



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UNB
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS EM ENGENHARIA / FCTE
PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA
ENGENHARIA

AVALIAÇÃO DA POTÊNCIA DISSIPADA E AUTOAMORTECIMENTO DE CONDUTORES 838
MCM.

PAUL EDSON VAINCOEUR

ORIENTADOR: PROF. DR. JORGE LUIZ DE ALMEIDA FERREIRA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UNB
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS EM ENGENHARIA / FCTE

AVALIAÇÃO DA POTÊNCIA DISSIPADA E AUTOAMORTECIMENTO DE CONDUTORES
838 MCM.

PAUL EDSON VAINCOEUR

ORIENTADOR: PROF. DR. JORGE LUIZ DE ALMEIDA FERREIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA

PUBLICAÇÃO: 114A/2025

BRASÍLIA / DF, FEVEREIRO DE 2025

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UNB
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS EM ENGENHARIA / FCTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA
ENGENHARIA

AVALIAÇÃO DA POTÊNCIA DISSIPADA E AUTOAMORTECIMENTO DE CONDUTORES
838 MCM.

PAUL EDSON VAINCOEUR

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO AO
EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA,
COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR: _____

PROF. DR.

ORIENTADOR, Dr. Jorge Luiz de Almeida Ferreira / FCTE - UnB

DR. MEMBRO INTERNO

EXAMINADOR – Dr. Marcus Vinicius Girão de Moraes / FCTE - UnB

DR. MEMBRO EXTERNO

EXAMINADOR – Dr. Marcus Vinicius Costa Sá / IFB

DR. MEMBRO INTERNO

EXAMINADOR – Dr. Eder Lima de Albuquerque / FCTE - UnB

Relatório (ata) de defesa de dissertação assinado eletronicamente pela banca avaliadora, via Sistema Eletrônico de Informações - SEI, documento 12401392, processo nº 23106.003869/2025-90.

BRASÍLIA / DF, FEVEREIRO DE 2025

FICHA CATALOGRÁFICA

VAINCOEUR, PAUL EDSON	
Avaliação da Potência Dissipada e Autoamortecimento de Condutores 838 MCM. [Distrito Federal], 2025. 104p., (FCTE, Mestrado em Integridade de Materiais da Engenharia, 2025). Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia.	
1. CAL 1120 838 MCM 3. Amortecedores Stockbridge I. ENM/FCTE/UnB.	2. Dissipação de energia 4. Vibração eólica II. Título (serie)

REFERÊNCIA

VAINCOEUR, PAUL EDSON (2025). Avaliação da Potência Dissipada e Autoamortecimento de Condutores 838 MCM. Dissertação de mestrado em Integridade de Materiais da Engenharia, Publicação: 114A/2025, Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 104p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Paul Edson Vaincoeur

TITULO: Avaliação da Potência Dissipada e Autoamortecimento de Condutores 838 MCM.

GRAU: Mestre

ANO: 2025

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

Pauleysonv.2015.edu@gmail.com

Brasília, DF – Brasil

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus Todo-Poderoso por tudo o que fez na minha vida, à minha mãe Eugenie Bazelais, ao meu pai Milo Vaincoeur, à Norwich Outreach to Haiti, Conor Brooks e a Susan Montano Petruzzi pelo apoio.

Meus sinceros agradecimentos também ao meu orientador, Professor Dr. Jorge Luiz de Almeida Ferreira, por ter concordado em me orientar durante todo o meu estudo para a conclusão deste projeto de mestrado. Agradeço seu estímulo, sua confiança em mim e seu incentivo constante. Também gostaria de agradecer à Professora Maria Alzira por seu incentivo e incansável apoio acadêmico. Ela tem sido uma mentora tanto acadêmica quanto moral durante todo o meu tempo na Universidade de Brasília (FCTE).

Sou grato a Dr. Remy Badibanga Kalomboo e Felipe Maganha da Lima por disponibilizarem recursos valiosos e por me ajudarem com a preparação, o conhecimento e a montagem de materiais no laboratório (LabCabos) durante os estudos experimentais.

Também gostaria de agradecer à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) por seu generoso apoio financeiro durante meu mestrado no programa da engenharia da FGA (PPG Integridade).

RESUMO

O comportamento dinâmico e a dissipação de energia de cabos condutores de alumínio tipo CAL 1120 | 838 MCM, juntamente com a eficiência de amortecedores tipo Stockbridge sob diferentes condições de carga e fadiga, foram investigados neste estudo. A pesquisa teve como objetivo quantificar a dissipação de energia dos condutores sob frequências de vibração, amplitudes e cargas de tração variadas, além de avaliar a degradação do desempenho dos amortecedores após ciclos de fadiga. Os experimentos foram realizados com excitações harmônicas em frequências entre 15,25 Hz e 35,55 Hz, com cargas de tração variando de 22,5% a 30% da carga de ruptura (UTS). Os testes de fadiga incluíram 10 milhões de ciclos de vibração, e a dissipação de energia foi medida utilizando o método da potência com dados de acelerômetros. Os resultados indicaram que a dissipação de energia aumentou com a frequência, passando de 0,0068 W/m em 15,25 Hz para 0,015 W/m em 35,55 Hz, representando um aumento de 120%. Amplitudes maiores, como 1 mm, resultaram em dissipação aproximadamente 25% superior em comparação a 0,7 mm. Cargas de tração mais altas, como 30% da UTS, reduziram a dissipação de energia em 15% em relação a 22,5%, devido ao aumento da rigidez do cabo. Os amortecedores Stockbridge apresentaram uma redução de eficiência de 12,07% após fadiga, particularmente na faixa de 80 Hz a 100 Hz. No entanto, mostraram maior eficiência na faixa de 81 Hz a 90 Hz, com dissipação até 30% superior em relação a outras frequências.

Palavras-chave: Vibração eólica; Dissipação de energia; Amortecedores Stockbridge; Condutores de alumínio; Fadiga estrutural.

ABSTRACT

The dynamic behavior and energy dissipation of CAL 1120 | 838 MCM aluminum conductors, along with the efficiency of Stockbridge dampers under different load and fatigue conditions, were investigated in this study. The research aimed to quantify the energy dissipation of conductors under varying vibration frequencies, amplitudes, and tensile loads, as well as to evaluate damper performance degradation after fatigue cycles. Experiments were conducted using harmonic excitations at frequencies ranging from 15,25 Hz to 35,55 Hz and tensile loads between 22,5% and 30% of the conductor's ultimate tensile strength (UTS). Fatigue tests involved 10 million vibration cycles, and energy dissipation was measured using the power method with accelerometer data. The results showed that energy dissipation increased with frequency, from 0.0068 W/m at 15,25 Hz to 0,015 W/m at 35,55 Hz, representing a 120% increase. Larger amplitudes, such as 1 mm, resulted in approximately 25% higher dissipation compared to 0,7 mm. Higher tensile loads, such as 30% UTS, reduced energy dissipation by 15% compared to 22,5% UTS due to increased conductor stiffness. After 10 million fatigue cycles, dampers exhibited a 10% reduction in efficiency, particularly in the 80 Hz to 100 Hz range. However, they performed most efficiently in the 81 Hz to 90 Hz range, with energy dissipation up to 30% higher than at other frequencies.

Keywords: Wind-induced vibration; Energy dissipation; Stockbridge dampers; Aluminum conductors; Structural fatigue.

Sumário

LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
LISTA DE ACRÔNIMOS	XIV
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 METODOLOGIA	3
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 CABOS CONDUTORES	5
2.2 VIBRAÇÃO EM CABOS CONDUTORES	9
2.2.1 Vibrações Eólicas	11
2.2.2 Galope	15
2.2.3 Oscilações Induzidas por Esteiras	18
2.3 SISTEMA DE AMORTECIMENTO	19
2.4 VIBRAÇÃO DE SISTEMAS CONTÍNUOS	19
2.4.1 Vibrações longitudinais do cabo condutor de alumínio	19
2.4.2 Fator de Qualidade Q e Amortecimento ξ	24
2.5 PARÂMETROS	25
2.6 ABSORVEDORES DE VIBRAÇÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	28
2.7 AUTOAMORTECIMENTO DO CONDUTOR	33
2.7.1 Mecanismos responsáveis pelo autoamortecimento do condutor	36
2.7.2 Métodos de Medição de Auto Amortecimento	38
2.7.3 Diferenças e escolha do método	44
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL E CIENTÍFICA	46
3.1 BANCADA EXPERIMENTAL	46
3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	47
3.2.1 Condutor CAL 1120/838MCM	47

3.2.2 Configuração dos Sensores	49
3.2.3 Amplificador de potência	51
3.2.4 Shaker eletromecânico	52
3.2.5 Sistema de controle	53
3.3 PROCEDIMENTOS DE TESTES	54
3.3.1 Processo de Montagem do Cabo Condutor	54
3.3.2 Configurações da bancada experimental.....	55
3.3.3 Procedimento para Teste de Autoamortecimento	56
3.3.4 Procedimento do ensaio caracterização (Amortecedor tipo Stockbridge)	58
3.4 ANÁLISE DE DADOS	60
3.4.1 Calculo da Potência dissipada	60
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
4.1 CURVA DE AUTOAMORTECIMENTO	62
4.2 IMPACTO DA CARGA DE TRAÇÃO (EDS) E DAS FREQUÊNCIAS NA POTÊNCIA DISSIPADA.....	68
4.3 COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS AMORTECEDORES STOCKBRIDGE.....	73
5 CONCLUSÃO.....	75
LISTAS DE REFERÊNCIAS.....	77
APÊNDICES	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Sistema de transmissão: componentes e funcionalidades. (a) amortecedor e (b) Isolador elétrico de porcelana.....	5
Figura 2.1.1. Cabo de Alumínio Liga - CAL.....	7
Figura 2.1.2. Cabo Alumínio com Alma de Aço - CAA.....	7
Figura 2.1.3. Cabo de Alumínio nu - CA.	8
Figura 2.1.4. Três condutores utilizados em sistemas de transmissão – CA, CAL e CAA.	8
Figura 2.2. Distribuição estatística típica da velocidade do vento. Fonte: Diana et al. (2021)	10
Figura 2.2.1. Relação entre número de Strouhal versus número de Reynold para cilindros circulares. Fonte: Katopodes (2019).	13
Figura 2.2.2. Função de potência reduzida versus amplitude de vibração relativa. Fonte: Chan (2006).	14
Figura 2.2.3. Falha típica de uma linha aérea causada por uma tempestade de gelo e um galope. Fonte: Li et al. (2021).	16
Figura 2.2.4. Vento soprando contra um cabo revestido de gelo. Fonte: ROCHA (2012)	17
Figura 2.2.5. Acúmulo de gelo nas linhas de energia. Fonte: adaptado de Bleszynski e Kumosa (2019).	17
Figura 2.2.6. Modos de vibração induzidos por esteira em condutores paralelos. Fonte: EPRI (2009).	18
Figura 2.4. Representação de um elemento diferencial de uma corda vibrante. Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em Den Hartog (1972).....	19
Figura 2.4.1. Três primeiros modos naturais de vibração de uma corda.	23
Figura 2.4.2. Curva de resposta harmônica mostrando o ponto de meia potência e a largura de banda. Fonte: Rao S. e Philip G. (2018).	25
Figura 2.5. fluxograma de cálculo da amplitude da vibração para cada valor de frequência.....	26
Figura 2.6. Modelo do amortecedor Stockbridge usando na linha transmissão.	29
Figura 2.6.1. Modelo do amortecedor Bretelle usando na linha transmissão. Fonte: Papailiou (2007).30	
Figura 2.6.2. Modelo do amortecedor Festoon. (a) e (b) Festoon em pontos de suspensão; (c) Festoon nos pontos mortos. Fonte: Papailiou (2007).....	31
Figura 2.6.3. Modelo do amortecedor espiral.....	32
Figura 2.6.4. Modelo do absorvedor Elgra usando na linha transmissão. Fonte: Labegalini (1992)...	32
Figura 2.7. Relação entre Energia Dissipada, Energia de Entrada e Amplitude de Vibração em Sistemas de Autoamortecimento. Fonte: Diana (2011)	34
Figura 2.7.1. Potência dissipada versus deslocamento normalizado Y/D. Conductor Drake sob carga 2858 daN. Fonte: Umberto (2011)	35

Figura 2.7.2. Contato entre dois corpos cilíndricos com uma superfície de contato elíptica. Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em EPRI (2009).....	36
Figura 2.7.3. Linhas de fluxo e a rotação do campo de velocidade representando a área ao redor do Condutor. Fonte: Meynen et al. (2005)	37
Figura 2.7.4. Representação da bancada mostrando a localização das medições nodais e antinodais ..	41
Figura 2.7.5. Traço de decaimento de um condutor 264-AL3/34-ST1A tensionado a 20% de RTS. Fonte: Umberto et al. (2011)	44
Figura 3.1. Representação esquemática da bancada de teste experimental de Auto amortecimento	47
Figura 3.2.1. Seção transversal do Cabo CAL 1120 / 838 MCM. Fonte: Labcabos	48
Figura 3.2.2. Sensores (a) Acelerômetro, (b) Leitor de carga e (c) Célula de carga.....	49
Figura 3.2.3. Sistema de acoplamento do ensaio autoamortecimento. Fonte: Labcabos	50
Figura 3.2.4. Montagem do sistema de acoplamento com os sensores. Fonte: Labcabos.....	51
Figura 3.2.5. Amplificador da potência da bancada do teste. Fonte: Labcabos.	51
Figura 3.2.6. Shaker eletromecânico. Fonte: LabCabos.....	52
Figura 3.2.7. Sistema de controle da bancada experimental	53
Figura 3.3.1. Bobinas grandes de cabos enrolados, com a marca ALUBAR. Fonte: Labcabos.....	54
Figura 3.3.2. Grampo de ancoragem: (a) lado da célula de carga e (b) Lado do Tifor. Fonte: Labcabos.	56
Figura 3.3.3. Guincho de Alavanca Tifor. Fonte: Labcabos.	56
Figura 3.3.4. Captura do ensaio varredura realizada com amplitude de deslocamento 1 mm pico-a-pico.	56
Figura 3.3.5. Talha do peso para controlar os valores da carga de tração.	57
Figura 3.3.6. Captura do shaker control mostra a configuração do ensaio autoamortecimento.....	58
Figura 3.3.7. Amortecedor fixa no shaker – Ensaio da caracterização.....	59
Figura 3.4.1. Captura da tela Pycharm usando as bibliotecas em Python para analisar os dados experimentais	61
Figura 4.1. Potência dissipada em função da amplitude de deslocamento normalizado Y/D - EDS 30% UTS.	62
Figura 4.1.1. Potência dissipada, mínima, media, máxima em função da frequência - EDS 30% UTS.	63
Figura 4.1.2. Potência dissipada em função frequência para $Y = 0,70$ e 1 mm - EDS 30% UTS.	64
Figura 4.1.3. Potência dissipada em função da Amplitude de deslocamento normalizado (Y/D) - EDS 26,5 % UTS.	65
Figura 4.1.4. Potência dissipada, mínima, media, máxima em função da frequência - EDS 26,5 % UTS.	65
Figura 4.1.5. Potência dissipada em função da frequência para $Y = 0,70$ e 1 mm - EDS 26,5 % UTS	66

Figura 4.1.6. Potência dissipada em função amplitude de deslocamento normalizado Y/D - EDS 22,5 % UTS	67
Figura 4.1.7. Potência dissipada, mínima, media, máxima em função frequência - EDS 22,5 % UTS.	67
Figura 4.2.1. Potência dissipada pelo condutor em função deslocamento normalizado Y/D para diferentes cargas de tração EDS - Para $f = 15,25$ Hz	69
Figura 4.2.2. Potência dissipada pelo condutor em função deslocamento normalizado Y/D para diferentes cargas de tração EDS - Para $f = 35,55$ Hz	69
Figura 4.2.3. Resposta em frequência do conductor CAL 1120 838 MCM	70
Figura 4.2.4. a) Fator de qualidade Q e b) Fator de amortecimento do Condutor CAL 1120 838 MCM	71
Figura 4.2.5. Fator de amortecimento do Condutor CAL 1120 sob diferente valor de EDS (30 e 26,5%)	72
Figura 4.3.1. Potência dissipada dos amortecedores dos tipos Stockbridge: a) Antes da Fadiga, b) Pós - Fadiga.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.2. Comparação dos tipos de condutores Movimento. Fonte: EPRI (1979).....	10
Tabela 2.2.1. Formação de vórtices dos números de Reynolds em diferentes regimes de fluxo. Fonte: Venkata et al (2017).....	12
Tabela 2.2.2. Número de Strouhal vs. Número de Reynolds para uma seção circular.	13
Tabela 2.5. Frequências do ensaio em diferentes cargas de tração.....	28
Tabela 2.7. Comparação de métodos laboratoriais.	45
Tabela 3.2. Características geométricas e mecânicas do condutor CAL 1120/838 MCM.....	48
Tabela 3.2.1. Especificações dos sensores utilizados no experimento.	49

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

P_w	Potência média fornecida pelo vento	[W]
P_d	Potência média dissipada pelo sistema	[W]
Y_{max}	Amplitude máxima de vibração	[mm]
F	frequência de vibração	[Hz]
D	diâmetro do Condutor	[mm]
d_m	diâmetro mensageiro do Amortecedor	[mm]
E	Módulo de Elasticidade	[Mpa]
E_{int}	Energia de entrada no sistema	[J]
L	Comprimento do vão	[m]
V_s	Velocidade na base do shaker	[m/s]
Q	Fator de qualidade	
F	Força de imposta pelo shaker	[N]
M	Massa	[kg]
t	Tempo	[sec.]

Grupos Adimensionais

Re	Número de Reynolds
S	Número de Strouhal

Símbolos Gregos

δ	Decremento logarítmico	
θ	Ângulo de fase entre a força e a velocidade	[°]
ξ	Amortecimento	
λ	Comprimento de onda	[m]
ω_n	Frequência Natural	[m]

LISTA DE ACRÔNIMOS

AAAC: All Aluminium Alloy Conductor | CAL: Condutor Alumínio Liga

AAC: All Aluminium Conductor | CAA: Condutor Alumínio nu

ACSR: Aluminium Conductor Steel Reinforced | CAA: Condutor Alumínio Com Alma de Aço

UTS: Ultimate tensile strength

UPC: Último Ponto do Contato

EDS: EveryDay Stress

RMS: Root Mean Square

FT: Tranfert Function | Função de Transferência

Matlab: Matrix Laboratory

UNB: Universidade de Brasília

LabCabos: Laboratório de Cabos

IEA: International Energy Agency

EPE: Empresa de Pesquisa Energética

ANNEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

SIN: Sistema Interligado Nacional

PDE: Plano Decenal de Expansão de Energia

IACS: International Annealed Copper Standard

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

A transmissão de energia elétrica é um dos pilares fundamentais para o desenvolvimento econômico e social de qualquer país, garantindo que a energia gerada em centrais hidrelétricas, termoeletricas ou eólicas seja disponibilizada aos consumidores de forma confiável e eficiente. No Brasil, o setor de transmissão desempenha um papel estratégico, já que o Sistema Interligado Nacional (SIN) conecta as principais fontes de geração aos grandes centros consumidores. Contudo, a infraestrutura de transmissão brasileira enfrenta desafios crescentes, como o envelhecimento das linhas, a necessidade de modernização tecnológica e a adaptação às demandas de consumo em expansão. Cimini e Fonseca (2013) destacam que a infraestrutura do setor de transmissão de energia, em operação há mais de 20 anos, enfrenta desafios significativos devido ao envelhecimento das linhas e ao aumento da demanda energética.

Entre os diversos fatores que comprometem a eficiência e a segurança das linhas de transmissão, as vibrações induzidas pelo vento ocupam uma posição de destaque. Esses fenômenos, que podem ser classificados como vibrações de alta frequência ou galope de baixa frequência, têm impacto direto na durabilidade dos cabos e nas estruturas de suporte, podendo levar a falhas por fadiga. Como demonstrado por Azevedo e Cescon, (2002a) e Kalombo et al. (2016), esses efeitos são críticos para a integridade dos sistemas de transmissão. Além disso, as condições climáticas brasileiras, caracterizadas por velocidades de vento variáveis e regiões com alta intensidade de rajadas, agravam esses efeitos, tornando essencial o estudo aprofundado dos mecanismos de dissipação de energia nesses cenários.

Os condutores de alumínio, amplamente utilizados em linhas de transmissão devido à sua alta condutividade elétrica e baixa densidade, apresentam, entretanto, maior flexibilidade estrutural, o que os torna mais suscetíveis às vibrações induzidas. O autoamortecimento, ou seja, a capacidade inerente do cabo de dissipar a energia mecânica das vibrações internamente, desempenha um papel crucial na redução desses efeitos. Esse fenômeno está associado a interações complexas entre as propriedades físicas do material e o comportamento estrutural do cabo, mas ainda carece de compreensão detalhada, especialmente em frequências naturais de vibração típicas de operação.

Além do autoamortecimento, dispositivos externos como amortecedores Stockbridge são amplamente empregados para mitigar os efeitos das vibrações induzidas. A eficiência desses

dispositivos depende de fatores como frequência de excitação, carga aplicada e condições de fadiga. Estudos prévios de Adhikari e Woodhouse (2001) e Ferreira et al. (2023), mostram a existência de lacunas no entendimento dos mecanismos de amortecimento e na caracterização da dissipação de energia em cabos de alumínio, especialmente em frequências naturais típicas de operação. Essas lacunas ressaltam a importância de avaliar o desempenho dinâmico de amortecedores em condições reais de operação, bem como de compreender como a dissipação de energia varia em função de fatores como frequência, amplitude de vibração e carga de tração.

Dessa forma, este trabalho visa preencher essas lacunas ao analisar o comportamento dinâmico do condutor CAL 1120 / 838 MCM e a eficiência dos amortecedores Stockbridge F4000 sob condições de vibração controladas. Além de contribuir para o avanço do conhecimento científico nessa área, os resultados têm implicações práticas diretas no planejamento de sistemas de transmissão mais seguros e eficientes.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho é composto pelos dois grandes objetivos a seguir:

a) Objetivo principal

Analisar o comportamento dinâmico e a dissipação de energia do cabo condutor CAL 1120/838 MCM sob vibrações induzidas pelo vento, considerando o efeito do autoamortecimento e a eficiência de amortecedores tipo Stockbridge F4000 em diferentes condições de frequência e carga de tração.

b) Objetivos específicos

- Caracterizar o efeito das vibrações induzidas pelo vento sobre o condutor, com ênfase nas faixas de frequência mais críticas;
- Analisar como a fadiga afeta o desempenho dos amortecedores Stockbridge;
- Identificar a faixa de frequência na qual os amortecedores Stockbridge apresentam maior eficiência;
- Examinar a relação entre a capacidade de dissipação de energia e as oscilações do condutor;
- Estudar o impacto de variações na carga aplicada sobre a capacidade de dissipação de energia do condutor.

1.3 METODOLOGIA

Os ensaios Autoamortecimento foram aplicados a um condutor CAL 838 MCM submetido a cargas de tração de 22,5, 26,5 e 30% da carga de ruptura final (UTS) e uma função harmônica, usando um excitador eletrodinâmico (*Shaker*). As medições de vibração foram feitas com acelerômetros e duas células de carga, e os dados foram registrados no sistema Shaker Controle, que inclui o sistema de controle do *shaker* eletrodinâmico.

Foi realizado um teste de varredura para identificar as frequências naturais do sistema. Essas frequências naturais são essenciais, pois foram usadas para calcular o fator de qualidade (Q), que, por sua vez, é usado para determinar o fator de amortecimento (ζ). Segundo a norma IEEE Std 563 (1978), as amplitudes de vibração foram estabelecidas, garantindo a precisão e a repetibilidade dos ensaios. Em seguida, o condutor foi submetido a vibrações forçadas para determinar a potência dissipada, utilizando o Método da Potência. Para um comprimento total de 43 m, a energia dissipada foi calculada com base em cinco modos de frequência, sendo que, para cada modo, cinco valores de amplitude foram determinados. Assim resultou em um total de 25 testes para cada valor de Carga de estiramento EDS (*Everyday Stress*). Essa abordagem metódica permitiu obter um conjunto abrangente de dados sobre a dissipação de energia do condutor sob diferentes condições de carga e frequência.

Para verificar a eficácia dos amortecedores tipos stockbridge F4000 e seus comportamentos em diferentes frequências de vibração antes e após fadiga, foi realizada um ensaio caracterização dinâmica. O ensaio de caracterização variou as frequências de vibração a uma taxa de 0,025 Hz/s, permitindo que o sistema atingisse o regime permanente e capturasse respostas detalhadas ao longo do domínio de frequências, especialmente em pontos sensíveis a fenômenos ressonantes. Durante o ensaio, foram adquiridos em tempo real dados da força entre o *shaker* e o amortecedor, da velocidade de vibração e do ângulo de fase entre essas grandezas. O controle do ensaio foi feito a partir de um acelerômetro montado na base do shaker, mantendo a velocidade em 100 mm/s. Cada uma das três amostras foi submetida a um ensaio da Fadiga de 10 milhões de ciclos de vibração, com amplitude de 0,5 mm na maior frequência de ressonância. Os resultados foram apresentados em gráficos de ângulo de fase entre força e velocidade, impedância mecânica e potência dissipada.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, descritos a seguir:

- **Capítulo 1:** Apresenta o contexto e a motivação do trabalho, detalhando os objetivos principais e específicos, bem como a relevância científica e prática do estudo.
- **Capítulo 2:** Revisão da literatura, abordando os principais conceitos relacionados a vibrações induzidas pelo vento, dissipação de energia e o uso de amortecedores Stockbridge em cabos de transmissão.
- **Capítulo 3:** Detalha a metodologia experimental adotada, incluindo a configuração dos testes, os parâmetros analisados e o método utilizado para determinar a dissipação de energia.
- **Capítulo 4:** Apresenta e discute os resultados obtidos, com análise aprofundada dos dados e comparação com estudos prévios na literatura.
- **Capítulo 5:** Conclusões do trabalho, com destaque para as principais contribuições científicas, implicações práticas e sugestões para pesquisas futuras.

Referências

A lista de referências inclui todas as fontes bibliográficas consultadas e citadas ao longo desse trabalho, garantindo que os fundamentos teóricos e práticos do estudo estejam adequadamente documentados.

Apêndices

Algumas informações, como tabelas de dados brutos ou gráficos adicionais, estão disponíveis nos apêndices deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CABOS CONDUTORES

No contexto da engenharia elétrica e da transmissão de energia, os cabos condutores desempenham um papel central na transmissão de energia elétrica, combinando propriedades mecânicas e elétricas para atender às demandas estruturais e operacionais das linhas de transmissão. Esses cabos, geralmente fabricados com alumínio de alta condutividade e reforçados com aço para suportar esforços mecânicos, enfrentam condições ambientais severas, como ventos extremos, formação de gelo e grandes variações de temperatura.

No contexto das vibrações eólicas, esses condutores estão sujeitos a forças dinâmicas que podem comprometer sua integridade estrutural e funcionalidade ao longo do tempo, destacando a importância de estudar seus comportamentos vibracionais e de desenvolver soluções para mitigar falhas por fadiga. Este capítulo tem o objetivo de fornecer informações gerais sobre cabos condutores de energia, abrangendo aspectos essenciais relacionados ao seu uso (materiais usados e aplicações práticas).

Os condutores de transmissão apresentam alta sensibilidade ao envelhecimento, o que compromete sua durabilidade estrutural. Essa linha de transmissão, destinada à transmissão aérea de eletricidade, é composta não apenas de cabos condutores e protetores contra surtos, um sistema de amortecedor, mas também de estruturas metálicas de suporte (*Tower*), conforme mostrado na Figura 2.1, para apoiar os cabos. Ela também é composta de um sistema de fundações rígidas, amortecimento de vibração do vento e sinalização aérea, acessórios e outros acessórios, incluindo uma faixa de segurança.

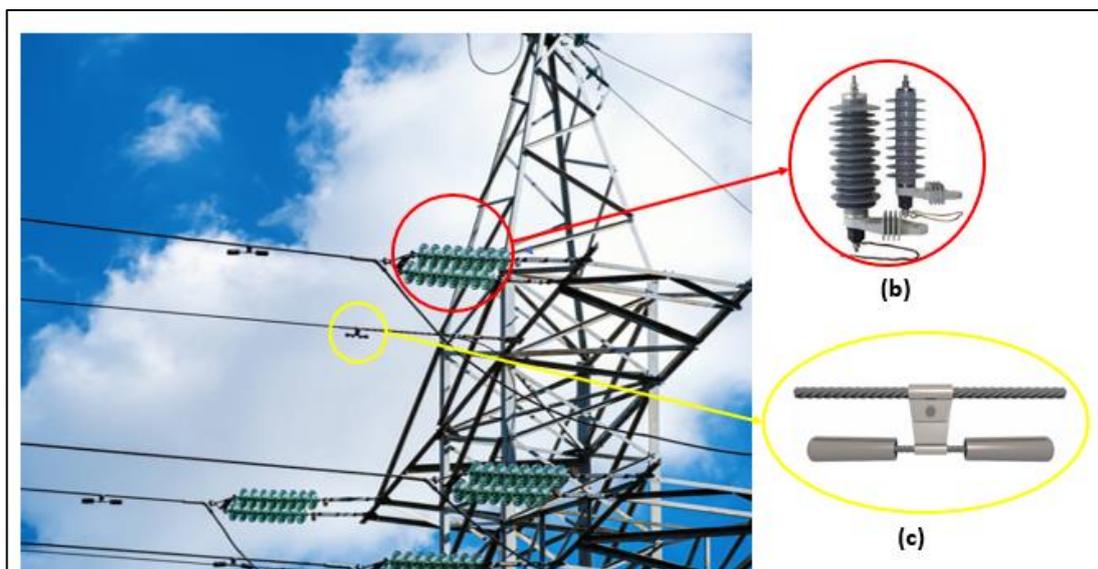


Figura 2.1 - Sistema de transmissão: componentes e funcionalidades. (c) amortecedor e (b) Isolador elétrico de porcelana.

Segundo Aggarwal et al. (2000) as linhas aéreas são os suportes mais econômicos e amplamente usados para energia elétrica. Um dos principais fatores que limitam a vida útil dos condutores são as vibrações induzidas pelo vento e o problema da erosão dos fios de alumínio. Diante dessas limitações, muitos condutores de linhas de transmissão geralmente consistem em um material de núcleo de alta resistência cercado por um material de alta condutividade, para atenuar os efeitos da vibração e da erosão.

Segundo Cui et al. (2017), O cobre, apesar de seu preço tender a aumentar em relação ao do alumínio, é considerado o principal metal para a transferência de energia elétrica devido à sua alta condutividade e boas propriedades mecânicas. No entanto, devido às reservas limitadas de cobre e à sua sensibilidade, conforme apontado Karabay (2006a), os condutores de liga de alumínio (CAL) tornaram-se muito populares nos últimos 15 a 20 anos, segundo Valiev et al. (2014). Portanto, o estudo do comportamento de fadiga desses condutores de alumínio usados em linhas de transmissão permite garantir seu desempenho e durabilidade diante de vários efeitos dinâmicos, como destacado por Goudreau et al. (2010), Kalombo et al. (2017), Ferreira et al. (2023) e Araújo (2023).

Tipos de condutores de alumínio

- **Condutor de Alumínio Liga CAL ou (AAAC - *All Aluminum Alloy Conductor*):** Segundo Papailiou (2007), os condutores CAL possuem uma relação força-peso superior à dos CAA, permitindo maior capacidade térmica sem comprometer os projetos de flecha. No entanto, ao utilizar uma porcentagem semelhante da resistência à tração nominal (RTS), a relação entre a tensão horizontal (H) e o peso do condutor (w) aumenta, o que pode resultar em problemas com vibração eólica. O CAL é uma liga tratada termicamente de alumínio-magnésio-silício, conforme IEC 60104 (1967), com condutividade entre 52,5% e 57,5% IACS e resistência entre 250 MPa e 330 MPa. Há uma relação inversa entre condutividade e resistência mecânica: quanto maior a condutividade, menor a resistência, e vice-versa. Nos últimos 20 anos, esse tipo de condutor se tornou muito popular, conforme destacado por Karabay (2006). Um estudo realizado por Mohtar Siti et al. (2004), com base em análises metalográficas e de microscopia eletrônica de transmissão, demonstrou que a condutividade do CAL é superior à de outros condutores de alumínio, como o CA.



Figura 2.1.1 - Cabo de Alumínio Liga - CAL.

- Cabos Alumínio com Alma de Aço CAA ou (ACSR - *Aluminum Conductor Steel Reinforced*):** Condutores de Alumínio com Alma de Aço mostra na Figura 2.1.2 entrelaçados para fornecer resistência mecânica, são os condutores mais comumente usados no mundo. Ele consiste em um núcleo e uma primeira camada de aço, sendo as outras camadas feitas de alumínio comercial puro. As outras camadas são feitas de alumínio comercial puro AA 1350-H19. Em termos de durabilidade, um estudo realizado por Kalombo et al. (2015), demonstrou que o cabo de Alumínio com Alma de Aço (CAA) tem uma vida de fadiga 5 vezes maior do que o Cabo de Alumínio Liga (CAL). Os cabos CAA oferecem várias vantagens, como seu uso como cabos de aterramento aéreos para transmissão de energia, seu uso em linhas de transmissão de longos vãos, sua alta resistência à tração e seu peso leve, o que significa que eles exigem menos suporte em longos vãos. Esse tipo é o mais comum no Brasil.

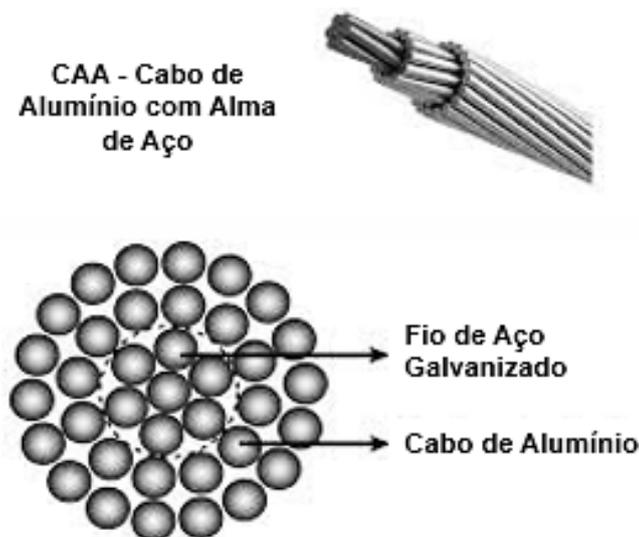


Figura 2.1.2 - Cabo Alumínio com Alma de Aço - CAA.

- **Cabo de Alumínio nu CA ou (AAC – All Aluminium Conductor):** Todos os fios desse tipo de condutor são produzidos com alumínio normalmente da liga 1350-H19. Devido à baixa relação resistência por peso, esse tipo de condutor conforme mostra a Figura 2.1.3 é recomendado para ser instalado em linhas de transmissão com pequenos vãos e áreas onde os carregamentos de vento são baixos. A vantagem dos condutores CA é que eles têm um alto grau de resistência à corrosão, razão pela qual são amplamente usados em áreas costeiras. Esse tipo de condutor (CA) foi desenvolvido devido à corrosão galvânica à qual os condutores CAA são suscetíveis.



Figura 2.1.3 - Cabo de Alumínio nu - CA.

Em resumo, a Figura 2.1.4 apresenta três categorias de condutores empregados em sistemas de transmissão e distribuição de energia: CA (Condutor de Alumínio), CAL (Condutor de Liga de Alumínio) e CAA (Condutor de Alumínio com Alma de Aço). As características estruturais e materiais de cada categoria tornam-nos apropriados para diversas aplicações nas redes de energia.



Figura 2.1.4 - Três condutores utilizados em sistemas de transmissão – CA, CAL e CAA.

¹ A liga usada nos CALs é uma liga de alumínio, magnésio e silício tratada termicamente, designada pela norma IEC 60104.

2.2 VIBRAÇÃO EM CABOS CONDUTORES

A vibração dos cabos abrange os movimentos oscilatórios resultantes de forças externas, como o vento, ou da interação com vibrações mecânicas de estruturas adjacentes. Esses fenômenos, influenciados por diversos fatores, representam um aspecto crucial no projeto e na operação de linhas de transmissão de energia, já que podem comprometer a integridade estrutural, acelerar a fadiga do material e afetar diretamente a segurança e a confiabilidade do sistema. Nesse contexto, os cabos condutores estão sujeitos a diferentes tipos de vibração, que impactam significativamente sua durabilidade e desempenho. Dentre os fenômenos mais comuns, destacam-se três categorias principais de movimentos cíclicos do condutor, conforme descrito por Ervik et al. (1989):

- ***Vibrações de alta frequência (vibrações eólicas):*** Caracterizadas por frequências entre 5 Hz e 150 Hz e amplitudes equivalentes ao diâmetro do cabo, essas vibrações resultam da formação de vórtices aerodinâmicos em condições de vento moderado.
- ***Galope:*** Ocorre em baixas frequências (< 3 Hz) e altas amplitudes, geralmente causado pelo acúmulo de gelo em regiões com condições climáticas extremas. Esse fenômeno provoca movimentos transversais significativos, aumentando o risco de falha por fadiga.
- ***Oscilações induzidas por esteiras:*** Frequências intermediárias e amplitudes moderadas, causadas pela interação entre múltiplos condutores em configuração agrupada.

A compreensão desses mecanismos é essencial para desenvolver estratégias eficazes de mitigação, garantindo a integridade das infraestruturas.

Dessa forma, Diana et al. (2021) demonstram, na Figura 2.2, que existe uma correspondência direta entre os valores da velocidade do vento e os valores de frequência. Esta relação permite explicar com maior precisão a evolução da frequência, tanto no aumento quanto na diminuição, em função das variações na velocidade do vento.

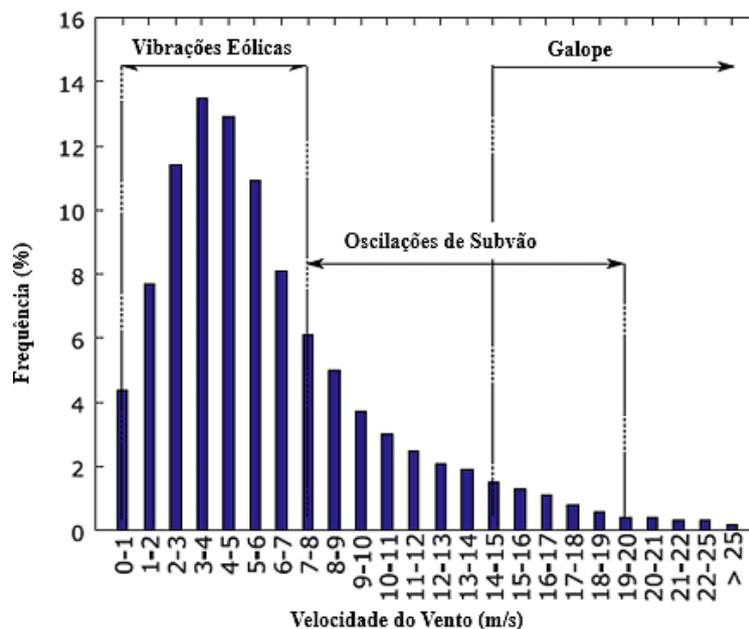


Figura 2.2 - Distribuição estatística típica da velocidade do vento.
 Fonte: Diana et al. (2021).

De fato, para analisar as diferentes manifestações das vibrações em cabos condutores causadas pelo vento, foi realizada uma comparação abrangente, conforme ilustrado na Tabela 2.2. Esta tabela oferece uma comparação detalhada entre os tipos de condutores, considerando seu movimento, com base nas diretrizes estabelecidas pelo EPRI (1979).

Tabela 2.2. Comparação dos tipos de condutores Movimento. Fonte: EPRI (1979).

Parâmetro	Tipos de vibrações		
	Eólica	Galope	Induzidas por Esteiras
Tipo de sobrecarga afetada.	Todos	Todos	Condutores agrupados (linhas paralelas no plano horizontal)
Faixa de frequência.	3 a 150 Hz	0,08 a 3 Hz	0,15 a 10 Hz

Amplitude de pico a pico (expressa no diâmetro do condutor).	0,01 a 1	5 a 300	0,5 a 80
Tipo de movimento causado pelo vento.	Estável.	Estável.	Estável.
Velocidade do vento.	0,89 a 6,71 m/s	6,71 a 17,88 m/s	6,71 a 17,88 m/s
Superfície do condutor.	Nua ou uniformemente gelada (ou seja, geada).	Depósito de gelo assimétrico.	Nua, seca

2.2.1 Vibrações Eólicas

A vibração eólica é um tipo de movimento causado pelo vento nos condutores aéreos e nos fios de proteção das linhas de transmissão e distribuição. A vibração do vento é caracterizada por uma baixa amplitude (diâmetro do condutor) e uma alta frequência (5 a 150 Hz).

A vibração do vento nos condutores e nos fios de blindagem das linhas de transmissão e distribuição pode causar danos que terão um impacto negativo na confiabilidade ou na capacidade de manutenção dessas linhas.

Há três fatores principais que afetam as vibrações eólicas: o comprimento do vão, a tensão e o tipo de terreno. Quando a tensão do condutor é alta, as vibrações eólicas são mais severas, especialmente em vãos longos e terrenos suaves com ventos regulares de baixa a moderada intensidade, conforme destacado Kasap (2012) e Chan (2006a).

Nesse fenômeno, as rupturas por fadiga nos fios do condutor ocorrem nos grampos de suspensão ou nos grampos de outros dispositivos instalados no condutor, como escoras, amortecedores de escora e outros dispositivos. Um vento leve perpendicular a um cabo pode causar vórtices na esteira. O tipo de vórtice depende da velocidade do vento e do número de Reynolds. Segundo o Cardou (2013), há dois efeitos principais importantes das vibrações do vento, que são: Danos por abrasão e falha por fadiga.

As vibrações do vento são controladas por dois parâmetros essenciais: o número de Reynolds e o número de Strouhal. O número de Strouhal foi desenvolvido pelo físico tcheco Vincenc

Strouhal em 1878, relaciona-se com as frequências de desprendimento de vórtices, o diâmetro do cilindro circular e a velocidade média do fluxo livre, conforme destacado por Strouhal (1878) e White Frank M. (2010). Esses parâmetros podem ser expressos pela equação (1):

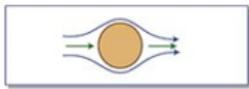
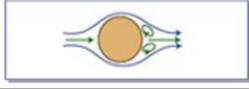
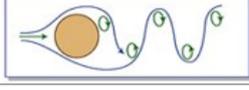
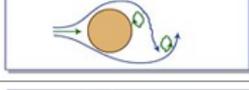
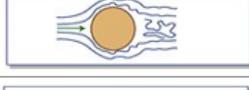
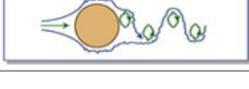
$$S_t = \frac{f_{st} D}{v} \quad (1)$$

As vibrações do vento são causadas pela fragmentação de vórtices, que resulta da força do vento através do condutor. Os diferentes regimes de fluxo podem ser determinados pelo número de Reynolds, que pode ser expresso pela equação (2):

$$R_e = \frac{v D}{\nu} \quad (2)$$

onde "D" representa o diâmetro do condutor, "V" a velocidade do vento e "ν" a viscosidade cinemática do fluido que é uma propriedade importante em mecânica dos fluidos e engenharia. A viscosidade cinemática descreve a resistência de um fluido ao escoamento sob a influência da gravidade e determinada em função da viscosidade dinâmica (μ) e a densidade (ρ) do fluido. O coeficiente para o ar em condições normais é: $\nu \approx 1,486 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$. A Tabela 2.2.1 apresenta os diferentes regimes de fluxo, destacando o tipo de vórtice em função do número de Reynolds. Além disso, ela ilustra a evolução da estrutura dos vórtices na esteira de um cilindro à medida que o número de Reynolds aumenta.

Tabela 2.2.1. Formação de vórtices dos números de Reynolds em diferentes regimes de fluxo.
Fonte: Venkata et al. (2017).

	Regime de Fluxo Não Separado.	$R_d < 5$
	Um par fixo de vórtices Kármán na esteira.	$5 - 15 < R_d < 40$
	Dois Regimes em que a Esteira de Vórtices é Laminar.	$40 < R_d < 150$
	Transition Range for Turbulence in the Belt.	$150 < R_d < 300$
	A Esteira de Vórtices é Totalmente Turbulenta.	$300 < R_d < 3 \times 10^5$
	A Camada Limite Laminar Passou pela Transição Turbulenta e a Esteira é Mais Estreita e Desorganizada.	$3 \times 10^5 < R_d < 3.5 \times 10^6$
	Restabelecimento da Esteira de Vórtices Turbulenta	$3.5 \times 10^6 < R_d$

Nesse caso, O número de Reynolds e o número de Strouhal são dois parâmetros fundamentais para analisar o fenômeno de descolamento de vórtices. Eles ajudam a prever e descrever o comportamento do fluxo e a formação de vórtices em torno de objetos, como cilindros, em diferentes condições de escoamento. A Tabela 2.2.2 demonstra a relação entre o número de Reynolds e Strouhal para uma seção circular.

Tabela 2.2.2. Número de Strouhal vs. Número de Reynolds para uma seção circular.

Número de Reynolds (Re)	Número Strouhal (S)
<30	0
50	0.13
500	0.20
1000	0.21
10^4	0.20
10^5	0.19
10^6	0.21
10^7	0.23

O trecho na Figura 2.2.1 descreve a relação entre o número de Reynolds (Re) e o número de Strouhal (S_{tr}) para o escoamento ao redor de um cilindro circular, com base nos dados de ROSHKO (1954).

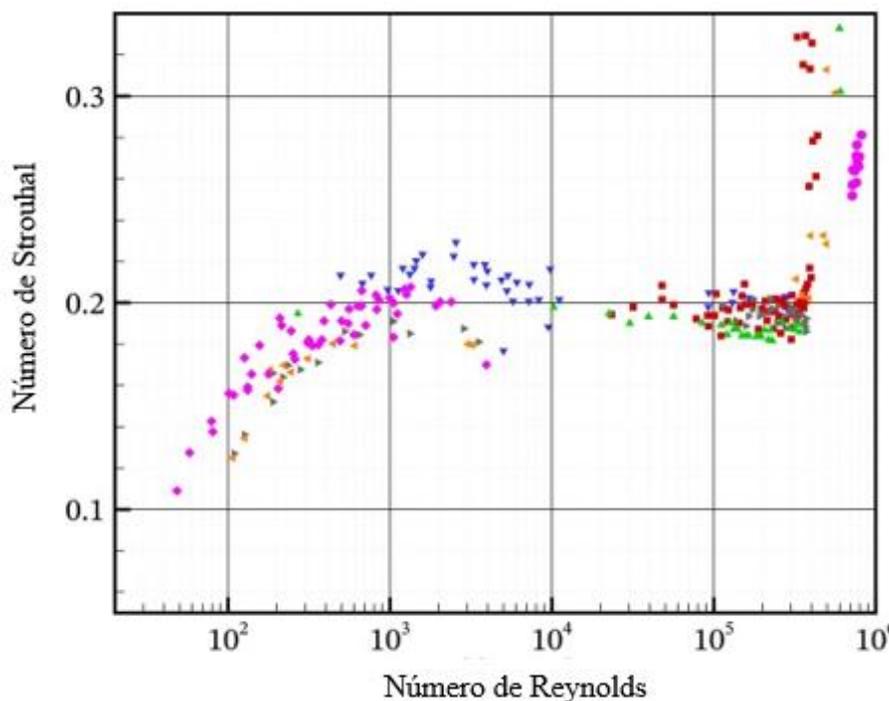


Figura 2.2.1. Relação entre número de Strouhal versus número de Reynold para cilindros circulares. Fonte: Katopodes (2019).

A potência máxima fornecida ao sistema por forças aerodinâmicas, com um fluxo de ar laminar estacionário perpendicular ao condutor, é determinada usando equações derivadas empiricamente. A maioria das equações usadas para determinar a potência máxima fornecida ao sistema por forças aerodinâmicas pode ser escrita na forma da equação (3):

$$P_w = fl^3 D^4 f_{nc}(A/D) \quad (3)$$

onde $f_{nc}(A/D)$ é a função de potência reduzida (uma função da amplitude relativa da vibração A/D), L é o comprimento do vão e f é a frequência de vibração, conforme destacado por CIGRE (1989). A Figura 2.2.2 mostra a $f_{nc}(A/D)$ obtida com base na pesquisa realizada pelos autores mais eminentes nesse campo.

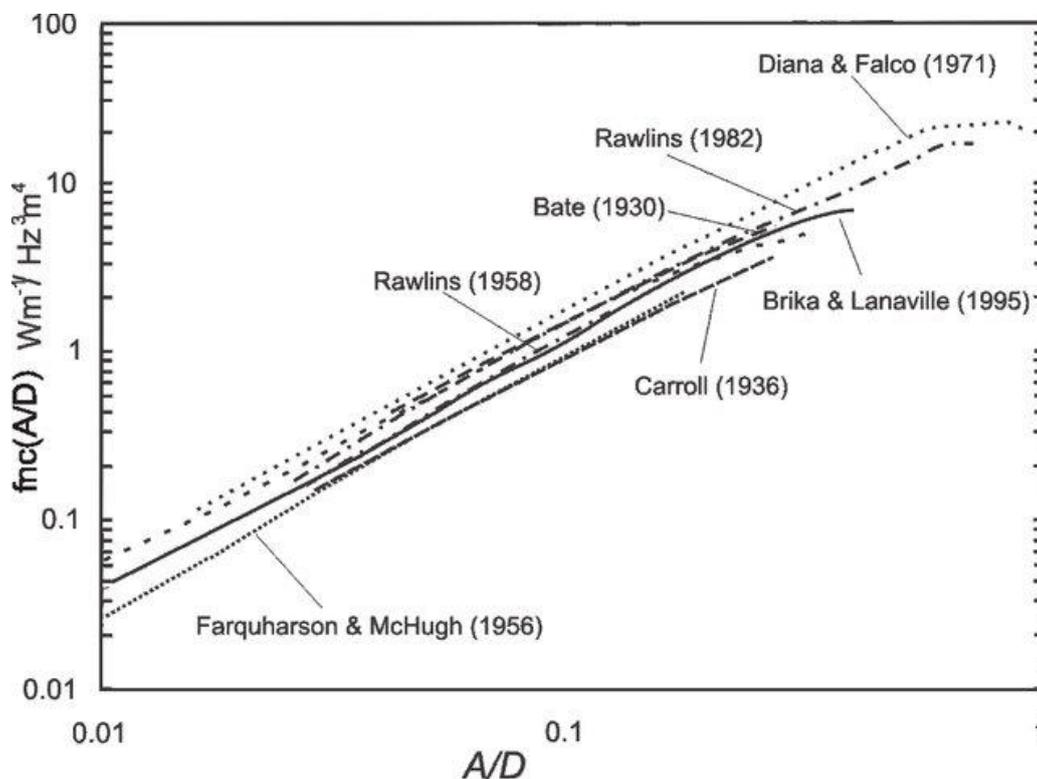


Figura 2.2.2 - Função de potência reduzida versus amplitude de vibração relativa.
Fonte: CHAN (2006a).

A frequência na qual os vórtices ocorrem está ligada ao número de Strouhal. Essa é uma relação sem dimensão entre a velocidade do vento e o diâmetro do condutor. Quando ouvimos as linhas elétricas "cantando" ao vento, ouvimos essa frequência de vórtice. Os fios são bem pequenos em comparação com os tubos e, portanto, produzem um som de frequência mais alta do que os tubos. Essa frequência de vórtice é calculada pela equação (4):

$$f = S_{strouhal} \left(\frac{V}{D_0} \right) \quad (4)$$

onde:

f: é a frequência;

V: é a velocidade do vento;

D_0 : é o diâmetro do tubo.

Essa não é a forma científica, pois é essencialmente uma questão de determinar o valor do número de Strouhal medindo a frequência de derramamento do vórtice e as outras duas variáveis. Felizmente, esse número geralmente está em uma faixa estreita de 0,18 a 0,22. Para os cilindros como o condutor, o número de Strouhal depende essencialmente do número de Reynolds (Re). Essa fórmula é usada a partir de uma relação empírica desenvolvida pelo pesquisador Roshko (1954).

Um estudo realizado por Diana e Falco (1971), durante a vibração de um condutor, no qual o condutor foi considerado como um cilindro rígido em um fluxo uniforme, concluiu que a força de elevação que atua durante a vibração do condutor é harmônica no tempo, assim como o deslocamento do condutor em estado estável. A magnitude dessa força de elevação é definida por:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_l D L V^2 \quad (5)$$

em que D é o diâmetro do condutor, L é o comprimento do vão do condutor, C_l é o coeficiente de elevação, ρ é a densidade do fluido e V é a velocidade do vento. Um coeficiente de elevação máximo de 0,55 foi medido em um cilindro que tinha uma vibração normalizada máxima de 0,55 D de pico a pico. Cilindros com amplitudes máximas de vibração acima e abaixo desse valor registraram um coeficiente de elevação entre 0,28 e 0,33, conforme destacado por Barry (2010) e Dos Santos (2015).

2.2.2 Galope

O galope é uma vibração de baixa frequência (0,1 - 3 Hz) e grande amplitude induzida pelo vento e pelo gelo assimétrico em condutores aéreos que geralmente dura muito tempo, conforme destacado por Chabart e Lilien (1998), Hu et al. (2012) e Cai et al. (2015). Esses condutores podem ser simples ou agrupados, com um único ou alguns loops de onda estacionária por vão. Ela é causada por um vento cruzado moderadamente forte e constante que atua na superfície de um condutor assimetricamente gelado.

Entre 4 e 6 de janeiro de 1998, a América do Norte foi atingida pelo pior desastre natural da história do Canadá. A tempestade de gelo foi uma crise sem precedentes, com pelotas de gelo de 100 mm provenientes da chuva congelante que atingiu o sul de Quebec. Essa chuva congelante, acompanhada de ventos, causou muitos danos nas cidades. Em Montreal, por exemplo, fios elétricos extremamente pesados estão agora pendurados perigosamente a poucos metros do chão. Os postes que deveriam ser indestrutíveis sucumbiram ao frio, conforme mostrado na Figura 2.2.3, e 3.000 quilômetros de linhas de energia da Hydro-Québec caíram, mergulhando metade de Quebec na escuridão. Esse foi um dos maiores impactos causados por esse evento.



Figura 2.2.3 - Falha típica de uma linha aérea causada por uma tempestade de gelo e um galope. Fonte: Li et al. (2021).

Esse tipo de vibração se torna uma grande preocupação para o projeto de linhas de transmissão quando a formação de gelo atmosférico é um risco. Esse fenômeno foi amplamente estudado por Desai et al. (1990, 1995) e McComber e Paradis (1998), mas ainda não é totalmente compreendido. A partir da teoria clássica da instabilidade aerodinâmica, esse conceito foi estudado por Den Hartog (1958). É um conceito difícil de estudar na natureza devido às dificuldades de obter as informações necessárias sobre dados quantitativos, por exemplo: frequência, amplitudes, condições climáticas, condutores únicos e condutores agrupados são todos difíceis de obter. A diversidade de formas e características dos depósitos de gelo de uma época para outra torna imprecisa a generalização de algumas observações.

O galope é um fenômeno muito perigoso para as linhas de transmissão devido à sua alta amplitude de vibração e longa duração. A tensão dinâmica gerada no processo pode causar fraturas por fadiga e danificar as torres. É causado pela instabilidade aerodinâmica. Esse é um exemplo de vibração auto excitada, conforme mostrado na Figura 2.2.4.

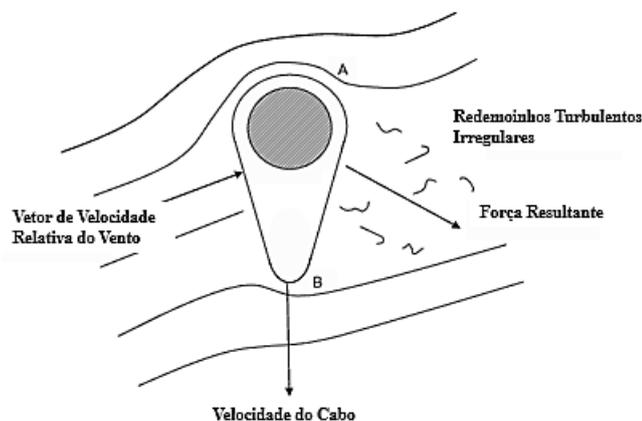


Figura 2.2.4 - Vento soprando contra um cabo revestido de gelo. Fonte: ROCHA (2012).

Quando a superfície do condutor é congelada, isso causa um movimento que representa um deslocamento do ponto de suspensão na direção vertical dos condutores. Como pode ser visto na Figura 2.2.5, um exemplo desse fenômeno é o impacto do gelo nos condutores. Quando o gelo se acumula nas linhas elétricas, ele assume a forma de uma gota de água.

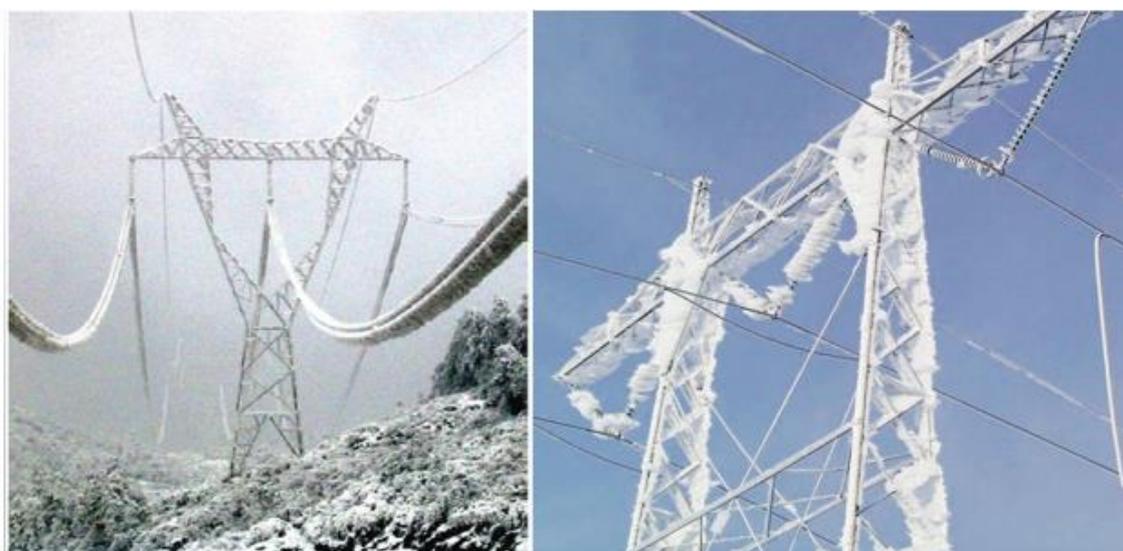


Figura 2.2.5 - Acúmulo de gelo nas linhas de energia. Fonte: adaptado de Bleszynski e Kumosa (2019).

2.2.3 Oscilações Induzidas por Esteiras

Para explicar o fenômeno da vibração induzida por esteira, vamos considerar duas linhas condutoras lado a lado separadas por um espaçador. A esteira da linha de barlavento proporciona diferentes tipos de movimento no feixe condutor, induzindo menor arrasto e criando forças de elevação na linha de sota-vento. A oscilação induzida pela esteira é o terceiro maior movimento induzido pelo vento reconhecido como um problema significativo nas linhas de transmissão, conforme destacado Wang (2008).

O movimento resultante na esteira pode ser vertical ou horizontal. Também pode ser torcional. Nesse caso, quatro modos de vibração podem ser possíveis para um sistema de dois condutores, conforme mostrado na Figura 2.2.6. Desses quatro tipos de movimento, há três que afetam a seção como um todo (ao longo do vão). Esses três últimos modos são chamados de modos de corpo rígido, pois produzem uma pequena distorção na seção transversal do feixe condutor.

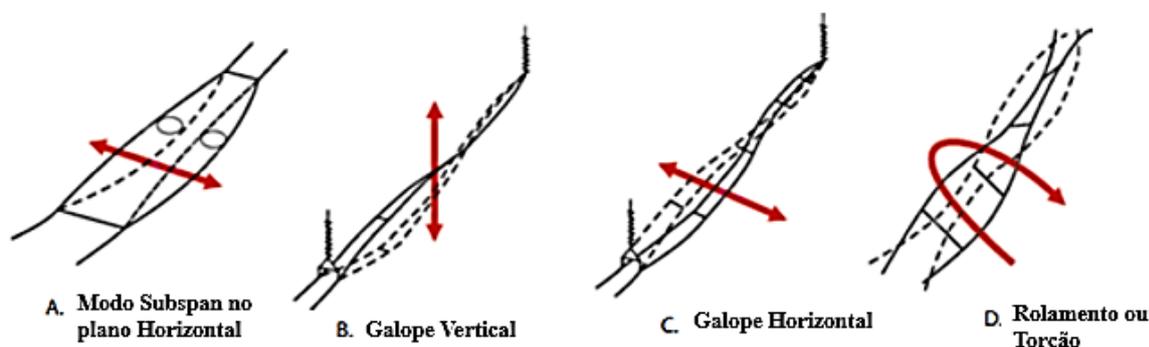


Figura 2.2.6 - Modos de vibração induzidos por esteira em condutores paralelos.
Fonte: EPRI (2009).

Os movimentos são observados com mais frequência quando os condutores estão nus ou secos, embora geralmente possam ocorrer na presença de gelo no condutor ou em caso de chuva. Esses movimentos ocorrem em ventos moderados a fortes, geralmente entre 7 e 18 m/s, conforme destacado por EPRI (1979).

2.3 SISTEMA DE AMORTECIMENTO

Os sistemas de amortecimento desempenham um papel essencial na redução dos impactos de vibrações em cabos condutores, com destaque para os amortecedores Stockbridge. Esses dispositivos, compostos por contrapesos ligados por um núcleo de aço, dissipam a energia vibracional ao converter movimentos mecânicos em calor, por meio da deformação interna e atrito nos cabos de ligação.

Estudos prévios, como os de Kalombo et al. (2016), demonstraram que os amortecedores Stockbridge oferecem alta eficiência em faixas de baixa a média frequência, mas sua eficácia pode ser limitada em condições de alta amplitude, como o galope. Outras tecnologias, como o Bretelle e o Feston, têm sido investigadas para aplicações específicas, mas sua implementação ainda é restrita devido a custos e complexidade operacional.

2.4 VIBRAÇÃO DE SISTEMAS CONTÍNUOS

As vibrações de sistemas contínuos são fenômenos importantes em muitas áreas da engenharia. Os sistemas contínuos, como cabos, vigas, placas e cascas, geralmente são modelados por equações diferenciais parciais (PDEs) que descrevem a propagação de ondas mecânicas através do meio. Nesta seção, nos concentraremos nas vibrações longitudinais de um cabo de alumínio condutor de energia, que pode ser descrito por equações diferenciais parciais de segunda ordem.

2.4.1 Vibrações longitudinais do cabo condutor de alumínio

Um cabo de alumínio condutor de energia pode ser modelado como uma corda vibratória sujeita a vibrações longitudinais. Considere um elemento diferencial dx do cabo e analise as forças que atuam sobre esse elemento. As forças que atuam no elemento são as forças de tensão em suas extremidades. Como mostrado na Figura 2.4, a força tensora $T(x, t)$ tem um componente vertical que varia ao longo da posição x , levando à derivação da equação da onda.

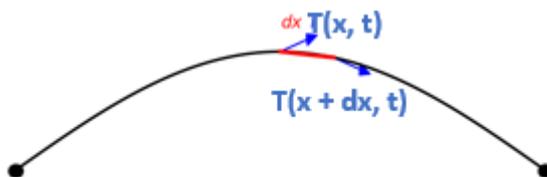


Figura 2.4 - Representação de um elemento diferencial de uma corda vibrante.

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em Den Hartog (1972).

Se T for a tensão no cabo, a equação da onda pode ser obtida considerando um pequeno elemento diferencial dx da corda, onde as forças de tensão nas extremidades do elemento diferencial podem ser escritas como:

$$T(x, t) \text{ e } T(x + dx, t) \quad (2.4)$$

Esse modelo considera o equilíbrio das forças ao longo da corda, resultando na equação diferencial de onda, como demonstrado por Den Hartog (1972).

Ao desenvolver $T(x + dx, t)$ em uma série de Taylor, obtemos:

$$T(x + dx, t) \approx T(x, t) + \frac{\partial T}{\partial x} dx \quad (2.5)$$

A força que atua sobre o elemento diferencial na direção longitudinal é:

$$\frac{\partial T}{\partial x} dx \quad (2.6)$$

Aplicando a segunda lei de Newton, obtemos:

$$\rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} dx = \frac{\partial T}{\partial x} dx \quad (2.7)$$

Onde ρ é a densidade linear do cabo, A é a área da seção transversal e $u(x, t)$ é o deslocamento longitudinal. Simplificando, obtemos a equação da onda longitudinal:

$$\rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.8)$$

Para um cabo de alumínio homogêneo com tensão constante T_0 , essa equação se torna:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{T_0}{\rho A} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.9)$$

Estabelecer $c^2 = \frac{T_0}{\rho A}$, em que “ c ” é a velocidade de propagação da onda longitudinal no cabo. A equação de onda clássica será:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.10)$$

Solução da equação de onda usando o método de separação de variáveis

Para resolver a equação de onda unidimensional, usamos o método de separação de variáveis. Suponha que a solução possa ser escrita como:

$$u(x, t) = X(x)T(t) \quad (2.11)$$

Substituindo essa forma na equação de onda, obtemos:

$$X(x) \frac{d^2 T(t)}{dt^2} = c^2 T(t) \frac{d^2 X(x)}{dx^2} \quad (2.12)$$

Dividindo os dois lados por $X(x)T(t)$ obtemos:

$$\frac{1}{T(t)} \frac{d^2 T(t)}{dt^2} = c^2 \frac{1}{X(x)} \frac{d^2 X(x)}{dx^2} \quad (2.13)$$

Como o lado esquerdo dessa equação depende apenas de t e o lado direito apenas de x , ambos os lados devem ser iguais a uma constante, que chamaremos de $-\lambda$. Obtemos então duas equações diferenciais ordinárias:

Equação de tempo:

$$\frac{d^2 T(t)}{dt^2} + \lambda T(t) = 0 \quad (2.14)$$

Equação espacial:

$$\frac{d^2 X(x)}{dx^2} + \frac{\lambda}{c^2} X(x) = 0 \quad (2.15)$$

As soluções gerais dessas equações são:

$$T(t) = A \cos(\sqrt{\lambda}t) + B \sin(\sqrt{\lambda}t) \quad (2.16)$$

$$X(x) = C \cos\left(\frac{\sqrt{\lambda}}{c}x\right) + D \sin\left(\frac{\sqrt{\lambda}}{c}x\right) \quad (2.17)$$

As constantes A , B , C e D são determinadas pelas condições iniciais e de contorno do problema. Para um cabo fixo em ambas as extremidades (em $x = 0$ e $x = L$), as condições de contorno são:

$$u(0, t) = 0 \text{ e } u(L, t) = 0$$

Aplicando essas condições de limite à solução espacial $X(x)$, obtemos:

$$C = 0 \text{ e } \sin\left(\frac{\sqrt{\lambda}}{c}L\right) = 0 \quad (2.18)$$

Isso significa que:

$$\frac{\sqrt{\lambda}}{c}L = n\pi, \text{ para } n = 1, 2, 3 \dots \quad (2.19)$$

E assim,

$$\lambda_n = \left(\frac{n\pi c}{L}\right)^2 \quad (2.20)$$

As soluções modais correspondentes são:

$$X_n(x) = D_n \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (2.21)$$

E as soluções de tempo são:

$$T_n(t) = A_n \cos\left(\frac{n\pi c}{L}t\right) + B_n \sin\left(\frac{n\pi c}{L}t\right) \quad (2.22)$$

A solução geral para as vibrações longitudinais do cabo é, então:

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[A_n \cos\left(\frac{n\pi c}{L}t\right) + B_n \sin\left(\frac{n\pi c}{L}t\right) \right] \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (2.23)$$

Podemos escrever novamente:

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos(\omega_n t) + B_n \sin(\omega_n t)] \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (2.24)$$

onde:

$$\omega_n = \left(\frac{n\pi c}{L}\right) \text{ são as frequências naturais do cabo.} \quad (2.24a)$$

Em conclusão, as vibrações longitudinais de um cabo podem ser descritas por uma equação de onda unidimensional. Por meio do método de separação de variáveis, as soluções exatas dessa equação foram determinadas, mostrando que o deslocamento do cabo pode ser expresso como uma soma de modos de vibração harmônica. A Figura 2.4.1 ilustra os primeiros modos de vibração da corda, confirmando que as soluções da equação de onda podem ser expressas como uma soma de modos harmônicos.

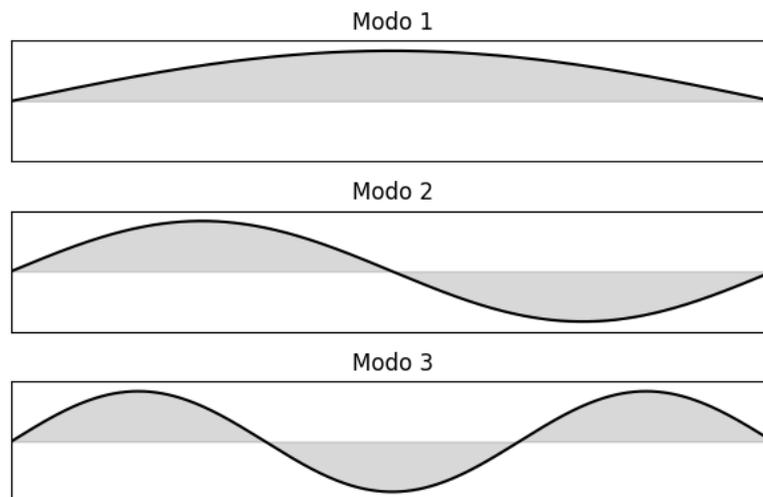


Figura 2.4.1 - Três primeiros modos naturais de vibração de uma corda.

2.4.2 Fator de Qualidade Q e Amortecimento ξ

O fator de qualidade Q é uma medida crucial na avaliação do comportamento de sistemas oscilatórios, tanto em contextos mecânicos quanto elétricos. Na engenharia mecânica, ele é utilizado para controlar de vibrações indesejadas. Segundo Chan, (2006a) e Meirovitch, (2001) a sua importância reside em várias áreas fundamentais para medir o amortecimento.

O fator de qualidade Q está diretamente relacionado ao amortecimento ξ , conforme definido na equação (2.25):

$$\frac{x}{\delta_{st}} = Q = \frac{1}{2\xi} \quad (2.25)$$

Esse parâmetro é fundamental na análise de sistemas vibratórios, pois influencia diretamente a largura de banda do sistema, ou seja, a faixa de frequência na qual a resposta é significativa. Essa fórmula mostra que o fator de qualidade Q é inversamente proporcional ao coeficiente de amortecimento ξ . Portanto, um baixo coeficiente de amortecimento ξ leva a um alto valor de Q .

Nos sistemas em que Q é alto: as oscilações são duradouras e a dissipação de energia é mínima. Isso significa que, para um pequeno fator de amortecimento ξ , o sistema perde muito pouca energia por ciclo de oscilação. Como resultado, o sistema retém grande parte de sua energia inicial, o que permite que ele continue oscilando por um período mais longo antes de parar.

Considere a Figura 2.4.2, os pontos R_1 e R_2 , onde o fator de amplificação cai para $\frac{Q}{\sqrt{2}}$, são chamados de pontos de meia potência. A diferença entre as frequências associadas aos pontos de meia potência R_1 e R_2 é chamada de largura de banda do sistema que representam as frequências em que a resposta atinge o valor $\frac{Q}{\sqrt{2}}$.

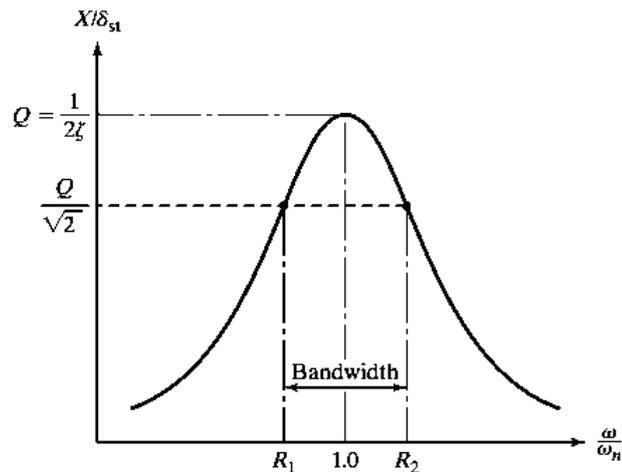


Figura 2.4.2 - Curva de resposta harmônica mostrando o ponto de meia potência e a largura de banda. Fonte: Rao S. e Philip G. (2018).

Ao medir a frequência de ressonância R_n e a largura de banda ΔR nos pontos de meia potência, uma medida aproximada de Q pode ser determinada a partir da equação (2.25a):

$$Q \cong \frac{R_n}{\Delta R} = \frac{R_n}{R_2 - R_1} \quad (2.25a)$$

Ou,

$$Q \cong \frac{\omega_n}{\Delta\omega} = \frac{\omega_n}{\omega_2 - \omega_1} \quad (2.25b)$$

Portanto,

$$Q = \frac{1}{2\xi} \cong \frac{R_n}{\Delta R} \quad (2.25c)$$

A correta interpretação dessa curva permite avaliar o desempenho de dispositivos como amortecedores e auxilia na tomada de decisões para otimizar a dissipação de energia em estruturas sujeitas a vibrações.

2.5 PARÂMETROS

Os testes de autoamortecimento foram realizados usando os vários parâmetros mencionados nesta literatura (Frequência, amplitude de vibração, velocidade e carga de tração). Esses parâmetros fundamentais serão utilizados para avaliar o comportamento vibratório do cabo

condutor. A avaliação das amplitudes de vibração em cabos condutores submetidos à ação do vento segue as diretrizes estabelecidas pela norma IEEE, garantindo uma metodologia padronizada para análise da resposta dinâmica. O procedimento adotado pode ser representado por meio de um fluxograma representa na Figura 2.5, que detalha as etapas do cálculo para diferentes níveis de frequência dinâmica. Esse procedimento é aplicado a três diferentes valores de frequência associados ao comportamento vibratório do cabo. A partir desses cálculos, obtêm-se três conjuntos de amplitudes média representando diferentes condições de excitação dinâmica.

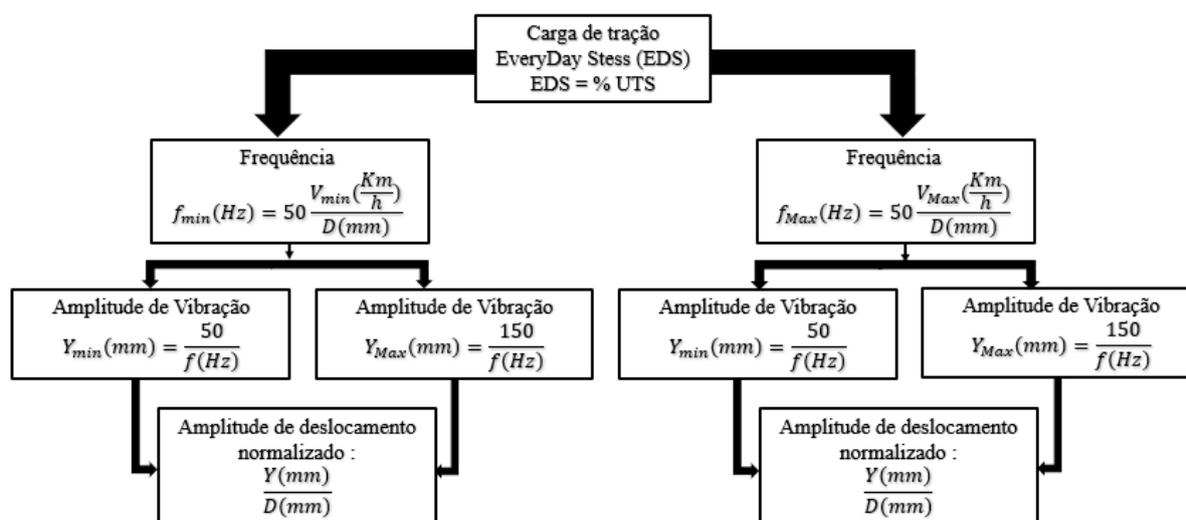


Figura 2.5 - fluxograma de cálculo da amplitude da vibração para cada valor de frequência.

O conceito de EDS (*EveryDay Stress*) foi proposto em 1960 pelo Chan, (2006a) com o objetivo de fornecer orientação sobre tensões seguras de projeto de condutores com relação à vibração do vento. Ele representa uma métrica para representar a carga de tração aplicada a um cabo condutor em condições normais de operação. Ele expressa a tensão mecânica no cabo como uma porcentagem da carga de ruptura (RTS - *Rated Tensile Strength*) e é usado para avaliar o comportamento mecânico e a fadiga dos condutores ao longo do tempo.

O uso da porcentagem da resistência à tração final (RTS) para representar o efeito do auto amortecimento nos condutores tem várias vantagens. Por exemplo, se for feita referência à resistência à tração final, ela se baseará na resistência à tração final do material do condutor e, ao mesmo tempo, fornecerá uma indicação direta da capacidade máxima do material de suportar uma carga de tração sem ruptura.

Além disso, se considerarmos o período específico mencionado pela norma (até 1962), para explicar sua ampla utilização e relevância, muitas linhas foram construídas com condutores específicos, e o uso da porcentagem de UTS talvez fosse mais relevante e amplamente adotado naquela época. Sem ignorar outros parâmetros que podem ser sugeridos para a realização de testes de auto amortecimento de cabos.

A norma IEEE Standards (1978), recomendada para a realização do processo de varredura de frequência, corresponde a uma vibração gerada por ventos cuja velocidade varia entre 3 e 30 km/h para o diâmetro do condutor em questão. A relação entre a frequência, a velocidade do vento e o diâmetro do condutor é determinada pela equação (2.26).

$$f[Hz] = 50 \frac{V}{D} \quad (2.26)$$

onde:

V: velocidade do vento em Km/h;

D: diâmetro do condutor em mm;

f: frequência em Hz.

Após determinar os valores da frequência, a norma recomenda que as seguintes cargas, expressas como porcentagem do condutor de resistência à tração nominal (RTS), sejam preferidas: 15 (17,5), 20 (22,5), 25 (27,5), 30 (35), 40 (50). Os valores entre parênteses são opcionais. Considerando que a resistência à tração nominal (RTS) representa o valor calculado da resistência à tração do condutor, o que indica o valor mínimo de teste para o condutor com fios desencapados.

De acordo com o IEEE Std 563 (1978), o comprimento de loop refere-se à distância entre dois pontos consecutivos de fixação de um cabo condutor, onde vibrações podem ocorrer. Para cada comprimento de Loop, é necessário testar pelo menos três amplitudes antinodais duplas diferentes: mínima, média e máxima. Esses valores devem ser calculados com base nas equações (2.27) e (2.27a):

$$Y_{min} = \frac{25}{f[Hz]} \quad (2.27)$$

$$Y_{Max} = \frac{150}{f[Hz]} \quad (2.27a)$$

Table 2.5. Frequências do ensaio em diferentes cargas de tração.

CAL 1120 / 838MCM	EDS (%RTS)	Carga de tração (kgf)	Frequências de Ressonâncias (Hz)				
			14,41	19,31	24,34	31,23	36,55
			Frequências do ensaio (Hz)				
	22,50%	2131	15,25	19,95	24,50	30,50	35,55
	26,50%	2510	15,25	19,95	24,50	30,50	35,55
	30%	2842	15,25	19,95	24,50	30,50	35,55

2.6 ABSORVEDORES DE VIBRAÇÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Vaja et al., (2018) afirmam que as vibrações eólicas, que são os tipos mais comuns de vibrações observadas em linhas de transmissão, referem-se às vibrações dos cabos condutores na faixa de 3 a 150 Hz e são causadas pelo desprendimento de vórtices devido ao fluxo de vento laminar, podendo levar à fadiga e à eventual falha da linha de transmissão. Para evitar esses efeitos adversos causados pelas vibrações do vento nas linhas de transmissão, Lara-López et al., (2001) destacam que os projetistas instalaram um sistema de amortecimento (Absorber), o qual reduz as vibrações e, conseqüentemente, a probabilidade de falha por fadiga.

Esses absorvedores de vibração em linhas de transmissão desempenham um papel crucial na atenuação dos efeitos das vibrações mecânicas nos cabos condutores. Seu uso é essencial para garantir a confiabilidade e a longevidade das redes de transmissão de eletricidade. A estabilização das linhas de transmissão com absorvedores de vibração contribui para uma operação mais eficiente do sistema de energia, minimizando a necessidade de manutenção adequada e garantindo um desempenho consistente ao longo do tempo. Suas principais funções são as seguintes:

- a) Os absorvedores de vibração são projetados para reduzir as vibrações induzidas pelo vento nas linhas de transmissão.
- b) Ao reduzir a amplitude das vibrações nos cabos, os absorvedores contribuem significativamente para a prevenção da fadiga do material.
- c) O "Condutor galope" é um fenômeno no qual os cabos oscilam lateralmente de forma descontrolada. Hu et al. (2025) propôs uma estratégia de controle ativo denominada "estratégia de feedback de velocidade com atraso axial" para suprimir o galope em linhas de transmissão congeladas.

Existe diferentes tipos de amortecedores:

1. **Amortecedor Stockbridge:** Stockbridge foi criada por George. H Stockbridge em 1924 e foi posteriormente modificada para melhorar sua operação. Consistem em uma massa (geralmente um peso metálico) suspensa entre dois braços com molas, amortecendo as vibrações oscilantes e de torção no condutor. Vecchiarelli et al., (2000) afirmam que o amortecedor Stockbridge mostrado na Figura 2.6 é o tipo mais comum utilizado na linha de transmissão.

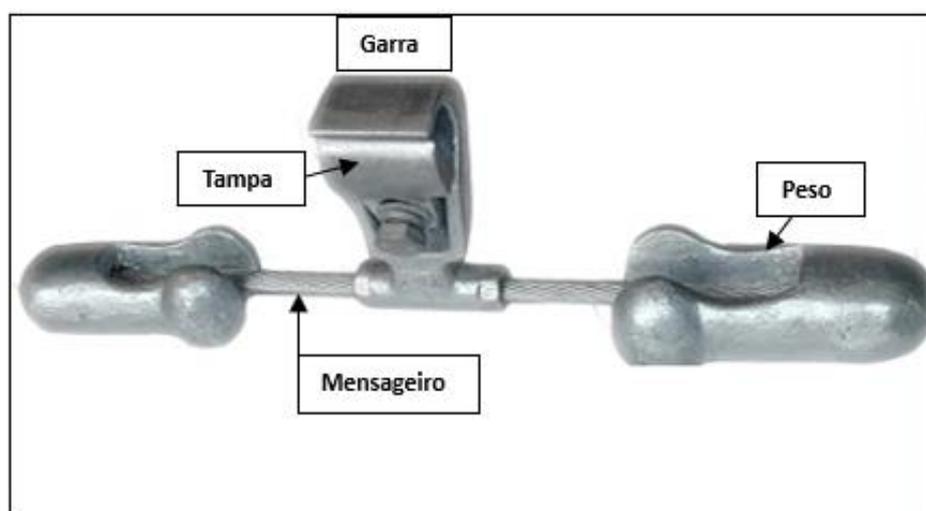


Figura 2.6 - Modelo do amortecedor Stockbridge usando na linha transmissão.

É o primeiro tipo de amortecedor que foi projetado por Henry Stockbridge em 1924 como resultado de uma falha em cabos de energia aéreos que ocorreu durante um movimento de vibração induzido pelo vento. Sua principal função é de suprimir as vibrações do condutor em sistemas de transmissão de energia por mais de 90 anos, devido às suas várias vantagens, como desempenho e custo, como demonstrado por Wang et al., (2021). Segundo Zondi et al., (2020) sua função permite que ele seja usado porque a tensão máxima que pode causar falha por fadiga do cabo durante o movimento está no grampo de suspensão. Por esse motivo, os engenheiros de linhas de transmissão geralmente recomendam que se evite colocar o amortecedor em um nó, para todas as frequências esperadas de vibração do vento. Um amortecedor Stockbridge, conforme mostrado na Figura 2.6, consiste em várias partes, por exemplo: um cabo do amortecedor, dois corpos rígidos (massas inerciais) e um grampo para fixar o amortecedor ao condutor como descrito por Sauter et al. (2002).

2. **Amortecedor Bretelle:** O tipo de amortecedor mostrado na Figura 2.6.1 é geralmente usado na França. Ele é feito com pedaços de condutores usados do mesmo tamanho da linha em que é usado.

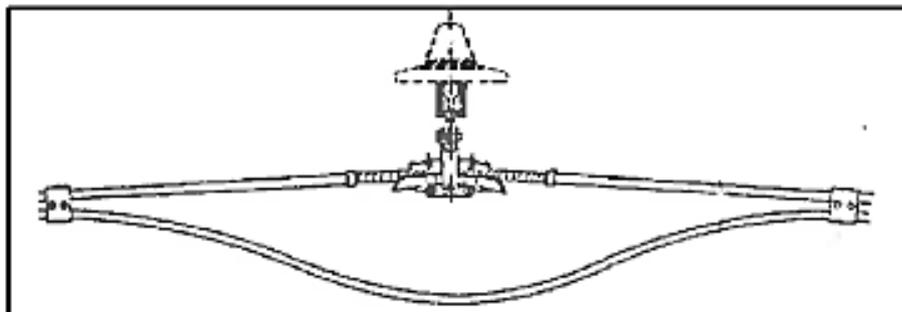


Figura 2.6.1 - Modelo do amortecedor Bretelle usando na linha transmissão.

Fonte: Papailiou (2007).

3. **Amortecedores Festoon:** O amortecedor Festoon mostrado na Figura 2.6.2, desempenha um papel fundamental na melhoria da resistência e da confiabilidade das linhas de transmissão de energia. Ao controlar as vibrações, eles ajudam a evitar falhas relacionadas à fadiga e prolongam a vida útil dos componentes da linha. Sua principal função é amortecer e dissipar a energia vibratória gerada pelo movimento do condutor. Eles são particularmente eficazes para lidar com as oscilações causadas por vibrações induzidas pelo vento. Os amortecedores Festoon, juntamente com outros dispositivos de controle de vibração, contribuem para a estabilidade e a integridade gerais da infraestrutura de transmissão de energia, garantindo um sistema de distribuição de energia confiável e eficiente. Segundo Papailiou (2007), os principais problemas relatados no uso de Festoon ocorreram em seus grampos. Além disso, os amortecedores Festoon têm sido amplamente utilizados em vãos longos, geralmente com resultados satisfatórios experiência satisfatória, conforme destacado por Ervik et al. (1968).

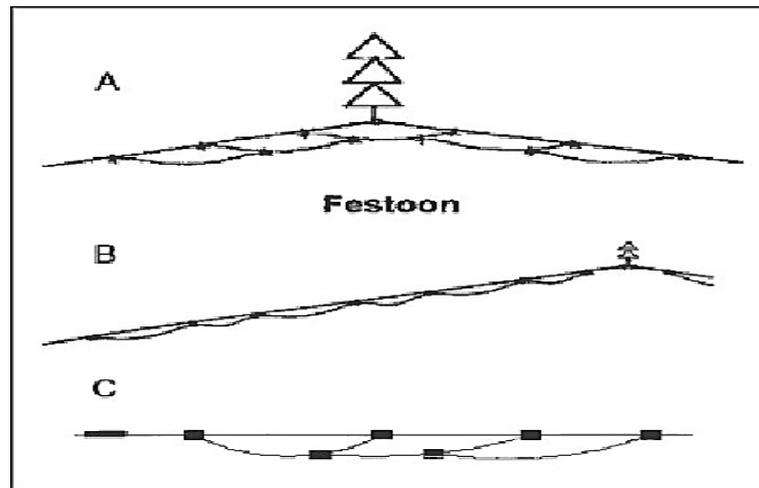


Figura 2.6.2 - Modelo do amortecedor Festoon. (a) e (b) Festoon em pontos de suspensão; (c) Festoon nos pontos mortos. Fonte: Papailiou (2007).

Os amortecedores Festoon geralmente consistem em um peso ou massa central conectado ao acionador por cabos ou hastes flexíveis. O peso central pode ter características aerodinâmicas para melhorar seu desempenho em condições de vento. Eles têm sido usados em vários vãos longos. Segundo Chan (2006b) até o momento, não há regras de projeto publicadas para seu uso.

4. Amortecedor de vibração em espiral: como outros amortecedores de vibração, o amortecedor de vibração em espiral mostrado na Figura 2.6.3 é um dispositivo comumente usados para atenuar as vibrações induzidas pelo vento em linhas de transmissão aéreas. Sua concepção é simples, mas eficaz: uma haste ou fio enrolado helicoidalmente em torno do condutor. A principal função desse amortecedor é reduzir a fadiga dos condutores da linha de energia, minimizando as tensões de flexão causadas pelas vibrações. Entre as várias vantagens, ele tem a capacidade de evitar o movimento excessivo que poderia levar à falha por fadiga durante a vibração induzida pelo vento nas linhas de transmissão.

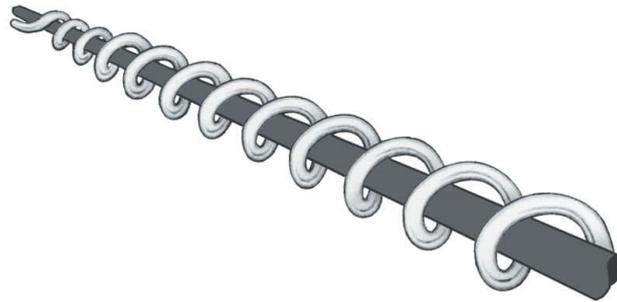


Figura 2.6.3 - Modelo do amortecedor espiral.

5. *Amortecedores Elgra*: O amortecedor Elgra é um amortecedor sueco conhecido como Elgra contém uma haste vertical com três massas fundidas livremente presas a um eixo vertical, conforme mostrado na Figura 2.6.4.

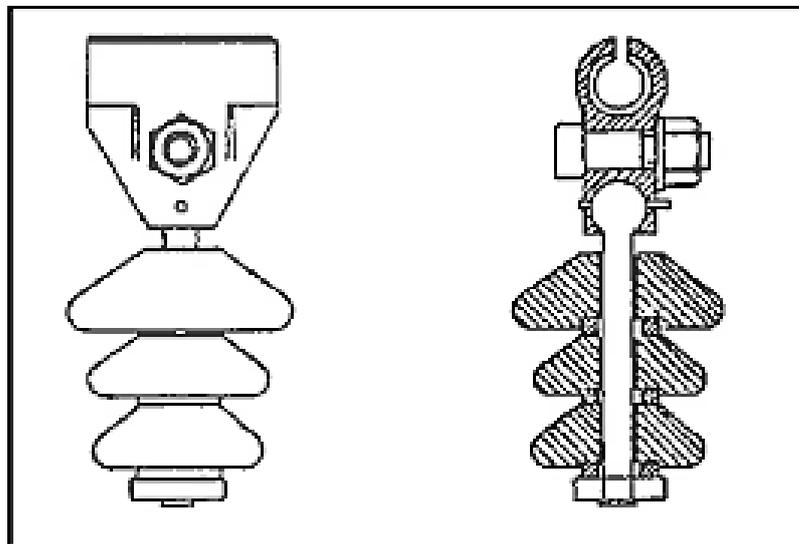


Figura 2.6.4 - Modelo do absorvedor Elgra usando na linha transmissão.
Fonte: Labegalini (1992).

2.7 AUTOAMORTECIMENTO DO CONDUTOR

A dissipação de energia mecânica é um fenômeno significativo em sistemas de cabos condutores, especialmente em aplicações onde os cabos estão sujeitos a cargas dinâmicas, como vento, vibrações mecânicas ou oscilações naturais ou movimentos dinâmicos que o cabo pode experimentar em operação. Ela está ligada à capacidade do sistema de absorver e dissipar a energia da vibração. Os materiais dos cabos e os sistemas de amortecimento podem influenciar significativamente a quantidade de energia dissipada.

Vários parâmetros podem contribuir para a dissipação de energia do cabo, como a interação do cabo com o ambiente. Quando o cabo oscila com o vento, ele pode dissipar energia devido ao atrito com o ar e à resistência ao movimento. A flexão e a deformação do cabo, especialmente em situações de carga dinâmica, levam à dissipação de energia devido aos movimentos internos e às deformações viscoelásticas do material. Quando o cabo vibra ou se deforma sob a influência dessas forças, ocorrem atritos internos, flexões e distorções nos materiais constituintes. Esses processos resultam na conversão de parte da energia cinética do movimento do cabo em calor, levando à dissipação de energia mecânica. Quando um cabo é submetido a vibração ou oscilação, parte da energia mecânica é convertida em calor devido aos efeitos de histerese e ao atrito interno no material do cabo.

O Autoamortecimento em cabos condutores oferece várias vantagens importantes, incluindo:

- **Redução da vibração indesejada:** como a oscilação excessiva pode causar danos estruturais, a redução da vibração indesejada garante a integridade e a durabilidade do sistema.

- **Prevenção de fadiga:** cargas dinâmicas, como vento e movimentos estruturais, podem levar a ciclos repetidos de tensões, e o Auto amortecimento ajuda a dissipar a energia associada, reduzindo assim o risco de falha por fadiga.

- **Minimização das perdas de energia:** nos sistemas de transmissão de energia elétrica, o autoamortecimento minimiza as perdas de energia associadas às vibrações.

À medida que a energia introduzida pelo vento aumenta, a amplitude da vibração também aumenta até que a energia dissipada pelo cabo seja igual à energia de entrada. Conforme mostrado na Figura 2.7, um exemplo de gráfico com energia de entrada e duas curvas de energia dissipada, isso explica por que a curva a) representa um cabo que dissipa mais energia e, portanto, terá uma amplitude de vibração menor do que o cabo representado pela curva b). O

princípio dessa curva é usado no método de balanço de energia (EBM), que é um dos métodos usados para determinar o comportamento de um condutor sob o efeito das vibrações do vento.

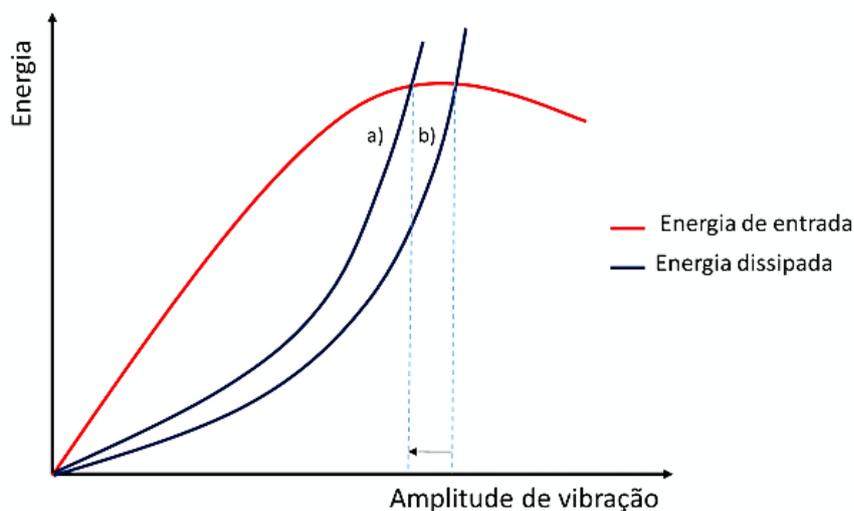


Figura 2.7 - Relação entre Energia Dissipada, Energia de Entrada e Amplitude de Vibração em Sistemas de Autoamortecimento. Fonte: Diana (2011).

O princípio do Balanço de Energia especifica que, em um sistema mecânico sujeito a vibrações induzidas pelo vento, a energia fornecida pelo vento (P_w) deve ser igual à energia dissipada pelo sistema (P_d). Em outras palavras, a entrada de energia deve ser igual à saída de energia para que o sistema esteja em equilíbrio.

Esse método se baseia no equilíbrio da seguinte equação simples, que se baseia em uma equação de balanço de energia algébrica para um condutor que vibra em um regime estacionário. Segundo Hagedorn et al. (1980a) e Hagedorn, (1982) os métodos para obter expressões de potência e valores de deformação são retirados de seus trabalhos.

Matematicamente, a expressão pode representar pela equação (2.28):

$$P_w(y_{max}; f) - P_d(y_{max}; f) = 0; \forall f \quad (2.28)$$

onde:

P_w é a potência média fornecida pelo vento, P_d é a potência média dissipada pelo sistema, Y_{max} é a amplitude máxima de vibração, f é a frequência de vibração.

Essa equação divulga que, para cada frequência f , a amplitude máxima de vibração Y_{\max} deve ser determinada de forma que a diferença entre a energia fornecida pelo vento e a energia dissipada pelo sistema seja zero, garantindo assim que a entrada de energia seja igual à saída de energia, de acordo com o princípio do balanço de energia.

As normas IEE Standards (1978) e CIGRE (1979) recomendam que os resultados das medições sejam apresentados em diagramas que mostrem a potência dissipada por unidade de comprimento do condutor, como uma função da razão entre a amplitude do deslocamento antinódo Y_0 e o diâmetro do condutor, para cada comprimento de loop $\lambda/2$ e a frequência correspondente f e a carga de tração T . Um exemplo desses diagramas é mostrado na Figura 2.7.1 valores da potência dissipada por unidade de comprimento do condutor Drake tensionado a 28500 N vs. amplitude de vibração com 9 valores de frequência entre 16 e 58 Hz.

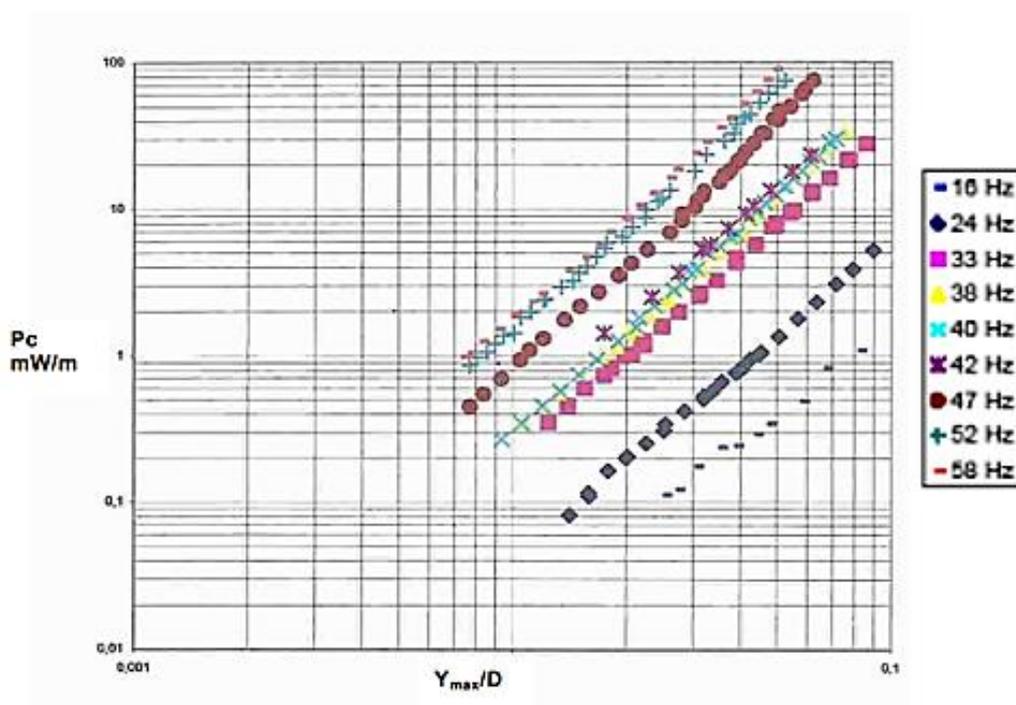


Figura 2.7.1 - Potência dissipada versus deslocamento normalizado Y/D . Condutor Drake sob carga 2858 daN. Fonte: Umberto (2011).

Em resumo, a compreensão da dissipação de energia em cabos condutores é um fator importante em diversas áreas, incluindo engenharia elétrica e estrutural. Esse entendimento permite que o projeto dos cabos seja otimizado, garantindo que eles possam suportar as condições operacionais esperadas, minimizando as perdas de energia e maximizando a eficiência e a durabilidade do sistema. Além disso, em aplicações críticas, como linhas de

transmissão de energia, o gerenciamento adequado da dissipação de energia é vital para a segurança e a confiabilidade do sistema.

2.7.1 Mecanismos responsáveis pelo autoamortecimento do condutor

O amortecimento é um elemento muito importante quando se trata de reduzir os efeitos negativos da carga de vento nos condutores. Os mecanismos responsáveis pela dissipação da energia do condutor são altamente complexos, devido a vários fatores. Como uma compreensão precisa desses mecanismos é fundamental para o projeto de sistemas elétricos eficientes e confiáveis, devido à sua complexidade intrínseca, pode ser difícil modelá-los e analisá-los de forma simplificada.

Quando o condutor é submetido a um movimento transversal sob a influência das forças dinâmicas da natureza, o auto amortecimento do condutor pode ser identificado como sendo gerado por três mecanismos principais.

O primeiro mecanismo de amortecimento, conhecido como amortecimento estrutural, resulta do movimento entre os fios condutores. Devido ao efeito de atrito, o movimento entre os fios na forma de um deslizamento alternado nos pontos de contato resulta em dissipação de energia. Para essa forma de amortecimento estrutural dentro do condutor, os contatos entre os fios são devidos à geometria mostrada na Figura 2.7.2.

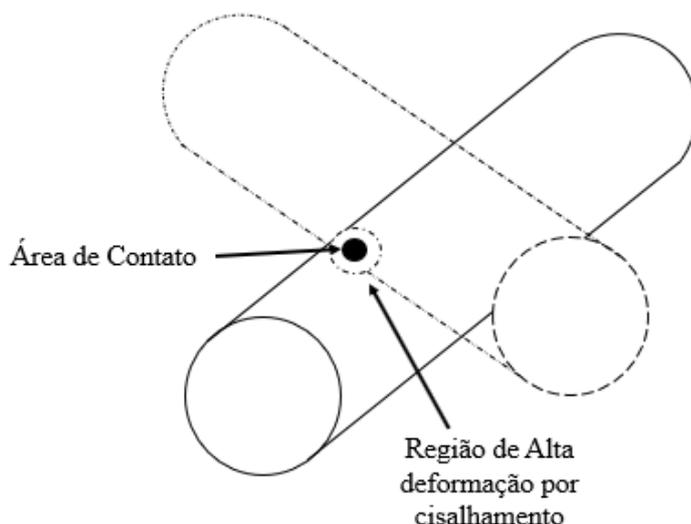


Figura 2.7.2 - Contato entre dois corpos cilíndricos com uma superfície de contato elíptica.
Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em EPRI (2009).

A segunda forma de amortecimento do condutor, conhecida como amortecimento do material, ocorre em nível micromolecular nos fios da estrutura do condutor. Deve-se observar que essa forma de amortecimento ocorre ao longo de todo o comprimento do condutor, com parte da energia externa sendo transformada em energia molecular.

A terceira forma de dissipação de energia é o amortecimento fluidodinâmico (aerodinâmico) resultante das interações entre o condutor e o fluido no qual ele foi imerso. Isso faz parte do efeito de atrito no qual a energia foi dissipada na forma de calor e, em seguida, transmitida aos objetos ao redor ou à atmosfera pelo fluxo do fluido.

O fenômeno do amortecimento fluidodinâmico, também conhecido como amortecimento aerodinâmico, ocorre quando objetos se movem por um fluido (como o ar) e encontram resistência a esse movimento devido às forças exercidas pelo fluido. Isso pode ser visto no contexto de condutores, como linhas de transmissão elétrica, quando esses cabos são submetidos ao vento.

Veja o exemplo de uma linha de transmissão elétrica. Os cabos de transmissão geralmente são longos e estão suspensos entre torres ou postes. Quando há vento, esses cabos podem estar sujeitos a vibrações induzidas pelo movimento do ar. As vibrações do cabo podem ser acentuadas por fenômenos como o vórtex shedding, estudado por vários pesquisadores como Meynen et al. (2005), em que vórtices alternados se formam em ambos os lados do cabo. A Figura 2.7.3 mostra as linhas de corrente e a rotação do campo de velocidade representando a área ao redor do Condutor. Essa dissipação de energia ajuda a reduzir a amplitude das vibrações do cabo.

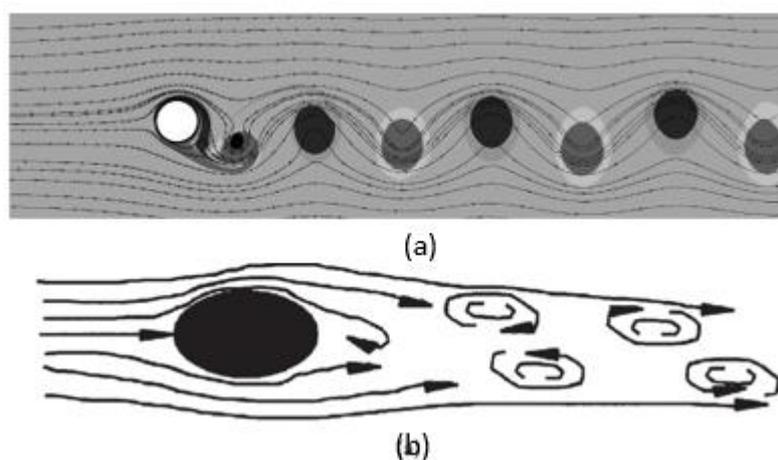


Figura 2.7.3 - Linhas de fluxo e a rotação do campo de velocidade representando a área ao redor do Condutor. Fonte: Meynen et al. (2005b).

2.7.2 Métodos de Medição de Auto Amortecimento

De acordo com a norma IEC 62567 (2013), três métodos principais são reconhecidos para o estudo do amortecimento automático de um cabo condutor e eles são divididos em duas categorias principais, geralmente chamadas de métodos de "vibração forçada" e "vibração livre".

O primeiro método de vibração forçada é o "Método de potência", no qual o condutor é forçado a vibrar em ressonância em um número de harmônicos sintonizáveis e a potência total dissipada pelo condutor vibratório é medida no ponto de fixação ao agitador.

O segundo método de vibração forçada, conhecido como "*Standing Wave Method*" ou precisamente, "*Inverse Standing Wave Ratio Method*", determina as características de dissipação de energia de um condutor medindo as amplitudes nos antinodos e nós ao longo da extensão de um número de harmônicos sintonizáveis.

O método de vibração livre conhecido como "Método de Decaimento" determina as características de dissipação de energia de um condutor medindo, para um determinado número de harmônicos sintonizáveis, a taxa de decaimento da amplitude de um movimento livre após um período de vibração forçada.

De acordo com o IEEE 664 (1993), recomenda-se que as frequências usadas para teste cubram o espectro correspondente a uma faixa de velocidade do vento de 1 a 7 m/s, a menos que especificado de outra forma. As medições também devem ser feitas em cada frequência de sintonia, usando um mínimo de 10 frequências. E as frequências naturais do vão podem ser estimadas usando a equação (2.29):

$$f = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (2.29)$$

onde:

f: é a frequência natural;

n: é o número de loops no compartimento;

L: é o comprimento do compartimento livre;

T: é a tensão do condutor; m: é a massa por unidade de comprimento do compartimento ativo sem amortecedores.

a) Método da Potência

A medição do amortecimento do condutor usando o método da Potência envolve a aplicação de técnicas específicas para avaliar a dissipação de energia e as características de amortecimento do sistema. As características de dissipação do amortecedor são determinadas pela medição da força e da velocidade transmitidas ao vão de teste no ponto de fixação ao agitador.

Esse método recomenda um conjunto de procedimentos definidos para avaliar a dissipação de energia do cabo, com base em dispositivos experimentais, como a bancada de testes. Nesse caso, é usado um equipamento de teste adequado, geralmente equipado com um agitador ou dispositivo de excitação mecânica para aplicar forças dinâmicas ao condutor, variando a frequência e a amplitude da excitação para abranger uma gama de condições operacionais e avaliar o comportamento dinâmico em diferentes cenários. O cabo condutor é puxado ao longo de uma extensão de teste e forçado a vibrar em uma de suas frequências naturais, com a amplitude da vibração no antinodo e a frequência sendo controlada pelo excitador eletromecânico (controle do *shaker*).

Para garantir o procedimento de verificação dos transdutores usados em testes de medição de força e velocidade, o padrão IEEE exige dois critérios: o ângulo de fase entre a força e a velocidade deve ser igual ou próximo a 90 graus, o que significa que a força e a velocidade devem estar em fase, ou quase, e a relação entre força e aceleração (F/As) deve ser constante em todas as frequências. Isso significa que, independentemente da frequência na qual o sistema está vibrando, a resposta do sistema em termos de aceleração deve ser proporcional à força aplicada. Essa relação constante indica que o comportamento dinâmico do sistema é previsível e linear em diferentes frequências. O objetivo desse comportamento linear (relação constante) é garantir a confiabilidade dos resultados obtidos na faixa de frequências de teste.

Instrumentos como os acelerômetros do tipo PCB e Célula de Carga são usados para medir os valores das velocidades e forças do condutor. Quando um estado estacionário é atingido, a energia introduzida pelo agitador no condutor durante um ciclo de vibração é igual à dissipada pelo vão. A energia introduzida no condutor, e em grande parte dissipada por seu mecanismo de amortecimento, é determinada pela medição da força F que atua entre o condutor e o agitador e o deslocamento do ponto de acionamento Y_f . O resultado é dado pela equação (2.30):

$$E_{diss} = \pi F Y_f \text{sen}(\theta_d) \quad (2.30)$$

A potência inserida no cabo pode ser calculada multiplicando-se os valores da força (F), da velocidade (V) e do cosseno do ângulo de fase (φ) entre essas duas grandezas, que são medidas no ponto de excitação do condutor.

$$P = \frac{1}{2} (F V_s) \cos(\varphi) \quad (2.31)$$

onde:

P: é a potência dissipada pelo amortecedor;

F: é a força medida no dispositivo vibratório;

V_s : é a velocidade medida no dispositivo vibratório;

φ : é a diferença de ângulo de fase entre os sinais de força e velocidade medidos.

Outra forma de expressar o auto amortecimento do condutor é o coeficiente de amortecimento viscoso não dimensional “h”, que pode ser calculado dividindo-se a energia introduzida no condutor ($E_{diss} = P / f$) pela energia cinética total do condutor E_{kin} .

$$h = \frac{1}{4\pi} \frac{E_{diss}}{E_{kin}} \quad (2.32)$$

E_{kin} : é dado pela equação (2.32a):

$$E_{kin} = \frac{1}{4} m l w^2 Y_0^2 \quad (2.32a)$$

b) Método da Onda Estacionária (ISWR)

Esse método é baseado na geração de ondas estacionárias ao longo do condutor. As vibrações são analisadas para determinar as características de amortecimento. Ele usa um gerador para criar ondas mecânicas no condutor.

Ele determina as características de dissipação de energia de um amortecedor medindo as amplitudes nodais e antinodais ao longo da extensão em cada harmônico sintonizável.

Segundo Chan, (2006a) neste método, a potência dissipada é avaliada medindo-se as amplitudes de vibração no nó. Como muitas vezes é difícil medir corretamente a vibração do nó, os pesquisadores às vezes são aconselhados a não usar esse método (ISWR) para determinar o amortecimento automático do cabo. Isso ocorre porque há alguns problemas importantes com esse método, como estimar corretamente a posição dos nós e medir a amplitude de vibração dos nós, que pode ter um valor muito baixo, da ordem de alguns

micrômetros, nos resultados. Esteja ciente de que um erro na medição da amplitude de vibração dos nós pode modificar consideravelmente o cálculo do autoamortecimento. Diana et al., (2000), propõem dois métodos para melhorar a precisão dessas medições.

Tompkins et al., (1956), propõem uma solução que permite que o princípio desse método seja entendido. Essa proposta se baseia na necessidade de rastrear as ondas que deixam o vibrador quando são refletidas nas extremidades do vão. Para esse argumento, podemos supor que o vibrador esteja fixo próximo a uma das extremidades do vão. Os pulsos induzidos pelo vibrador viajam até a extremidade do vão e retornam como ondas refletidas. Um exemplo gráfico é mostrado na Figura 2.7.4, localizando o primeiro antinodo livre e o primeiro nó livre do amortecedor no vão.

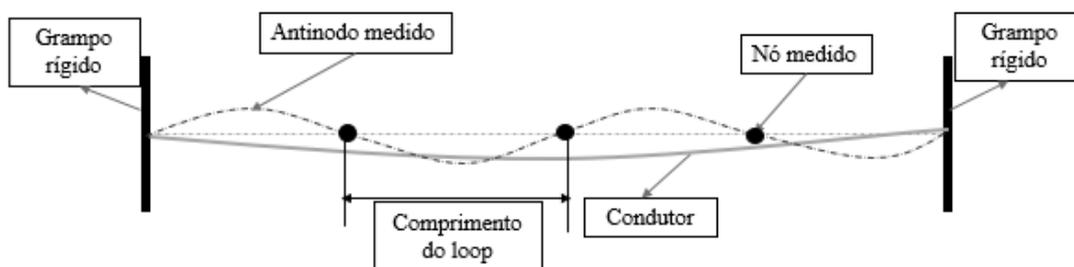


Figura 2.7.4 - Representação da bancada mostrando a localização das medições nodais e antinodais.

Após a aquisição dos dados, a potência dissipada pelo amortecedor pode ser calculada com base na equação (2.33):

$$P = \sqrt{Tm} \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{a}{Y_0} \right) \quad (2.33)$$

onde:

P: é a potência dissipada pelo amortecedor;

T: é a tensão do condutor; m é a massa por unidade de comprimento do vão;

V_a : é a velocidade antinó;

a :é a amplitude no nó;

Y_0 : é a amplitude no antinó;

e: é a eficiência = a / Y_0 .

Ao fazer duas medições em dois loops diferentes j e k , a potência dissipada pela seção do condutor entre esses loops será:

$$P = P_k - P_j \quad (2.34)$$

onde:

P é a potência dissipada entre os nós k e j ,

P_k é a potência transmitida pelo agitador ao nó k ,

P_j é a potência transmitida pelo agitador ao nó j .

A potência dissipada por unidade de comprimento P_c entre dois nós consecutivos pode ser calculada pela equação (2.35):

$$P_c = \frac{P_k - P_j}{n_{kj} \frac{\lambda}{2}} \quad (2.35)$$

onde:

n_{kj} é o número de loops (igual a 2) entre os nós k e j , e λ é o comprimento de onda.

c) Método do decaimento

O método do decaimento é um método de vibração livre que permite que as características de dissipação de energia de um amortecedor sejam determinadas pela medição da taxa de decaimento da amplitude de movimento de um compartimento após um período de vibração forçada em uma frequência natural e uma amplitude de teste fixa.

Dos vários métodos de Autoamortecimento, esse método é o mais rápido e fácil de implementar, pois requer, em sua forma mais simples, apenas um único transdutor para medir o decaimento. Segundo Hard et al. (1967), quando realizar esse teste, ele pode ser aplicado levando um compartimento de teste a uma ressonância estável e, em seguida, removendo repentinamente a excitação do Shaker.

Esse método tem a vantagem de abranger uma ampla faixa de amplitudes em um único teste, além de ser fácil de instrumentar. Além disso, esse método não negligencia as perdas nas terminações do vão, incluindo-as no cálculo da dissipação do condutor. Nesse método, a força de excitação é reduzida progressivamente após a aplicação inicial, permitindo que o decaimento natural das oscilações seja observado.

O decréscimo logarítmico do sistema de amortecimento (δ) pode ser determinado a partir do logaritmo natural da razão entre duas amplitudes sucessivas do antínodo de vibração (Y_0 e Y_n). Ele é dado pela equação (2.36):

$$\delta = \frac{1}{N} \ln \left(\frac{Y_0}{Y_n} \right) \quad (2.36)$$

onde:

δ : é o logaritmo do decréscimo do sistema de amortecimento;

N : é o número de ciclos registrados durante o decaimento;

Y_0 : é a amplitude no antínodo antes de o gerador de vibração ser liberado;

Y_n : é a amplitude no antínodo após "n" ciclos terem sido registrados;

$N2$: é o número de ciclos necessários para atingir a metade da amplitude inicial do antínodo.

A potência dissipada pelo amortecedor pode ser estimada como uma função do logaritmo do decréscimo (δ) e é dada pela equação (2.36a):

$$P = \frac{1}{2} f_m V_a^2 L \delta \quad (2.36a)$$

onde:

P : é a potência dissipada pelo amortecedor;

m : é a massa por unidade de comprimento do compartimento;

V_a : é a velocidade máxima do loop na amplitude inicial do antinodo;

f : é a frequência de excitação;

δ : é o logaritmo do decremento;

L : é o comprimento do compartimento.

Conforme mostrado na Figura 2.7.5, um exemplo gráfico gerado por esse teste, ele mostra o sinal de tensão gerado pelo acelerômetro em função do tempo. A taxa de decaimento é uma função das perdas do sistema. Quanto menor for a dissipação de energia, maior será o tempo de decaimento.

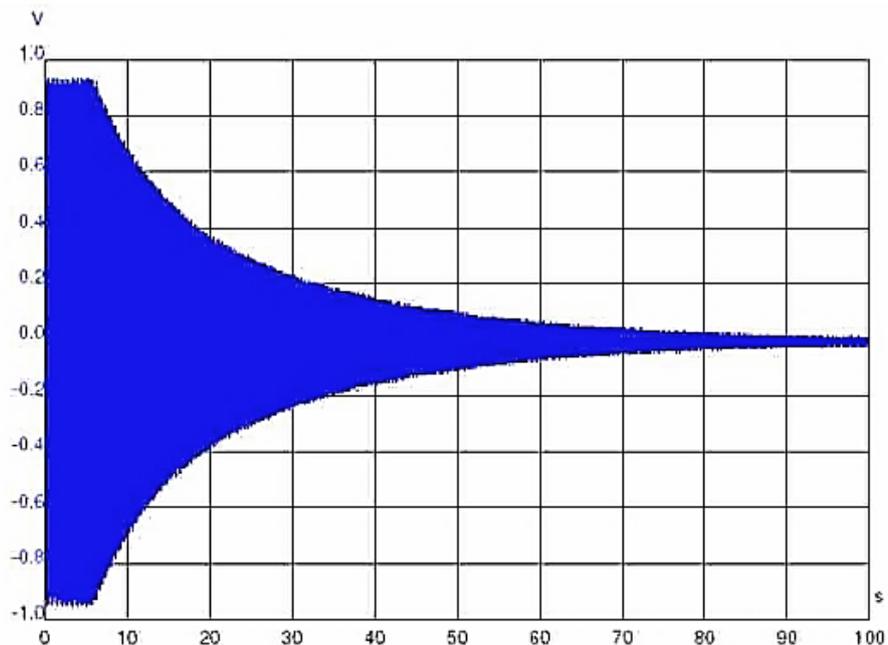


Figura 2.7.5 - Traço de decaimento de um condutor 264-AL3/34-ST1A tensionado a 20% de RTS. Fonte: Umberto et al. (2011).

2.7.3 Diferenças e escolha do método

Os métodos da Onda Estacionária (ISWR) e Potência são considerados dispendiosos em termos de equipamento e complexos de implementar. Entretanto, o método de decaimento é intuitivamente fácil de entender e relativamente fácil de implementar, pois requer apenas um mínimo de instrumentos. Para valores baixos de amortecimento, é recomendável usar o teste de decaimento porque ele oferece boa precisão e resolução, em comparação com outros métodos que oferecem precisão reduzida.

De acordo com Diana (2000), muitos pesquisadores o descartam devido às dificuldades de medição, especialmente a necessidade de medir a amplitude de vibração no nó do cabo, que é muito baixa devido ao baixo valor de amortecimento intrínseco do condutor. Segundo Papaillou (2017), o Método da Potência é simples e requer um número limitado de pontos de medição.

Os condutores trançados, comumente usados em linhas de transmissão elétrica, normalmente apresentam baixas taxas de decaimento em suas oscilações. Essa característica torna o método de "vibração forçada" eficaz para estudar seu comportamento dinâmico. O

método de vibração forçada envolve a aplicação de uma força externa para induzir vibrações no condutor e observar sua resposta.

Cada um dos três métodos de medição do auto amortecimento tem suas vantagens e desvantagens. Um resumo comparativo de algumas das características gerais de cada método é apresentado na Tabela 2.7.

Tabela 2.7. Comparação de métodos laboratoriais.

<i>Características gerais</i>	<i>Método da Potência</i>	<i>Método da Onda Estacionária</i>	<i>Método do Decaimento</i>
<i>1.- Tipos de amortecedores que podem ser testados</i>	Todos	Todos	Todos
<i>2.- Tipo de vibração</i>	Forçada	Forçada	Libre
<i>3.- Principal vantagem</i>	Versatilidade: coleta e análise de dados simples.	Aplicabilidade a Estruturas Longas.	Simplicidade Experimental.
<i>4.- Principal desvantagem</i>	Limitação em Baixas Amplitudes.	dificuldade em medir as amplitudes dos nós.	Complexidade na Análise Exponencial.

Essa tabela apresenta uma comparação entre os três métodos de medição do amortecimento em sistemas vibratórios (Método da Potência, Método da Onda Estacionária e Método do Decaimento). Ela serve para destacar as principais características, vantagens e limitações de cada abordagem, auxiliando na escolha do método mais adequado para diferentes aplicações experimentais.

Ela é necessária para selecionar o método adequado para caracterizar o amortecimento de condutores ou outras estruturas sujeitas a vibração.

3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL E CIENTÍFICA

Este capítulo descreve os procedimentos ou abordagens experimentais e o material usado para avaliar a relação entre a capacidade de auto amortecimento do cabo e sua resposta dinâmica sob condições de carga aleatória. O teste foi, portanto, baseado em uma série de testes realizados na bancada experimental do laboratório. Um teste foi realizado para determinar a curva de auto amortecimento do cabo e outro para determinar a resposta dinâmica do cabo. Para realizar esse teste, o cabo foi submetido a uma carga aleatória representativa de condições reais, como vento ou vibrações ambientais. Os resultados dos testes experimentais foram usados para identificar correlações entre a capacidade de auto amortecimento do cabo e suas características de resposta dinâmica.

3.1 BANCADA EXPERIMENTAL

A bancada de ensaios de autoamortecimento do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores (*Labcabos*) da Universidade de Brasília, denominada bancada C, possui um vão ativo de 43 metros. Sua configuração inclui dois blocos de concreto localizados nas extremidades, que sustentam o cabo ao longo do seu comprimento. Um bloco fixo serve como suporte para o *shaker*, enquanto um bloco móvel é montado em um carrinho de metal que se desloca sobre trilhos de aço, garantindo precisão no ajuste da carga de tração.

A amostra utilizada nos ensaios de fadiga é instalada utilizando dois grampos de ancoragem idênticos aos utilizados nas linhas de transmissão, que farão a fixação nas extremidades e permitirão a aplicação da carga de tração. Dois grampos rígidos especiais não articulados, semelhante ao mostrado na Figura 3.1, são usados para minimizar a dissipação de energia da terminação. Os dispositivos de terminação e as braçadeiras rígidas devem ser suficientemente rígidos para garantir que não ocorram perdas além das extremidades da extensão do teste. Deve-se eliminar a folga excessiva nas camadas trançadas do condutor de teste. Se forem usadas ponteiros de compressão, elas devem ser comprimidas ao contrário para evitar que a folga retorne ao vão.

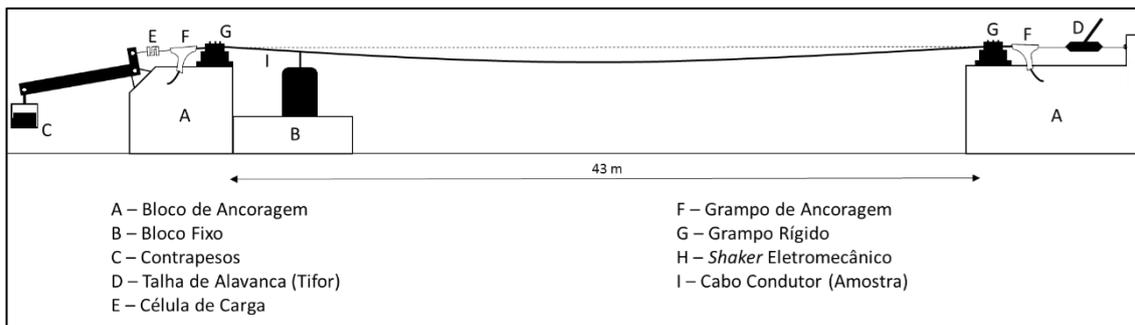


Figura 3.1 - Representação esquemática da bancada de teste experimental de Auto amortecimento.

De acordo com a norma padrão IEEE std 664 (1993) e IEEE Std 563 (1978), a bancada de teste é composta por um conjunto de equipamentos que permite a realização do teste de auto amortecimento. Um *shaker* eletromecânico que é conectado ao condutor com o objetivo de inserir potência no sistema e provocar o movimento oscilatório. Uma célula de carga e um sistema de contrapeso para controlar a carga de esticamento, um sistema de alavanca para esticar o cabo.

3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Os equipamentos e materiais mencionados nesta seção representam os elementos necessários para a realização dos testes de auto amortecimento de acordo com as Normas IEEE 664.

3.2.1 Condutor CAL 1120/838MCM

O condutor é a única parte da linha de transmissão que transporta energia elétrica, portanto, a condutividade elétrica é uma das propriedades mais importantes nessa escolha. Assim, antigamente, o cobre era usado como material condutor, pois tinha uma excelente condutividade elétrica. Devido ao seu preço exorbitante no mercado, o alumínio puro era usado como condutor. No entanto, esse último tem uma série de deficiências em termos de propriedades mecânicas, por isso foi usada uma versão aprimorada, a liga de alumínio.

Esse condutor de liga de alumínio 838MCM mostra na Figura 3.2.1, cujas especificações/características são apresentadas na Tabela 3.2, oferece maior resistência à corrosão do que a maioria dos outros condutores, razão pela qual é amplamente utilizado em áreas costeiras. Segundo a norma IEC 60104 (1967), a liga usada nos CAL geralmente é uma liga de alumínio, magnésio e silício tratada termicamente.



Figura 3.2.1 - Seção transversal do Cabo CAL 1120 / 838 MCM.
Fonte: Labcabos.

Ela foi desenvolvida para atender à necessidade de um condutor econômico para aplicações aéreas, em que é necessária maior resistência mecânica. De fato, o uso da liga 1120 na fabricação de condutores para linhas de transmissão baseia-se em sua maior resistência mecânica do que a de outros condutores de liga. Como demonstrado por Barber (1995) desde 1964, na Austrália, os condutores de liga de alumínio 1120 têm sido usados em linhas de transmissão devido à sua combinação de alta resistência mecânica e resistência à fluência. A resistência à fluência é uma das principais preocupações das ligas, pois é um elemento crucial para garantir a durabilidade e a confiabilidade dos componentes elétricos. Segundo Barber (1995) em 1978, a *Association for Electrical Research* foi encarregada de realizar um projeto de pesquisa para comparar a resistência à fluência da liga 6201 com a de outras quatro ligas de alumínio, com objetivo de determinar qual liga tinha as melhores propriedades de resistência à fluência.

Tabela 3.2. Características geométricas e mecânicas do condutor CAL 1120/838 MCM.

Propriedades geométricas e mecânicas	AAAC 838 MCM
Limite de resistência à tração do fio (MPa)	249
Peso linear (N/m)	11,49
Massa linear nominal (Kg/m)	1,1709
Diâmetro fio (mm)	3,825
Número de fios	37
Diâmetro do condutor (mm)	26,78
Módulo de Young Al 6201 (GPa)	69

3.2.2 Configuração dos Sensores

A norma IEEE Std 664 (1980) estabelece diretrizes para a medição do comportamento vibratório de cabos condutores submetidos a excitações externas, incluindo a avaliação do autoamortecimento. Foram utilizados três acelerômetros e duas células de carga. Cada sensor é posicionado em um ponto diferente do vão ativo. Os sensores conforme identificados na Figura 3.2.2, tais como:

- Acelerômetros foram utilizados para medir a aceleração das vibrações;
- Células de carga, para registrar a força dinâmica aplicada durante o ensaio.

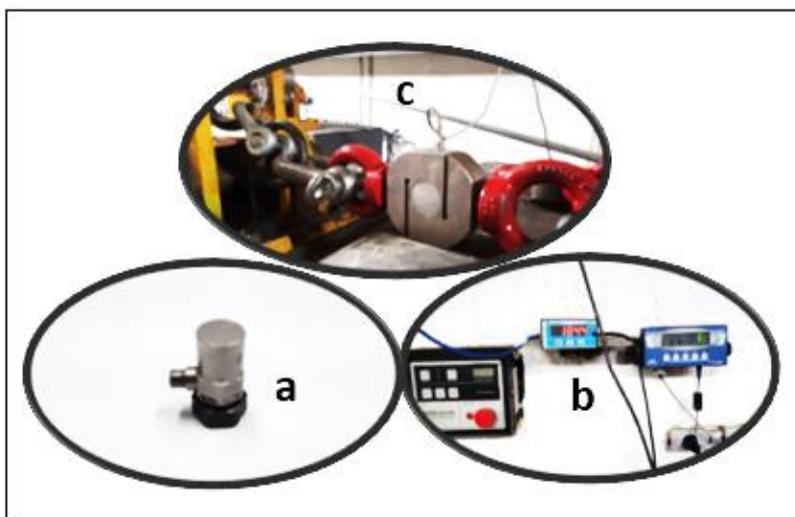


Figura 3.2.2 - Sensores (a) Acelerômetro, (b) Leitor de carga e (c) Célula de carga.

A Tabela 3.2.1 apresentada a seguir, reúne as principais características técnicas desses sensores, como número de série, sensibilidade e fabricante.

Tabela 3.2.1. Especificações dos sensores utilizados no experimento.

Sensores	Número de série (SN)	Sensibilidade	Fabricantes	Modelos	Resolução de banda larga:
Célula de carga	58155	0,2430 mV/N	Brüel & Kjaer	8230-003	-
Acelerômetro	57505	100,90mV/g	PCB Piezotronics	352C33	1 a 10000 Hz.
Acelerômetro	243344	99,10mV/g	PCB Piezotronics	352C33	1 a 10000 Hz.
Acelerômetro	86683	100,90mV/g	PCB Piezotronics	352C33	1 a 10000 Hz.

No ensaio de autoamortecimento de cabos condutores, o *shaker* eletrodinâmico foi utilizado para aplicar uma excitação controlada e induzir vibrações no cabo. No entanto, para garantir uma transmissão eficiente da força do shaker para o condutor, foi necessário um sistema de acoplamento mecânico conforme mostra na Figura 3.2.3. Neste caso, o acoplamento garante que a força seja aplicada em um único ponto fixo, sem variações indesejadas.

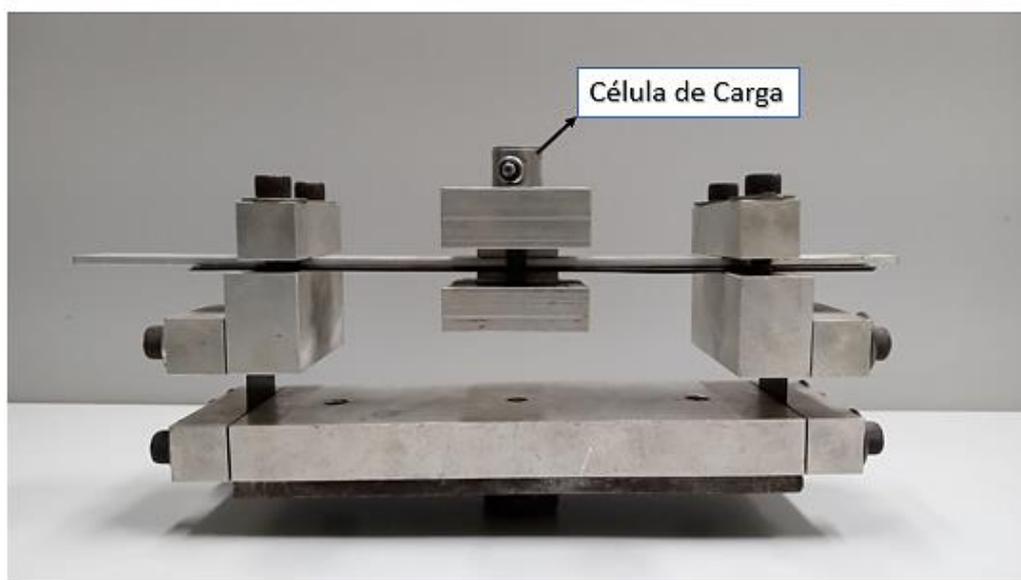


Figura 3.2.3 - Sistema de acoplamento do ensaio autoamortecimento. Fonte: Labcabos.

Dois transdutores são usados no teste para determinar as frequências naturais do cabo condutor. O primeiro transdutor é colocado na base do agitador, que é responsável por aplicar as forças de excitação ao sistema durante a varredura. Essa posição estratégica permite que a resposta dinâmica seja medida diretamente na fonte da excitação. O segundo transdutor é conectado ao cabo a uma distância de 100 mm do acoplamento. Esse local específico possibilita o monitoramento das oscilações ao longo de todo o comprimento do cabo, fornecendo informações cruciais sobre suas características de vibração em diferentes pontos. A Figura 3.2.4 associadas mostra um diagrama da disposição desses transdutores, proporcionando uma visão clara da configuração experimental.

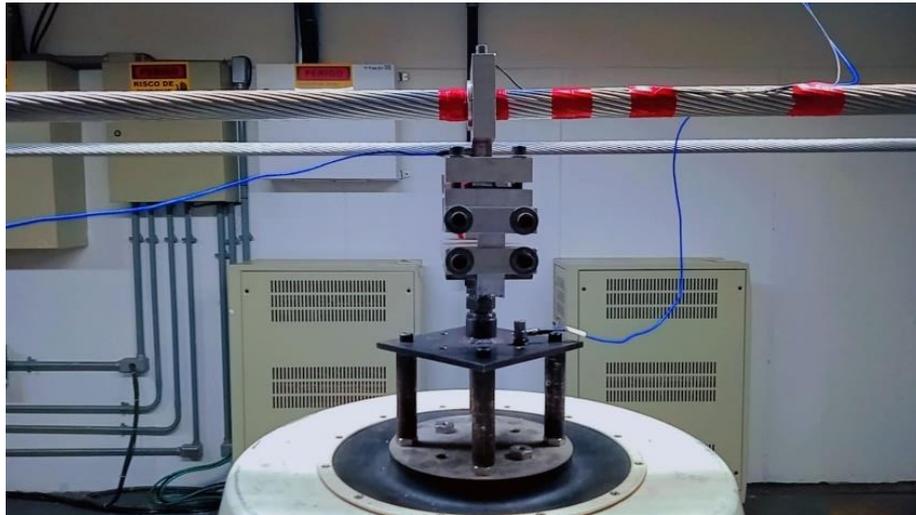


Figura 3.2.4 - Montagem do sistema de acoplamento com os sensores.
Fonte: Labcabos.

3.2.3 Amplificador de potência

O amplificador de potência mostra na Figura 3.2.5 é o elemento intermediário no sistema de teste de vibração. Nos sistemas de teste de vibração, o amplificador de potência fornece a energia necessária para acionar o agitador eletrodinâmico. Em um sistema de teste de vibração, um amplificador de potência é conectado ao agitador eletrodinâmico para fornecer a energia elétrica para acionar o agitador em frequências e amplitudes específicas. Essa configuração é comumente usada em setores como o aeroespacial, automotivo e eletrônico para testar a integridade estrutural e o desempenho de componentes e sistemas sob cargas de vibração simuladas.



Figura 3.2.5 - Amplificador da potência da bancada do teste. Fonte: Labcabos.

A combinação do amplificador de potência e do shaker eletrodinâmico permite que engenheiros e pesquisadores submetam os produtos a vibrações controladas, ajudando-os a identificar possíveis pontos fracos, analisar a fadiga e validar o projeto e a confiabilidade do componente. O objetivo é fornecer potência suficiente ao shaker para produzir os níveis de vibração desejados para o teste.

3.2.4 Shaker eletromecânico

Um agitador eletrodinâmico mostra na Figura 3.2.6 é um dispositivo usado em testes de vibração para simular condições ambientais reais ou para testar a durabilidade e o desempenho de produtos. Ele consiste em um ímã potente e uma bobina. Quando uma corrente elétrica flui pela bobina, ela interage com o campo magnético, causando um movimento controlado do shaker e gerando vibrações.



Figura 3.2.6 - Shaker eletromecânico. Fonte: LabCabos.

3.2.5 Sistema de controle

O sistema de controle é o motor central dos testes do laboratório e é composto por um conjunto de equipamentos que utiliza software básico e sistemas de aquisição de dados. O equipamento inclui o controlador e o computador. Todos devem ser usados em conjunto. A principal função do controlador é manter as condições de vibração dos testes. O computador serve como plataforma central para processamento de dados, execução de dados e comunicação com os outros componentes do sistema.



Figura 3.2.7 - Sistema de controle da bancada experimental.

3.3 PROCEDIMENTOS DE TESTES

Esta seção descreve de forma detalhada e sistemática, as etapas seguidas para a realização dos ensaios experimentais.

3.3.1 Processo de Montagem do Cabo Condutor

Como qualquer outro procedimento experimental, os testes são realizados em uma série de etapas que devem ser seguidas uma após a outra para garantir que os resultados sejam verificados, consistentes e validados.

A montagem da amostra inicia-se com a seleção do cabo CAL 1120/838 MCM como condutor representativo. O cabo é fixado à bancada experimental utilizando bobinas de enrolamento mostra na Figura 3.3.1 e polias metálicas para garantir a estabilidade. Grampos rígidos são posicionados nas extremidades do cabo, permitindo a aplicação precisa da carga de tração e minimizando interferências externas. A metodologia de fixação é desenvolvida com o objetivo de minimizar a interferência externa que poderia causar danos durante o teste.



Figura 3.3.1 - Bobinas grandes de cabos enrolados, com a marca ALUBAR.
Fonte: Labcabos.

Quando o cabo estiver apoiado nos dois blocos de concreto da bancada de teste, que representam dois suportes localizados em cada extremidade, dois grampos de ancoragem e rígidos são posicionados em cada extremidade para segurar e fixar o cabo. Para identificar esses dois grampos de ancoragem, de um lado, um identificado pela Figura 3.3.2.b está conectado a uma peça que permite que o cabo seja puxado pelo Guincho de Alavanca Tifor mostra na Figura 3.3.3 e do outro lado, está conectado a uma célula de carga e a uma alavanca mostrada na Figura 3.3.2.a.

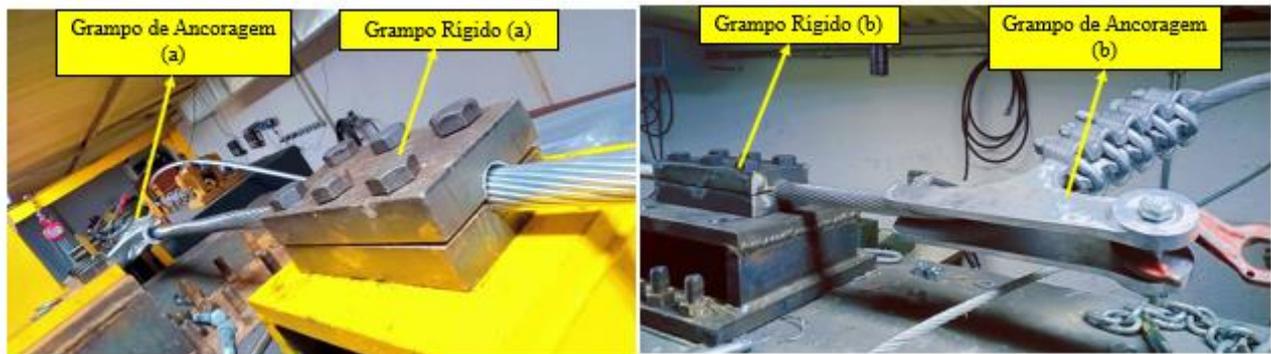


Figura 3.3.2 - Grampo de ancoragem: (a) lado da célula de carga e (b) Lado do Tifor. Fonte: Labcabos.



Figura 3.3.3 - Guincho de Alavanca Tifor. Fonte: Labcabos.

3.3.2 Configurações da bancada experimental

A realização do teste de autoamortecimento no equipamento experimental envolve vários estágios usando um sistema de controle integrado com software chamado "*Shaker Control*", que permite que o teste de Varredura seja realizado vibrando o cabo em uma amplitude de deslocamento de 1 mm pico – a – pico com as frequências calculadas como uma função da velocidade do vento. Além disso uma faixa de frequência foi escolhida no intervalo 14 – 40 Hz mostrada na Figura 3.3.4. Como demonstrado pela norma IEEE Std 664 (1980) as frequências de 15,25 Hz a 35,55 Hz foram selecionadas por representarem modos naturais típicos de vibrações em cabos. Assim sendo, um conjunto de componentes necessários é instalado, incluindo o shaker, o cabo, o amplificador e os transdutores de medição.

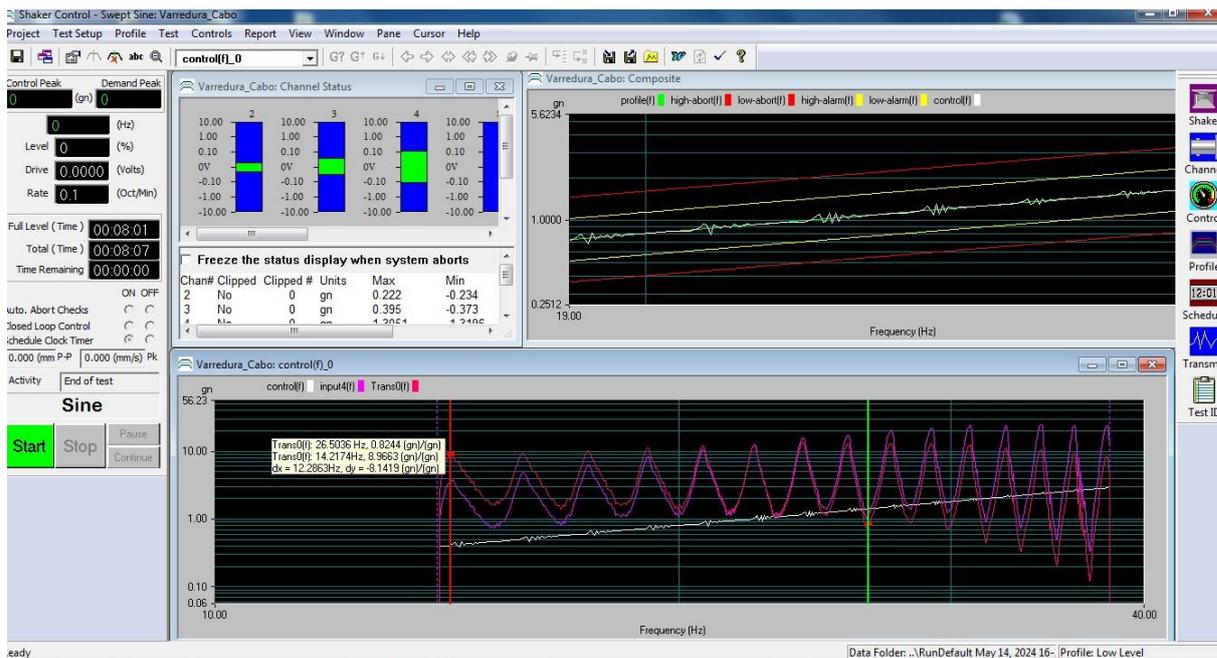


Figura 3.3.4 - Captura do ensaio varredura realizada com amplitude de deslocamento 1 mm pico-a-pico.

Para a realização dos testes, o laboratório foi equipado com uma temperatura constante de 21° na sala de testes para garantir condições estáveis, especificamente para minimizar as variações que poderiam influenciar os resultados.

Antes do lançamento do software "Shaker Control", o controlador foi conectado ao computador para permitir a realização dos testes de vibração. Segundo IEEE Std 664 (1980), os parâmetros como a velocidade do vento, as frequências naturais e a amplitude do deslocamento foram bem configuradas de acordo com os requisitos específicos do experimento. Essa configuração geral permitiu que os testes fossem realizados com precisão, com controle preciso dos parâmetros e aquisição eficiente de dados.

3.3.3 Procedimento para Teste de Autoamortecimento

O teste de autoamortecimento foi realizado para determinar a energia mecânica dissipada pelo cabo vibratório em modo de vibração. Conforme mencionado na seção 2.6, há vários métodos para medir a energia dissipada pelo cabo. Os ensaios de autoamortecimento foram realizados com o objetivo de avaliar a dissipação de energia mecânica em cabos submetidos a vibrações forçadas. O Método da Potência foi adotado devido à sua capacidade de medir com precisão a energia dissipada em frequências próximas aos modos naturais do cabo, simulando condições reais de operação e reconhecido por sua precisão na análise de sistemas vibratórios.

Esse método, baseado no princípio do balanço de energia, avalia a dissipação de energia mecânica ao longo do cabo quando submetido a frequências próximas aos seus modos naturais de vibração.

Nesse método, o condutor é induzido a vibrar em três frequências próximas aos seus modos naturais harmônicos sintonizáveis, o que significa frequências específicas de ressonâncias predefinidas. Essas frequências geralmente determinadas a partir de Teste de Varredura sob diferente carga de tração, são selecionadas para representar condições potenciais de carga conforme a Figura 3.3.5 ou excitação em situações reais, como a vibração eólica. Esse método exige que pelo menos cinco comprimentos de loop diferentes sejam testados, com valores máximos e mínimos correspondentes às frequências mínimas e máximas. Como demonstrado pela norma IEEE Std 664 (1980), elas são geradas na faixa de velocidade do vento (3 a 30 quilômetros por hora) para o diâmetro do condutor em consideração.



Figura 3.3.5 - Talha do peso para controlar os valores da carga de tração.

O teste foi realizado vibrando o condutor nas frequências determinadas a partir do ensaio de varredura usando a ferramenta *Shaker Control* mostrado na Figura 3.3.6, configurando a janela conforme aos parâmetros específicos permitindo de captura diretamente à Força, Velocidade e a fase.

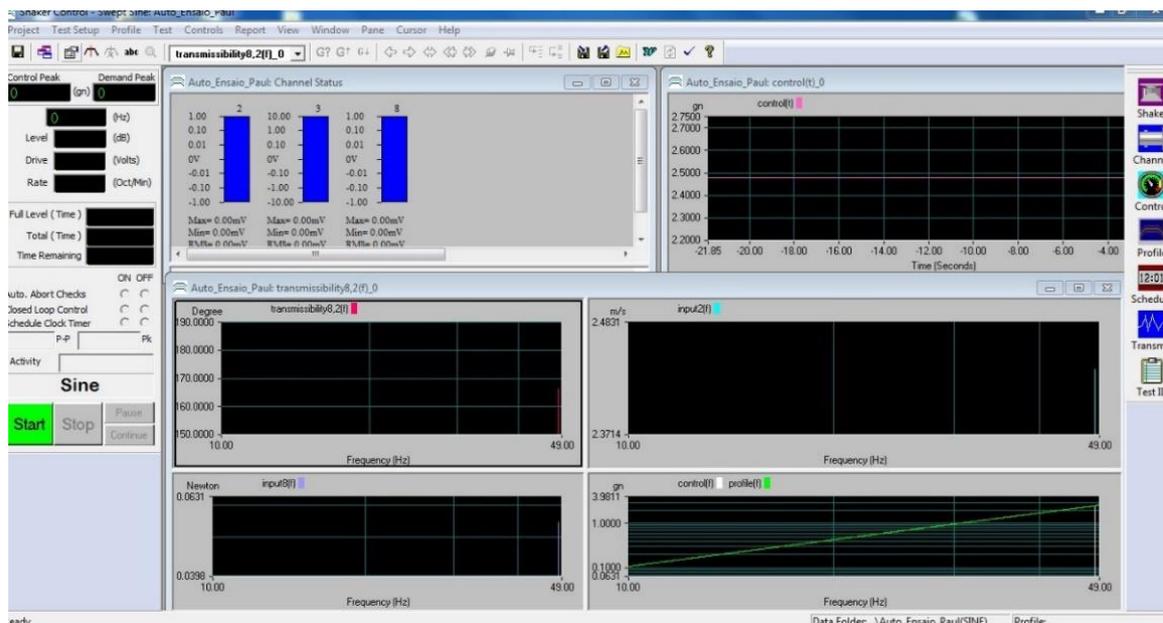


Figura 3.3.6 - Captura do shaker control mostra a configuração do ensaio autoamortecimento.

Foram utilizados três canais de medição — Canal 2, Canal 3 e Canal 8 —, cada um responsável por fornecer dados distintos para o cálculo da potência dissipada pelo condutor. O Canal 8 registrou a força em Newtons, enquanto o Canal 2 mediu a velocidade em metros por segundo (m/s). Segundo a norma IEEE Std 664 (1993), a fase foi determinada a partir da razão ou transmissibilidade entre os sinais dos Canais 8 e 2 ou razão da força e velocidade. O Canal 3 atuou como referência para o controle da varredura, diferenciando-se do Canal 4, que foi utilizado para registrar a resposta da varredura.

Todos os resultados foram capturados em uma planilha do Excel para análise posterior. A partir dessas medições, a potência total dissipada pelo condutor vibratório no ponto de fixação do agitador foi calculada utilizando o Método da Potência. Essa abordagem permite avaliar a capacidade do condutor de dissipar a energia gerada pelas vibrações.

3.3.4 Procedimento do ensaio caracterização (Amortecedor tipo Stockbridge)

Este método é utilizado para testar a resposta dinâmica de sistemas, como cabos ou amortecedores, dentro de uma faixa de frequência específica. É particularmente relevante para determinar como um cabo ou um sistema mecânico responde a vibrações em diferentes frequências. Esse tipo de ensaio é fundamental para entender como os sistemas de amortecimento se comportam sob diferentes condições de vibração.

Nesta Figura 3.3.7 mostra o amortecedor de tipo Stockbridge F4000 está fixado ao equipamento do shaker, usando três sensores: 2 células de carga (Input 1 e 2) para medir as forças e 1 acelerômetro (Input 3) na base do shaker permite o controle de vibração.

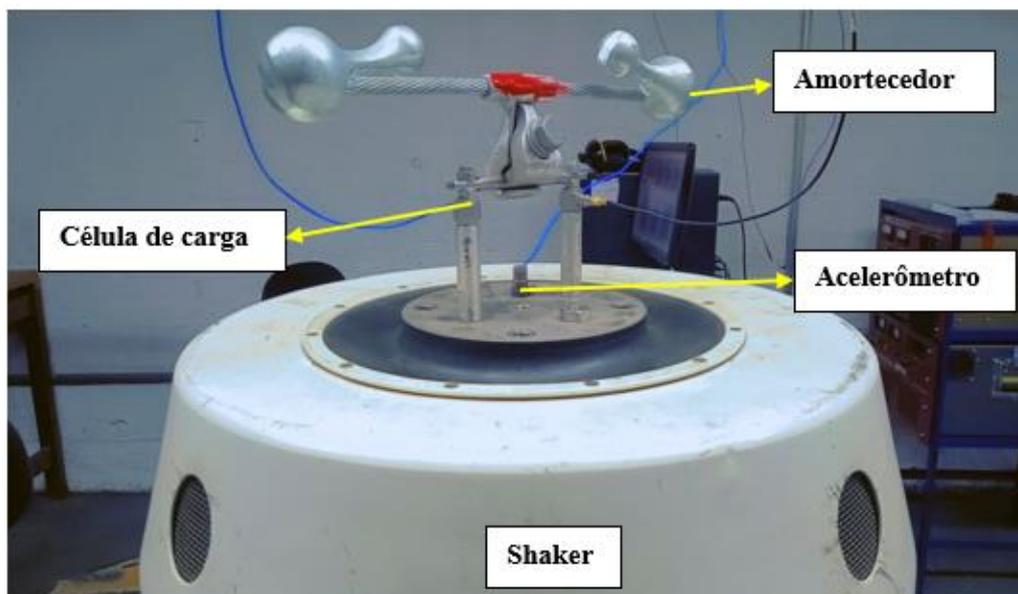


Figura 3.3.7 - Amortecedor fixa no shaker – Ensaio da caracterização.

Segundo a Norma IEC Std 61897 (1998) a faixa de frequência de teste foi realizado no intervalo de $0,18/d$ a $1,4/d$, onde d é o diâmetro do condutor (em metros). Ou seja, a frequência de varredura depende do diâmetro do condutor a ser testado, a velocidade do grampo é mantida constante a $0,1$ m/s (zero a pico) e a varredura foi realizada automaticamente com uma taxa máxima de $0,5$ Hz/s. Nesse caso a faixa da frequência foi 20 Hz até 170 Hz com um diâmetro $d_{\text{mensageiro}}$ igual a $8,50$ mm.

O ensaio foi realizado também em duas condições diferentes, a primeira foi um ensaio antes da FADIGA que permite de avaliar a resistência do amortecedor a vibrações ao longo de uma ampla faixa de frequências ($20 - 170$ Hz), e outra, o amortecedor é excitado continuamente em sua frequência de ressonância, um total de 10 milhões (10^7) de ciclos e uma amplitude de deslocamento de $0,5$ mm Pico a Pico e a duração do tempo do ensaio foi 19 horas.

Testar após fadiga garante que os amortecedores atendem aos requisitos de desempenho mesmo após uso prolongado, garantindo a segurança e a confiabilidade dos componentes em aplicações práticas.

3.4 ANÁLISE DE DADOS

3.4.1 Cálculo da Potência dissipada

Para analisar os dados coletados durante os ensaios experimentais, foram utilizadas diferentes ferramentas computacionais para organização, processamento e interpretação dos resultados.

a) Organização e Pré-Processamento dos Dados

Inicialmente, os dados brutos foram organizados numa Planilha Excel, onde foram estruturados em tabelas para facilitar a visualização e conferência inicial dos valores medidos. Esse processo envolveu a verificação da consistência dos dados, identificação de eventuais valores discrepantes e organização por parâmetros experimentais, como frequência de excitação, velocidade, amplitude de deslocamento normalizado (Y/D) e carga de estiramento (EDS).

b) Processamento e Análise Computacional

Após a organização inicial, os dados foram analisados utilizando Python, devido à sua versatilidade em manipulação de grandes volumes de dados e modelagem matemática. As principais bibliotecas empregadas foram:

- NumPy: o NumPy fornece um ambiente eficiente para processamento de dados científicos em Python.
- Pandas: para estruturação e filtragem dos dados e facilita a leitura e análise de dados estruturados provenientes de arquivos CSV ou planilhas Excel.
- Matplotlib: para geração de gráficos e visualização da dissipação de potência, amortecimento modal e comportamento da vibração em função dos diferentes valores de EDS.

PyCharm, foi a única ferramenta utilizada para organizar scripts de processamento de dados, depuração e visualização de gráficos. Ele é um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) popular para Python, criada pela *JetBrains*, amplamente utilizado para desenvolvimento de software, análise de dados e machine learning.

```
1 import matplotlib.pyplot as plt
2 import numpy as np
3
4 # Calculo da Potência dissipada do cabo em Watt usando Metodo da Potencia e da Onda Estacion
5 # Dados Experimental LabCabos UNB | Abril 2024 | Paul Edson Vaincoeur
6
7 # Constantes fornecidas
8 D = 26.78 # Diâmetro do condutor em mm
9 RTS = 92.90 # RTS em kN
10 EDS = 0.30 # Usando 30% como exemplo
11 m_cabo = 1.1709 # Massa linear do cabo em Kg/m
12
13
14 # Funções para calcular a potência dissipada
15 usage
16 def power_method(Fi, Vi, theta):
17     return 0.5 * Fi * Vi * np.cos(np.radians(theta)) * (1/43)
```

Run: Modo de vibração - Copia x

Process finished with exit code 0

Figura 3.4.1 - Captura da tela Pycharm usando as bibliotecas em Python para analisar os dados experimentais.

A aplicação de ferramentas computacionais para esse processamento e análise dos dados permitiu uma avaliação detalhada do comportamento vibratório do condutor sob diferentes condições de estiramento. A abordagem adotada garantiu um tratamento eficiente dos dados experimentais, proporcionando insights valiosos sobre os mecanismos de dissipação de energia e autoamortecimento do sistema

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Curva de Autoamortecimento

a) CASO: EDS = 30 % UTS

Os resultados apresentados na Figuras 4.1 a 2.2.2 referem-se a testes de autoamortecimento realizados com o condutor CAL 1120/838 MCM, submetido a cargas EDS de 22,5%, 26,5% e 30% de sua UTS (resistência à tração nominal). A dissipação de potência foi calculada utilizando o Método da Potência, conforme descrito nas normas IEEE. A análise na Figura 4.1 revela:

- A diferença na potência máxima dissipada é de 4,925 W/m entre as frequências de 15,25 Hz e 35,55 Hz.
- A diferença mínima de dissipação de energia é de 0,1771 W/m entre as frequências de 15,25 Hz e 35,55 Hz.

Além disso, a potência dissipada aumenta proporcionalmente à frequência de excitação. O aumento da amplitude de vibração (Y/D) leva a um aumento significativo na dissipação de potência (PD), mas esse impacto é amplificado em frequências mais altas, como observado em 35,55 Hz, onde a potência máxima é 5,75 vezes maior do que em 15,25 Hz, mesmo com uma amplitude de vibração menor.

Esse comportamento, observado em frequências entre 15,25 Hz e 35,55 Hz, está relacionado ao aumento das forças inerciais em frequências mais elevadas. Além disso, as curvas indicam uma relação direta entre a dissipação de energia e o deslocamento normalizado, refletindo a eficiência do autoamortecimento em condições dinâmicas específicas.

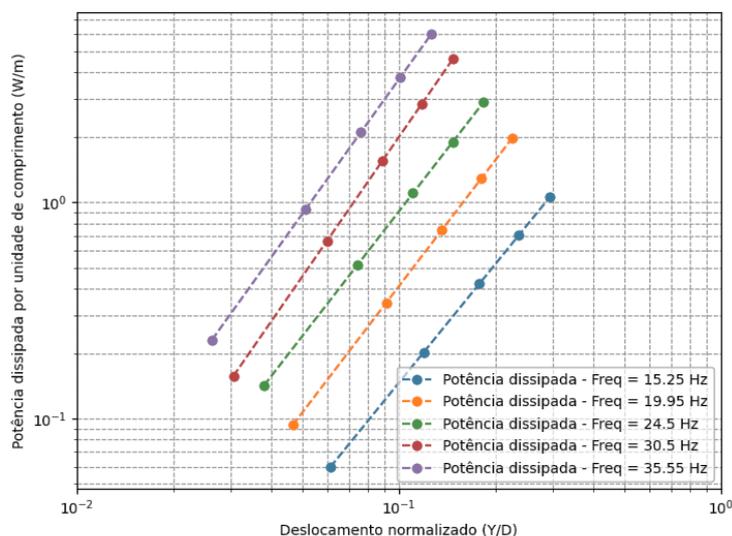


Figura 4.1 - Potência dissipada em função da amplitude de deslocamento normalizado Y/D - EDS 30% UTS.

A Figura 4.1.1 apresenta as potências dissipadas (mínima, média e máxima) pelo condutor em função das frequências, destacando o aumento da dissipação de potência com diferentes frequências naturais. Comparando as frequências de 15,25 Hz e 35,55 Hz, a Potência Dissipada mínima e a Potência Dissipada máxima aumentam em 0,1917 W/m e 4,571 W/m, respectivamente, com uma diferença total de 4,3793 W/m. Além disso, a variação relativa é de 77% para PD_min e 82% para PD_max, uma diferença de 5%.

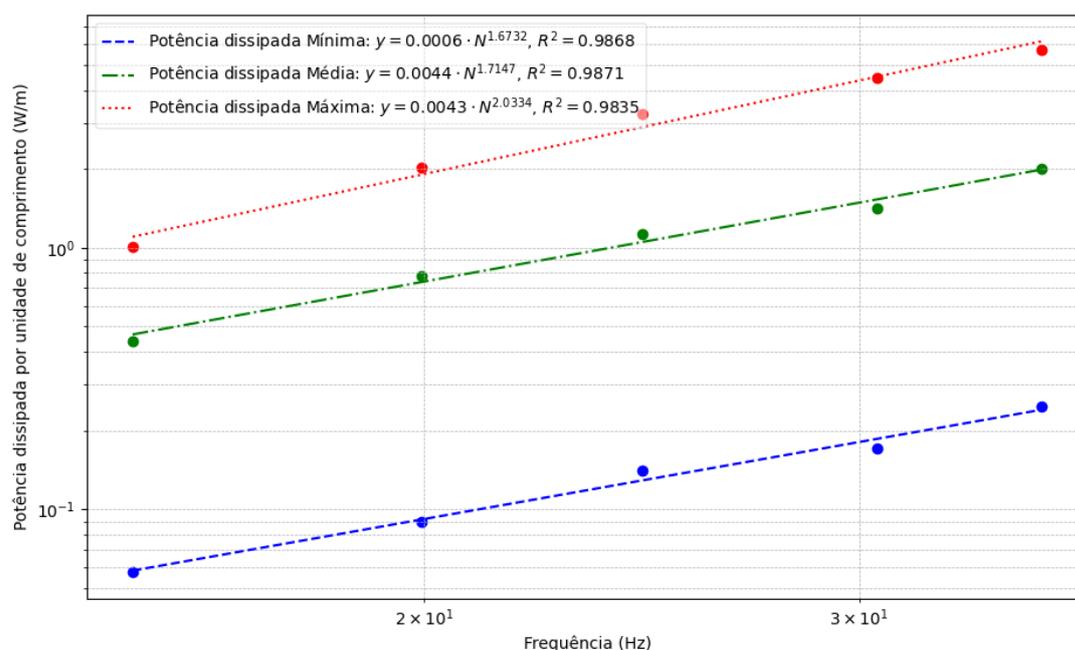


Figura 4.1.1 - Potência dissipada, mínima, média, máxima em função da frequência - EDS 30% UTS.

A Figura 4.1.2 mostra a potência dissipada pelo condutor em relação às frequências, com a única diferença de que o condutor foi vibrado para cada frequência em amplitudes de deslocamento de 0,70 e 1 mm pico a pico para justificar o comportamento do condutor em amplitudes maiores e menores. Nesse caso, foi observando que as frequências mais altas resultam em maior dissipação de energia.

Os resultados mostram claramente que a energia dissipada por unidade de comprimento do condutor aumenta com a frequência. Isso pode ser explicado pelo fato de que frequências mais altas induzem movimentos mais rápidos e mais energéticos do condutor, resultando em maior dissipação de energia.

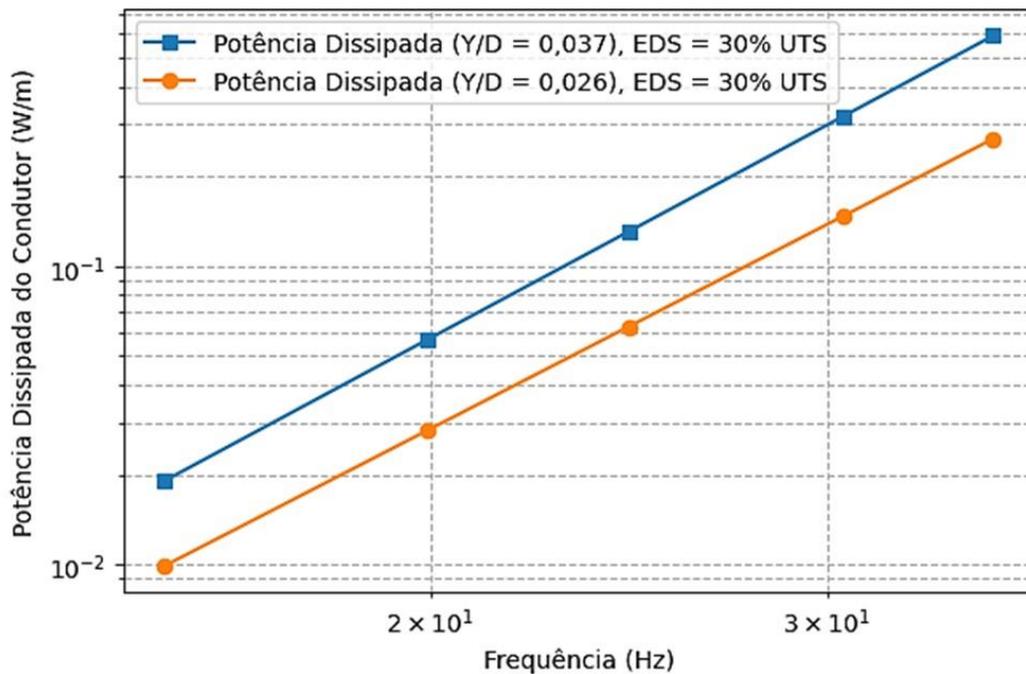


Figura 4.1.2 - Potência dissipada em função frequência para $Y = 0,70$ e 1 mm - EDS 30% UTS.

b) CASO: EDS = 26.5 % UTS

Ao analisar os resultados para EDS = 26,5% UTS, observa-se uma diferença significativa na dissipação de potência entre as frequências de 15,25 Hz e 35,55 Hz, tanto para os valores máximos quanto mínimos. A diferença na potência máxima dissipada é de 8,158 W/m, enquanto a diferença mínima é de apenas 0,22 W/m conforme na Figura 4.1.3. Essa diferença demonstra que o aumento da frequência tem um impacto muito maior na dissipação máxima de potência do que na mínima. A potência dissipada em 35,55 Hz é aproximadamente 7,3 vezes a potência dissipada em 15,25 Hz. Além disso, comparando com os resultados obtidos para EDS = 30% UTS, a diferença na potência máxima dissipada é reduzida para 4,925 W/m. Uma redução de 3,233 W/m entre os dois casos que reflete o impacto de uma maior carga de tração (EDS) no comportamento do sistema.

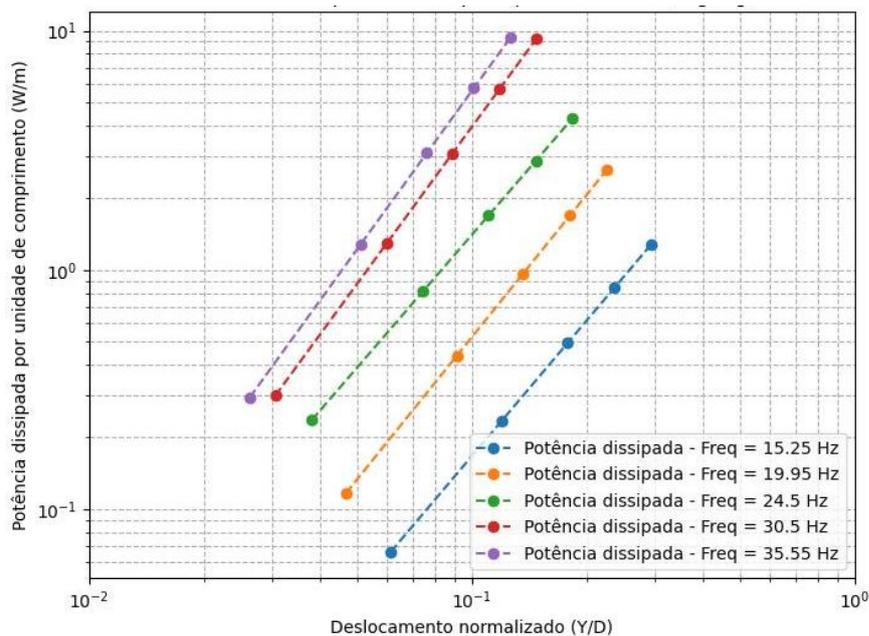


Figura 4.1.3 - Potência dissipada em função da Amplitude de deslocamento normalizado (Y/D) - EDS 26,5 % UTS.

Neste caso, onde EDS = 26,5% UTS, A Figura 4.1.4 apresenta as potências dissipadas (mínima, média e máxima) pelo condutor em função das frequências, e também a Figura 4.1.5 identifica a Potência dissipada em função das frequências (por amplitudes de 0,70 e 1 mm pico a pico), destacando o aumento da dissipação de potência com diferentes frequências naturais. Comparando as frequências de 15,25 Hz e 35,55 Hz, a Potência dissipada mínima e a Potência dissipada máxima aumentam em 0,246 W/m e 8,34 W/m, respectivamente, com uma diferença total de 8,037 W/m. Além disso, a variação relativa é de 79% para PD_min e 88% para PD_max, uma diferença de 9%.

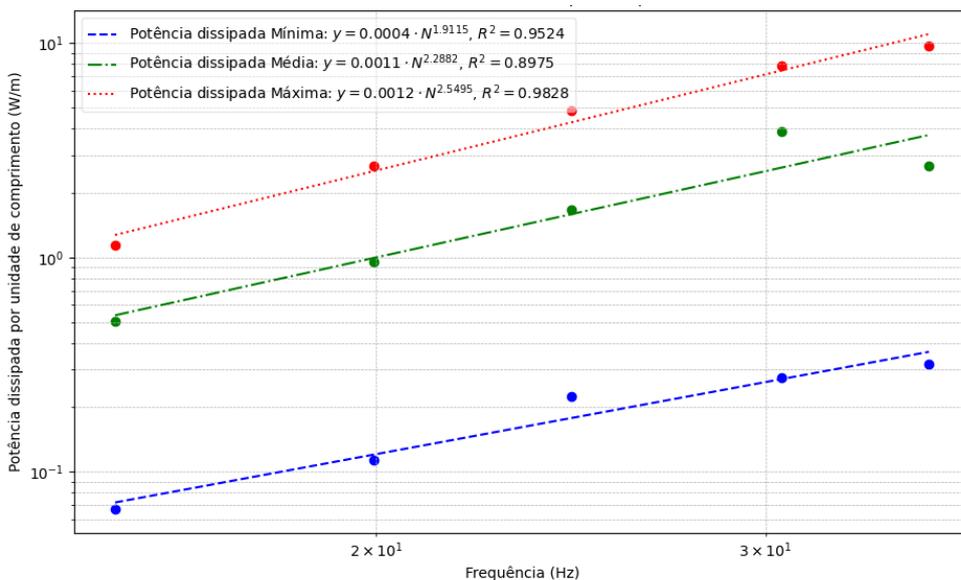


Figura 4.1.4 - Potência dissipada, mínima, média, máxima em função da frequência - EDS 26,5 % UTS.

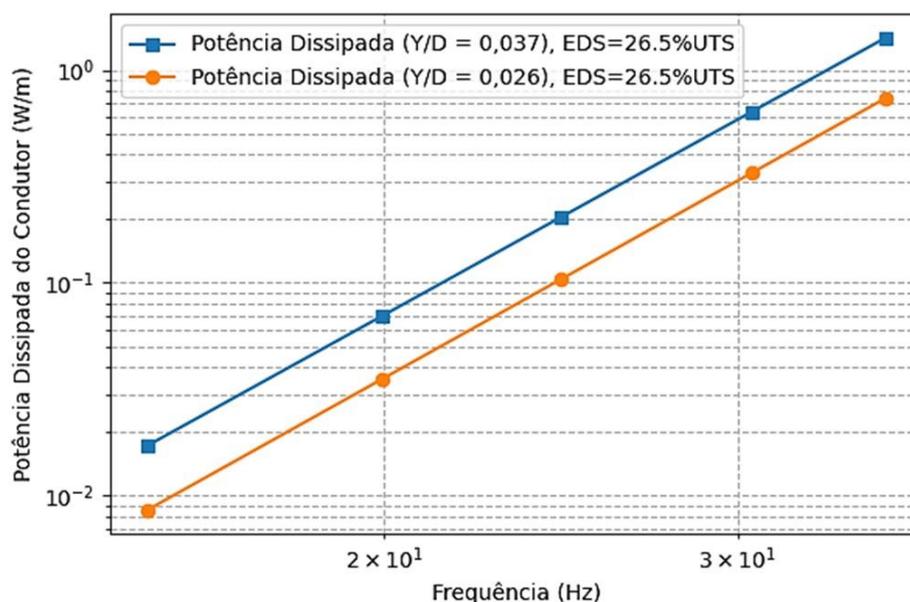


Figura 4.1.5 - Potência dissipada em função da frequência para $Y = 0,70$ e 1 mm - EDS $26,5 \%$ UTS.

Portanto, ao comparar os casos de EDS = 30% UTS e EDS = $26,5\%$ UTS, observar que:

- Para a frequência de $35,55 \text{ Hz}$, a potência dissipada mínima aumentou em $0,0634 \text{ W/m}$ e a potência dissipada máxima aumentou em $3,955 \text{ W/m}$ quando o EDS foi reduzido de 30% UTS para $26,5\%$ UTS.
- Para a frequência de $15,25 \text{ Hz}$, a potência dissipada mínima aumentou em $0,0088 \text{ W/m}$ e a potência dissipada máxima aumentou em $0,186 \text{ W/m}$ quando o EDS foi reduzido de 30% UTS para $26,5\%$ UTS.

c) CASO: EDS = $22,5 \%$ UTS

Analisando os resultados para EDS = $22,5\%$ UTS, observando que a diferença na potência máxima dissipada entre as frequências de $15,25 \text{ Hz}$ e $35,55 \text{ Hz}$ atingiu $10,58 \text{ W/m}$, enquanto a diferença mínima foi de apenas $0,49 \text{ W/m}$. Esse comportamento destaca o impacto significativo da frequência mais alta sobre a potência dissipada, especialmente para os valores de potência máxima. Além disso, observou-se que a potência dissipada a $35,55 \text{ Hz}$ é aproximadamente $7,99$ vezes maior do que a dissipada a $15,25 \text{ Hz}$, refletindo uma maior sensibilidade da potência dissipada a vibrações de alta frequência em condições de descarga eletrostática mais baixas. Em comparação, a maior flexibilidade do cabo em EDS = $22,5\%$ UTS resulta em uma dissipação de energia ainda maior em altas frequências, destacando a influência direta da carga de tração na dinâmica do sistema.

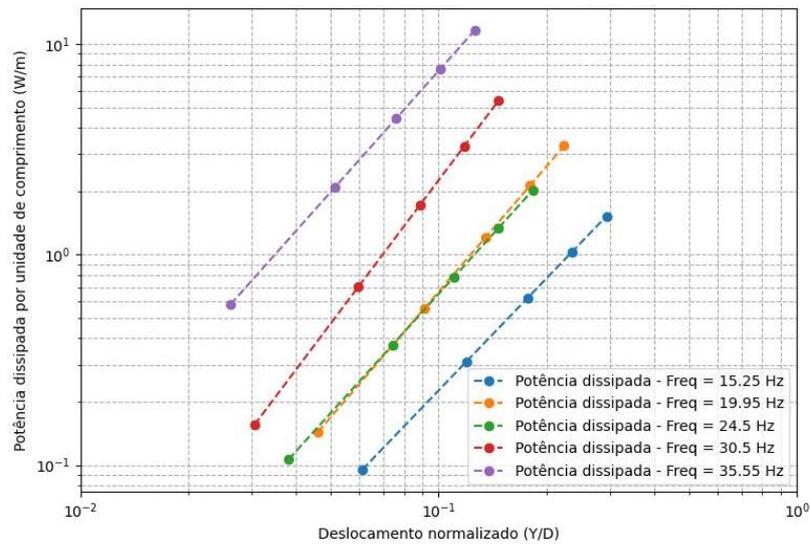


Figura 4.1.6 - Potência dissipada em função amplitude de deslocamento normalizado Y/D - EDS 22,5 % UTS.

No caso EDS = 22,5% UTS, analisando resultados na Figura 4.1.7, observando o aumento da dissipação de potência com diferentes frequências naturais. Comparando as frequências de 15,25 Hz e 35,55 Hz, a Potência Dissipada mínima e a Potência Dissipada máxima aumentam em 0,443 W/m e 9,467 W/m, respectivamente, com uma diferença total de 9,023 W/m. Além disso, a variação relativa é de 83% para PD_min e 87% para PD_max, uma diferença de 4%.

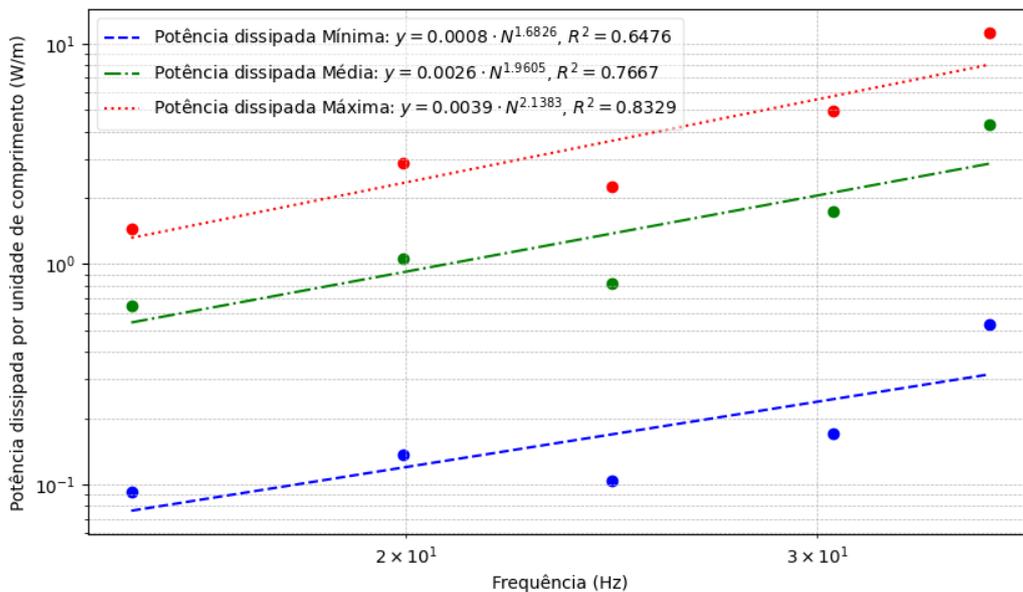


Figura 4.1.7 - Potência dissipada, mínima, média, máxima em função frequência - EDS 22,5 % UTS.

Em resumo, analisando os resultados sobre diferente caso de EDS, os gráficos apresentados demonstram a relação entre a potência dissipada por unidade de comprimento e a Amplitude deslocamento normalizado do cabo condutor de alumínio liga 1120 durante um teste de autoamortecimento. Cada curva representa um ensaio realizado em uma frequência diferente, o que permite avaliar como a frequência influencia a capacidade do cabo de dissipar energia e, conseqüentemente, sua capacidade de amortecer vibrações. Foi observado que à medida que a amplitude de vibração do cabo aumenta, a potência dissipada também aumenta. Isso indica que o mecanismo de amortecimento está mais ativo em maiores amplitudes de vibração. As curvas para diferentes frequências mostram que a capacidade de amortecimento do cabo varia com a frequência da excitação.

4.2 Impacto da carga de tração (EDS) e das frequências na potência dissipada.

a) Impactos das cargas EDS:

A dissipação de potência foi avaliada para diferentes valores de carga de tração (T), calculados como o produto entre a porcentagem de EDS e a UTS do condutor. Essa força desempenha um papel crucial na estabilidade do cabo, influenciando diretamente suas características dinâmicas. Observou-se que o aumento na carga de tração eleva as frequências naturais do cabo, reduzindo simultaneamente a amplitude das vibrações. Essa mudança resulta em menor dissipação de energia para uma energia de excitação constante, evidenciando a maior rigidez do condutor sob tensões mais altas. Esses resultados são consistentes com estudos prévios. Segundo Kalombo et al. (2016b), também foi relatada a redução da dissipação em cabos sob maiores cargas de tração. Ao analisar os resultados apresentados nas Figuras 4.2.1 e 4.2.2, observa-se que:

- **Para EDS = 30% UTS:**

O valor máximo de dissipação de potência é de 67,67% e o valor mínimo é de 64,10%, resultando numa diferença de 3,57%.

- **Para EDS = 22,5% UTS:**

O valor máximo de dissipação de potência é de 50,88% e o valor mínimo é de 46,80%, resultando numa diferença de 4,08%.

b) Impacto das frequências:

Os resultados mostram que as potências dissipadas aumentam significativamente com a frequência em todas as condições de EDS. Este aumento é especialmente notável em condições de menor EDS (22,5%), onde a potência dissipada mínima é 5,88 vezes maior e a potência

máxima é 7,45 vezes maior na frequência mais alta (35,55 Hz) em comparação com a mais baixa (15,25 Hz). Além disso, observando à medida que a frequência aumenta, a amplitude da vibração do condutor diminui, e a deformação mecânica do material é mais acentuada.

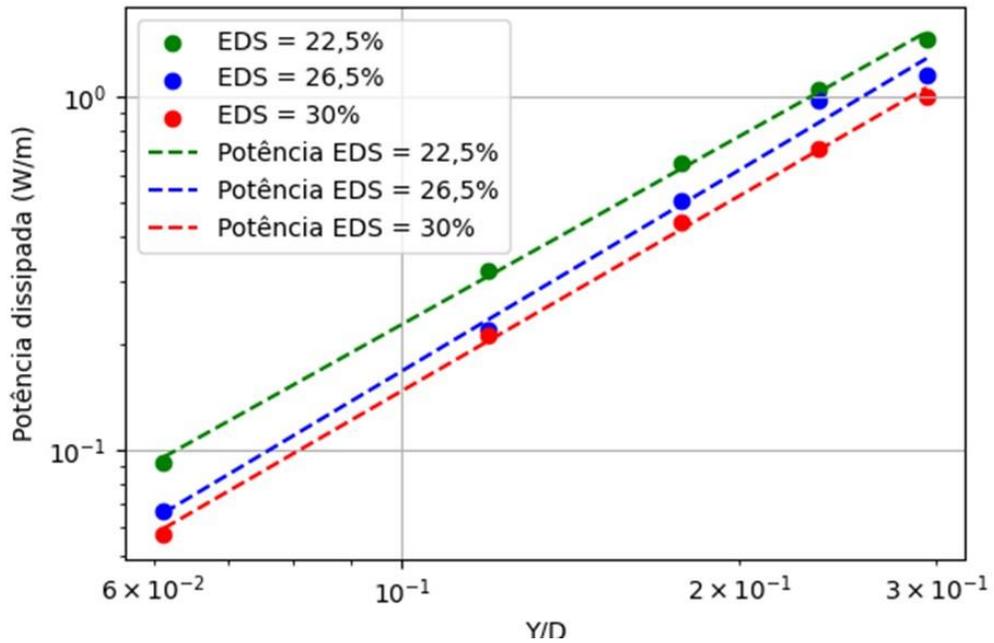


Figura 4.2.1 - Potência dissipada pelo condutor em função deslocamento normalizado Y/D para diferentes cargas de tração EDS - Para $f = 15,25$ Hz.

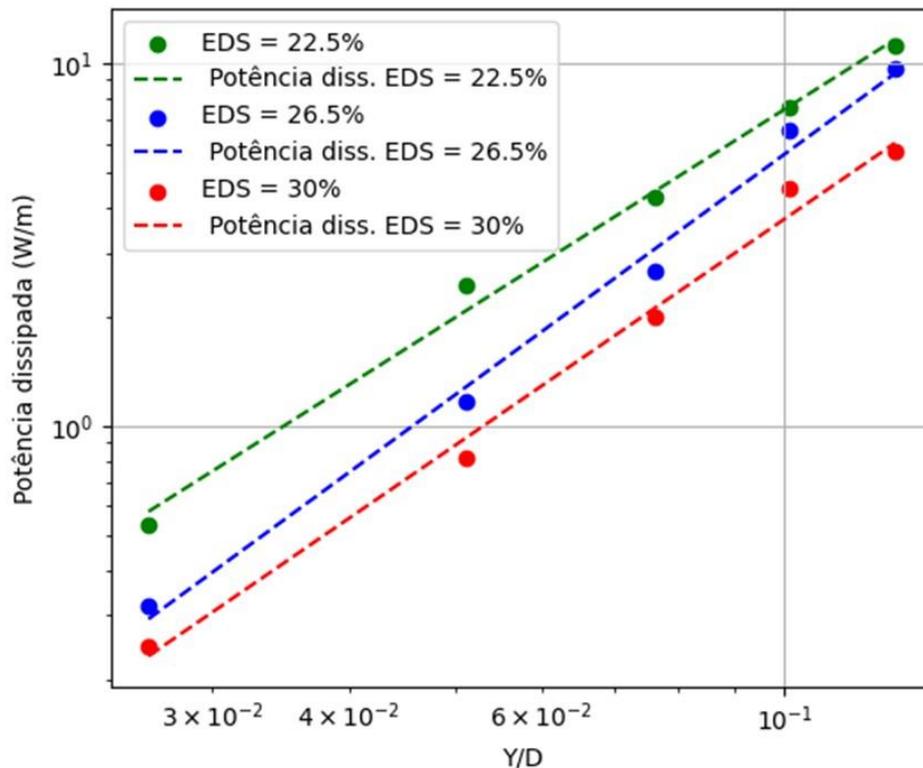


Figura 4.2.2 - Potência dissipada pelo condutor em função deslocamento normalizado Y/D para diferentes cargas de tração EDS - Para $f = 35,55$ Hz.

Conclusão:

- Quando a carga de tração é de 30% UTS, o sistema apresenta menor variação nas potências dissipadas e uma dissipação de energia mais constante em ambas as frequências.
- Quando a carga de tração é de 22,5% UTS, o sistema apresenta uma dissipação de energia menos eficiente, com maiores variações nas potências dissipadas, sugerindo maior sensibilidade e possível instabilidade do sistema.

Esses resultados indicam que, um cabo mais tensionado é mais resistente à deformação e vibrará com menor amplitude para a mesma energia de excitação. Portanto, para garantir um comportamento mais controlado e estável do sistema, seria mais vantajoso operar com cargas de tração mais altas (30% UTS), especialmente em condições de vibração com frequências variáveis.

Função de Transferência, $H(f)$

No contexto de sistemas dinâmicos e análise de resposta em frequência, a “Amplitude de resposta” pode ser considerada como a resposta do sistema à excitação como uma função da frequência. Ela representa a magnitude da saída do sistema para uma determinada frequência. O resultado na Figura 4.2.3 mostra como a amplitude da saída varia em função da frequência e foi observado que o pico mais alto fica em aproximadamente 24,37 Hz, indica a frequência natural de vibração do cabo. Nesta frequência, o cabo vibra com a maior amplitude, o que pode levar a fadiga e, eventualmente, à ruptura do material se as tensões forem excessivas.

Ela se considera como a função de transferência que descreve como a saída do sistema está relacionada à entrada em termos de frequência. É uma descrição do sistema em termos de sua resposta à excitação determinada a partir de dados experimentais.

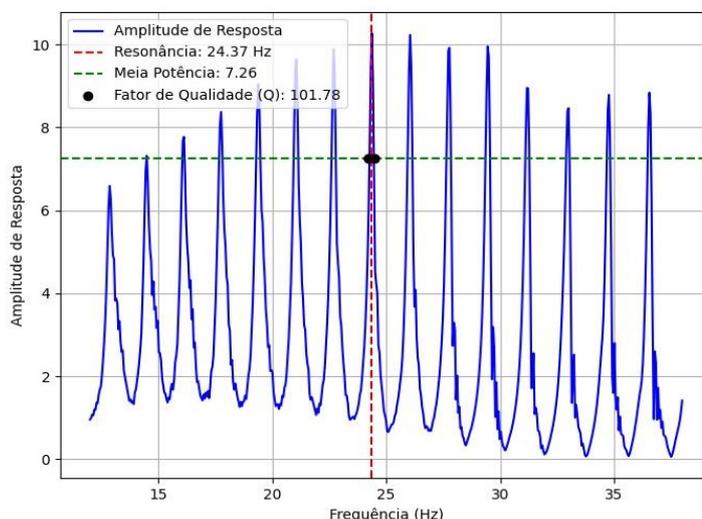
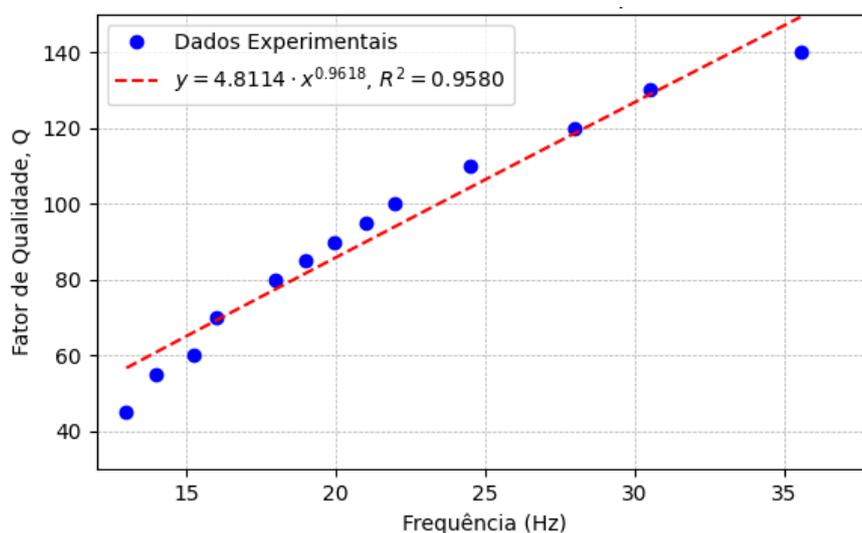


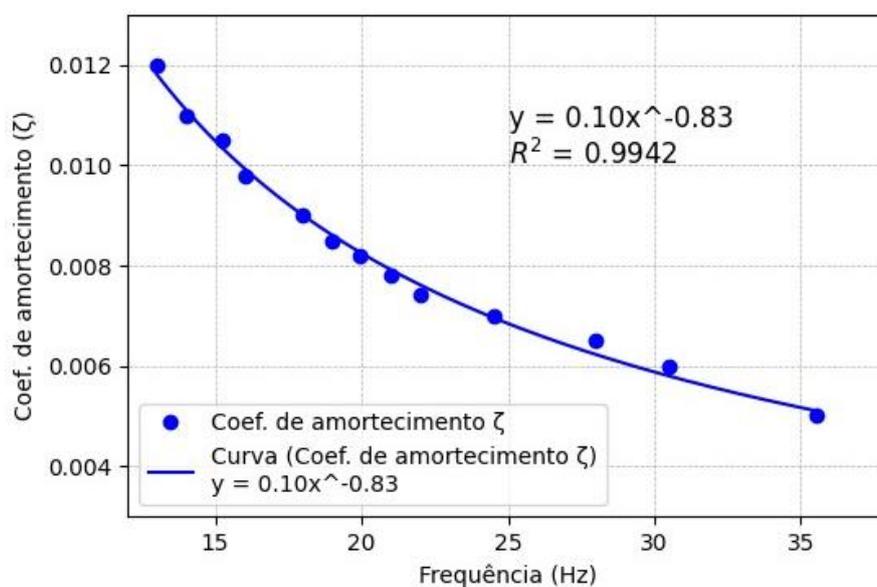
Figura 4.2.3 - Resposta em frequência do conductor CAL 1120 | 838 MCM.

Fator de qualidade Q e amortecimento ξ :

O fator de qualidade Q e amortecimento são as medidas da "resistência" à dissipação de energia em sistemas oscilatórios, como os cabos de transmissão. Um Q alto indica baixa perda de energia, enquanto um Q baixo indica maiores perdas. Conforme ao resultado da Figura 4.2.4 (a) observando uma relação quase linear entre o fator de qualidade Q e a frequência, como indicado pela equação da linha de tendência. Observou-se que, na Figura 4.2.4 (a) e (b), Q aumenta e ξ diminui com a frequência, sugerindo que, em frequências mais altas, o cabo condutor tem menor dissipação de energia relativa. Portanto, o comportamento do fator de amortecimento sugere a necessidade de precaução em relação a vibrações de alta frequência, onde a dissipação de energia não é tão eficiente.



(a)



(b)

Figura 4.2.4 - a) Fator de qualidade Q e b) Fator de amortecimento do Condutor CAL 1120 | 838 MCM.

Afim de demonstrar como o fator de amortecimento varia com a frequência sob diferentes condições de carga de tração no cabo condutor. A Figura 4.2.5 mostra a relação entre o fator de amortecimento (ζ) e a frequência (Hz) para dois valores diferentes carga de EDS (Every Day Stress), que são 30% e 26,5%. Foi observado que o fator de amortecimento diminui à medida que a frequência aumenta, tanto para EDS a 30% quanto para EDS a 26,5%. A curva para EDS de 26,5% mostra que o fator de amortecimento é menor do que para EDS de 30% na maioria das frequências. Isso sugere que, em condições de menor tensão, o sistema dissipa menos energia por ciclo de vibração, resultando em um fator de amortecimento menor.

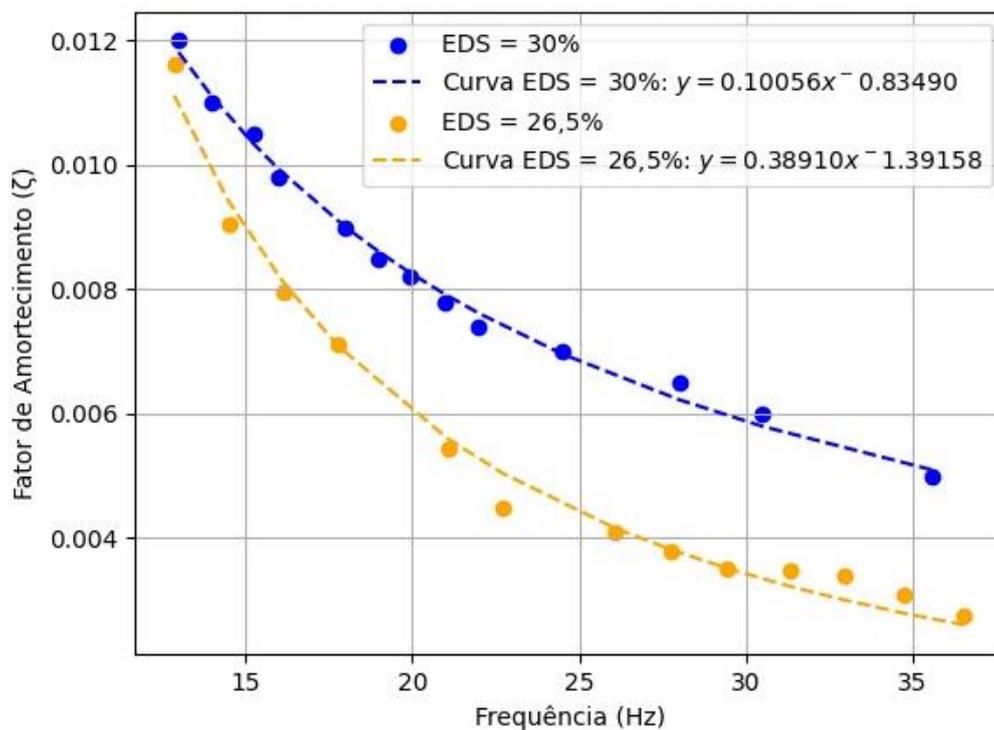


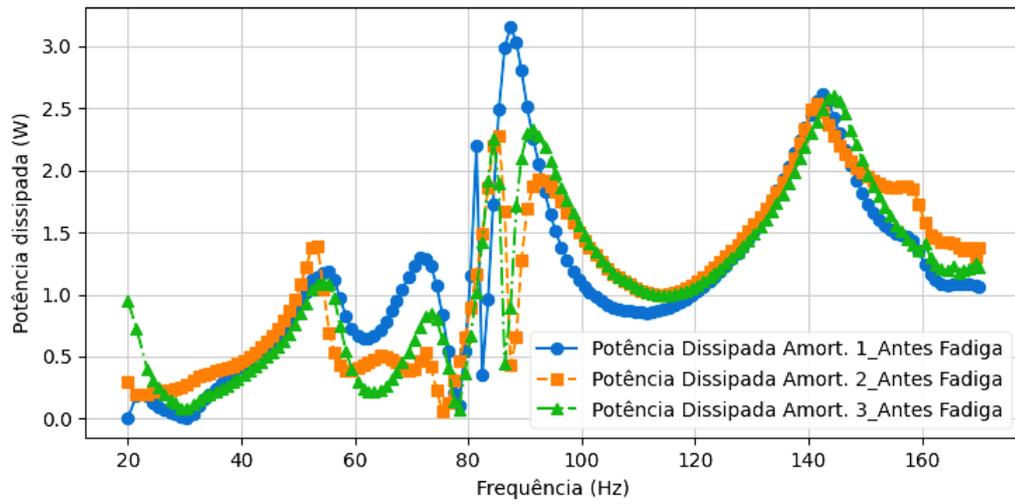
Figura 4.2.5 - Fator de amortecimento do Condutor CAL 1120 sob diferente valor de EDS (30 e 26,5%).

4.3 Comportamento Dinâmico dos Amortecedores Stockbridge

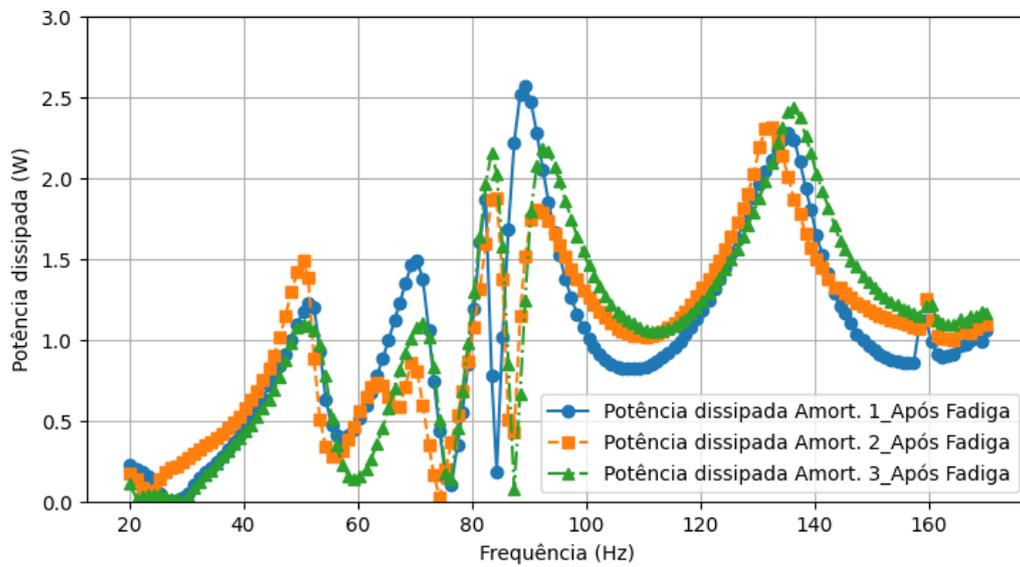
Foram realizados ensaios dinâmicos para avaliar o desempenho de três amortecedores Stockbridge F4000 antes e após a aplicação de 10^7 ciclos de fadiga. Durante os testes, as frequências de excitação foram ajustadas gradualmente, permitindo a análise detalhada da eficiência dos dispositivos em diferentes condições. Baseado na análise dos resultados na Figura 4.3.1 (a) e (b), observando que:

- O amortecedor é mais eficaz na faixa de frequência de 81 Hz a 142 Hz, pois nessa região a potência dissipada está acima da metade do valor máximo (1,578 W). Essa faixa de frequência é crucial para o desempenho do amortecedor. Fora desta faixa, a eficácia do amortecedor diminui, o que pode levar falhas no sistema.
- O pico de potência dissipada ocorre em 87 Hz antes da fadiga, com 3,156 W, e em 90 Hz após a fadiga, com 2,510 W.
- Após a fadiga, houve uma redução de 20,47% na potência dissipada no pico (de 3,156 W para 2,510 W). Essa redução significativa na potência dissipada sugere que o amortecedor está perdendo eficiência ao longo do tempo.
- Na análise da faixa de 81 Hz a 90 Hz, a potência média dissipada diminuiu 12,07% após a fadiga (de 2,667 W para 2,354 W).

Esses resultados mostraram uma redução significativa na capacidade de dissipação dos amortecedores após os ciclos de fadiga, com impacto mais evidente em frequências elevadas. Esse comportamento ressalta a necessidade de considerar a degradação por fadiga no planejamento de sistemas de amortecimento. Segundo Ferreira et al., (2024) , estudos comparativos corroboram esses achados, destacando variações de até 15% na eficiência pós-fadiga.



(a)



(b)

Figura 4.3.1 - Potência dissipada dos amortecedores dos tipos Stockbridge: a) Antes da Fadiga, b) Pós - Fadiga.

5 CONCLUSÃO

O estudo aborda o fenômeno das vibrações eólicas em cabos condutores de linhas de transmissão, destacando os desafios impostos por forças oscilatórias que podem levar à fadiga material e, eventualmente, à falha dos sistemas. Além disso, explora o papel do amortecimento, com ênfase nos amortecedores Stockbridge, como solução para dissipação de energia vibratória e garantia da estabilidade estrutural dos cabos. A pesquisa investiga a relação entre características como frequência e amplitude de vibração e a capacidade dos condutores e sistemas de amortecimento de mitigar esses efeitos. A seguir, são apresentadas as principais conclusões obtidas com base nos experimentos realizados e nas análises conduzidas:

- A dissipação de energia do condutor aumentou com a frequência. Para EDS de 30%, a potência dissipada foi de 0,0068 W/m na frequência de 15,25 Hz, enquanto na frequência de 35,55 Hz atingiu 0,015 W/m, representando um aumento de aproximadamente 120%;
- Amplitudes maiores resultaram em maior dissipação de energia. Em frequências próximas a 35,55 Hz, a dissipação com amplitude de 1 mm foi aproximadamente 25% maior do que com 0,7 mm, evidenciando a relação direta entre amplitude e energia dissipada;
- A dissipação de energia diminuiu com o aumento da carga de tração. Para EDS de 30%, a potência dissipada foi 15% menor em comparação a EDS de 22,5%, destacando o efeito de rigidez acrescida em condições de maior tensão no condutor;
- Após 10 milhões de ciclos de fadiga, a eficiência dos amortecedores diminuiu levemente. Na faixa de frequências entre 80 Hz e 100 Hz, a dissipação de energia foi cerca de 12,07% menor em comparação ao estado pré-fadiga, indicando que, embora ainda eficazes, os dispositivos sofreram degradação;
- Os amortecedores mostraram maior eficiência entre 81 Hz e 90 Hz, com dissipação de energia superior em até 30% em relação a frequências fora dessa faixa, reforçando a importância de ajustes específicos para essa faixa operacional.

Apesar dos avanços nos estudos sobre vibrações em cabos condutores, ainda existem lacunas significativas na literatura. Entre elas, destacam-se:

- A influência detalhada da carga de tração nas frequências naturais e na dissipação de energia, especialmente em condições de vibrações de alta frequência.
- A caracterização do desempenho de amortecedores Stockbridge sob diferentes níveis de fadiga acumulada.

- O impacto de condições ambientais extremas, como temperaturas muito baixas, no comportamento dinâmico dos cabos.

Este trabalho busca preencher essas lacunas ao investigar o comportamento dinâmico de cabos CAL 1120/838 MCM, com foco na dissipação de energia e na eficiência de amortecedores sob condições de fadiga.

TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se:

1. Explorar novos materiais para amortecedores, com foco em ligas avançadas que combinem leveza e alta eficiência de dissipação.
2. Investigar o impacto de condições ambientais extremas, como temperaturas extremamente baixas ou altas, na eficiência de amortecedores.
3. Desenvolver modelos computacionais para prever a eficiência de amortecimento em diferentes condições de carga dinâmica.
4. Realizar estudos experimentais em cabos com configurações geométricas mais complexas, considerando interações entre múltiplos condutores

LISTAS DE REFERÊNCIAS

- ADHIKARI, S.; WOODHOUSE, J. Identification of damping: Part 1, viscous damping. *Journal of Sound and Vibration*, v. 243, n. 1, p. 43–61, 24 maio 2001.
- AGGARWAL, R. K. et al. Overview of the condition monitoring of overhead lines. *Electric Power Systems Research*, v. 53, n. 1, 2000.
- AZEVEDO, C. R. F. et al. Fretting fatigue in overhead conductors: Rig design and failure analysis of a Grosbeak aluminum cable steel reinforced conductor. *Engineering Failure Analysis*, v. 16, n. 1, p. 136–151, Jan. 2009.
- AZEVEDO, C. R. F.; CESCO, T. Failure analysis of aluminum cable steel reinforced (ACSR) conductor of the transmission line crossing the Paraná River. *Engineering Failure Analysis*, v. 9, n. 6, 2002a.
- AZEVEDO, C. R. F.; CESCO, T. Failure analysis of aluminum cable steel reinforced (ACSR) conductor of the transmission line crossing the Paraná River. *Engineering Failure Analysis*, v. 9, n. 6, 2002b.
- BARBER, K. W. IMPROVED OVERHEAD LINE CONDUCTORS USING ALUMINIUM ALLOY 1120. In: *Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference*. IEEE, 1994. p. 528-534. [s.l: s.n.].
- BARRY, O. Finite element analysis of a single conductor with a Stockbridge damper under Aeolian vibration. Recommended Citation. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://digitalcommons.ryerson.ca/dissertations>>.
- BLESZYNSKI, M.; KUMOSA, M. New approach to moisture accumulation assessment. *Materials and Design*, v. 183, 2019.
- CAI, M. et al. Numerical Simulation of Aerodynamic Coefficients of Iced-Quad Bundle Conductors. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 30, n. 4, p. 1669–1676, 1 ago. 2015.
- CARDOU, Alain. Mechanical models for overhead electrical conductors in bending (with Matlab® applications). [s.l.], 2013.
- CHABART, O.; LILIE, J. L. Galloping of electrical lines in wind tunnel facilities. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 74–76, 1998.

- CHAN, J. EPRI transmission line reference book: Wind-induced conductor motion (“The Orange Book”). *Epri*, v. 3, n. 3, 2006a.
- CHAN, J. Updating the EPRI transmission line reference book: Wind-induced conductor motion (“The Orange Book”). *Epri*, v. 3, n. 3, 2006b.
- CIMINI, C. A.; FONSECA, B. Q. A. Temperature profile of progressive damaged overhead electrical conductors. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v. 49, n. 1, 2013.
- CIGRE SC22 WG01. 1989. “Report on Aeolian Vibration.” *Electra* Vol. 124, pp. 40-77. May.
- CIGRE, S., & IEEE PES T&D Committee. (1979). Guide on conductor self-damping measurement. *Electra*, (62), 79-90.
- CUI, X. et al. Study on the improvement of electrical conductivity and mechanical properties of low alloying electrical aluminum alloys. *Composites Part B: Engineering*, v. 110, 2017.
- DEN HARTOG, J. P. Vibration: A Survey of Industrial Applications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, v. 172, n. 1, 1958.
- DESAI, Y. M. et al. Static and Dynamic Behavior of Mechanical Components Associated with Electrical Transmission Lines -- III(B). *The Shock and Vibration Digest*, v. 22, n. 3, 1990.
- DESAI, Y. M. et al. Finite element modelling of transmission line galloping. *Computers and Structures*, v. 57, n. 3, 1995.
- DIANA, G. et al. On the measurement of overhead transmission lines conductor self-damping. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 15, n. 1, 2000.
- DIANA, G. Modelling of Aeolian Vibrations of a Single Conductor Plus Damper. *CIGRE presentation, Bangkok.*, 2011.
- DIANA, G. et al. A wireless monitoring system to identify wind induced vibrations in HV transmission lines. (CIGRE SEERC, Ed.) Em: *Anais...*In CIGRE SEERC Conference 2021 (pp. 1-10)., 21 jan. 2021. Disponível em: <<https://re.public.polimi.it/handle/11311/1194884>>. Acesso em: 20 fev. 2025.
- DIANA, G.; FALCO, M. On the forces transmitted to a vibrating cylinder by a blowing fluid - Experimental study and analysis of the phenomenon. *Meccanica*, v. 6, n. 1, 1971.

- EPRI: Transmission Line Reference Book: Wind-Induced Conductor Motion, 2nd edn. EPRI, Palo Alto (2009). 1018554.
- EPRI: Transmission Line Reference Book: Wind-Induced Conductor Motion, 1st edn. Electrical Power Research Institute, Palo Alto (1979).
- ERVIK, M. et al. Report on aeolian vibration. *Electra*, n. 124, 1989.
- ERVIK, M.; HORN, T.; JOHNSEN, R. Erection of and vibration protection on long fjord crossings in Norway. In: CIGRE. 1968.
- FERREIRA, J. et al. Fatigue Behavior Analysis and Life Prediction of Overhead Conductors Subject to Narrowband Vibration. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 38, n. 2, 2023.
- FERREIRA, J. L. A. et al. Evaluation of the accuracy and efficiency of the modified maximum variance method for multi-axial fatigue analysis under constant amplitude loading. *International Journal of Fatigue*, v. 188, 1 Nov. 2024.
- GOUDREAU, S. et al. Strain measurements on ACSR conductors during fatigue tests II - Stress fatigue indicators. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 25, n. 4, 2010.
- HAGEDORN, P. On the computation of damped wind-excited vibrations of overhead transmission lines. *Journal of Sound and Vibration*, v. 83, n. 2, 1982.
- HAGEDORN, P.; SCHÄFER, B. On non-linear free vibrations of an elastic cable. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, v. 15, n. 4–5, 1980a.
- HAGEDORN, P.; SCHÄFER, B. On non-linear free vibrations of an elastic cable. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, v. 15, n. 4–5, 1980b.
- HARD, A. R.; HOLBEN, R. D. Application of the Vibration Decay Test to Transmission Line Conductors. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-86, n. 2, 1967.
- HU, J. et al. Numerical investigation on galloping of iced quad bundle conductors. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 27, n. 2, 2012.
- HU, M. et al. Vibration suppression analysis of iced transmission lines under axial time-delay velocity feedback strategy. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, v. 15, n. 1, 1 jan. 2025.
- IEC 60104. Aluminium-magnesium-silicon alloy wire for overhead line conductors. Em: INTERNATIONAL STANDARD (Ed.). 02. ed. [s.l.] International Standard, 1967.

- IEC 62567. Overhead lines: methods for testing self-damping characteristics of conductors. Em: INTERNATIONAL STANDARD (Ed.). *International Standard*. 01. ed. [s.l.] International Standard, 2013. p. 74.
- IEC STD 61897. Overhead lines - Requirements and tests for Stockbridge type aeolian vibration dampers. Em: *International Standard*. traduced English. 01. ed. [s.l.] International Electrotechnical Committee, 1998. p. 1–44.
- IEE STANDARDS, B. IEEE Guide on Conductor Self-Damping Measurements. *IEEE Std 563-1978*, v. 1978, n. September, 1978.
- IEEE 664. IEEE guide for laboratory measurement of the power dissipation characteristics of aeolian vibration dampers for single conductors. Em: IEEE (Ed.). *IEEE*. IEEE ed. [s.l.] Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1993. p. 17.
- IEEE STD 563-1978. IEEE Guide on Conductor Self-Damping Measurements. Em: IEEE (Ed.). *IEEE*. IEEE Standards Board ed. [s.l: s.n.]1978.
- IEEE STD 664. IEEE Guide for Laboratory Measurement of the Power Dissipation Characteristics of Aeolian Vibration Dampers for Single Conductors. Em: *IEEE*. [s.l: s.n.]. 1978.
- IEEE STD 664-1980. Guide on the Measurement of the Performance of Aeolian Vibration Dampers for Single Conductors. Em: IEEE (Ed.). *New York*. [s.l: s.n.]
- JOÃO M. MIGUEL DOS SANTOS. Modelling and analysis of wind-excited vibrations of transmission lines. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto (Portugal). [s.l: s.n.]. Disponível em: <repository-aberto.up.pt>. Acesso em: 17 março. 2024.
- KALOMBO, R. B. et al. Comparative Fatigue Resistance of Overhead Conductors Made of Aluminium and Aluminium Alloy: Tests and Analysis. Em: *Procedia Engineering, Anais...Elsevier Ltd*, 2015.
- KALOMBO, R. B. et al. Assessment of the fatigue failure of an All-Aluminium Alloy Cable (AAAC) for a 230 kV transmission line in the Center-West of Brazil. *Engineering Failure Analysis*, v. 61, p. 77–87, 1 mar. 2016a.
- KALOMBO, R. B. et al. Assessment of the fatigue failure of an All-Aluminium Alloy Cable (AAAC) for a 230 kV transmission line in the Center-West of Brazil. *Engineering Failure Analysis*, v. 61, p. 77–87, 1 mar. 2016b.

- KALOMBO, R. B. et al. Influence of the catenary parameter (H/w) on the fatigue life of overhead conductors. *Tribology International*, v. 108, 2017.
- KARABAY, S. Modification of AA-6201 alloy for manufacturing of high conductivity and extra high conductivity wires with property of high tensile stress after artificial aging heat treatment for all-aluminum alloy conductors. *Materials and Design*, v. 27, n. 10, 2006a.
- KARABAY, S. Modification of AA-6201 alloy for manufacturing of high conductivity and extra high conductivity wires with property of high tensile stress after artificial aging heat treatment for all-aluminum alloy conductors. *Materials and Design*, v. 27, n. 10, 2006b.
- KASAP, H. Investigation of stockbridge dampers for vibration control of overhead transmission lines a thesis submitted to the graduate school of natural and applied sciences of middle east technical university. Dissertação de Mestrado. Middle East Technical University (Turkey). [s.l: s.n.]. 2012
- KATOPODES, N. D. Free-Surface Flow: *Environmental Fluid Mechanics*. [s.l.] Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2019.
- LARA-LÓPEZ, A.; COLÍN-VENEGAS, J. Endurance of dampers for electric conductors. *International Journal of Fatigue*, v. 23, n. 1, 2001.
- LI, J.-X.; MCCLURE, G.; WANG, S.-H. Ensuring the Structural Safety of Overhead Transmission Lines by Design. *Journal of Aerospace Engineering*, v. 34, n. 3, 2021.
- MCCOMBER, P.; PARADIS, A. A cable galloping model for thin ice accretions. *Atmospheric Research*, v. 46, n. 1–2, 1998.
- MEIROVITCH, Leonard. *Fundamentals of vibrations*. [s.l.] Boston, McGraw-Hill, 2001.
- MEYNEN, S. et al. On the numerical simulation of vortex-induced vibrations of oscillating conductors. *Journal of Fluids and Structures*, v. 21, n. 1 SPEC. ISS., 2005a.
- MEYNEN, S. et al. On the numerical simulation of vortex-induced vibrations of oscillating conductors. *Journal of Fluids and Structures*, v. 21, n. 1 SPEC. ISS., 2005b.
- MOHTAR SITI NORASMAH.; JAMAL MD NOAH.; SULAIMAN MARIZAN. Analysis of All Aluminum Conductor (AAC) and All Aluminum Alloy Conductor (AAAC). Em: IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON, *Anais...*2004.

- PAPAILIOU KONSTANTIN O. *International Council on Large Electric Systems (CIGRE). Study Committee B2: Overhead Lines*. [s.l.] Springer International Publishing Switzerland, 2007.
- RAO SINGIRESU S.; PHILIP GRIFFIN. *Mechanical Vibrations*. Sixth Edition ed. [s.l.] Pearson Education / Prentice Hall, 2018.
- ROCHA, D. Estudo do Comportamento Estrutural de Cabos em Linhas Elétricas Aéreas de Muito Alta Tensão. Departamento de Engenharia Civil-Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- ROSHKO, A. On the development of turbulent wakes from vortex streets. 1954. California Institute of Technology, Washington, 1954. Disponível em: <<https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/AD0004228.pdf>>. Acesso em: 23 fev. 2025.
- SAUTER, D.; HAGEDORN, P. On the hysteresis of wire cables in Stockbridge dampers. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, v. 37, n. 8, 2002.
- STROUHAL, V. Ueber eine besondere Art der Tonerregung. *Annalen der Physik*, v. 241, n. 10, 1878.
- TOMPKINS, J. S. et al. Quantitative Relationships in Conductor Vibration Damping. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*. Part III: Power Apparatus and Systems, v. 3, n. 75, p. 879-896, 1956. [s.l: s.n.]. 1956.
- UMBERTO. *State of the Art for Testing Self-Damping Characteristics of Conductors for Overhead Lines: Working Group B2.25*. Cigré, 2011. [s.l: s.n.]
- VAJA, N. K.; BARRY, O. R.; TANBOUR, E. Y. On the modeling and analysis of a vibration absorber for overhead powerlines with multiple resonant frequencies. *Engineering Structures*, v. 175, 2018.
- VALIEV, R. Z.; MURASHKIN, M.; SABIROV, I. A nanostructural design to produce high-strength Al alloys with enhanced electrical conductivity. *Scripta Materialia*, v. 76, 2014.
- VECCHIARELLI, J.; CURRIE, I. G.; HAVARD, D. G. Computational analysis of aeolian conductor vibration with a stockbridge-type damper. *Journal of Fluids and Structures*, v. 14, n. 4, 2000.

- VENKATA, Y. O.; GUPTA, V.; ATTRI, A. Experimental vortex-induced vibration of spring mounted cylinder: Achieving Lock-In. Em: 5th International Conference on Ship and Offshore Technology ICSOT, m, *Anais...*2017.
- WANG, J. Overhead transmission line vibration and galloping. Em: 2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application, ICHVE 2008, *Anais...*2008.
- WANG, Z.; LI, H. N.; SONG, G. Aeolian Vibration Control of Power Transmission Line Using Stockbridge Type Dampers - A Review. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, v. 21, n. 1, 2021.
- WHITE FRANK M. *Fluid Mechanics*. Seventh ed. New York: McGraw-Hill Education, 2010.
- ZONDI, Z.; KAUNDA, M.; NGONDA, T. Characteristics of the asymmetric Stockbridge damper. Em: 12th South African Conference on Computational and Applied Mechanics, SACAM 2020, *Anais...*2020.

APÊNDICES

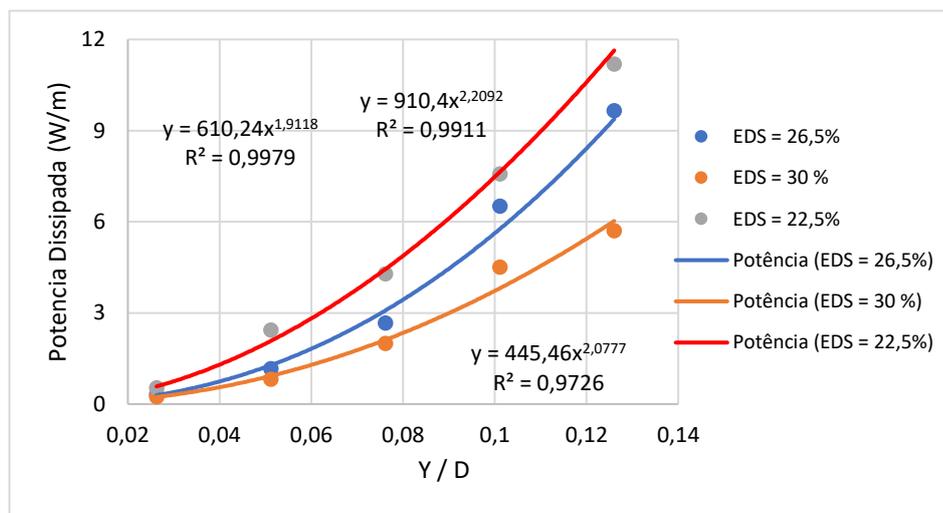
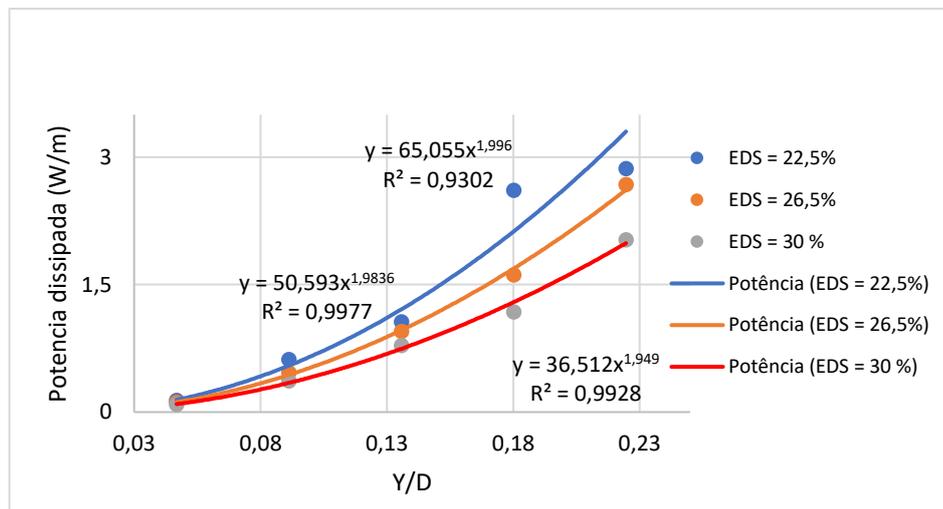
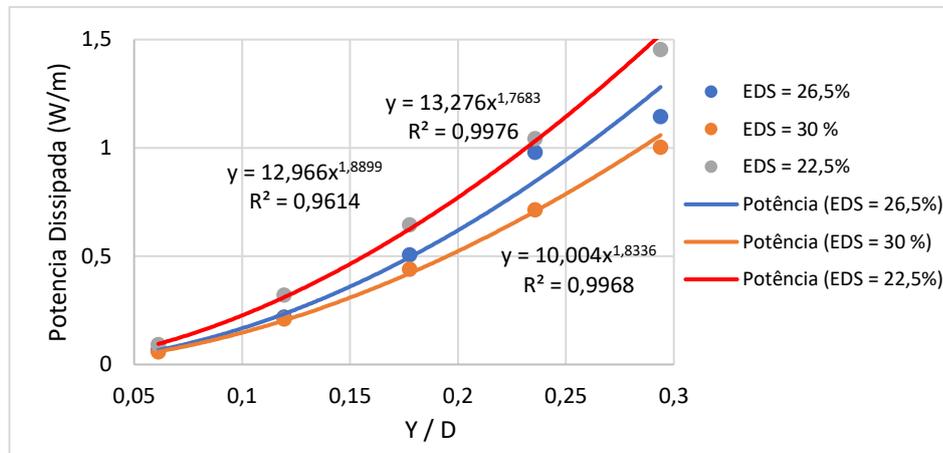


Figura A1- Potência dissipada do condutor por unidade de comprimento versus amplitude de deslocamento normalizado Y/D sob diferente carga EDS e frequências. a) 15.25 Hz b) 19.95 Hz e c) 35.50 Hz.

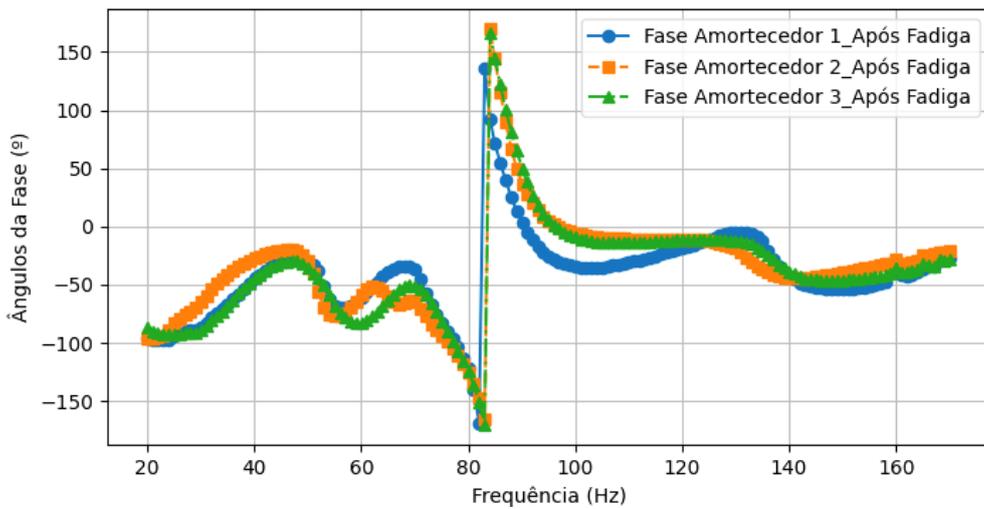
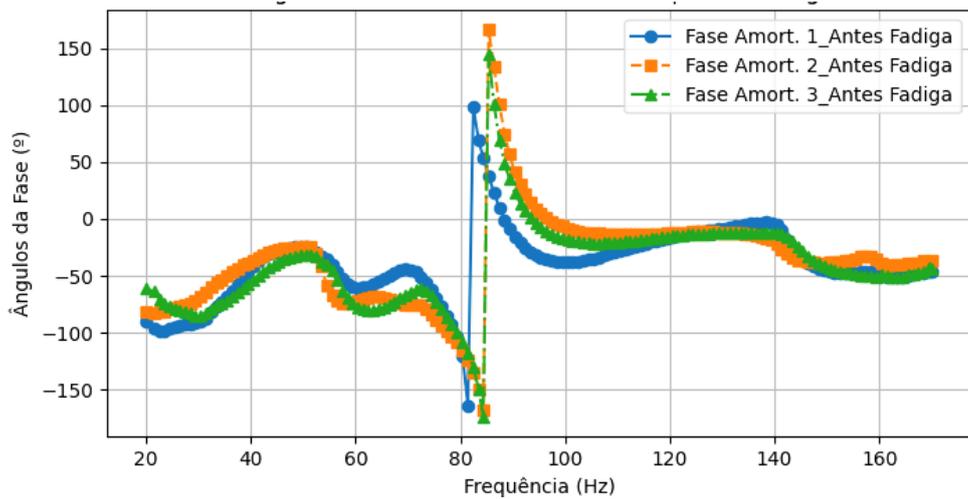


Figura A2 - Ângulo de Fase ($^{\circ}$) dos amortecedores Stockbridge a) Antes da Fadiga, b) Pos - Fadiga.

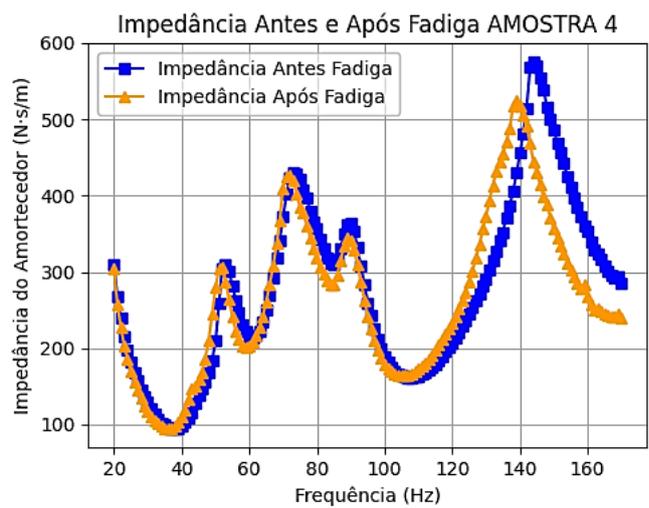
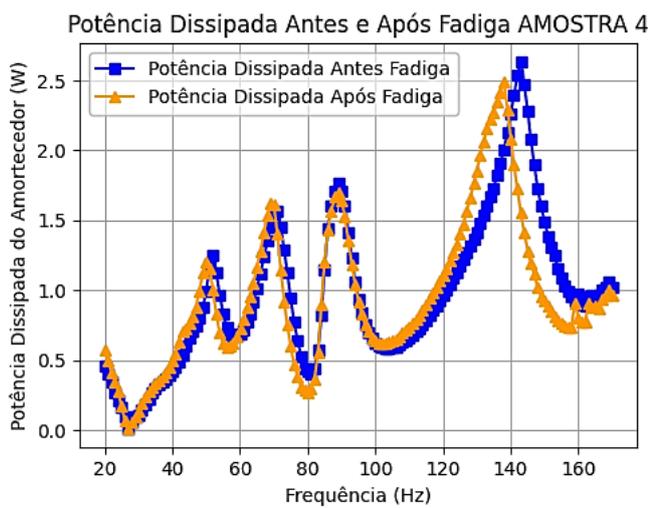
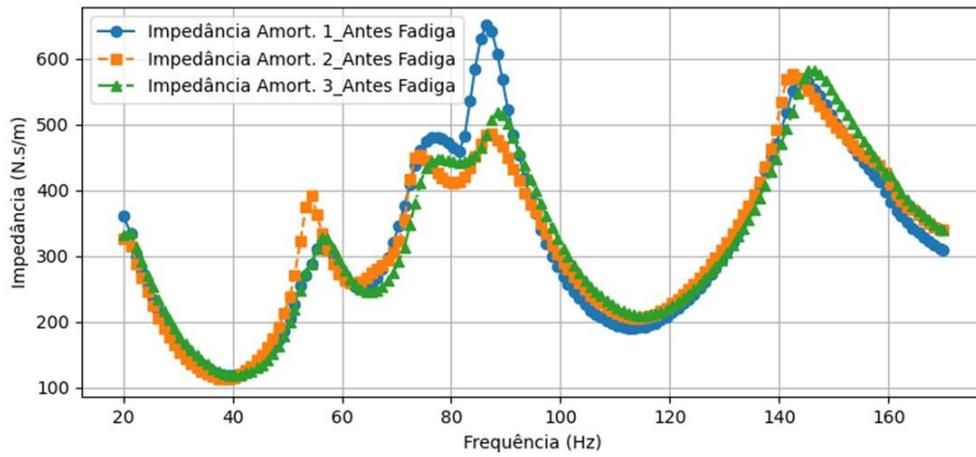
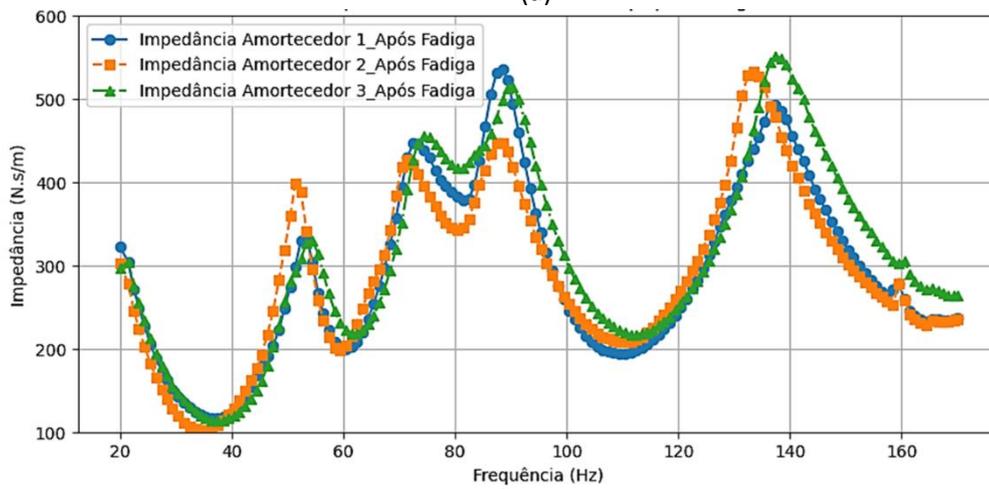


Figura A3. Potência dissipada e Impedância A4 do Amortecedor Stockbridge versus frequências - Ensaio Antes e Após fadiga.



(a)



(b)

Figura A4 - Impedância dos amortecedores dos tipos Stockbridge: a) Antes da Fadiga, b) Pos - Fadiga.

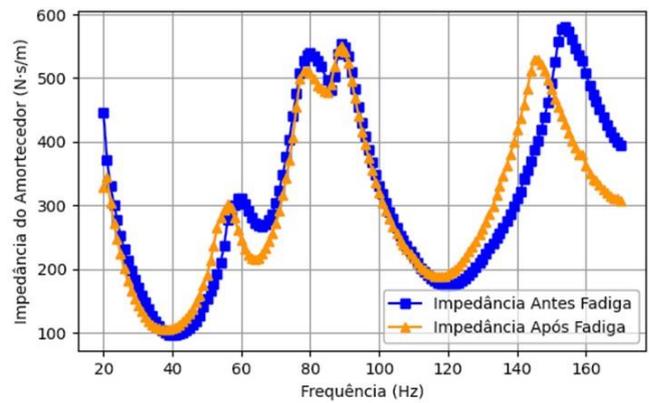
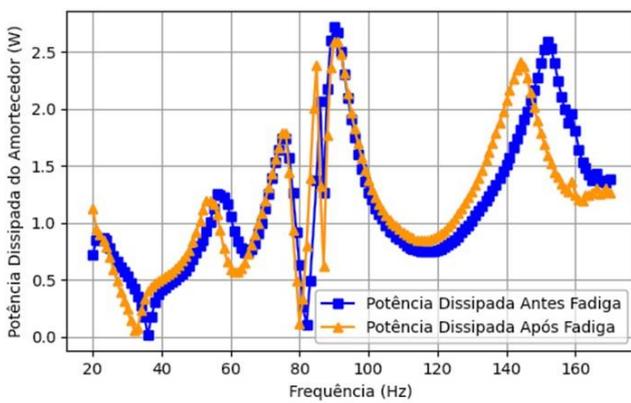


Figura A5. Potência dissipada e Impedância A5 do Amortecedor Stockbridge versus frequências - Ensaio Antes e Após fadiga

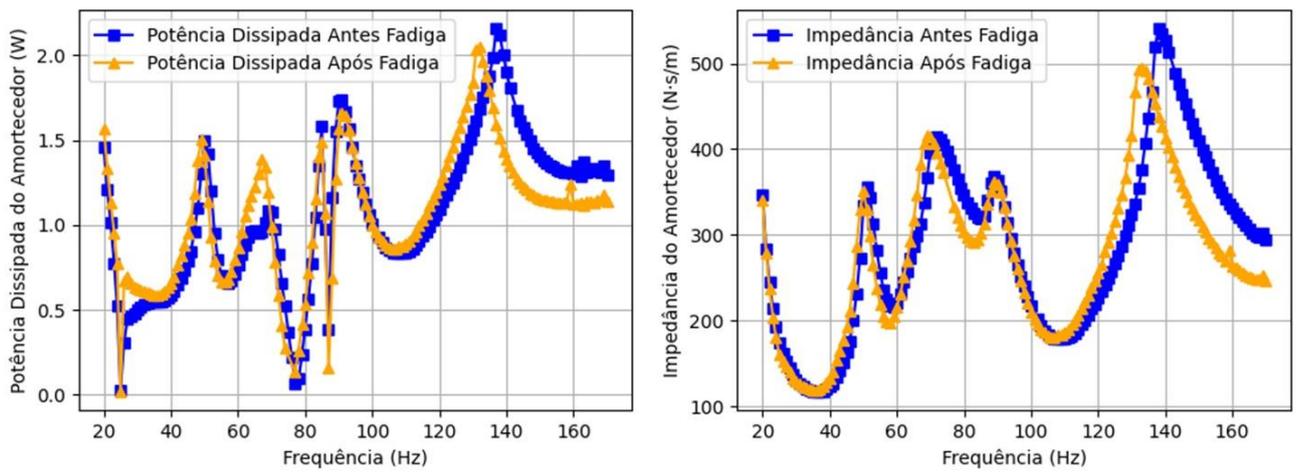


Figura A6. Potência dissipada e Impedância A6 do Amortecedor Stockbridge versus frequências - Ensaio Antes e Após fadiga.

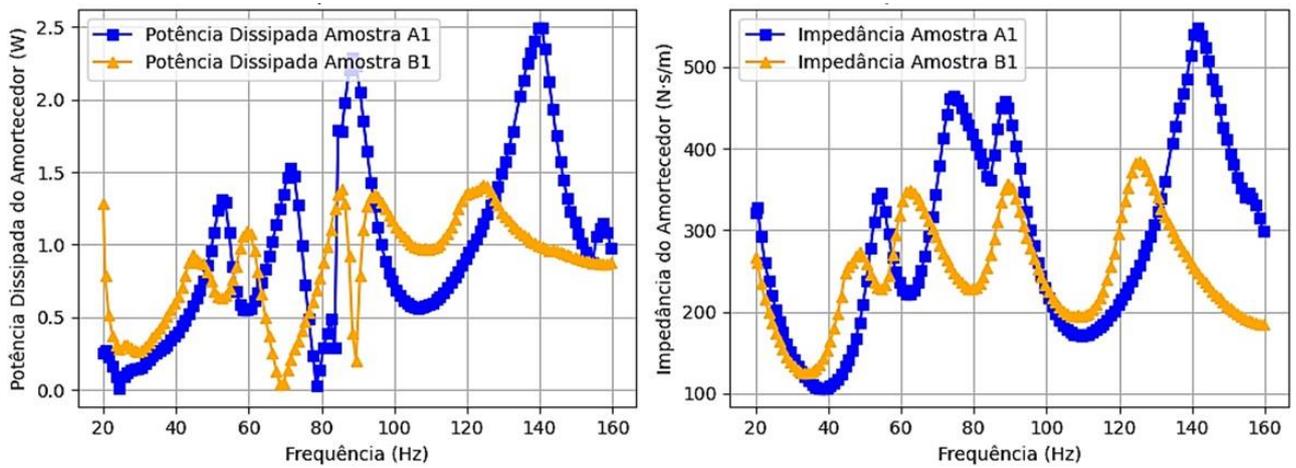


Figura A7. Potência dissipada e Impedância do 2 Amortecedores Stockbridge com rigidez diferente em função das frequências.

Tabela A1. Resultado do Ensaio da caracterização do Amortecedor A1

Freq. (Hz)	Fase Após Fadiga (°)	Fase Antes Fadiga (°)	Impedância Após Fadiga (N.s/m)	Impedância Antes Fadiga (N.s/m)	Potência Diss. Após (W)	Potência Diss. Antes(W)
20	-96,84857284	-90,12320651	323,0149692	361,1036473	0,228127213	0,004454136
21	-97,67361872	-96,52291625	304,5867413	333,6049241	0,200730178	0,186866828
22	-97,96991916	-98,03447128	272,0524871	300,023727	0,186462796	0,207173603
23	-97,58162974	-97,87155078	249,3620382	277,0897496	0,162730475	0,187501871
24	-95,44179292	-96,14322603	227,5598504	254,7789528	0,105745028	0,133366921
25	-92,88950829	-94,61426768	206,3559483	233,7707914	0,051316028	0,092953029
26	-90,56615794	-93,7535887	188,380312	215,7440586	0,009238429	0,070101645
27	-89,14065646	-92,95065214	173,587038	200,0845322	0,012925176	0,051133359
28	-89,27135214	-92,49058425	162,5626206	187,9092755	0,010265391	0,040543434
29	-88,18909499	-91,19879056	151,610784	175,4602258	0,023800891	0,018234165
30	-85,33286011	-90,40848302	143,077655	164,9294125	0,057820538	0,005840408
31	-80,61467466	-87,31967337	135,70749	156,0753557	0,109958864	0,036262926
32	-76,15992961	-81,98483794	129,5588676	148,2703763	0,154025876	0,102755241
33	-72,2283429	-77,03844904	124,4170026	141,0070985	0,188815494	0,157255039
34	-69,05329528	-73,20574981	120,9967953	135,3995202	0,215124841	0,194562704
35	-65,13184457	-68,31815518	118,2253434	129,5862776	0,247274901	0,238133616
36	-60,72131134	-62,82805589	116,8650533	124,8225229	0,284335261	0,283602863
37	-56,09554518	-57,14363089	117,0083273	121,3296581	0,324758146	0,327504187
38	-51,40042186	-51,48690913	118,7985349	119,1609408	0,368839487	0,369287738
39	-47,46448774	-46,60145576	121,6923668	118,4503585	0,409508639	0,405105404
40	-43,2631632	-41,43402827	127,0901485	118,9993392	0,460668046	0,444084895
41	-39,40782531	-36,95496092	133,8543355	121,0764866	0,514826531	0,481638356
42	-36,0196109	-33,02636925	143,4563644	124,6385898	0,577790263	0,520431462
43	-33,11601207	-30,39655856	154,9314997	129,8446588	0,646208476	0,557758531
44	-30,93204198	-29,47044295	168,4262599	136,4029229	0,719587065	0,591510142
45	-29,39743506	-29,67568331	179,4807559	142,3988442	0,778974137	0,616401152

46	-27,64474532	-28,27258144	191,3241231	149,9481345	0,844274195	0,657923988
47	-26,18607132	-25,95277596	204,0683959	159,904029	0,912267395	0,716367169
48	-25,86125484	-24,49537067	222,7785894	171,8250886	0,998689095	0,779126544
49	-27,34162835	-23,86349791	248,9022793	186,2090603	1,101334864	0,848619986
50	-30,74967593	-24,18383549	275,1822177	204,8141744	1,17806147	0,931071197
51	-34,22441176	-25,05585941	298,7041358	225,7303663	1,229944767	1,018853567
52	-42,87123328	-28,70859681	330,5993815	255,7840334	1,206408643	1,117664203
53	-55,94733007	-32,23837373	335,1511144	271,0776314	0,93510874	1,142676843
54	-65,25181685	-34,86475225	304,0274555	288,1049097	0,634776071	1,177899288
55	-69,21998605	-39,80585459	267,8636486	310,4073387	0,474215974	1,188249244
56	-70,19162145	-45,83154658	243,2688866	321,70897	0,411407629	1,117510592
57	-69,3933021	-52,07064101	223,1787426	317,677211	0,391947982	0,973750406
58	-66,93749389	-56,90050005	209,4554084	302,398394	0,409486127	0,824049791
59	-63,39275545	-59,41537232	201,8232105	284,4002823	0,451038356	0,722158072
60	-58,78535566	-60,26473368	199,6644034	269,8075959	0,51637331	0,667926063
61	-53,84403818	-60,06436324	202,6017318	258,7472576	0,59643917	0,644395868
62	-49,71931079	-59,23548563	209,2959345	252,5350996	0,67512276	0,644585499
63	-45,02876712	-57,37298864	220,8135105	249,4308546	0,778823554	0,671245124
64	-41,11968247	-55,00981146	236,2409696	251,3416078	0,887973334	0,719201279
65	-37,92286021	-52,25533957	254,6929773	257,1977891	1,002610064	0,785806023
66	-35,60355675	-49,49062923	276,5455386	267,5370681	1,121849866	0,867324295
67	-34,31747309	-47,25971866	297,4348315	279,6039807	1,225581004	0,946894589
68	-33,75639695	-45,40196183	325,4990217	297,3223723	1,349955425	1,041697349
69	-34,73158747	-44,24852387	357,0828336	319,7380108	1,463817489	1,142897913
70	-40,705049	-44,57008235	394,5539095	346,3792151	1,49122328	1,231232925
71	-50,13406038	-46,47675017	430,3358975	376,5319108	1,375268986	1,293647016
72	-61,63618787	-50,71488259	447,0176319	409,3697291	1,059210164	1,292759501
73	-70,40058426	-55,45940525	445,8619432	437,1585954	0,746372661	1,236223691
74	-78,51258829	-62,11177394	439,5658265	461,6135516	0,43695259	1,077164625

75	-85,96310216	-69,2915596	430,4757147	475,2405763	0,151208179	0,838527883
76	-92,85874511	-76,76862241	414,7658074	481,1223422	0,103391843	0,54958896
77	-100,0284494	-85,04319178	402,5939695	481,0918299	0,349905209	0,207506396
78	-106,3130295	-92,53813603	395,5223251	477,7886014	0,55501837	0,105628896
79	-116,0433444	-103,3293638	389,1589373	471,9268089	0,852896017	0,54321845
80	-128,6368337	-119,9477948	382,6457005	464,6958502	1,193029745	1,158236483
81	-148,1132413	-163,9533927	378,9721364	458,2626712	1,60680832	2,1988775
82	170,4078117	98,31031475	380,0275162	483,140377	1,870504514	0,348592893
83	113,3628497	68,9256658	397,3796032	536,6197901	0,786523216	0,962956228
84	84,879294	53,6592366	426,4051364	584,5456644	0,189967645	1,72846587
85	64,15980563	37,56941443	467,276629	630,1655942	1,016518176	2,492517042
86	47,99777469	23,09818318	506,0325922	651,5401032	1,689757973	2,991308107
87	33,05801979	10,04211251	531,8779026	641,932322	2,224875506	3,156411655
88	19,67114939	-1,071475466	536,0579094	607,4935259	2,519786312	3,033989067
89	9,966925782	-8,769535882	523,5122097	568,3996812	2,574540345	2,806528258
90	-0,036619832	-16,22635401	495,1137011	523,3426053	2,473088456	2,510722283
91	-7,624304391	-21,0304086	460,8067217	484,53589	2,281209474	2,259054511
92	-14,03531127	-25,15166284	424,6919821	453,8779289	2,058414265	2,052532078
93	-19,05429825	-28,91501515	393,1562485	418,6779859	1,855889969	1,830444788
94	-23,3154894	-31,96953042	363,6747968	387,7158551	1,668405401	1,643238991
95	-26,13873447	-33,84706749	340,1950795	364,3361713	1,525479698	1,511476113
96	-29,04066331	-35,57821993	316,0891499	340,3684627	1,380415007	1,382817093
97	-30,8282058	-36,79566019	294,7288571	318,7832782	1,264145353	1,27509382
98	-32,6131255	-37,74735143	276,1295288	300,0559488	1,161845668	1,185167399
99	-33,87602749	-37,90042964	260,2071712	283,6422905	1,078962118	1,117844606
100	-34,61223993	-37,93698481	246,3354648	269,4227691	1,012650461	1,061383777
101	-35,22061854	-37,68347551	235,7907811	258,1214049	0,962176899	1,020347671
102	-35,33957312	-37,30379895	225,3591967	246,3360385	0,9180995	0,978620954
103	-35,45855502	-36,53523873	216,0511949	235,6734818	0,878930769	0,945724902

104	-35,25367666	-35,74900198	208,8965536	226,0429546	0,851947497	0,916195708
105	-34,86413731	-34,84834591	202,8234509	217,6708816	0,831208582	0,892201292
106	-34,20761952	-33,65306279	199,4437701	211,4774238	0,82370031	0,879145553
107	-33,32354714	-31,97892876	197,2122199	206,4780994	0,822957128	0,874629189
108	-32,281834	-30,60933922	195,3622422	201,5851449	0,824908817	0,866485345
109	-31,54829899	-29,50492494	194,5972532	197,676572	0,828238923	0,859243531
110	-30,62294495	-28,05359168	194,7168232	193,9935661	0,836831123	0,85498334
111	-29,52642637	-26,74233195	196,1582402	191,5594503	0,852402548	0,854333006
112	-28,62456818	-25,5235803	198,301905	190,6894528	0,869312076	0,859390706
113	-27,34510981	-24,14907302	201,6276562	190,3100626	0,894376371	0,867202649
114	-26,04251076	-22,68290459	205,9713211	191,1137482	0,924168438	0,880574132
115	-24,66846793	-21,34328591	211,1667346	192,6570066	0,958176497	0,896051395
116	-23,24527505	-20,0298132	217,2347139	195,3194158	0,996855501	0,916422927
117	-22,00207133	-19,06530852	223,8212974	198,2950152	1,036322261	0,935950367
118	-20,57210291	-17,8255472	231,1894122	202,5942458	1,080881897	0,963065087
119	-19,24313932	-16,60780642	240,3604452	207,9390685	1,133191491	0,995092804
120	-17,75273739	-15,60958793	249,5643694	214,0682889	1,186751843	1,029454939
121	-16,35697455	-14,60746256	259,9492375	220,6087993	1,245712504	1,066083655
122	-14,74674378	-13,54621507	272,8392305	227,6744036	1,317454928	1,105201739
123	-13,56812632	-12,82235162	283,3703797	234,0581976	1,375581869	1,139633599
124	-11,97120075	-12,00718219	297,3882498	242,189723	1,452547845	1,182859591
125	-10,44457149	-11,27307345	312,8645724	251,5345406	1,536449366	1,231841015
126	-8,670962591	-10,61584532	329,2200597	261,2688635	1,624994387	1,282229039
127	-6,978578299	-9,989899456	347,4001974	271,6682617	1,721942823	1,335976974
128	-5,571504672	-9,440233146	361,8353727	281,2923554	1,798453346	1,385612924
129	-4,834035478	-8,917532423	378,4400179	293,7159716	1,883302896	1,448872201
130	-4,426874237	-8,195772665	395,4162743	306,7804563	1,968806371	1,515970769
131	-4,585935684	-7,473084001	410,5670596	320,9844111	2,043989155	1,589034054
132	-5,449927303	-6,670673368	425,8514077	336,3919158	2,117126462	1,668349314

133	-7,061797325	-5,838264543	440,0616253	352,8306856	2,18096274	1,752607955
134	-9,339200987	-4,982960925	454,2989188	368,6724398	2,238214242	1,833817455
135	-15,51317297	-4,249644486	474,0376968	387,3910545	2,279293011	1,92891082
136	-24,10134365	-4,100828323	492,1417676	407,6274875	2,24177901	2,029898348
137	-31,29886048	-3,194817379	493,9392711	429,6033536	2,106923668	2,141823799
138	-36,93259182	-2,84983818	486,8378268	450,5494025	1,942807091	2,246833203
139	-40,40863905	-3,195773606	475,8385339	469,9912682	1,809427525	2,343339933
140	-43,74543239	-5,284418157	456,7092415	492,510229	1,648676955	2,448608431
141	-46,0851547	-9,765131588	440,7662698	519,5524265	1,52744558	2,555189764
142	-48,5034515	-17,82464562	426,218192	551,804973	1,410621646	2,620988611
143	-50,78888747	-25,92197158	408,6984969	569,5155796	1,289946339	2,557273126
144	-51,69366898	-31,5997713	392,0804558	569,7042658	1,213993828	2,423460772
145	-52,19546932	-35,08401476	380,6771353	564,1858116	1,165196587	2,305682095
146	-52,9011918	-38,55957022	366,9393382	553,6138748	1,105438987	2,162507003
147	-53,97803943	-41,22115837	353,3848295	542,9991349	1,037839402	2,040184555
148	-53,84121708	-43,3775584	341,1995631	529,7976643	1,005501281	1,92344662
149	-53,89992939	-45,10679839	329,7053399	515,7445697	0,970203426	1,818208542
150	-53,85883897	-46,52141255	318,828415	501,2612844	0,939175622	1,722925839
151	-53,77223217	-47,18243826	310,2112936	489,8531813	0,915644195	1,663162828
152	-53,28715213	-47,76005371	300,4409051	476,6356054	0,896975803	1,600582745
153	-52,75308597	-47,74368857	291,4404107	464,279581	0,88090207	1,5594773
154	-51,9855093	-47,62200192	283,0451049	453,1453235	0,870550433	1,525686866
155	-51,17408282	-47,37857398	275,341391	441,8510229	0,86213711	1,494638355
156	-50,26984773	-46,79773468	269,1495438	432,8930125	0,859154983	1,480662843
157	-49,07497442	-45,99201824	262,6556884	423,2809312	0,85929876	1,46965501
158	-35,58606099	-45,74897278	271,3006474	412,4478239	1,099745127	1,438608403
159	-36,11641153	-47,05394874	279,1355405	398,0052155	1,127290793	1,354937957
160	-40,18449956	-49,41129294	260,9137465	381,9246725	0,99580668	1,241110038
161	-42,20418652	-51,07247693	246,2995762	369,4744717	0,911040732	1,159234476

162	-41,82565744	-51,52881553	240,0418776	360,297527	0,893207693	1,119357704
163	-40,16491058	-51,58949493	236,0673978	351,0034956	0,90092208	1,089072511
164	-38,34739722	-51,27604389	233,2596028	342,3483612	0,91356769	1,069395875
165	-34,57379962	-49,47161717	235,6887509	336,14671	0,969883784	1,090732911
166	-34,43987327	-48,60085	235,934287	328,9969052	0,971693258	1,086357381
167	-31,62397749	-47,8552119	234,820089	322,9758535	0,998623413	1,082473955
168	-29,78037281	-46,8698888	234,3531692	316,6165919	1,015985772	1,08094307
169	-32,43343688	-46,10280391	235,4725423	310,8777985	0,992577709	1,076248704
170	-26,42576634	-46,53805089	236,8964425	308,3731455	1,059010552	1,058440341

Tabela A2. Resultado do Ensaio da Caracterização do Amortecedor A2.

Freq. (Hz)	Fase Após Fadiga (°)	Fase Antes Fadiga (°)	Impedância Após Fadiga (N.s/m)	Impedância Antes Fadiga (N.s/m)	Potência Diss. Após (W)	Potência Diss. Antes(W)
20	-95,79716766	-81,32771226	303,1220297	326,6839142	0,18004684	0,292528385
21	-95,88392473	-82,74277038	278,5520977	314,8689412	0,14097879	0,196190504
22	-94,26358527	-81,39513989	246,654197	287,2244611	0,090659869	0,212418035
23	-92,08610728	-81,2894837	224,1872384	266,7739512	0,040346973	0,199697798
24	-85,72407286	-79,36826074	203,2219943	245,4926723	0,073984072	0,221697457
25	-81,22000701	-77,94137274	183,1353302	224,0106544	0,138287818	0,231303422
26	-77,12574569	-76,8192751	166,1627089	205,4141251	0,183790458	0,232472775
27	-73,81333613	-75,81867286	151,5256843	189,5688089	0,209664508	0,230543654
28	-71,58172888	-74,42115467	140,0961528	177,2296978	0,219757627	0,236342214
29	-67,38269929	-71,66425123	128,9878362	164,3975051	0,246350017	0,256876286
30	-62,58420447	-68,64159196	119,4924362	152,9993659	0,273256166	0,276764325
31	-57,06510762	-64,41920312	112,208899	143,4848323	0,303131288	0,307852532
32	-51,89237307	-59,92796436	107,0637676	136,1607176	0,328412337	0,339112226
33	-47,16519226	-56,32208206	103,7582454	129,5911273	0,350718426	0,357309327
34	-43,37786598	-53,38850895	102,5224172	124,6968852	0,370586178	0,369884734
35	-39,36321734	-50,12537579	102,9416354	119,831825	0,395834492	0,382106167
36	-35,84378816	-46,76485438	105,2455412	116,011857	0,424440752	0,395360003
37	-32,92019396	-43,62478074	109,3347718	113,7641008	0,456611345	0,409701214
38	-30,40452256	-40,71982953	115,0534532	112,9263592	0,493795492	0,425922434
39	-28,33161989	-38,4361421	121,0692235	113,4801137	0,530415913	0,4424355
40	-26,25984078	-35,97853755	129,3402947	115,7621597	0,577384293	0,466280764
41	-24,47829178	-33,73376512	139,0565407	119,8043351	0,630049228	0,49597972
42	-22,94721265	-31,71036254	150,1695901	125,5216172	0,688669435	0,531788194
43	-21,71921122	-29,77585145	162,765984	132,5464554	0,752968241	0,574090404
44	-20,72936653	-28,06474902	177,6331291	141,1649854	0,827479007	0,620471505
45	-20,13007036	-26,93330427	193,5623271	149,7700174	0,905264548	0,665220929
46	-19,51519282	-25,95775346	217,0304019	161,5206416	1,018889382	0,723443721
47	-19,80760347	-25,58639607	245,9535706	175,4261749	1,152637149	0,788314863

48	-22,27171206	-25,15444466	282,9193957	192,1928936	1,303656095	0,866803816
49	-26,60845364	-24,29609819	319,3569691	212,8502863	1,421868779	0,966744279
50	-33,39773347	-23,94228585	360,0872902	238,761488	1,49633101	1,087301379
51	-45,64124385	-24,9086842	398,3847542	270,0033692	1,385501467	1,219804792
52	-62,89491661	-30,62419852	389,6565535	322,5959149	0,885049953	1,381840567
53	-72,59246712	-41,75440171	341,1166629	374,2465057	0,509171032	1,389365309
54	-76,61884319	-57,78954139	295,3757627	391,2247841	0,341120586	1,039258902
55	-77,27338706	-67,37384736	259,2016681	362,2232657	0,284957854	0,695238422
56	-76,20496104	-71,47845642	234,9283248	334,7850956	0,279557088	0,530708843
57	-72,73864	-73,60365615	214,0593373	308,5274644	0,316944159	0,434569879
58	-67,48231077	-74,21690469	202,336637	287,8357515	0,386695969	0,390714781
59	-61,86264962	-73,3576259	199,0079475	272,3916511	0,468210443	0,389240269
60	-56,38569845	-71,81292396	204,0632093	263,0314232	0,563626031	0,409652266
61	-52,60884626	-70,52792631	216,0827973	258,5248931	0,654645079	0,429992437
62	-51,85732395	-69,44320346	230,5190581	258,4032243	0,710157852	0,452735028
63	-53,59744102	-68,31060099	249,3419684	261,3866076	0,738168426	0,482069527
64	-57,40582136	-67,6736312	267,2534763	267,3795935	0,71815083	0,506784863
65	-62,38194208	-68,7289091	281,5875562	274,0700241	0,65137608	0,496220322
66	-66,55735971	-69,94708018	295,9976542	281,2050059	0,587610606	0,481150897
67	-67,82827351	-71,53717556	312,7515781	286,6414713	0,588814407	0,452980914
68	-65,46195445	-73,63202875	342,7504522	294,239529	0,709874261	0,413809946
69	-63,30222129	-75,08054114	385,3380221	305,2428698	0,863100208	0,392230615
70	-67,24707222	-75,48203332	418,98313	322,68328	0,808006388	0,40364141
71	-73,61329354	-74,83222278	427,6089683	354,5793616	0,60200507	0,462756722
72	-80,27086342	-74,9801237	421,4373768	416,3509255	0,355522724	0,537596904
73	-85,37507068	-79,13001691	410,8567598	448,7636939	0,165404209	0,422078327
74	-90,74384532	-84,09581038	396,8366631	452,5191326	0,025737366	0,232357525
75	-95,99680726	-88,4030575	383,3423864	445,1930152	0,19989633	0,061939633
76	-101,5686161	-93,2508936	371,1504575	435,8679043	0,371625616	0,12341957
77	-107,2373044	-98,27517398	359,7711122	426,4991939	0,532438625	0,306532681
78	-112,7780427	-102,7694385	352,5044719	419,3886496	0,681613729	0,462948636

79	-120,1043837	-108,5920997	346,3358152	413,0358523	0,867605899	0,657750378
80	-129,1890818	-115,8905531	343,5928873	410,5325277	1,084381249	0,895349033
81	-139,6606499	-124,5383103	346,796348	412,3952779	1,320453926	1,168038144
82	-153,633127	-135,3125377	356,2372662	419,950436	1,594386177	1,491588381
83	-173,9259471	-149,1266091	376,4600685	433,9105083	1,869410637	1,859978181
84	160,9758531	-167,4779889	398,0690322	450,8155834	1,878483326	2,197691969
85	131,8475685	166,5191527	415,231671	470,4464638	1,382716733	2,283941203
86	103,5588234	133,7166088	434,5312505	483,6550304	0,508401849	1,667903627
87	78,8591652	100,3486071	448,1165397	485,3428727	0,432092773	0,435070518
88	59,12958981	74,07688525	447,7115836	477,1351507	1,146563708	0,65331905
89	45,73684545	56,90316668	437,0253819	466,6518557	1,522644476	1,272054568
90	33,29751354	41,14313337	418,5667726	450,288887	1,746861375	1,693128923
91	24,28718253	30,05888369	396,6064212	432,6756642	1,805178683	1,869789613
92	17,02191022	21,35932628	374,4650468	415,039788	1,788312204	1,930409818
93	11,45205481	14,37758879	354,7841671	396,3817675	1,736178745	1,917210244
94	6,957271191	8,91045943	335,029385	378,8660675	1,661064482	1,869413804
95	3,831011609	5,410287968	319,8537273	366,5676418	1,593762689	1,822539118
96	0,808898753	1,34148959	303,4733062	350,2098056	1,515501974	1,74876459
97	-1,592509623	-1,883639609	288,5740461	333,2161419	1,440669529	1,663412321
98	-3,685252288	-4,768247095	275,8157533	317,6806648	1,37472478	1,581215906
99	-5,14051973	-6,614802419	263,8377616	303,3155797	1,312352796	1,50471531
100	-6,18895378	-8,295192899	253,9995161	290,5282259	1,261165469	1,435932279
101	-7,065212419	-9,349965365	246,0692928	279,9713151	1,219662101	1,379792665
102	-7,934394983	-10,66510464	237,8189113	268,6156873	1,176269468	1,318296139
103	-8,595748547	-11,61340812	230,7552973	258,545276	1,139436521	1,264755552
104	-9,222787241	-12,26181165	224,1431646	248,6440149	1,104855233	1,213407088
105	-9,671557996	-12,82571207	218,1591739	240,040606	1,074052488	1,168924804
106	-9,530309682	-12,70582859	214,8811925	234,5454811	1,058228523	1,142681913
107	-9,860562992	-13,01310514	212,6684617	228,6317796	1,046305015	1,112353794
108	-10,1626486	-13,71371864	209,9273392	222,5846288	1,031984609	1,079917446
109	-10,55325347	-13,29852509	208,9642567	217,1751237	1,025934674	1,055544009

110	-10,75799522	-13,7138006	208,2788787	212,5274334	1,021828759	1,031093491
111	-10,93664565	-13,75554671	209,2670246	208,7627797	1,026047377	1,012590628
112	-10,94604399	-13,71237992	211,3031837	206,6301919	1,036019133	1,002520164
113	-11,12425729	-13,72989252	214,9927899	205,3145788	1,053456503	0,996003637
114	-11,11603374	-13,58375379	220,0123209	205,2624478	1,078077096	0,996369004
115	-11,03694015	-13,35518834	226,1649268	206,5329829	1,108442019	1,003397446
116	-11,07961517	-13,24516765	233,9414717	208,9318284	1,146386063	1,015611424
117	-11,00789818	-13,02725729	241,0399155	211,8401042	1,181520979	1,030655652
118	-11,01019313	-12,79748973	249,9549658	216,1148583	1,225078316	1,052302504
119	-11,05551826	-12,716511	259,8938942	221,3599731	1,273725528	1,078336644
120	-11,10573381	-12,41398826	270,3297098	227,5362883	1,324501363	1,109622412
121	-11,13299993	-12,18020454	281,953777	234,4546449	1,381528176	1,144488695
122	-11,22580854	-11,91926399	294,4930456	242,1644302	1,442255618	1,183130957
123	-11,52513475	-11,66042714	305,7287348	249,2158816	1,495752278	1,218843527
124	-11,86325644	-11,44910109	320,1362285	257,8669279	1,564179738	1,261952533
125	-12,60411341	-11,32358953	337,7135409	267,0056611	1,645562526	1,307380769
126	-13,54957553	-11,37563557	355,8581307	276,7179039	1,727106271	1,354502275
127	-15,04178063	-11,36612795	376,3236599	287,1765431	1,814284209	1,405789017
128	-16,30889002	-11,44462048	397,2298547	296,9187205	1,903120303	1,453216293
129	-17,81647671	-11,56281008	426,7902484	308,7445073	2,02788926	1,510395511
130	-19,01845342	-11,75757975	466,0694504	320,7054595	2,198676721	1,567645937
131	-23,48892156	-11,92896286	504,8934673	333,2230872	2,311064425	1,627881862
132	-28,51083187	-12,2609647	529,0009743	346,6870896	2,321043759	1,691575057
133	-32,80152944	-12,57138314	533,5159035	362,1638809	2,239964382	1,764955797
134	-35,57934008	-12,93515902	528,0341816	375,7039876	2,145505898	1,828167452
135	-38,47296342	-13,51165432	515,0322363	392,8718789	2,014532228	1,90719388
136	-40,45415543	-14,3642805	492,3542374	413,0649784	1,870422522	1,997688416
137	-42,06930395	-15,40708647	479,644121	436,2366201	1,778571953	2,099460933
138	-43,25721046	-16,49917909	455,4292116	463,5022274	1,656196263	2,218201858
139	-44,11896178	-18,25606769	439,3965041	492,544492	1,575513777	2,334412745
140	-44,5916382	-21,30886176	420,8997994	534,8823925	1,497558338	2,487194245

141	-44,19578775	-26,56816212	405,5311337	569,0101114	1,452252473	2,54081708
142	-44,84951882	-30,98999932	389,8133737	576,7181485	1,380515569	2,469966913
143	-44,81850976	-33,99011897	375,2939448	571,6849793	1,329957239	2,368317437
144	-43,07820486	-35,87265573	362,8590319	561,4428803	1,324111405	2,273237279
145	-42,77833223	-36,95469431	352,483493	551,320624	1,292303564	2,200979273
146	-42,19705581	-37,74169604	341,0868028	539,4186494	1,262063831	2,131121465
147	-41,82890861	-38,23084687	330,2213081	528,30414	1,228955435	2,073188776
148	-40,93532861	-38,47208916	320,176956	516,9874288	1,208070496	2,02193521
149	-40,13436597	-38,42711919	310,5853812	506,2945896	1,185827372	1,981130196
150	-39,33758342	-38,20598498	301,7692295	496,2732612	1,165655365	1,948112369
151	-38,55858667	-38,11314905	294,8431143	487,6467711	1,151508202	1,916559184
152	-37,55050538	-37,61148531	287,4380303	477,7928503	1,138087494	1,890496182
153	-36,52037624	-36,90477929	280,6801143	469,146717	1,126414815	1,87371996
154	-35,42749132	-35,9726497	274,2610858	460,7116	1,116041139	1,862309476
155	-34,5385012	-34,73999179	268,1213446	453,6198043	1,102965095	1,861884616
156	-33,51667757	-33,41769447	263,2952389	448,7098493	1,096238053	1,870885851
157	-32,57157063	-32,23596245	257,8050986	443,8726602	1,084956439	1,875943234
158	-31,80363879	-32,59889138	252,756134	438,4691212	1,072842256	1,846434799
159	-25,53199509	-35,69351353	278,6534112	426,5909307	1,256789788	1,731723938
160	-29,98232784	-39,24622281	258,9230262	408,370253	1,120304405	1,579846205
161	-31,6249064	-40,80317811	241,6206245	392,8180662	1,027168155	1,484435436
162	-30,91011343	-40,71591561	235,3532122	383,9006521	1,008204974	1,453058211
163	-29,61344298	-40,47134019	231,9260236	375,4868324	1,006850998	1,426485126
164	-28,55380742	-40,01994664	229,4026818	370,8347975	1,006107533	1,418482546
165	-26,30604678	-39,03394052	234,6665515	362,8917529	1,050255607	1,407486564
166	-22,33431905	-39,30561813	232,9942212	355,5340789	1,076106821	1,373688073
167	-25,45817441	-38,69245838	232,4463817	349,0006261	1,048039534	1,360179396
168	-23,1279324	-36,93010563	232,5283293	343,950364	1,068050578	1,372883307
169	-20,35790817	-39,96948521	234,2242406	339,3646346	1,096587152	1,298725297
170	-20,98292513	-35,88913015	236,4336532	340,1335656	1,102166715	1,375882599

Tabela A3. Resultado do Ensaio da Caracterização do Amortecedor A3.

Freq. (Hz)	Fase Após Fadiga (°)	Fase Antes Fadiga (°)	Impedância Após Fadiga (N.s/m)	Impedância Antes Fadiga (N.s/m)	Potência Diss. Após (W)	Potência Diss. Antes(W)
20	-86,63681154	-61,07305925	297,9778277	331,3994294	0,114590041	0,947466348
21	-90,60202327	-63,81913684	304,9297694	335,7235495	0,015810599	0,730338293
22	-91,63923531	-70,70902194	276,3515591	313,3664741	0,039074824	0,511669601
23	-92,2017697	-73,82146405	255,5703002	292,5446202	0,048532518	0,403099089
24	-92,39520749	-76,8742308	234,4578775	271,353172	0,047998395	0,304556035
25	-92,68705465	-78,46234542	213,3520396	252,5672113	0,049371477	0,247698369
26	-92,17879977	-80,44553868	195,1945895	233,2583708	0,036828368	0,191348023
27	-91,21900792	-81,62591833	179,8010242	216,2049234	0,018989316	0,156324516
28	-91,38541865	-82,67203694	168,1828691	203,1709979	0,020193632	0,128733543
29	-90,40829178	-84,58512514	156,4760626	189,0856971	0,005538823	0,088670005
30	-87,23461702	-84,52426815	147,1277527	176,5230092	0,035258332	0,083694363
31	-82,90054775	-82,18806339	139,0386698	165,8586691	0,085387004	0,112038637
32	-78,76457447	-79,21419899	131,6919304	157,1539008	0,127527785	0,146179214
33	-74,51734422	-75,78205622	125,1720738	149,1894431	0,166124731	0,182199246
34	-70,71555843	-73,61565679	120,6754077	142,469988	0,198207747	0,199869959
35	-65,82937082	-71,20951772	116,8314564	135,2124845	0,237924447	0,21662575
36	-60,70826567	-68,12658203	114,4717512	129,0879864	0,278635782	0,239280081
37	-55,74257124	-64,74982526	113,7198843	124,3237265	0,318479793	0,263885594
38	-50,96667411	-60,96669955	114,6544299	120,974577	0,359364581	0,292184488
39	-47,12898543	-57,63175719	116,759141	119,2317211	0,395423124	0,317723869
40	-43,16386249	-53,77428145	120,2484242	118,6141	0,436575881	0,348950649
41	-39,55844806	-50,05303384	124,9723988	119,5684093	0,479594974	0,382219404
42	-36,37275559	-46,52235875	131,5700279	121,7647057	0,527589049	0,417234814
43	-33,78131007	-43,11788507	140,0504468	124,9044921	0,57970474	0,454039185
44	-31,81901377	-39,96729294	150,4382973	129,4426539	0,636672526	0,494165201
45	-30,75181378	-37,62017012	161,3836165	134,555639	0,690905509	0,530976966

46	-30,12020569	-35,3882965	179,6311386	141,9180112	0,773868025	0,576428353
47	-29,62256151	-33,8769054	202,6096147	151,3746531	0,877382859	0,626256827
48	-30,03077802	-32,87308273	227,9969394	163,5826871	0,983276523	0,684629646
49	-32,98599259	-31,86783938	257,8493016	179,2652682	1,0772501	0,758775257
50	-38,35228786	-31,18572204	281,4981103	198,6184194	1,099677833	0,846716633
51	-41,99847853	-31,12895292	293,2815403	218,7717707	1,085868845	0,933141511
52	-46,48731305	-32,62120584	309,6034937	247,4977463	1,062156067	1,038727656
53	-53,19502676	-37,13470076	326,8058226	273,8369067	0,975410766	1,087673064
54	-61,71775399	-40,6031016	330,8755902	288,3913977	0,781388857	1,091193972
55	-70,57006857	-45,58095718	314,4796856	311,3464514	0,521812595	1,085819186
56	-76,14635119	-53,57642453	292,0324963	328,8000074	0,349174916	0,97308135
57	-80,10245828	-62,72145713	266,9841084	326,8472754	0,228990893	0,747043125
58	-82,36215126	-69,33208311	246,6377418	311,6418197	0,163611462	0,54883699
59	-82,85598077	-74,20981495	232,3142887	295,2415092	0,144175553	0,400883235
60	-81,72298898	-77,53971663	223,2903944	278,8747381	0,160417381	0,300334711
61	-79,13068627	-79,43141267	219,0833032	265,7160149	0,206158197	0,243268042
62	-76,00377099	-79,98758815	218,8104634	256,8549035	0,264090116	0,222844188
63	-71,23774006	-79,98969185	222,4264248	249,5885917	0,357029145	0,216550672
64	-66,3539635	-79,11468314	229,5551561	245,9335294	0,459427739	0,231773075
65	-61,2048819	-77,50542908	240,3827571	245,4351271	0,577854835	0,26504565
66	-56,32044282	-75,18442832	255,3985309	248,1850728	0,706684328	0,316726664
67	-53,03328447	-72,90949718	271,7255376	253,0030207	0,815285653	0,371054233
68	-51,11512485	-69,8386441	294,3107565	262,2178644	0,921809838	0,451049255
69	-50,5362629	-66,89690891	319,8719643	274,7689389	1,014334769	0,538087673
70	-51,99188893	-64,00353146	351,7907176	290,9309922	1,080495268	0,636354509
71	-55,37941008	-61,78988761	391,1600471	313,9153193	1,108260277	0,740396305
72	-61,38276052	-61,35480456	428,2535033	347,5566778	1,022750894	0,831060769
73	-68,14003067	-63,28425789	447,3846925	379,7612207	0,830922088	0,851554279
74	-77,04282036	-67,13940112	456,2916353	411,9073516	0,510622554	0,798298665

75	-85,42383823	-72,72254807	454,3277408	433,3217584	0,180950732	0,642155261
76	-93,71464296	-79,24766009	446,3101744	443,947217	0,144386277	0,413412957
77	-101,9917668	-86,29142253	437,2587771	447,7178511	0,453642653	0,144576118
78	-108,6454298	-91,99105836	428,8748958	447,4071601	0,684696039	0,077611996
79	-117,9377111	-99,44144246	421,7682351	446,0754905	0,986662667	0,365416883
80	-128,6273124	-107,6277931	417,9987956	443,9068134	1,303179361	0,671315068
81	-141,7083269	-117,5716812	418,2998236	442,3832858	1,639772886	1,022649534
82	-158,541383	-130,0562017	424,0710595	443,4403457	1,971051801	1,425215786
83	179,7616193	-149,4058136	433,2334222	447,3070772	2,162795438	1,922308438
84	158,1080616	-173,8261854	438,6758445	453,3884549	2,03204462	2,250599896
85	135,1993336	144,7112601	445,1934985	465,1461098	1,577220965	1,895071948
86	111,8072058	100,4407874	459,0967185	484,9722655	0,851328723	0,438558207
87	91,88969096	69,29072576	478,1239088	507,5019004	0,078699537	0,895642187
88	74,42336709	48,46375753	499,7724557	518,5998268	0,669820887	1,716397622
89	60,86686211	35,32345696	513,5414568	515,226809	1,247935078	2,098537535
90	45,56822174	23,1182093	515,5377346	500,9670789	1,801595378	2,300662138
91	33,37005015	13,95608415	500,0707523	480,8512453	2,084961316	2,330493525
92	31,67310329	12,91366067	497,6770312	477,5306497	2,114721336	2,324628099
92	23,24287391	6,919541226	476,5623312	459,1721808	2,18697108	2,27679196
93	15,03700258	1,420337295	449,1122874	438,3426865	2,16576988	2,187785157
94	13,99949684	0,5399259	444,9482409	435,9948838	2,155438191	2,176522503
94	8,677987108	-3,515535746	420,4361244	417,2958919	2,076073013	2,08042978
95	4,487584041	-7,207717488	398,0482105	399,1630401	1,981946721	1,978109284
96	0,208306552	-10,34225526	373,3810003	379,8141346	1,864925233	1,866428586
97	-3,094550201	-13,1268961	351,0238547	361,9254998	1,750649744	1,760446415
98	-5,776464991	-15,43224889	330,861741	343,6981559	1,644219379	1,654840442
99	-7,871639204	-17,1324196	313,3437302	326,9922675	1,550276232	1,560803189
100	-9,737182454	-18,40777986	297,1015885	311,6374872	1,462521364	1,477020574
101	-10,85555764	-19,33999141	285,0768745	299,240478	1,398366359	1,410261692

102	-12,00873947	-20,04811811	272,8853253	286,224546	1,332962819	1,342917259
103	-12,80598648	-20,76875771	262,0134236	274,2094358	1,276031222	1,280606662
104	-13,38846502	-21,15395307	251,9071986	263,5259209	1,223937168	1,22748822
105	-13,62585508	-21,39202614	242,6746183	253,2050551	1,177940061	1,177465845
106	-13,49763877	-21,34716546	236,9443238	245,2585137	1,150558797	1,140848265
107	-13,61552783	-20,48060569	231,8615655	239,6600498	1,125330572	1,121209079
108	-13,55982081	-20,41877882	227,194101	233,1151061	1,103015647	1,091123446
109	-13,57236104	-20,24761428	223,4497489	227,3183065	1,084817919	1,065098708
110	-13,49810322	-20,20491193	219,7315814	220,952301	1,067047993	1,035589338
111	-13,47621929	-19,87605198	217,8276808	216,1626628	1,0578889	1,015280057
112	-13,24500373	-19,49361602	217,3355799	213,1196009	1,056530449	1,003370982
113	-13,23973082	-18,88829733	218,1467675	210,7831154	1,060448793	0,995937061
114	-12,89630891	-18,32264838	220,3436842	209,5707841	1,072616414	0,993539974
115	-12,69066557	-17,67610266	223,6883783	209,5466675	1,089688667	0,997038068
116	-12,6883433	-17,60110719	224,280115	209,5727545	1,092667784	0,997656389
116	-12,43155551	-17,02920178	228,1332817	210,5975791	1,112624326	1,005666098
117	-12,13414175	-16,56720778	233,0150249	212,3019531	1,137594775	1,016239385
118	-11,94912558	-16,07144532	239,5122354	215,2405894	1,169990347	1,032897809
119	-11,57406623	-15,41943546	246,8438541	219,1318938	1,207592509	1,054919237
120	-11,3685595	-14,97984448	254,8374868	223,7436149	1,247439714	1,079234822
121	-11,19701246	-14,49361696	263,6880818	229,3275073	1,291678696	1,10877864
122	-10,95552429	-14,0278527	273,3546104	235,5733845	1,340004932	1,141294465
123	-10,84118692	-13,79794853	282,3092604	241,4883597	1,384634235	1,171090322
124	-10,73687627	-13,55143334	293,3886294	249,0746751	1,439243262	1,209036984
125	-10,87908081	-13,33745717	306,0046982	257,2601974	1,500499712	1,249997292
126	-10,9812058	-12,95204325	319,8211759	266,1300786	1,567516836	1,295125795
127	-11,32077549	-12,7704695	334,883533	275,5191268	1,639635016	1,341801452
128	-11,75285326	-12,63834632	350,1371855	284,1295026	1,711606867	1,384456744
129	-12,06316242	-12,55053741	367,2129266	294,5699053	1,792925938	1,435818362

130	-12,38131264	-12,42169272	386,2900063	305,4289652	1,883628298	1,489427131
131	-13,3415826	-12,35183354	408,071867	317,0628192	1,982115711	1,54657124
132	-14,53060927	-12,27711127	433,9173221	329,4199063	2,096926869	1,607351751
133	-16,33017289	-12,18239021	463,5825892	342,7673634	2,22075062	1,673048896
134	-18,75199407	-12,11258567	490,5032189	354,8724923	2,318318154	1,73256765
135	-22,10012552	-12,08619382	521,8827477	370,6946713	2,413736889	1,809929779
136	-26,07903861	-12,00218249	544,4147367	388,8964343	2,441116274	1,899142042
137	-30,43047022	-11,89568618	552,2236744	407,362097	2,378096336	1,990322618
138	-34,36913983	-11,8784741	549,0190635	428,5788071	2,263468398	2,094054308
139	-36,92349401	-11,76522957	541,5589474	448,0451651	2,162801285	2,190012581
140	-39,54781664	-12,32533241	525,5308039	471,0863417	2,02519534	2,298207109
141	-41,32866555	-13,53755439	513,24252	493,6756023	1,925494496	2,396540324
142	-43,16147853	-15,64393012	499,9233259	518,6515667	1,821003062	2,494020044
143	-44,25873477	-19,12628845	478,9720899	548,0644786	1,714157361	2,584730029
144	-45,63570092	-24,10932131	462,1868093	571,4245757	1,614065749	2,603894235
145	-45,76156765	-28,22475622	449,8799566	581,5790156	1,567716956	2,55863822
146	-46,31552332	-32,50602813	433,9378674	582,9753174	1,497434303	2,455456382
147	-45,99873914	-36,17367583	419,8598859	576,4230252	1,456921696	2,324005113
148	-46,54113813	-38,72598095	406,1330411	566,1222853	1,395325358	2,205899791
149	-46,06674051	-41,24222267	392,9785961	554,2995462	1,361877735	2,081644017
150	-45,87350079	-43,27906707	380,5129799	540,1048183	1,323300155	1,964198613
151	-45,76080267	-44,65830084	370,5978313	528,6474865	1,291404707	1,878321849
152	-45,27506693	-45,87478487	359,8011904	514,6170923	1,264555898	1,79022285
153	-44,66619654	-47,11804324	349,511509	501,0413277	1,241422819	1,702968865
154	-44,08410049	-47,83483062	339,8022969	487,6076386	1,219049811	1,63492606
155	-43,39247553	-48,69516126	330,3921405	474,2238993	1,199022129	1,563483067
156	-42,6449523	-49,29386832	322,93282	463,3101179	1,186341193	1,509128598
157	-41,80210694	-50,05057133	314,6351126	450,7678618	1,171291532	1,445627095
158	-41,06698733	-50,41768034	306,6948477	438,6280684	1,154832915	1,396098399

159	-36,85390804	-50,45967235	302,5427635	426,8805279	1,210360881	1,359051585
160	-37,31278747	-48,03440875	306,4200208	423,3762285	1,217534255	1,414865059
161	-39,09278943	-50,34208381	290,1354489	407,3466759	1,124309803	1,298381074
162	-38,50664991	-51,03436447	282,2403603	396,2540743	1,102824097	1,244358559
163	-37,39884786	-50,9077874	276,396079	385,6519479	1,096552817	1,214448295
164	-36,17536972	-50,60641213	271,5658332	376,1720131	1,094627834	1,192166736
165	-33,90826598	-48,35608334	273,7893934	369,4978365	1,134693959	1,225978058
166	-34,28480066	-49,20327269	270,2300313	360,8820653	1,114989919	1,177599186
167	-30,5227051	-47,31294952	267,3622133	354,3842672	1,150377098	1,200003508
168	-29,68524193	-45,71889263	265,1971403	347,3282102	1,15060092	1,210973616
169	-27,36625608	-42,59102112	264,4673912	341,455653	1,172923638	1,25547231
170	-27,8946122	-43,59456717	264,258249	339,131479	1,165342654	1,225527221