimativas de vida derivadas de dois modelos distintos, ambos baseados em curvas S–N de referência: uma oriunda do CIGRÉ e outra desenvolvida internamente pelo Lab. Cabos (Lima, 2023).

De forma geral, os dados sugerem que o modelo baseado na curva S–N do Lab. Cabos apresentou maior compatibilidade com os resultados experimentais, em especial nos ensaios realizados com acelerações intermediárias e elevadas. A curva construída a partir de dados experimentais mais próximos da aplicação prática mostrou potencial em fornecer estimativas de vida mais próximas da realidade dos cabos ensaiados, ainda que em alguns casos tenha indicado tendência levemente não conservadora.

Por sua vez, a curva do CIGRÉ apresentou comportamento mais conservador, resultando em estimativas inferiores às observadas experimentalmente, sobretudo em regimes de menor excitação. Essa tendência pode estar relacionada às condições padronizadas de ensaio e à adoção de fatores de segurança que buscam abranger diferentes tipos de condutores e cenários de operação. Embora útil como limite estrutural, tal abordagem pode limitar sua aplicabilidade em análises que demandam maior precisão na estimativa da vida útil remanescente.

A análise comparativa entre as previsões de vida obtidas com o VIBREC 500 e os dados de falha experimental indicou que o Vibrec 500 apresenta potencial como ferramenta de monitoramento contínuo em aplicações reais. Observou-se que, quando calibrado com parâmetros adequados e associado a uma curva S–N representativa, o algoritmo de previsão pode fornecer estimativas satisfatórias da vida à fadiga acumulada, inclusive em cenários de carregamentos variáveis.

Com base nos resultados, considera-se que a integração entre monitoramento contínuo, análise por algoritmo de dano acumulado e curvas S–N realistas se apresenta como uma abordagem promissora para aplicações de manutenção preditiva em linhas de transmissão. O uso de modelos ajustados à realidade do campo tende a contribuir para uma maior confiabilidade das previsões e apoiar estratégias de gestão da integridade estrutural de cabos condutores.

Com base na análise das falhas observadas, os resultados sugerem que as falhas externas ocorreram com maior frequência nos ensaios realizados sob amplitude constante,

enquanto as falhas internas, particularmente concentradas no topo dos cabos, pareceram mais associadas aos ensaios com amplitude variável. Essa diferença pode estar relacionada ao fato de que, em amplitudes constantes, a carga incide de forma localizada e repetitiva sobre a região externa dos fios, favorecendo desgaste por atrito e abrasão. Já nas amplitudes variáveis, o carregamento tende a se distribuir de maneira menos uniforme e mais imprevisível, o que pode contribuir para a nucleação e propagação de trincas internas a partir de regiões de concentração de tensões, especialmente no topo do cabo, onde a sollicitação mecânica é maior. Cabe ressaltar que não é possível estabelecer um padrão único para o tipo de fratura, uma vez que foram observadas rupturas quase planas, inclinadas em 45° , em formato de V ou de L.

Este estudo buscou reproduzir, de forma aproximada, as condições em que os cabos condutores operam em linhas de transmissão, considerando fatores que influenciam sua vida útil à fadiga, tais como a força de tração, os níveis de vibração induzidos pelo vento e a temperatura. Essa abordagem permitiu uma análise mais próxima do comportamento real dos cabos em serviço.

6.0.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta dissertação reforça a importância de ampliar os estudos dentro da linha de pesquisa que integra o uso de vibrógrafos e códigos computacionais aplicados a ensaios com amplitudes variáveis, buscando simular, de maneira mais próxima, a ação dos ventos sobre cabos de linhas de transmissão em campo. Com base nos resultados obtidos, sugerem-se os seguintes caminhos para trabalhos futuros:

- Realizar ensaios de fadiga em classes de aceleração mais baixas, abaixo de $1,25g$, associadas ao regime de altíssimo ciclo, a fim de avaliar a durabilidade dos cabos em condições que simulam longos períodos de operação em campo;
- Ampliar a base de dados experimentais por meio de novos ensaios e comparações com outros tipos de cabos e ligas, como os modelos ACSR e AAAC, com diferentes composições, de modo a avaliar o desempenho à fadiga e as características das falhas observadas;
- Realizar ensaios de fadiga, considerando carregamentos randômicos não-gaussianos, aproximando-se ainda mais das condições reais de campo e permitindo avaliar a robustez dos modelos de previsão;
- Utilizar MEV + EDS (Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia de Energia Dispersiva) para examinar a morfologia da fratura e realizar análises químicas qualitativas, confirmando composição e identificando possíveis inclusões ou discontinuidades.

Referências

- CEPEL. *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro: Simulações 2013*. Rio de Janeiro: CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, 2017. Acesso em: 31 de Julho de 2023. Disponível em: <<http://tinyurl.com/mp36bf6>>. Citado nas pp. 6 e 27.
- ALUBAR. **ALUMÍNIO LIGA 1120**. 2023. Acesso em: 03 de Agosto de 2023. Disponível em: https://www.alubar.net.br/img/site/arquivo/Folder%20Al_1120_14-06%20ajustado.pdf. Citado nas pp. 6 e 38.
- ANEEL; ONS. **Mapa Linhas de transmissão. Brasil, 2024**. 2024. Acesso em: 23 de Junho de 2024. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Citado nas pp. 6, 15 e 16.
- ASM. **Failure Analysis and Prevention**. 2002 edition. ed. [S.l.: s.n.], 2002. v. 11. Citado nas pp. 7, 55 e 58.
- ASPDEN, R. S.; GEMMELL, N. R.; MORRIS, P. A.; TASCAL, D. S.; MERTENS, L.; TANNER, M. G.; KIRKWOOD, R. A.; RUGGERI, A.; TOSI, A.; BOYD, R. W. *et al*. Photon-sparse microscopy: visible light imaging using infrared illumination. **Optica**, Optica Publishing Group, v. 2, n. 12, p. 1049–1052, 2015. Citado nas pp. 7 e 56.
- ASTM, E. **Standard terminology relating to fatigue and fracture testing**. 1823. Citado na p. 21.
- ATSM E 1049-85. **Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017. Citado na p. 45.
- AZEVEDO, C. R. d. F.; HENRIQUES, A.; FILHO, A. R. P.; FERREIRA, J.; ARAÚJO, J. **Fretting fatigue in overhead conductors: Rig design and failure analysis of a Grosbeak aluminium cable steel reinforced conductor**. [S.l.]: Elsevier, 2009. 136–151 p. Citado nas pp. 41 e 86.
- BENDAT, J. S.; PIERSOL, A. G. **Random Data: Analysis and Measurement Procedures**. New York: Wiley-Interscience, 1971. Citado nas pp. 7 e 47.
- BERNITSAS, M. M. **Vortex-induced vibration: Wikis**. 2009. University of Michigan, Ann Arbor, USA. Citado nas pp. 6 e 28.
- BISHOP, N. W. M.; SHERRATT, F. Fatigue life prediction from power spectral density data. 1989. Citado nas pp. 46 e 48.
- CALLISTER, W. D. Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução. **Livros Técnicos e Científicos Editora SA, 9ª ed. Rio de Janeiro, RJ**, 2016. Citado nas pp. 6, 21, 22, 23, 32 e 33.
- CIGRE. Guide for endurance tests of conductors inside clamps. **Electra**, v. 63, 1979. Citado nas pp. 6, 25, 27, 31 e 35.

- CIGRE. Guide for endurance tests of conductors inside clamps. **Electra**, v. 100, 1985. Citado nas pp. 10, 32 e 35.
- CIGRÉ Study Committee B2. **Overhead Conductor Safe Design Tension with Respect to Aeolian Vibrations**. Paris, France, 2005. Citado na p. 89.
- CLOUTIER, L.; LEBLOND, A. **Tutorial: Conductor Fatigue**. 2011. Presentation slides. Acesso em: 04 de Agosto de 2023. Disponível em: <http://www.aeolus.bz/Seminar%202011/Seminar%202011.pdf>. Citado nas pp. 6 e 18.
- DOWLING, N. E. **Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue**. 4th. ed. S.l.: Prentice Hall, 2012. Citado na p. 45.
- EPE, E. d. P. E. **Anuário estatístico de Energia elétrica (2024)**. Rio de Janeiro, RJ; 2024. Acesso em: 23 de Junho de 2024. Disponível em: <https://dashboard.epe.gov.br/apps/anuario-livro/#Apresenta%C3%A7%C3%A3o>. Citado nas pp. 10, 16 e 17.
- EPRI. **Epri transmission line reference book: Wind-induced conductor motion**. Electric Power Research Institute, 2006. Citado nas pp. 6, 10, 26, 29, 30, 39 e 54.
- FADEL, A. A. Avaliação do efeito de tracionamento em elevados níveis de eds sobre a resistência em fadiga do condutor ibis (caa 397, 5 mcm). 2010. Citado nas pp. 7, 10, 31, 32, 37, 41, 61, 62 e 78.
- FADEL, A. A.; ROSA, D.; MURÇA, L.; FERREIRA, J.; ARAÚJO, J. Effect of high mean tensile stress on the fretting fatigue life of an ibis steel reinforced aluminium conductor. **International Journal of Fatigue**, Elsevier, v. 42, p. 24–34, 2012. Citado nas pp. 6 e 40.
- FONSECA, B.; CIMINI, J. Análise de vida útil de cabos condutores de linhas aéreas de transmissão. **Uberlândia, MG**, 2003. Citado na p. 39.
- FRONTIN, S. d. O.; SAAVEDRA, A.; ARAÚJO, A.; MURÇA, L.; FRAGELLI, R.; RÉGO, V. Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas aplicadas a linhas de transmissão. **Brasília: Goya**, 2010. Citado nas pp. 17, 18 e 38.
- FUCHS, R. D. **Transmissão de Energia Elétrica**. [S.l.]: Editora EDUFU, Universidade Federal de Uberlândia, 2015. Citado nas pp. 6 e 36.
- GARCIA, A.; SPIM, J.; SANTOS, C.; AL et. **Ensaio dos Materiais, LTC**. 2000. Citado nas pp. 6, 22 e 23.
- GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 365 p. Citado nas pp. 6, 23, 24, 31 e 33.
- GARCIA, M. **Concepção, fabricação e avaliação de um dispositivo de fadiga por fretting em fios de alumínio de cabos condutores**. 2019. Citado na p. 86.

- GOMES, F. B. Análise comparativa de aparelhos para medição de vibração em cabos condutores de energia e cálculo da vida remanescente em cabos. 2015. Citado nas pp. 33 e 53.
- HAYKIN, S. **Communication Systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2001. Citado na p. 47.
- HENRIQUES, A. M. D. Bancada de ensaios mecânicos à fadiga de cabos condutores de energia. 2006. Citado nas pp. 44 e 59.
- HILL, R. E. R. **Princípios de Metalurgia física**. [S.l.]: Ceca (Compania Editorial Continental), 1980. Citado nas pp. 6 e 23.
- JOHANNESSON, P. **Rainflow Analysis of Switching Markov Loads**. Tese (Doutorado) — Lund Institute of Technology, 1999. Citado nas pp. 7 e 48.
- LABEGALINI, P. R.; LABEGALINI, J. A.; FUCHS, R. D.; ALMEIDA, M. T. de. **Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão**. [S.l.]: Editora Blucher, 1992. Citado nas pp. 6, 38 e 39.
- LANGER, B. F. Fatigue failure from stress cycles of varying amplitude. **Journal of Applied Mechanics**, v. 59, p. A160–A162, 1937. Citado na p. 42.
- LEE, Y.-L. **Fatigue Testing and Analysis: Theory and Practice**. [S.l.]: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. Citado nas pp. 45 e 49.
- LIENHARD, J. H. *et al.* **Synopsis of lift, drag, and vortex frequency data for rigid circular cylinders**. [S.l.]: Technical Extension Service, Washington State University Pullman, WA, 1966. v. 300. Citado nas pp. 6 e 29.
- LIMA, F. M. d. **Modelagem Estocástica e Abordagens de Previsão de Vida à Fadiga de Cabos Condutores sob Condições de Carregamento Aleatório**. 168 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2023. Citado nas pp. 7, 8, 45, 66, 74 e 90.
- LIMA, F. M. de. **Fadiga Multiaxial: Análise de Espectro para Previsão de Vida em Componentes Sujeitos a Carregamentos de Amplitude Variável**. 2021. 127 p. Monografia (Bacharel em Engenharia Mecânica), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília (UnB), Brasília-DF, Brasil. Citado na p. 45.
- MINER, M. A. Cumulative damage in fatigue. **Journal of Applied Mechanics**, p. 159–164, 1945. Citado nas pp. 7, 42 e 43.
- NEWLAND, D. E. **An Introduction to Random Vibrations, Spectral & Wavelet Analysis**. 3rd. ed. Mineola, New York: Dover Publications, Inc, 1993. 477 p. Citado nas pp. 7 e 48.
- PALMGREN, A. Die lebensdauer von kugellagern (the service life of ball bearings). **ZVDI - Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure**, v. 68, n. 14, p. 339–341, 1924. Citado na p. 42.

-
- PEREIRA, B. d. B.; PAIS, M. B. Z.; SALES, P. R. d. H. **Análise espectral de séries temporais**. Rio de Janeiro: Arte Final Leasing Editorial Ltda, 1986. Citado na p. 47.
- REINKE, G. **Influência do Tratamento Térmico nas Propriedades Mecânicas de Fios de Alumínio Liga Usados em Cabos Condutores Submetidos a Ensaio de Fadiga**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2017. Citado nas pp. 8, 67 e 86.
- ROCHA, P. H. C. **Estudo comparativo de vida em fadiga de cabos condutores utilizando o critério h/w**. 2016. Citado nas pp. 6, 7, 16, 37, 52 e 60.
- SANTOS, P. C. d. S. **Influência do tempo de monitoração da amplitude de vibração eólica sobre a previsão da vida à fadiga de cabos condutores**. 2018. Citado nas pp. 7 e 44.
- SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R. **Projeto de engenharia mecânica**. [S.l.]: Bookman, 2005. Citado nas pp. 21, 22 e 33.
- STEPHENS, R. I.; FATEMI, A.; STEPHENS, R. R.; FUCHS, H. O. **Metal fatigue in engineering**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2000. Citado nas pp. 6 e 22.