

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO  $H/w$  SOBRE O  
AUTO AMORTECIMENTO DE CABOS  
CONDUTORES DE ENERGIA**

Por,  
**THIAGO BARBOSA DE MIRANDA**

Brasília, 03 de Julho de 2017

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

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

**INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO  $H/w$  SOBRE O AUTO AMORTECIMENTO DE CABOS  
CONDUTORES DE ENERGIA**

**THIAGO BARBOSA DE MIRANDA**

**ORIENTADOR: Profº JORGE LUIZ DE ALMEIDA FERREIRA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS**

**BRASÍLIA/ DF: JULHO DE 2017**

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

**INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO  $H/w$  SOBRE O AUTO  
AMORTECIMENTO DE CABOS CONDUTORES DE ENERGIA**

**THIAGO BARBOSA DE MIRANDA**

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

**APROVADA POR:**

---

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

---

**Profº José Alexander Araújo, PhD (ENM - UnB)  
(Examinador Interno)**

---

**Profª Aida Alves Fadel, Dr. (ENM - UnB)  
(Examinadora Externa)**

**Brasília, 03 de julho de 2017**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Miranda, Thiago Barbosa de  
Influência do parâmetro  $H/w$  sobre o auto amortecimento de cabos condutores de energia, [Distrito Federal] 2017.

86.p. 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2017).

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

Departamento de Engenharia Mecânica

Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas.

1. Linha de Transmissão

2. Cabos Condutores

3. Auto Amortecimento

4. Parâmetro  $H/w$

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MIRANDA, T.B. (2017). Influência do parâmetro  $H/w$  sobre o auto amortecimento de cabos condutores de energia. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação DM 258/2017, ENM/ FT/ Universidade de Brasília, Brasília-DF, 86.p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Thiago Barbosa de Miranda

TÍTULO: Influência do parâmetro  $H/w$  sobre o auto amortecimento de cabos condutores de energia.

GRAU: Mestre

ANO: 2017

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

---

Thiago Barbosa de Miranda  
thiago\_enm@hotmail.com

## **AGRADECIMENTOS**

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

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

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

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

*Agradeço à toda equipe do Laboratório de Cabos, Remy, Miélle, Pedro, Renato, Silmar e Pereira que tanto colaboraram com seus conhecimentos e discussões e que ao longo desses dois anos de convívio diário passaram a ser grandes amigos.*

*Agradeço aos amigos, Bruno, Gustavo e Lara que durante esse desafiador mestrado, estiveram ao meu lado, proporcionando-me suas amizades, confiança e apoio.*

*Ao Professor Jorge Ferreira, por todo apoio, confiança e orientação fornecida durante a elaboração desse trabalho.*

*À CAPES, TAESA, TBE, BRASNORT, EATE, ATE III, TME e Amazônia Eletronorte, pelo apoio financeiro que possibilitou a realização deste trabalho.*

---

## RESUMO

Nesse trabalho foi realizada uma comparação do auto amortecimento dos cabos condutores Tern, Orchid e CAL 900, tendo como parâmetro de avaliação a relação  $H/w$ . Para tal, foram geradas curvas de auto amortecimento, a partir do Método da Potência, para os três cabos em níveis de  $H/w$  de 1820 m, 2144 m e 2725 m, considerando três diferentes frequências de excitação e cinco amplitudes de deslocamento.

Foi avaliado a influência da frequência e amplitude de vibração no auto amortecimento de cada cabo condutor, sendo observado um crescimento exponencial da potência dissipada com a variação desses parâmetros. Foi feita uma comparação entre as curvas de potência dissipada dos diferentes cabos, quando submetidos as mesmas condições de vibração e nível de  $H/w$ , o cabo condutor Tern obteve o maior auto amortecimento, o CAL 900 obteve valores intermediários e o Orchid teve os menores valores de potência em todos os ensaios. Finalmente, foi realizada uma correlação entre o auto amortecimento e vida em fadiga dos cabos condutores na linha de transmissão quando submetidos as mesmas condições dos ensaios experimentais, nesse estudo o cabo Orchid apresentou o melhor resultado para o caso analisado e o cabo CAL 900 teve um resultado inferior aos demais, apresentando uma estimativa de vida menor que os demais.

---

## ABSTRACT

In this work, a comparison of the self-damping of the overhead conductors Tern, Orchid and CAL 900 was carried out, using the  $H/w$  ratio as an evaluation parameter. Therefore, the self-damping curves were generated using the Power Method for the three cables at  $H/w$  levels of 1820 m, 2144 m and 2725 m, and considering three different excitation frequencies at five different displacement amplitudes for each  $H/w$  level.

The influence of the frequency and amplitude of vibration on the self-damping of each conductor was evaluated. One could observe an exponential growth of the power dissipated with the variation of these parameters. Additionally, a comparison between the power-dissipated curves of the different cables was made considering the same conditions of vibration and  $H/w$  level. The Tern conductor cable has a higher self-damping value meanwhile the CAL 900 presents an intermediate value and the Orchid has a lower values for all tests. Finally, a correlation between the self-damping and fatigue life of the cables in the transmission line when subject to the same conditions of the experimental tests were submitted. In this study Orchid cable presented a good result for the analyzed case and the cable CAL 900 has a bad result to the others, presenting a smaller life estimate than the others.

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	CONTEXTO E MOTIVAÇÃO.....	1
1.2	OBJETIVO.....	3
1.3	METODOLOGIA .....	4
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1	VIBRAÇÃO EM CABOS CONDUTORES .....	6
2.1.1	Vibrações Eólicas .....	7
2.1.2	Galope .....	12
2.1.3	Vibração de Esteira .....	14
2.2	VIBRAÇÃO DE SISTEMAS CONTÍNUOS .....	15
2.3	CABOS CONDUTORES.....	21
2.4	PARÂMETRO $H/w$ .....	24
2.5	CONTROLE PASSIVO DE VIBRAÇÃO EM CABOS.....	27
2.5.1	Mudança de geometria .....	27
2.5.2	Absorvedores de vibração em linhas de transmissão .....	28
2.5.3	Absorvedor tipo Bretelle .....	28
2.5.4	Absorvedor de braço oscilante .....	29
2.5.5	Absorvedor de impacto.....	29
2.5.6	Absorvedor tipo Helgra .....	30
2.5.7	Absorvedor em espiral.....	30
2.5.8	Absorvedor <i>Stockbridge</i> .....	31
2.6	AUTO AMORTECIMENTO DO CONDUTOR.....	33
2.6.1	Métodos de Medição de Auto Amortecimento.....	37
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	43
3.1	BANCADA EXPERIMENTAL.....	43
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS NO ENSAIO .....	44
3.2.1	Cabo condutor .....	44

3.2.2	<i>Shaker</i> Eletromecânico.....	45
3.2.3	Sensores.....	46
3.2.4	Sistema de Controle Vibratório.....	47
3.2.5	Sistema de Tracionamento e Fixação de Amostra na Bancada.....	48
1.1.1	Sistema de Acoplamento.....	49
3.3	METODOLOGIA DOS ENSAIOS.....	50
3.3.1	Montagem da Amostra.....	50
3.3.2	Instrumentação da Bancada.....	52
3.3.3	Parâmetros de Ensaio.....	54
3.3.4	Procedimento Para os Ensaios de Auto Amortecimento.....	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	60
4.1	CURVAS DE AUTO AMORTECIMENTO.....	60
4.2	INFLUÊNCIA DO $H/w$ SOBRE O AUTO AMORTECIMENTO PARA CADA CABO	61
4.3	COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE AUTO AMORTECIMENTO.....	65
4.3.1	$H/w = 2725$ m.....	65
4.3.2	$H/w = 2144$ m.....	66
4.3.3	$H/w = 1820$ m.....	68
4.4	POTÊNCIA DISSIPADA EM FUNÇÃO DO $H/w$ .....	69
4.5	BALANÇO DE ENERGIA.....	72
4.6	VIDA EM FADIGA.....	74
5	CONCLUSÕES.....	76
5.1	TRABALHOS FUTUROS.....	77
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	79
	ANEXO.....	82
	Cabo Tern.....	82
	Cabo Orchid.....	83
	Cabo CAL 900.....	85



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Regime de ventos no Brasil (CEPEL, 2015) .....	2
Figura 2.1 – Fios rompidos devido falha por fadiga (Cosmai, 2009). .....	8
Figura 2.2 - Esteira de Vórtice de Von Karman. (Souza, 2012) .....	9
Figura 2.3 – Distribuição de pressão e modulo da força em nove momentos do desprendimento de vórtices (Zasso, et al., 1988).....	9
Figura 2.4 – Relação entre Número de Reynolds e Número de Strouhal (Chen, 1972). .....	11
Figura 2.5 – Coeficiente de máxima potência introduzida ao cabo (EPRI, 2006). .....	12
Figura 2.6 – Linha de transmissão com deposito de gelo. ....	13
Figura 2.7 - Força resultante devido a ação do vento.....	13
Figura 2.8 - Ação do vento sobre um cabo com uma camada de gelo (Souza, 2012).....	14
Figura 2.9 - Oscilações devido à esteira do escoamento num feixe duplo de cabos. (Lilien, 2004). .....	14
Figura 2.10 - a) Corda vibrante engastada; b) Componentes verticais das tensões que agem sobre um elemendo $dx$ da corda (Den Hartog, 1972).....	15
Figura 2.11 – Quatro primeiros modos naturais de uma corda. ....	19
Figura 2.12 - Gráfico do comportamento das curvas de corda e cabo (Steidel, 1989).....	20
Figura 2.13 – Cabos condutores instalados nas linhas de transmissão.....	21
Figura 2.14 – Conjunto do cabo montado no grampo e isolador (Cloutier, et al., 2011).....	22
Figura 2.15 – Estrutura de um cabo condutor típico .....	22
Figura 2.16 – a) Conductor Aero-Z; b) Conductor trapezoidal .....	24
Figura 2.17 – Esquema de um condutor entre duas torres de transmissão.....	24
Figura 2.18 – Tipo de modificação de geometria em cabos (Kumar, et al., 2008). .....	28
Figura 2.19 - Amortecedor tipo Brallete (Labegalini, et al., 1992).....	29
Figura 2.20 - Amortecedor tipo Festão (Labegalini, et al., 1992).....	29
Figura 2.21 - Amortecedor tipo braço oscilante (Labegalini, et al., 1992). .....	29
Figura 2.22 - Amortecedor de impacto (Labegalini, et al., 1992).....	30
Figura 2.23 - Amortecedor tipo Helgra. (Labegalini, et al., 1992). .....	30
Figura 2.24 – Amortecedor em espiral (Dulhunty, 1984). .....	31

Figura 2.25 Absorvedor <i>stockbridge</i> (Silva Junior, 2011). .....	31
Figura 2.26 – Fases de amortecimento (Labegalini, et al., 1992). .....	32
Figura 2.27 – Curva típica de potência dissipada de um <i>stockbridge</i> (IEC 61897-1998-09).....	33
Figura 2.28 – Energia de entrada e dissipada (Diana, 2011).....	34
Figura 2.29 - Auto amortecimento do condutor Drake com carga de esticamento de 28,5 kN (CIGRÉ, 2011). .....	35
Figura 2.30 – Interface de contato entre dois fios (EPRI, 2006). .....	36
Figura 2.31 – Auto amortecimento em função da frequência para diferentes tensões de esticamento (Kiessling, et al., 2003). .....	37
Figura 2.32 – Curva de decaimento para o condutor 264-AL3 tensionado com a 20% da carga de ruptura. ....	40
Figura 2.33 – Sistema de desacoplamento para o Método do Decaimento (EPRI, 2006). ....	41
Figura 3.1 - Representação esquemática da bancada de ensaio. ....	44
Figura 3.2 – Cabos condutores. a) CAL 900; b) Orchid; c) Tern.....	44
Figura 3.3 – <i>Shaker</i> modelo V400 .....	46
Figura 3.4 - Sensores. a) Termômetro; b) Transdutor de força (esquerda) e acelerômetro (direita) c) Célula de carga. ....	46
Figura 3.5 – Controlador Laser LDS.....	47
Figura 3.6 – Amplificador de sinal DSA5-2k .....	47
Figura 3.7 – Ancoragem do cabo nos dois lados do vão.....	48
Figura 3.8 – Conexão flexível utilizada nos ensaios de auto amortecimento. ....	49
Figura 3.9 – Vista explodida da conexão flexível utilizada nos ensaios de auto amortecimento. ..	49
Figura 3.10 – Cabo enrolado na bobina. ....	50
Figura 3.11 – Condutor apoiado em polias ao longo do vão.....	50
Figura 3.12 – Sistema de tracionamento do cabo por meio de braço de alavanca. ....	51
Figura 3.13 - Montagem do grampo rígido com bucha de alumínio.....	52
Figura 3.14 – Acelerômetro que realiza o controle do ensaio.....	52
Figura 3.15 - Acoplamento flexível conectado ao cabo.....	53
Figura 3.16 - Esquema de controle da bancada.....	56
Figura 3.17 - Gráfico resultante do processo de varredura em frequência.....	57

Figura 3.18 – Tela de controle do ensaio de auto amortecimento.....	59
Figura 4.1 - Auto amortecimento do condutor Tern, $H/w = 2725m$ . ....	61
Figura 4.2 - Auto amortecimento do cabo Tern em função da frequência para diferentes valores de $H/w$ e $Y = 2mm$ . ....	62
Figura 4.3 - Auto amortecimento do cabo Tern em função da frequência para diferentes valores de $H/w$ e $Y = 4mm$ . ....	62
Figura 4.4 - Auto amortecimento do cabo Orchid em função da frequência para diferentes valores de $H/w$ e $Y = 2mm$ . ....	63
Figura 4.5 - Auto amortecimento do cabo Orchid em função da frequência para diferentes valores de $H/w$ e $Y = 4mm$ . ....	63
Figura 4.6 - Auto amortecimento do cabo CAL 900 em função da frequência para diferentes valores de $H/w$ e $Y = 2mm$ . ....	64
Figura 4.7 - Auto amortecimento do cabo CAL 900 em função da frequência para diferentes valores de $H/w$ e $Y = 4mm$ . ....	64
Figura 4.8 - Auto amortecimento para frequência nominal de 14 Hz e $H/w = 2725$ m, para diferentes cabos.....	65
Figura 4.9 - Auto amortecimento para frequência nominal de 24 Hz e $H/w = 2725$ m, para diferentes cabos.....	66
Figura 4.10 - Auto amortecimento para frequência nominal de 34 Hz e $H/w = 2725$ m, para diferentes cabos.....	66
Figura 4.11 - Auto amortecimento para frequência nominal de 14 Hz e $H/w = 2144$ m, para diferentes cabos.....	67
Figura 4.12 - Auto amortecimento para frequência nominal de 24 Hz e $H/w = 2144$ m, para diferentes cabos.....	67
Figura 4.13 - Auto amortecimento para frequência nominal de 34 Hz e $H/w = 2144$ m, para diferentes cabos.....	68
Figura 4.14 - Auto amortecimento para frequência nominal de 14 Hz e $H/w = 1820$ m, para diferentes cabos.....	68
Figura 4.15 - Auto amortecimento para frequência nominal de 24 Hz e $H/w = 1820$ m, para diferentes cabos.....	69
Figura 4.16 - Auto amortecimento para frequência nominal de 34 Hz e $H/w = 1820$ m, para diferentes cabos.....	69
Figura 4.17 – Auto amortecimento em função do $H/w$ , $Y = 2$ mm. ....	70

Figura 4.18 - Auto amortecimento em função do $H/w$ , $Y = 4$ mm. ....	71
Figura 4.19 – Balanço de energia do cabo Tern, frequência nominal de 24 Hz. ....	72
Figura 4.20 - Balanço de energia do cabo Orchid, frequência nominal de 24 Hz.....	73
Figura 4.21 – Balanço de energia do cabo CAL 900, frequência nominal de 24 Hz. ....	74
Figura A.1 - Auto amortecimento do condutor Tern, $H/w = 2725$ m. ....	82
Figura A.2 - Auto amortecimento do condutor Tern, $H/w = 2144$ m. ....	82
Figura A.3- Auto amortecimento do condutor Tern, $H/w = 1820$ m. ....	83
Figura A.4– Auto amortecimento do condutor Orchid, $H/w = 2725$ m. ....	83
Figura A.5 - Auto amortecimento do condutor Orchid, $H/w = 2144$ m.....	84
Figura A.6 - Auto amortecimento do condutor Orchid, $H/w = 1820$ m.....	84
Figura A.7 - Auto amortecimento do condutor CAL 900, $H/w = 2725$ m. ....	85
Figura A.8 - Auto amortecimento do condutor CAL 900, $H/w = 2144$ m. ....	85
Figura A.9 - Auto amortecimento do condutor CAL 900, $H/w = 1820$ m. ....	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparação entre os tipos de vibração induzidas pelo vento em cabos condutores (EPRI, 2006).....	7
Tabela 2.2 - Regimes de fluxo de fluido em torno de cilindros circulares (Blevins, 1994).....	11
Tabela 2.3 – Valores recomendados de $H/w$ em função do terreno (CIGRÉ, 2005). ....	27
Tabela 2.4 – Comparação entre os métodos de medição do auto amortecimento (CIGRÉ, 2011). ....	41
Tabela 3.1 – Propriedades dos cabos condutores.....	45
Tabela 3.2 – Descrição dos sensores.....	53
Tabela 3.3 - Amplitudes de deslocamento utilizadas no ensaio.....	55
Tabela 3.4 - Frequências e cargas de esticamento para cada nível de $H/w$ . ....	56
Tabela 4.1 – Vida em fadiga para os condutores CAL 900, Orchid, Tern.....	75

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

$d$	Diâmetro do cilindro	[m]
$E$	Módulo de Elasticidade	[Mpa]
$E_{int}$	Energia de entrada no sistema	[J]
$E_{diss}$	Energia dissipada pelo sistema	[J]
$f$	Frequência	[Hz]
$f_s$	Frequência de formação de vórtices	[Hz]
$F$	Força de imposta pelo <i>shaker</i>	[N]
$F_x$	Componente de força na direção horizontal	[N]
$F_y$	Componente de força na direção vertical	[N]
$H$	Carga de esticamento	[N]
$I$	Momento de Inercia	[m <sup>4</sup> ]
$L$	Comprimento do vão	[m]
$m$	Massa	[Kg]
$P$	Potência dissipada	[W]
$P_D$	Potência dissipada pelo absorvedor	[W]
$P_v$	Potência introduzida pelo vento	[W]
$t$	Tempo	[s]
$V$	Velocidade escoamento	[m/s]
$V_s$	Velocidade na base do <i>shaker</i>	[m/s]
$w$	Densidade linear uniforme	[kg/m]
$Y$	Amplitude de vibração pico-a-pico	[mm]

## Símbolos Gregos

$\beta$	Ângulo de hélice	[°]
$\nu$	Viscosidade cinemática do fluido	[m <sup>2</sup> /s]
$\theta_\nu$	Ângulo de fase entre a força e a velocidade	[°]
$\sigma$	Tensão	[Mpa]
$\omega$	Frequência de Vibração Angular	[rad/s]
$\omega_n$	Frequência Natural	[Hz]
$v$	Velocidade de Propagação de onda	[m/s]
$u_{esc}$	Amplitude de vibração para gerar o escorregamento total	[mm]
$\xi$	Coefficiente adimensional de amortecimento	[1]
$\delta$	Decremento logarítmico	[1]
$\lambda$	Comprimento de onda	[m]

## Grupos Adimensionais

$Re$	Número de Reynolds
$S$	Número de Strouhal

## Siglas

CA	Cabo de Alumínio
CAA	Cabo de Alumínio com Alma de Aço
CAL	Cabo de Alumínio Liga
Cigré	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électrique</i>
EDS	<i>Every Day Stress</i>
MBE	Método de Balanço de Energia
SIN	Sistema Interligado Nacional
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

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

A transmissão de energia elétrica é feita usualmente por meio linhas de transmissão. Os principais elementos das linhas de transmissão são as torres, que são estruturas metálicas que elevam e apoiam o cabo condutor, que é o componente mais importante da linha, pois este é responsável realizar a transmissão da energia elétrica, além desse componente ter um peso significativo no custo total da linha de transmissão, podendo chegar a valores superiores a 40% do total investido na instalação de uma nova linha de transmissão (EPRI, 2006).

Linhas de transmissão estão submetidas a ação do vento que causam nos cabos condutores a vibração eólica, esse tipo de vibração é caracterizado por frequências que variam 3 e 150 Hz e amplitudes que alcançam no máximo o valor do diâmetro do condutor. O início das vibrações se dá com a combinação de dois fatores: i) A frequência de excitação do vento se iguala a uma das frequências naturais dos cabos condutores, o que ocorre facilmente pois, em geral a frequência natural de um cabo condutor em uma linha de transmissão varia em média a cada 0,2 Hz. ii) A velocidade do vento deve ser de 1 m/s a 7 m/s, para gerar as vibrações eólicas. Essas condições de vento são encontradas em praticamente todo território nacional, como é possível observar no Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (2015), que contém o regime de ventos no território brasileiro (Fig 1.1). Gerando assim, uma condição muito favorável para a ocorrência do fenômeno.

As vibrações eólicas causam tensões mecânicas alternadas nos cabos condutores na região próxima da boca do grampo de suspensão, devido a isso, ocorre o fenômeno de fadiga do cabo condutor, que pode levar até mesmo a ruptura do cabo, causando grandes transtornos e prejuízos financeiros para os afetados com a interrupção do fornecimento da energia elétrica.





Figura 1.1 – Regime de ventos no Brasil (CEPEL, 2015)

O fenômeno de falha é acelerado pelas amplitudes de vibração geradas pelo vento. Essa amplitude é função da quantidade de energia mecânica inserida pelo vento e da quantidade de energia que o cabo e dispositivos fixados na linha são capazes de dissipar. A quantidade de energia mecânica que o cabo condutor consegue dissipar durante sua vibração é denominado auto amortecimento, essa característica do cabo é função principalmente da carga de esticamento do condutor e das características construtivas do cabo (Diâmetro do cabo, número de fios e material que constitui os fios).

O auto amortecimento é fundamental para a estabilização do movimento vibratório do cabo durante as ações do vento, visto que a energia disponível para induzir vibração no cabo está intrinsecamente associada a diferença entre as energias introduzida pelo vento e dissipada pelo cabo na forma de amortecimento. Quanto maior for a energia dissipada durante a vibração, menor serão as amplitudes de vibração e maior a vida útil do cabo na linha de transmissão. Além disso, o conhecimento da capacidade de auto amortecimento do condutor possibilita a verificação da necessidade, ou não, de serem utilizados amortecedores externos para faixas de frequências de vibração induzidas pelo vento. Com o aumento

dos tipos de cabos condutores, fabricados com alumínio puro ou ligas de alumínio em substituição a cabos com almas de aço, é importante a avaliação desta grandeza, de modo a gerar um maior conhecimento sobre as características de amortecimento de cada condutor, bem como sobre o efeito de outros fatores tais como: número de fios, número de camadas, tipo de material, carga de esticamento, etc.

A carga de esticamento do cabo condutor é um importante fator de projeto de linhas de transmissão uma vez que esse parâmetro tem influência direta no fenômeno de fadiga, auto amortecimento e a catenária formada pelo cabo. Para estabelecer critérios de seleção para a carga de esticamento o CIGRÉ (*Conseil International des Grands Réseaux Électrique*) propôs o parâmetro  $H/w$ , que é a razão entre a carga de tração  $H$  e a massa linear do condutor  $w$ . Apesar de não haver restrições ao uso desse parâmetro para diferentes tipos de cabo, o uso desse critério não é amplamente empregado no Brasil por existirem poucos estudos sobre a sua utilização em linhas de transmissão.

A seleção incorreta de um nível do parâmetro  $H/w$  pode acarretar por um lado a falha prematura do cabo condutor, devido a aceleração dos mecanismos de fadiga e a redução do auto amortecimento, caso o nível de  $H/w$  seja muito alto. Ou por outro lado, pode gerar um superdimensionamento da linha de transmissão, uma vez que o  $H/w$  está diretamente ligado a catenária formada pelo condutor. Aumentando a catenária, existe a necessidade de construir torres de transmissão mais altas e mais robustas para suportar o peso adicional do cabo condutor, elevando assim, o custo da construção da linha de transmissão.

Dessa forma, foi realizado no âmbito de um programa de Pesquisa e Desenvolvimento das empresas de transmissão de energia TAESA, BRASNORTE, ETEM, EATE, ETEII e TME por meio do projeto "Fadiga De Cabos Condutores CA, CAA e CAL: Avaliação Comparativa em Termos do Parâmetro  $H/w$  e Cálculo de Vida Residual", cujo objetivo é conduzir um estudo comparativo sobre o comportamento contra fadiga de cabos condutores de energia de alumínio puro (CA), de alumínio com alma de aço (CAA) e de alumínio liga (CAL) em termos do parâmetro  $H/w$ . Onde, esse trabalho está inserido, visando avaliar a influência do parâmetro  $H/w$  sobre o auto amortecimento e consequentemente da resposta vibratória do cabo condutor.

## 1.2 OBJETIVO

Esse trabalho tem como objetivo gerar as curvas de auto amortecimento e avaliar a influência do parâmetro  $H/w$  no comportamento do auto amortecimento dos cabos CAL 900, Orchid e Tern. Mais especificamente avaliando:

- A influência da frequência e amplitude de vibração no auto amortecimento de cada cabo condutor;

- A influência do valor de  $H/w$  sobre o auto amortecimento a medida que se varia a frequência de excitação do condutor.
- Comparação entre as curvas potência dissipada dos diferentes cabos, quando submetidos as mesmas condições de vibração e nível de  $H/w$ .
- A correlação entre o auto amortecimento e vida em fadiga dos cabos condutores na linha de transmissão quando submetidos as mesmas condições dos ensaios experimentais.

### 1.3 METODOLOGIA

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores da Universidade de Brasília em uma bancada construída especificamente para ensaio de auto amortecimento. Para a medição do amortecimento próprio do condutor foi utilizado o Métodos da Potência, neste método o condutor é forçado a vibrar, com amplitude constante, por um excitador eletromecânico (*shaker*) em uma de suas frequências naturais, quando a condição estacionária é alcançada a energia introduzida pelo *shaker* se torna igual a energia dissipada pelo condutor. Para calcular a potência dissipada é realizada então, a medição da força e velocidade no ponto de acoplamento entre o cabo condutor e o *shaker*. Foram realizados ensaios com os cabos condutores Tern (CAA), Orchid (CA) e CAL 900MCM, considerando três diferentes frequências e cinco amplitudes de deslocamento para três níveis de  $H/w$ , 1820 m, 2144 m e 2725 m.

Toda a metodologia experimental para levantar as curvas de auto amortecimento foi baseada nas recomendações da *Guide on Conductor Self-Damping Measurements* a IEEE Std 563<sup>TM</sup>- 1978 (R2007) e de um documento produzido pela CIGRÉ intitulado de *State of the Art for Testing Self-Damping Characteristics of Conductors for Overhead Lines*.

A partir dos dados gerados pelas curvas de auto amortecimento, as comparações puderam ser feitas por meio de novos gráficos, tais como: potência dissipada em função da amplitude de vibração, com uma curva para cada  $H/w$ ; auto amortecimento em função da amplitude de vibração normalizada, cada gráfico para uma condição específica de vibração e um nível de  $H/w$ ; gráfico de auto amortecimento em função do  $H/w$ , nesse gráfico são plotados os dados de todos os cabos em três níveis de frequências e para uma amplitude de vibração fixa; finalmente um gráfico obtido pelo Método de Balanço de Energia, onde são comparadas as curvas de auto amortecimento com a curva de potência introduzida pelo vento.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica, onde são descritas as causas das vibrações em cabos condutores. Também são apresentados alguns mecanismos de controle de vibração em linhas de transmissão, dentre eles o auto

amortecimento. Finalmente nesse capítulo são expostos os métodos e recomendações para a realização dos ensaios de auto amortecimento.

O terceiro capítulo se refere aos procedimentos utilizados nesse trabalho, bem como a descrição dos materiais, metodologia e equipamentos utilizados para realização dos testes. O quarto capítulo contém a apresentação dos resultados bem como uma análise dos mesmos, onde são feitas comparações por meio de gráficos dos três cabos testados. No quinto capítulo são apresentadas as conclusões desse trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 VIBRAÇÃO EM CABOS CONDUTORES

A ação do vento sobre as linhas de transmissão provoca oscilações dos condutores que, se não forem amortecidas, poderão causar o rompimento dos cabos por fadiga (Labegalini, et al., 1992). Os movimentos oscilatórios estão divididos em três principais categorias: Vibração eólica, galope do condutor e vibração de esteira (Labegalini, et al., 1992). Estes tipos de vibrações se distinguem um do outro pelos diferentes mecanismos de transferência de energia, por distintos padrões de movimento, por diferentes frequências e amplitudes de vibração e por provocarem diferentes efeitos sobre os cabos, assim como a outros componentes das linhas elétricas aéreas. A Tabela 2.1 apresenta resumidamente as características de cada de cada fenômeno que provoca a oscilação dos condutores.

Atualmente são adotadas várias metodologias visando diminuir as vibrações eólicas. Devido às dificuldades existentes em fase de projeto para prever o comportamento vibratório dos cabos com precisão, opta-se pela solução de limitar alguns parâmetros, tais como a tração dos cabos ou comprimento dos vãos (Souza, 2012). O amortecimento intrínseco dos cabos varia inversamente com a carga de tração, isso implica que a tração instalada deve ser tão baixa, quanto economicamente viável (Souza, 2012).

Tabela 2.1 – Comparação entre os tipos de vibração induzidas pelo vento em cabos condutores (EPRI, 2006)

Parâmetro	Vibração Eólica	Galope do Conductor	Oscilação devido à Esteira
Tipos de Linhas de Transmissão Afetadas	Todas	Todas	Apenas linhas com feixe de condutores
Faixa de Frequência (Hz)	3 a 150	0,08 a 3	0,15 a 10
Faixa de Amplitude (Valor vezes o diâmetro do condutor)	0,01 a 1	5 a 300	Modo de Corpo Rígido 0,5 a 80 Modo de Sub vão 0,2 a 20
Condições Favoráveis para o Fenômeno de Vibração			
Característica do Vento	Laminar	Laminar	Laminar
Velocidade do Vento (m/s)	1 a 7	7 a 18	4 a 18
Superfície do Conductor	Desencapado/Congelado uniformemente	Congelado assimetricamente	Desencapado/Seco
Danos			
Tempo estimado para ocorrer a falha	3 meses a mais de 20 anos	1 a 48 horas	1 mês a 8 anos
Causa da Falha	Falha por fadiga devido ao carregamento cíclico	Altos carregamentos dinâmicos	Colisão dos condutores e desgaste físico acelerado
Componentes da Linha mais afetados	Fios do Cabo Conductor	Conductor, ferragens, isoladores e estruturas	Acessórios de suspensão, espaçadores, amortecedores e fios do condutor
Condições de projeto que afetam o movimento do condutor	Carga de esticamento, auto amortecimento, uso de amortecedores	Relação entre frequências naturais verticais e torcionais	Separação e arranjo dos condutores, distância entre espaçadores

### 2.1.1 Vibrações Eólicas

A ação do vento sobre os cabos condutores instalados em linhas de transmissão geram as vibrações eólicas. Estas vibrações representam um dos maiores problemas em linha de transmissão (EPRI, 2006), pois esse fenômeno é a causa da maioria das falhas por fadiga nos fios dos cabos condutores e nos equipamentos utilizados no cabo para suporte, amortecimento e proteção.

As vibrações eólicas podem ocorrer em praticamente qualquer linha de transmissão que estejam sujeitas a velocidades de vento em torno de 1 m/s a 7 m/s. O movimento oscilatório causado pela ação do vento gera uma flexão no condutor podendo levar a falha por fadiga nos fios do condutor, como é possível ver na Fig. 2.1. O nível de tensão de flexão depende da carga de esticamento do condutor e da amplitude do movimento oscilatório do cabo, as amplitudes de vibração no antinó podem chegar até valores correspondentes a medida do diâmetro do cabo condutor. Com o intuito de evitar a fadiga do cabo condutor o controle da amplitude de deslocamento é feito através do auto amortecimento do condutor ou através de amortecedores posicionados ao longo da linha de transmissão.



Figura 2.1 – Fios rompidos devido falha por fadiga (Cosmai, 2009).

A vibração eólica é originada do fenômeno de desprendimento de vórtices em um escoamento em torno de um corpo cilíndrico (Fig. 2.2). A primeira investigação científica sobre esse fenômeno foi feita por Strouhal em 1878. Ele estudou a vibração de um fio sujeito a uma corrente de ar e concluiu que a frequência do som emitido variava com o diâmetro do fio e a velocidade relativa entre o fio e o ar (Rayleigh, 1896).



Figura 2.2 - Esteira de Vórtice de Von Karman. (Souza, 2012)

O fenômeno consiste no descolamento alternado de vórtices em torno do corpo cilíndrico. A geração de vórtices causa uma instável distribuição de pressão na superfície do condutor que provoca o movimento oscilatório do cabo condutor. A Figura 2.3 mostra a distribuição da pressão em torno de um cilindro estacionário durante o desprendimento de vórtices, nessa situação praticamente três quartos do cilindro é exposto a uma pressão negativa. Essa distribuição alternada de pressão gera carregamentos meios e de flutuação e o modulo dessas forças é indicado por setas sólidas.



Figura 2.3 – Distribuição de pressão e modulo da força em nove momentos do desprendimento de vórtices (Zasso, et al., 1988).

As vibrações eólicas são controladas por dois parâmetros adimensionais, o número de Strouhal e o número de Reynolds. O número Strouhal ( $S$ ) relaciona a frequência de desprendimento de vórtices com a velocidade do escoamento e o diâmetro do corpo cilíndrico. Esse parâmetro é representado pela Eq. (2.1)

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

onde  $f_s$  é a frequência de formação de vórtices,  $V$  é a velocidade do vento e  $d$  é o diâmetro do condutor. Para cabos condutores o número de Strouhal é adotado como sendo igual a 0,185. Com este valor é possível manipular a Equação 2.1 de duas formas. Para uma determina velocidade de vento é possível conhecer a frequência em que o cabo condutor será excitado (Eq. (2.2)) e conhecendo as frequências naturais do cabo ( $f_n$ ) pode-se verificar quais velocidades de vento gerariam uma excitação no cabo condutor (Eq. (2.3)).

O movimento vibratório se dará início quando a velocidade do vento é suficiente para gerar frequências de desprendimento de vórtices que se igualam as frequências naturais do condutor e além disso o condutor não está suficientemente amortecido. Com isso, o cabo condutor irá iniciar um movimento oscilatório no sentido transversal ao escoamento.

$$f_s = 0,185 \cdot \frac{V}{d} \quad (2.2)$$



$$V = \frac{f_n \cdot d}{0,185} \quad (2.3)$$

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

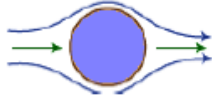

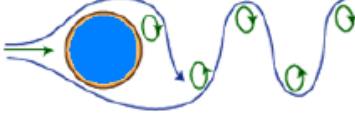

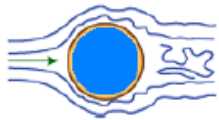

O número de Reynolds determina o tipo de escoamento que será gerado após a interação do fluido com o cabo condutor. Como o diâmetro e a viscosidade cinemática são aproximadamente constantes, este parâmetro adimensional é afetado diretamente pela variação da velocidade e consequentemente o comportamento do escoamento é afetado. A Tabela 2.2 mostra a evolução do processo de desprendimento de vórtices com o aumento do número de Reynolds. Para Reynolds menor que 5 o escoamento possui uma simetria em relação ao centro do cilindro. A medida que o número de Reynolds aumenta é formado um par de vórtices na parte posterior ao escoamento. A partir de Reynolds 40 a simetria é gradualmente perdida e os vórtices começam a se desprender de forma alternada e periódica, quando o número de Reynolds alcança 150 a esteira de vórtices começa a se tornar turbulenta.

O número de Reynolds relaciona as propriedades físicas do fluido, sua velocidade e a geometria do corpo cilíndrico (Eq. (2.4))

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} \quad (2.4)$$

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

Tabela 2.2 - Regimes de fluxo de fluido em torno de cilindros circulares (Blevins, 1994).

Esteira de vórtices	Faixa do número de Reynolds
	$R < 5$ . Regime de fluxo não separado
	$5 \leq R < 40$ . Um par fixo de vórtices em turbulência
	$40 \leq R < 150$ Esteira de vórtices é laminar $150 \leq R < 300$ Transição para vórtice turbulento
	$300 \leq R < 3(10^3)$ . A esteira de vórtices é totalmente turbulenta
	$3(10^3) \leq R < 3,5(10^5)$ . Camada limite laminar sofreu transição turbulenta. A turbulência é estreita e desorganizada.
	$3,5(10^5) \leq R$ Estabelecimento da esteira de vórtices turbulento.

O número de Reynolds e de Strouhal se relacionam como mostrado na Eq. (2.5). Na Figura 2.4 é apresentado um gráfico com valores que relacionam as duas quantidades adimensionais.

$$\frac{Re}{S} = \frac{V^2}{vf_s} \quad (2.5)$$

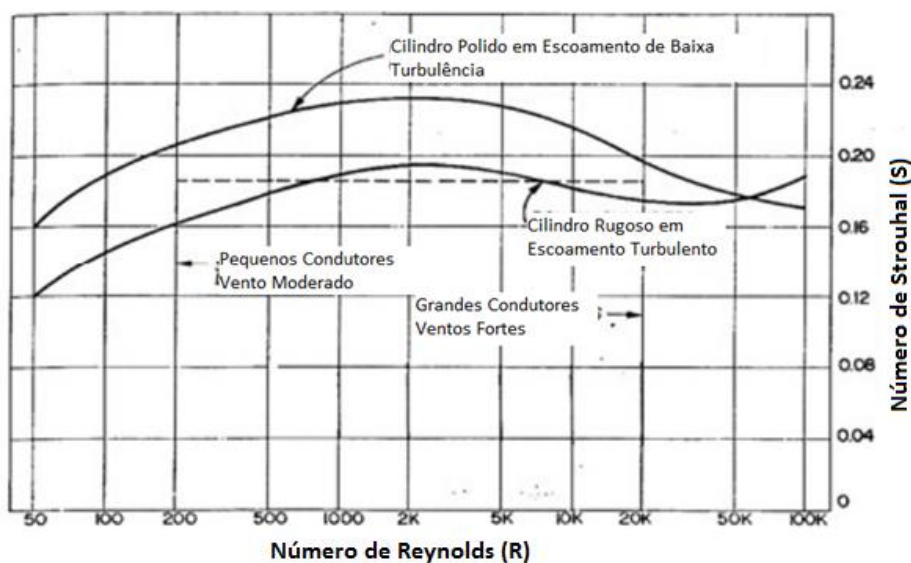


Figura 2.4 – Relação entre Número de Reynolds e Número de Strouhal (Chen, 1972).

A máxima potência que pode ser inserida no condutor devido as forças aerodinâmicas com o regime de escoamento estacionário e laminar, soprando perpendicularmente ao condutor, é determinado utilizando uma formulação empírica (Eq. (2.6)).

$$P_v = Lf^3 D^4 fnc(Y/D) \quad (2.6)$$

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

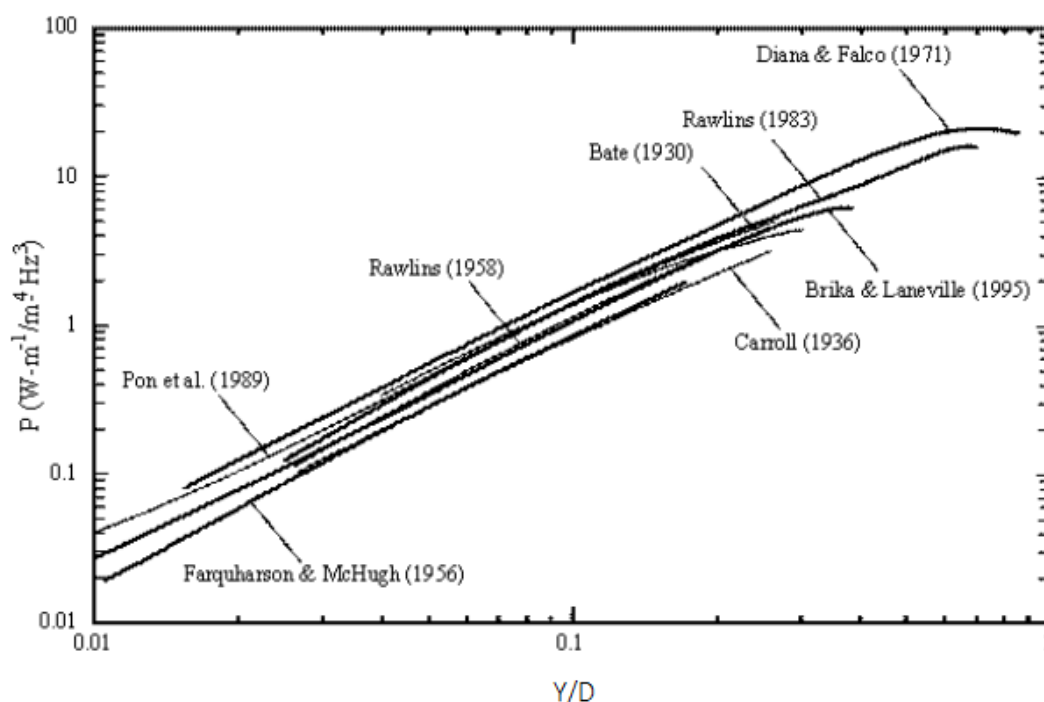


Figura 2.5 – Coeficiente de máxima potência introduzida ao cabo (EPRI, 2006).

## 2.1.2 Galope

O galope induz nos cabos uma oscilação com uma faixa de frequência de 0,1 a 3,0Hz e amplitudes em torno de cinco a trezentas vezes o diâmetro do cabo, que provocam o movimento do ponto de suspensão na direção vertical dos condutores. Esse movimento é geralmente originado quando se tem um condutor com a superfície congelada (Fig. 2.6), apresentando uma forma aerodinâmica assimétrica e ao mesmo tempo sobre a ação de ventos cruzados moderadamente fortes (7 a 18m/s) (Santos, 2008).



Figura 2.6 – Linha de transmissão com depósito de gelo.

Quando um vento sopra sobre um cilindro circular (Fig. 2.7 a), ele exerce uma força na mesma direção do vento. Isso ocorre devido a simetria, porém para uma seção transversal não circular, como é o caso de um cabo com uma camada de gelo, (Fig. 2.7 b) é gerado uma componente de força no sentido vertical, causando assim a vibração por galope. Depois que as oscilações verticais se iniciam, o vetor soma de velocidade absoluta do vento com a velocidade do condutor produz uma velocidade aparente do vento que formará, alternadamente, ângulos abaixo e acima da horizontal. Isso resulta em variações alternadas da porção do depósito de gelo em relação ao vento que efetivamente atua sobre o condutor, a Figura 2.8 ilustra esse fenômeno. Se a velocidade do condutor para cima coincide com uma força aerodinâmica de sustentação positiva e uma velocidade para baixo, com uma força de sustentação negativa, ocorrerá um galope acelerado. Caso contrário, o movimento é suprimido (Freire, 1997).

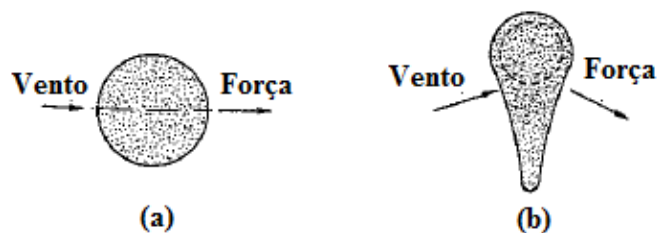


Figura 2.7 - Força resultante devido a ação do vento

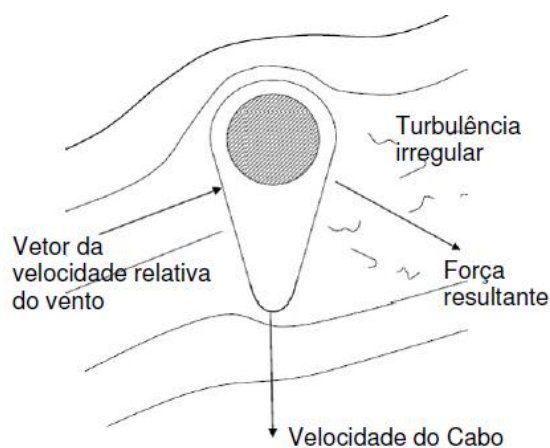


Figura 2.8 - Ação do vento sobre um cabo com uma camada de gelo (Souza, 2012).

Este fenômeno é bem menos frequente que os demais, já que ocorre apenas em áreas onde o acúmulo de gelo possa ocorrer. No Brasil, por exemplo, não existe nenhum registro desse tipo de ocorrência. (Freire, 1997).

### 2.1.3 Vibração de Esteira

Vibração de esteira proporciona vários tipos de movimentos no feixe dos condutores. O fenômeno é observado quando os condutores estão desencapados e secos. No entanto, pode ocorrer com um condutor congelado ou na ocorrência de chuvas (Santos, 2008). As oscilações induzidas pela esteira do escoamento são características de linhas elétricas aéreas com dois ou mais cabos por feixe. A esteira produzida por um cabo a barlavento, lado onde sopra o vento, pode provocar forças variáveis e complexas sobre o cabo a sotavento, lado onde sai o vento, conforme mostra a Figura 2.9. Este movimento de barlavento é transferido para o sotavento através de separadores ou de outros equipamentos.

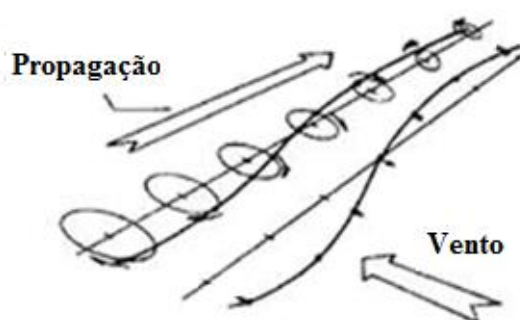


Figura 2.9 - Oscilações devido à esteira do escoamento num feixe duplo de cabos. (Lilien, 2004).

As frequências de vibração variam entre 1 e 10 Hz e são causadas por vento moderado a forte com velocidade que varia entre 4 a 18 m/s. É frequente a ocorrência deste fenômeno sobre cabos secos e em terrenos amplos (Souza, 2012).

Os amortecedores usuais como *stockbridge* ou similares, localizados próximos dos pontos de fixação de suspensão não conseguem amortecer as vibrações de feixes de cabos (Anderson, et al., 1995). Porém, segundo Simpson, et al., (1990) as vibrações eólicas que ocorrem em cabos múltiplos podem ser controladas por duas técnicas: uma baseada na combinação do espaçamento de elementos rígidos e amortecedores do tipo *stockbridge* nas extremidades do vão, outra consistindo no posicionamento adequado de separadores amortecedores.

## 2.2 VIBRAÇÃO DE SISTEMAS CONTÍNUOS

Simplificando o movimento do condutor para uma corda esticada e engastada nas extremidades. Suponhamos que a corda tenha comprimento  $L$  e suas extremidades estejam fixas nos pontos  $x = 0$  e  $x = L$  e que a corda esteja esticada com uma tensão constante  $H$ . A representação dessa simplificação é mostrada na Figura 2.10.

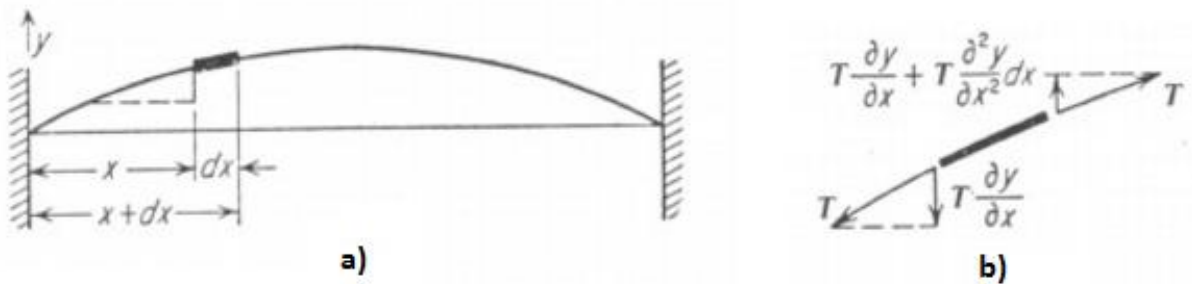


Figura 2.10 - a) Corda vibrante engastada; b) Componentes verticais das tensões que agem sobre um elemento  $dx$  da corda (Den Hartog, 1972)

Considerando também que a corda tenha densidade linear uniforme  $w$  que é dada pela Eq. (2.7).

$$w = \frac{dm}{dx} \quad (2.7)$$

Onde  $dx$  é o elemento infinitesimal da corda sobre análise. Seja  $y(x, t)$  a curva de deflexão durante a vibração, onde as ordenadas variam com a posição ao longo da corda e com o tempo e assumindo que a corda vibre apenas transversalmente a direção  $x$ .

Realizando o balanço de forças no elemento  $dx$  obtemos que as componentes horizontal ( $F_x$ ) e vertical ( $F_y$ ) da força resultante atuando sobre o segmento da corda são:

$$F_x = H \cos(\theta + \Delta\theta) - H \cos\theta, \quad (2.8)$$

$$F_y = H\text{sen}(\theta + \Delta\theta) - H\text{sen}\theta. \quad (2.9)$$

A equação do movimento é deduzida então através da 2ª Lei de Newton para o elemento infinitesimal. A força resultante na direção  $y$  fica da seguinte forma:

$$F_y = (w\Delta x) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (2.10)$$

Substituindo (2.10) em (2.9) temos:

$$H\text{sen}(\theta + \Delta\theta) - H\text{sen}\theta = (w\Delta x) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (2.11)$$

Como não há movimento na direção  $x$ , faz com que não haja forças nessa direção, logo a Eq. (2.8) fica:

$$\cos(\theta + \Delta\theta) = \cos\theta, \quad (2.12)$$

dividindo a Eq. (2.11) por  $\cos\theta$  e utilizando a relação da Eq. (2.12) obtemos:

$$\tan(\theta + \Delta\theta) - \tan\theta = \frac{\Delta x}{\cos\theta} \frac{w}{H} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (2.13)$$

Através da definição geométrica de derivada a Eq. (2.13) pode reescrita como:

$$\frac{\partial y}{\partial x}(x + \Delta x, t) - \frac{\partial y}{\partial x}(x, t) = \frac{\Delta x}{\cos\theta} \frac{w}{H} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (2.14)$$

Dividindo os dois lados da Eq. (2.14) por  $\Delta x$ :

$$\frac{\frac{\partial y}{\partial x}(x + \Delta x, t) - \frac{\partial y}{\partial x}(x, t)}{\Delta x} = \frac{1}{\cos\theta} \frac{w}{H} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (2.15)$$

Tomando o limite  $\Delta x$  tendendo a zero da parte esquerda da equação, a expressão torna-se a derivada parcial em relação a  $x$ .

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\frac{\partial y}{\partial x}(x + \Delta x, t) - \frac{\partial y}{\partial x}(x, t)}{\Delta x} = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (2.16)$$

A Equação (2.15) pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}(x, t) = \frac{1}{\cos\theta} \frac{w}{H} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}(x, t) \quad (2.17)$$

Considerando agora que os deslocamentos da corda são pequenos, implicando que  $\theta \ll 1$  e que  $\cos\theta \approx 1$ . Com essa consideração a Eq. (2.17) torna-se a equação da corda vibrante:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}(x, t) = \frac{w}{H} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}(x, t) \quad (2.18)$$

O termo  $w/H$  na Eq. (2.18) tem dimensão de  $1/(\text{velocidade})^2$  de maneira que a Eq. (2.18) pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}(x, t) = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}(x, t) \quad (2.19)$$

onde  $v$  é identificada com a velocidade de propagação de ondas na corda esticada:

$$v = \sqrt{\frac{H}{w}} \quad (2.20)$$

A relação da Eq. (2.19) implica que a velocidade de propagação da onda aumenta com a tensão na corda e diminui com a sua inércia.

Para obter a solução da equação da onda unidimensional (Eq. (2.19)), deve-se supor que a corda vibre em uma de suas frequências naturais e em uma função harmônica. Nessa situação a corda terá uma configuração semelhante as formas modais de vibração, e isto implica dizer matematicamente que a função  $y(x, t)$  pode ser reescrita através da Eq. (2.21) que apresenta a separação das variáveis  $x$  e  $t$ .

$$y(x, t) = y(x) \text{sen}\omega t \quad (2.21)$$

Derivando duas vezes a Eq. (2.21) em relação a  $t$  e a  $x$ , são obtidas as equações:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \omega y \text{cos}\omega t \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\omega^2 y \text{sen}\omega t \quad (2.23)$$



$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial y}{\partial x} \text{sen}\omega t \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \text{sen}\omega t \quad (2.25)$$

Substituindo as Eqs. (2.22) e (2.24) na Eq. (2.17) obtém-se uma equação diferencial ordinária de segunda ordem:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \text{sen}\omega t = -\frac{\mu}{T} \omega^2 y \text{sen}\omega t,$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -\frac{w\omega^2}{H} y \quad (2.26)$$

A solução geral da Eq. (2.25) é dada pela Eq. (2.26), a qual determina a amplitude da corda como função do espaço.

$$y(x) = C_1 \text{sen} \left( x \sqrt{\frac{w\omega^2}{H}} \right) + C_2 \text{cos} \left( x \sqrt{\frac{w\omega^2}{H}} \right), \quad (2.27)$$

Onde  $C_1$  e  $C_2$  são as constantes de integração e podem ser determinadas pelas condições iniciais de que, nos extremos da corda, as amplitudes sejam iguais a zero.

$$y = 0 \Rightarrow \begin{cases} x = 0 \\ x = l \end{cases}$$

Para determinar o valor de  $C_2$ , substitui-se o valor de  $x$  por zero, obtendo:

$$y(0) = 0 = C_1 \cdot 0 + C_2 \cdot 1, \quad (2.28)$$

$$C_2 = 0.$$

Da mesma forma para determinar o valor de  $C_1$ , utiliza-se da condição inicial que  $x = l$  quando  $y = 0$ ,

$$y(l) = 0 = C_1 \text{sen} \left( l \cdot \sqrt{\frac{w\omega^2}{H}} \right) \quad (2.29)$$

A solução trivial para a Eq. (2.28) é  $C_1 = 0$ , que é uma solução correta, porém essa solução se aplica para o caso da corda permanecer estacionária. Entretanto, a equação também pode ser satisfeita, fazendo o argumento do seno com múltiplos inteiros de  $\pi$ , o que é apresentado na Eq. (2.30).

$$l \cdot \sqrt{\frac{\mu\omega^2}{T}} = n\pi \quad (2.30)$$

sendo  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ , a variável inteira que representa o modo de vibração da corda. Como cada valor de frequência de vibração  $\omega$  representa um modo de vibração, essa frequência é então chamada de frequência natural  $\omega_n$ . Manipulando a Eq. (2.31) obtemos uma expressão para  $\omega_n$ .

$$\omega_n = \frac{n\pi}{l} \sqrt{\frac{H}{w}} \quad (2.31)$$

Variando o valor de  $n$  é possível encontrar a forma dos modos naturais de uma corda vibrante, como apresentado na Fig. 2.11.

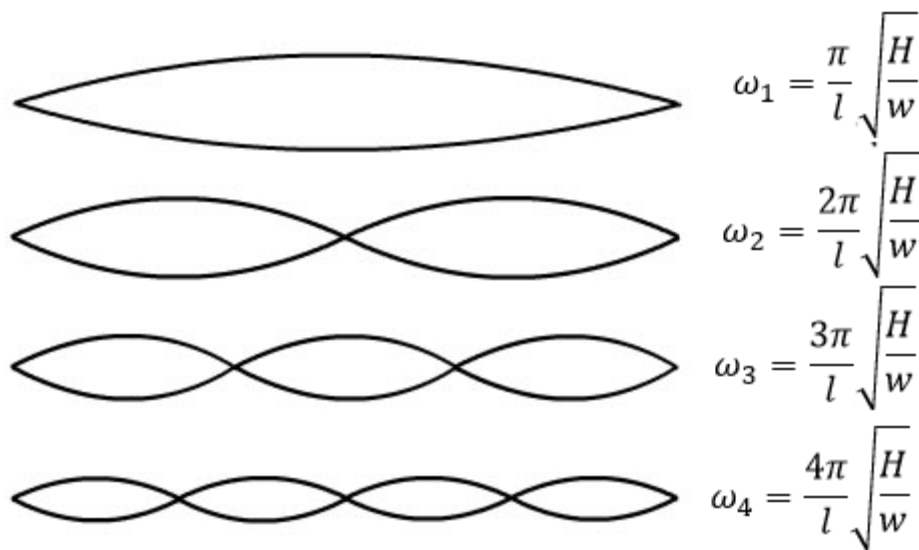


Figura 2.11 – Quatro primeiros modos naturais de uma corda.

Na prática o cabo condutor na linha de transmissão não é como uma corda vibrante, devida a rigidez flexional ( $EI$ ) que é o produto entre o módulo de elasticidade do cabo e seu momento de inércia. Um modelo para essa situação descrito por uma equação parcial diferencial é apresentado por (Kiessling, et al., 2003).

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - H \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + w \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = qW + qD \quad (2.32)$$

onde os termos  $qW$  e  $qD$  representam as forças pela ação do vento e forças de amortecimento, respectivamente.

O cálculo das frequências naturais para esse modelo é apresentado na Eq. (2.33). O desenvolvimento dessa formulação é encontrado no trabalho de Claren, et al., (1969).

$$\omega_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \frac{H}{w} \left[1 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \frac{EI}{H}\right]} \quad (2.33)$$

Uma comparação é feita por Steidel (1989), através de um gráfico de frequência versus comprimento de onda, representado na Fig. 2.12. Onde é exemplificado um caso específico no qual tem a comparação da corda vibrante, de um cabo engastado e um cabo apoiado, é observado o comportamento das curvas para cada caso, e nos casos dos cabos com extremidades engastadas ou apoiadas, a adição da rigidez a flexão provoca uma diferença no comprimento de onda para frequências superiores a 10 Hz e essa diferença tende a aumentar com o aumento da frequência.

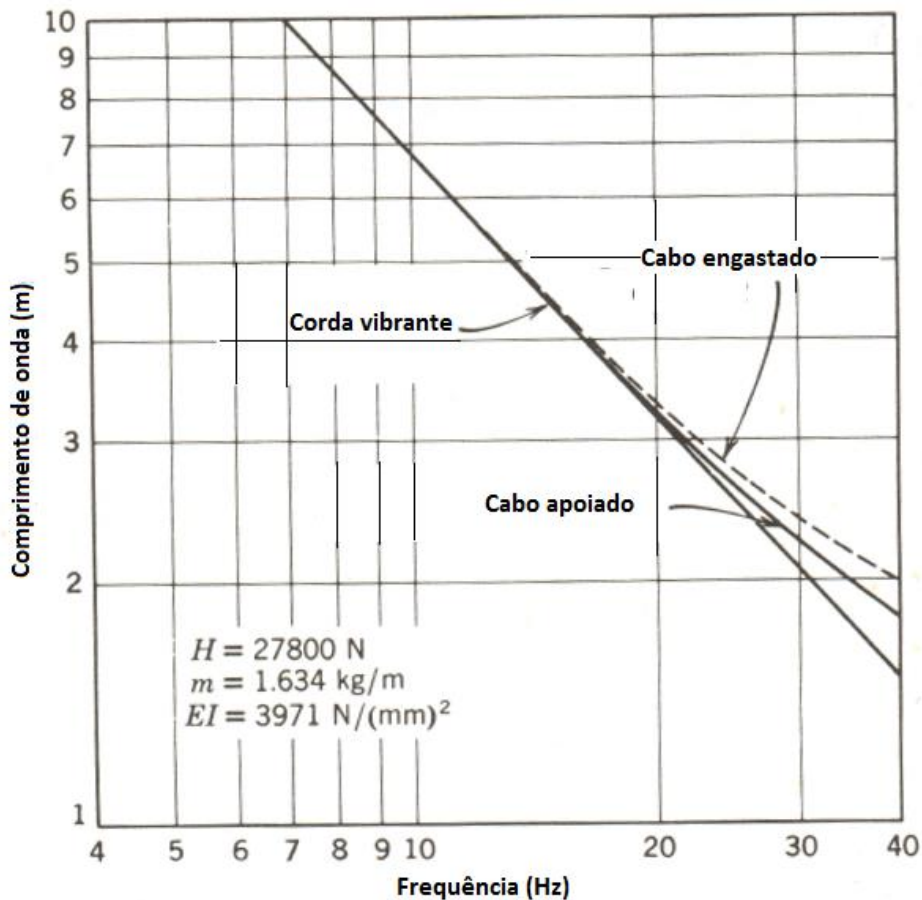


Figura 2.12 - Gráfico do comportamento das curvas de corda e cabo (Steidel, 1989).

Concluindo assim, que a parcela da equação que considera a rigidez a flexão torna-se desprezível para frequências baixas, e assim o comportamento linear dos cabos de linhas de transmissão pode ser considerado igual ao das cordas vibrantes, para essa situação.

## 2.3 CABOS CONDUTORES

Cabos condutores de energia são os componentes mais importantes em uma linha de transmissão, pois sua função é transmitir a energia elétrica. O custo de instalação e fabricação desse componente tem um peso significativo no custo total da linha de transmissão, podendo chegar a valores superiores a 40% do total investido na instalação de uma nova linha de transmissão (EPRI, 2006). Devido a isso é de suma importância uma correta seleção tanto das propriedades elétricas quanto mecânicas do cabo condutor.

Torres de transmissão são utilizadas para sustentar e manter um espaçamento ideal entre os cabos condutores. Estas torres são normalmente estruturas metálicas treliçadas que devem suportar cargas de compressão e flexão (Menezes, 2015). A Figura 2.13 apresenta a imagem de torres de transmissão sustentando cabos condutores.



Figura 2.13 – Cabos condutores instalados nas linhas de transmissão

Os cabos condutores são fixos às torres por meio de grampos de suspensão e o isolamento elétrico entre o condutor e torre de transmissão é feito por meio de isoladores, que podem ser fabricados em material cerâmico, como porcelana vitrificada ou vidro temperado, ou baseados em compostos poliméricos, como a borracha de silicone em torno de um núcleo de fibra de vidro. Uma exemplificação dessa montagem é apresentada na Fig 2.14.

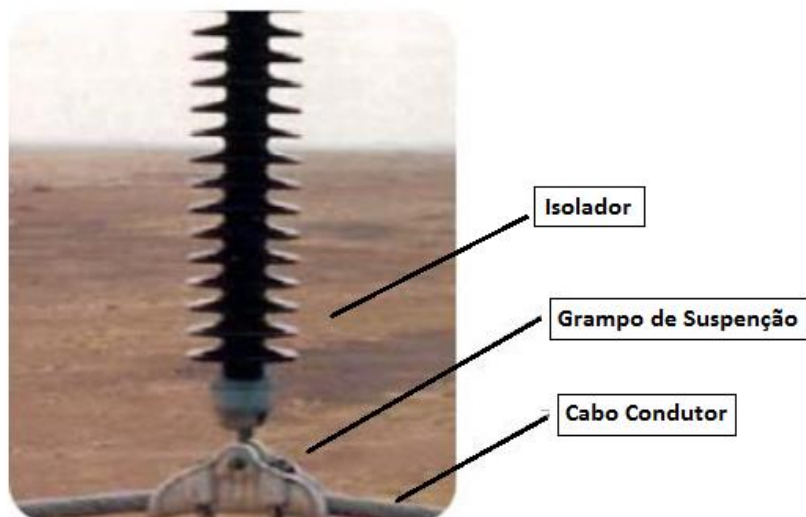


Figura 2.14 – Conjunto do cabo montado no grampo e isolador (Cloutier, et al., 2011).

A forma construtiva dos cabos condutores mais amplamente aplicada é a de fios com perfil circular dispostos em várias camadas em volta de um fio central, chamado de alma que pode ser do mesmo material ou diferente. Um exemplo de configuração de cabo condutor é mostrado na Fig. 2.11. O encordoamento dos fios é sempre feito em sentido oposto de uma camada para outro, com o intuito de manter a integridade construtiva do cabo. Sendo que para cabos de alumínio a convenção usual é que a camada mais externa tenha o sentido de rotação voltado para a direita. Para que as camadas de fios dos condutores com fios de mesmo diâmetro se encaixem, a camada imediatamente inferior terá seis fios a menos que a camada superior. Devido a necessidade de ajustar a relação entre resistência mecânica e peso do condutor, ainda existe a possibilidade de utilizar fios de diferentes diâmetros.



Figura 2.15 – Estrutura de um cabo condutor típico

A maior parte dos requisitos na seleção e projeto de um condutor estão relacionados às suas propriedades mecânicas. Os aspectos relacionados a parte elétrica estão associados a densidade de corrente, resistência elétrica e perda de energia elétrica, o que pode ser resolvido aumentando a seção

transversal do condutor ou utilizando feixe de cabos condutores. Para o ajuste das características mecânicas, são empregados o uso de diferentes ligas de alumínio em diferentes configurações.

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

- Cabo de Alumínio (CA): Todos os fios desse tipo de condutor são produzidos com alumínio normalmente da liga 1350-H19. Devido à baixa relação resistência por peso, esse tipo de condutor é recomendado para ser instalado em linhas de transmissão com pequenos vãos e áreas onde os carregamentos de vento são baixos.
- Cabo de Alumínio Liga (CAL): Esses condutores são construídos com fios de liga alumínio da série 6000. Essa liga é caracterizada pela adição de silício e magnésio e por passar por um tratamento térmico. Apesar de ter uma resistência mecânica superior à dos CA's a condutividade elétrica é inferior.
- Cabo de Alumínio com Alma de Aço (CAA): Esses cabos são caracterizados por possuírem os fios de aço nas camadas mais internas e fios de alumínio nas camadas mais externas. Os fios de aço asseguram uma maior resistência a tração para o cabo condutor. Sendo esse tipo o mais utilizado no Brasil.
- Cabo de Alumínio com Alma de Liga Alumínio (CALA): Os condutores do tipo CALA são constituídos por fios de alumínio nas camadas externas e fios de liga alumínio na alma do condutor. Tanto para os cabos CAA quanto CALA os fios de alumínio são posicionados nas camadas mais externas, isso é feito devido ao efeito pelicular que faz com que a maior parte da corrente passe pela região mais distante do centro do condutor e como o alumínio puro tem uma condutividade maior, ele é posicionado nessas regiões.

Além desses tipos ainda existem condutores compostos por diferentes perfis de fios, como os condutores com fios com formato de Z chamados de Aero-Z ou com fios trapezoidais (Figura 2.16). Os dois tipos podem ter suas almas com fios convencionais ou com alma feita de material compósito. Esses condutores possuem uma maior capacidade de transmissão de corrente para um mesmo diâmetro nominal, além disso, por terem uma maior área de contato entre os fios, estes dissipam mais energia mecânica durante o processo de vibração eólica (Munaswany, et al., 2000)

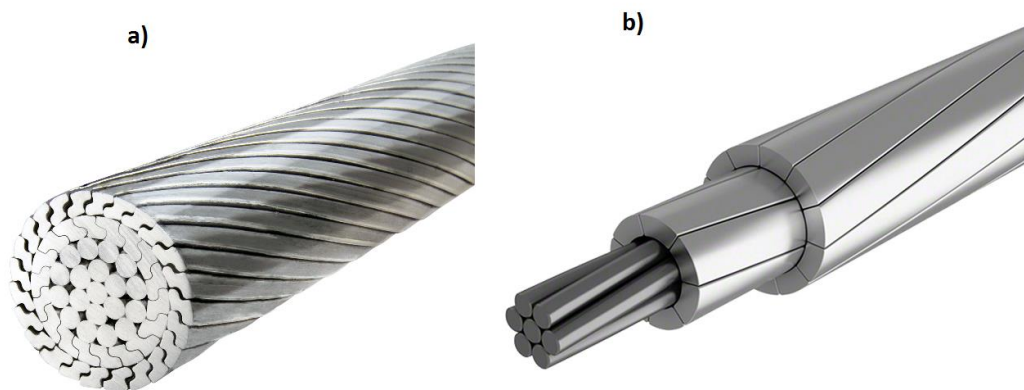


Figura 2.16 – a) Conductor Aero-Z; b) Conductor trapezoidal

## 2.4 PARÂMETRO $H/w$

Cabos condutores quando estão instalados em linhas de transmissão estão submetidos a uma carga de tração, também chamada de carga de esticamento ( $H$ ). Essa carga de tração é de fundamental relevância no projeto de uma linha de transmissão, pois esta impacta em diversos fatores tais como a vida útil do cabo, pois uma carga de esticamento mais elevada acelera o processo de fadiga e reduz o auto amortecimento do condutor. Por outro lado, uma carga de esticamento menor vai aumentar a flecha do vão (Figura 2.13) que por sua vez, é fundamental no projeto das torres de transmissão, fazendo com que exista a necessidade de construir torres maiores e mais resistentes, além de uma fundação mais robusta, encarecendo o projeto da linha de transmissão.

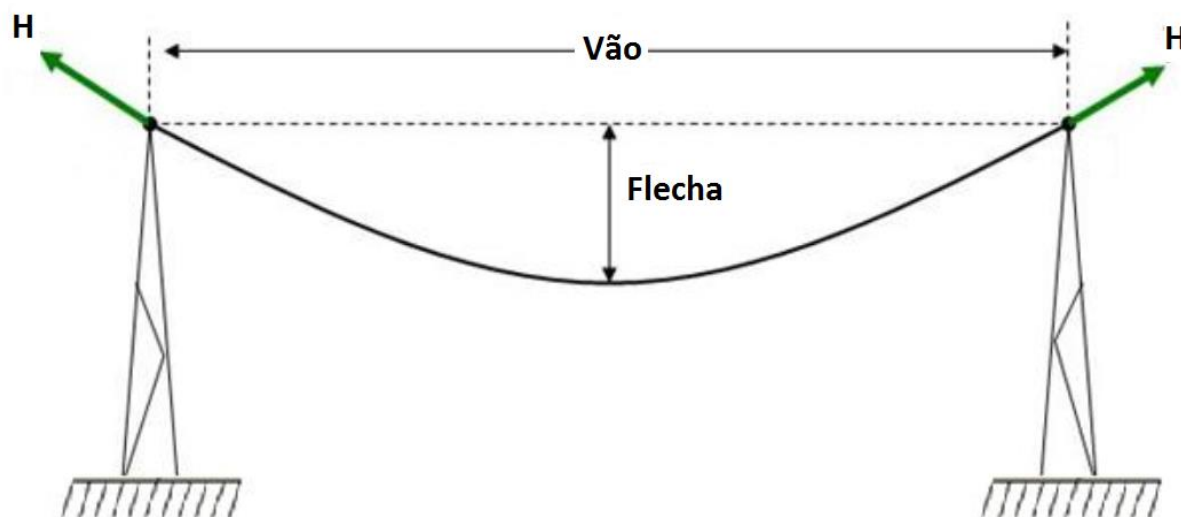


Figura 2.17 – Esquema de um condutor entre duas torres de transmissão.

Portanto, a seleção da carga de esticamento é um dos requisitos para otimização do projeto de linhas de transmissão de energia. Por muitos anos o CIGRÉ (*Conseil International des Grands Réseaux*

*Électrique*) sugeriu o uso do parâmetro EDS (*Every Day Stress*) para o projeto de linhas de transmissão visando a proteção contra falhas por fadiga, esse parâmetro é expresso em termos da porcentagem da Tensão Limite de Ruptura do condutor. O parâmetro EDS foi estudado e estabelecido por um grupo da CIGRÉ denominado “EDS Panel”. Este grupo fez seu estudo quando a maior parte das linhas de transmissão pelo mundo eram constituídas de Cabos de Alumínio com Alma de Aço (CAA) com razões de aço para alumínio entre 16% e 23%. Na época, quase não se utilizava cabos com razões menores e principalmente, não eram utilizadas ligas de alumínio (Barret, et al., 2001).

A CIGRÉ também fixou os limites do EDS entre 18-20% para condutores sem amortecedor e 21-23% para condutores com amortecedor (Zetterholm, 1960). No entanto, foi observado que alguns cabos condutores falharam apesar de seguirem os valores recomendados de EDS, o que indica que este parâmetro pode ser insuficiente para explicar as falhas encontradas, principalmente para cabos com configurações diferentes daquelas encontradas até a realização do estudo pelo CIGRÉ. Com o propósito de abranger diferentes tipos de condutores o CIGRÉ propôs como substituição ao parâmetro EDS um novo parâmetro, denominado  $H/w$ , (razão entre carga de tração  $H$  e massa por unidade de comprimento do condutor  $w$ ) como critério guia para investigar a fadiga em cabos condutores.

O parâmetro  $H/w$ , também chamado de constante de catenária, apresenta uma série de vantagens como critério guia em relação ao estudo de fadiga em cabos condutores se comparado ao EDS. Apesar de ainda não representar a solução definitiva para este estudo, o  $H/w$  abrange mais informações para a comparação de vida entre os diferentes condutores. Abaixo são explicitados fenômenos importantes em que o  $H/w$  está inserido:

- Para cabos condutores de alumínio com alma de aço o  $H/w$  pode ser expresso como uma relação das áreas ( $A_{al}$ ,  $A_{aço}$ ), tensões atuantes ( $S_{al}$ ,  $S_{aço}$ ) e densidades ( $\rho_{al}$ ,  $\rho_{aço}$ ) dos fios de alumínio e de aço, respectivamente, do condutor, além da constante gravitacional ( $g$ ).

$$\frac{H}{w} = \frac{A_{al}S_{al} + A_{aço}S_{aço}}{g(A_{al}\rho_{al} + A_{aço}\rho_{aço})} \quad (2.34)$$

A Equação (2.35) pode ser simplificada com as consideração que o  $\rho_{aço}$  é três vezes maior que o  $\rho_{al}$  e que as deformações sofridas pelos fios de aço e alumínio são iguais. Pela Lei de Hooke obtemos que:

$$S_{aço} = 3S_a \quad (2.35)$$

Substituindo (2.36) em (2.35) obtém-se:



$$S_{al} = g\rho_{al} \frac{H}{w} \sigma \quad (2.36)$$

Da Equação (2.36), pode-se notar que a tensão nos fios de alumínio é proporcional ao valor de  $H/w$  e independe da quantidade de fios de aço presente no cabo condutor. Segundo Claren (1978) quando um condutor está submetido a um mesmo nível de  $H/w$  o cabo condutor deveria apresentar uma mesma resistência a fadiga.

- A vida em fadiga do condutor está relacionada com a tensão de tração estática que também está ligada ao parâmetro  $H/w$  (Fadel, et al., 2012).
- O parâmetro  $H/w$  também está relacionado com o valor da flecha da catenária formada pelo cabo quando esticado. Para um mesmo valor de  $H/w$ , independente da configuração do cabo, os condutores terão a mesma flecha. A expressão da flecha ( $s$ ) para um vão  $L$  usando a fórmula da catenária é dada por:

$$s = \frac{H}{w} \left[ \cosh \left( \frac{L w}{2 H} \right) - 1 \right] \quad (2.37)$$

- O auto amortecimento é uma grandeza física inerente ao condutor, medida pela quantidade de energia que este dissipa durante o processo de vibração. De acordo com o Relatório 482 da CIGRÉ (2011) o auto amortecimento de um condutor sujeito a uma carga de tração é definido pela potência dissipada por unidade de comprimento deste condutor vibrando em um modo natural. O auto amortecimento do condutor pode ser uma das principais fontes de dissipação de energia durante a vibração eólica, porém, à medida que se aumenta a tensão no condutor ( $H$ ), o escorregamento dos fios é reduzido, isto tem como resultado a diminuição do auto amortecimento, além disso, o número de fios e o diâmetro desses fios (influência da massa linear ( $w$ )) que compõe o condutor, impacta diretamente na quantidade de energia dissipada, isso porque um número maior de fios implica em mais atrito entre os mesmos.
- As vibrações eólicas ocorrem quando a frequência de desprendimento de vórtices é igual a uma das frequências naturais do cabo condutor. Como já demonstrado na Eq. (2.31) o parâmetro  $H/w$  também está presente no cálculo da frequência natural de um meio contínuo.

Os valores máximos de  $H/w$  sugeridos pela CIGRÉ (2005), para um dimensionamento seguro da linha de transmissão contra falhas por fadiga são em função do terreno onde a linha será instalada. A formação do terreno influencia na intensidade das vibrações eólicas, isso devido ao fato de que ventos laminares (ocorrem em terrenos planos) geram movimentos mais severos que ventos em regimes turbulentos. A Tabela 2.3 mostra os valores de recomendados de  $H/w$  de acordo com a categoria do terreno. O valor mínimo admissível é de 1000 m para terrenos planos, onde os carregamentos devido a

ação do vento tendem a ser maiores. É importante ressaltar que os valores da Tab. 2.3 são validos para condutores nus não amortecidos do tipo CA, CAA, CAL e CALA.

Tabela 2.3 – Valores recomendados de  $H/w$  em função do terreno (CIGRÉ, 2005).

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

## **2.5 CONTROLE PASSIVO DE VIBRAÇÃO EM CABOS**

A maneira mais recomendada para o controle de movimentos oscilatórios em cabos é o controle passivo de vibração. Existem vários métodos para reduzir os efeitos das vibrações, como aumentar o amortecimento através de absorvedores e massas auxiliares fixados junto às linhas, evitar a frequência de ressonância e a mudança na geometria do cabo (Rao, 2008).

### **2.5.1 Mudança de geometria**

Para diminuir o efeito de esteira de vórtices de Von Karman é possível carenar o cabo, diminuindo as variações no campo de pressão e diminuindo a periodicidade do desprendimento dos vórtices, evitando ciclos alternados de tensão mecânica. A Figura 2.12 mostra alguns tipos de mudanças possíveis para a geometria do cabo.

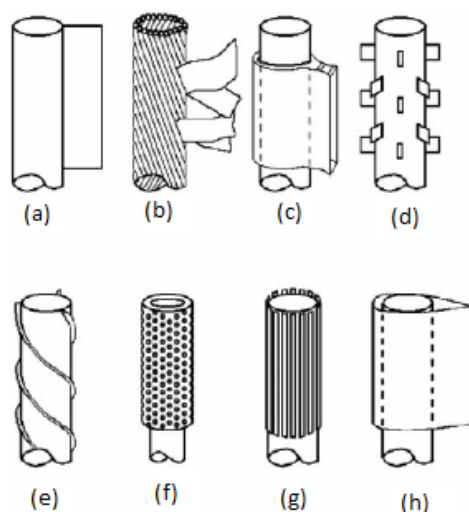


Figura 2.18 – Tipo de modificação de geometria em cabos (Kumar, et al., 2008).

Um dos tipos de modificação na geometria é a conformação em formato de aerofólio (Fig. 2.6 - h). Esse tipo de geometria tende a diminuir a vibração eólica em 80% (Kumar, et al., 2008); porém, essa modificação torna os custos de fabricação e instalação muito elevados.

## 2.5.2 Absorvedores de vibração em linhas de transmissão

Se as condições de vento predominantes ocorrem de tal forma que ocasione vibrações nos cabos condutores, alguma forma de prevenção deve ser investigada. Os amortecedores devem ser selecionados com base nas frequências em que se espera encontrar nas linhas de transmissão. Essa análise deve ser feita corretamente, pois um amortecedor localizado de forma inadequada pode afetar a capacidade do amortecedor para suprimir os efeitos nocivos da vibração eólica.

Com o intuito de minimizar os efeitos das vibrações eólicas em cabos condutores foram desenvolvidos vários tipos de amortecedores.

## 2.5.3 Absorvedor tipo Bretelle

Esse dispositivo é formado por um cabo preso junto próximo aos grampos de fixação, formando laços (Fig. 2.13). Este amortecedor dissipa energia através da fricção do cabo não tensionado, além disso, as características de vibração entre os fixadores também são mudadas (Labegalini, et al., 1992).

Apesar de ser um amortecedor barato, pois pode ser produzido com sobras de condutores. Sua instalação é mais demorada que os demais e ainda possui a desvantagem de não poder ser instalado com linha viva (Labegalini, et al., 1992).

Uma variação desse dispositivo é o amortecedor tipo festão. Esse consiste em vários laços de sobra do próprio condutor, conectados paralelamente (Fig. 2.14).

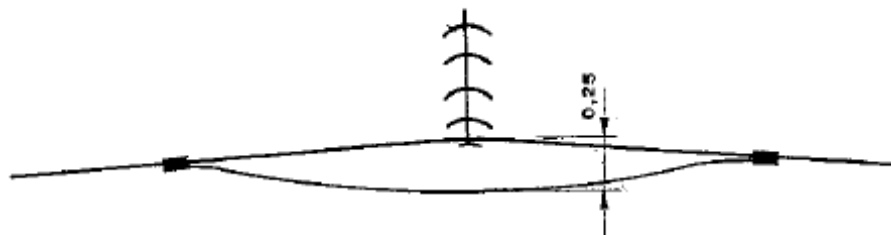


Figura 2.19 - Amortecedor tipo Brallete (Labegalini, et al., 1992).



Figura 2.20 - Amortecedor tipo Festão (Labegalini, et al., 1992).

#### 2.5.4 Absorvedor de braço oscilante

Este dispositivo consiste em um braço e um anel de impacto que são fixados ao cabo condutor (Fig. 2.15). A energia é dissipada através do impacto de uma extremidade do braço oscilante com o anel.

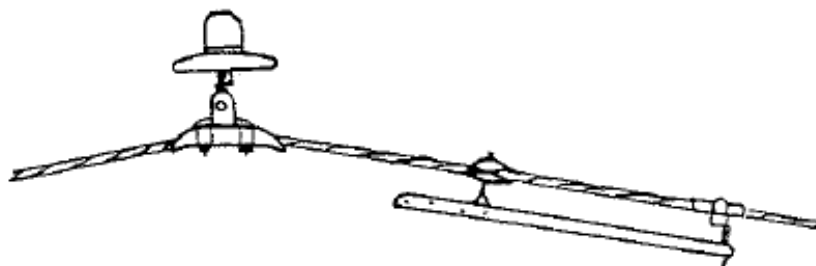


Figura 2.21 - Amortecedor tipo braço oscilante (Labegalini, et al., 1992).

#### 2.5.5 Absorvedor de impacto

Esse dispositivo é formado por massa que colide com uma base, sendo que essa massa é suportada por uma mola (Fig. 2.16). Quando o cabo vibra, o dispositivo faz com que a massa vibre, comprimindo e descomprimindo a mola, e com isso a massa se choca com a base. A redução da amplitude de vibração ocorre justamente com a dissipação de energia no momento do impacto.

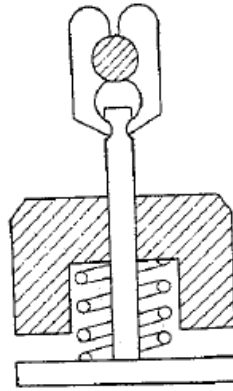


Figura 2.22 - Amortecedor de impacto (Labegalini, et al., 1992).

### 2.5.6 Absorvedor tipo Helgra

Esse dispositivo consiste em discos de ferro, com furos no centro, separados por um material emborrachado; os discos são sustentados por uma haste cilíndrica articulada (Fig. 2.17). A vibração no cabo condutor gera impactos entre as massas e a energia é dissipada pela deformação no material entre os discos. Segundo Labegalini (1992), quando esse amortecedor é aplicado corretamente pode-se obter até 90% na absorção da vibração no cabo. Sua vantagem em relação a outros absorvedores de vibração é que este não apresenta frequência própria, com isso, não introduz vibração nos cabos, além de não sofrer fadiga.

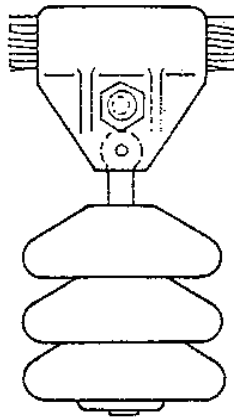


Figura 2.23 - Amortecedor tipo Helgra. (Labegalini, et al., 1992).

### 2.5.7 Absorvedor em espiral

Esse mecanismo de amortecimento é utilizado em geral para condutores com diâmetro menor que 20 mm (Dulhunty, 1984). Cabos com diâmetros reduzidos podem sofrer vibrações de até 300 Hz (Dulhunty, 1984), o que faz a utilização de outros tipos de amortecedores se torne inviável.

Esse amortecedor consiste de um cabo enrolado ao condutor, como mostra a Figura 2.18, quando o condutor vibra o cabo enrolado a ele se opõe ao movimento. O impacto do condutor e o amortecedor dissipa a energia e diminui a amplitude de vibração.



Figura 2.24 – Amortecedor em espiral (Dulhunty, 1984).

### 2.5.8 Absorvedor *Stockbridge*

O amortecedor *stockbridge* foi desenvolvido em 1925 por George H. Stockbridge, este é um amortecedor largamente utilizado na redução de vibrações eólicas em linhas de transmissão. Os modelos de *stockbridge* são constituídos por um cabo de fios flexíveis de aço, conhecido por cabo mensageiro e por massas fixadas nas suas extremidades.

Um grampo para fixação ao cabo está ligado ao cabo mensageiro, conforme mostrado na Figura 2.19.

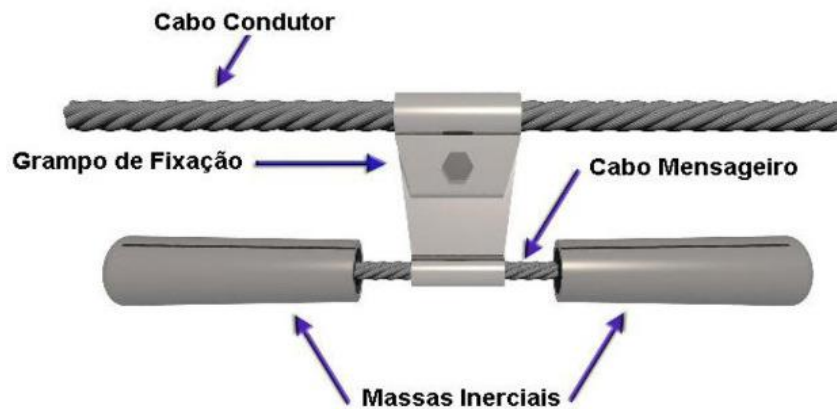


Figura 2.25 Absorvedor *stockbridge* (Silva Junior, 2011).

O amortecedor *stockbridge* dissipa a energia através do amortecimento histerético do material dos fios componentes do cabo mensageiro, ou seja, do amortecimento que ocorre pelo atrito interno entre moléculas quando o sólido é deformado, fazendo com que a energia seja dissipada pelo material, assim como, através de amortecimento devido à fricção entre os fios quando as massas oscilam, ou seja, do amortecimento que ocorre quando o atrito é seco e há fricção entre dois sólidos sem lubrificação.

O amortecimento acontece devido à inércia gravitacional ao movimento. Segundo Labegalini, et al (1992), podem ser distinguidas três fases em um ciclo de amortecimento. Essas fases serão descritas a seguir e ilustradas na Figura 2.26

– Na fase I, o cabo é dobrado para baixo. Contudo, o amortecedor mantém a sua posição devido à inércia;

– Na fase II, o cabo é fletido para cima e o amortecedor, sendo vencido pela inércia estática, adquire energia cinética e movimenta-se para baixo;

– Na fase III, o cabo retorna à posição negativa. Porém, o amortecedor, devido à energia cinética obtida do condutor, é fletido para cima.

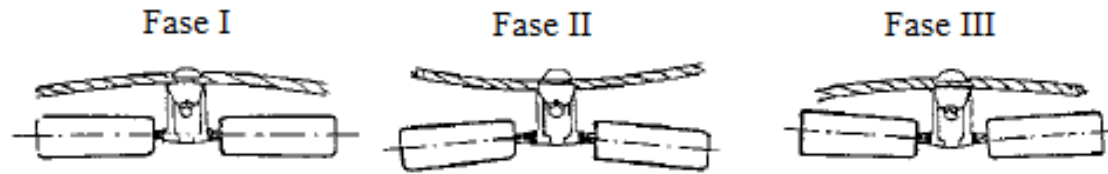


Figura 2.26 – Fases de amortecimento (Labegalini, et al., 1992).

Os amortecedores deste tipo têm-se mostrado muito eficazes, se utilizado em suas frequências de ressonância. Entretanto, a sua eficiência diminui muito quando o *stockbridge* atua fora dessas frequências. Para evitar que isso aconteça, é necessário o conhecimento prévio das características de vibração do cabo, para que possa ser utilizado o amortecedor com faixas de operação dentro das condições de vibração do condutor.

Para atender diferentes condições de operação podemos variar o tipo de material de que é feito o cabo mensageiro, o tamanho, material e formato das massas instaladas, assim como o tipo de grampo usado, o qual representa um papel importante atendendo à necessidade de não ferir o cabo, pois isso poderia reduzir a sua vida útil.

O desempenho dos amortecedores *stockbridge* é normalmente avaliado de acordo com normas estabelecidas internacionalmente. A Figura 2.27 representa uma curva de potência dissipada em função da frequência de um amortecedor do tipo *stockbridge*, onde é possível observar os picos de ressonância característicos desse absorvedor.

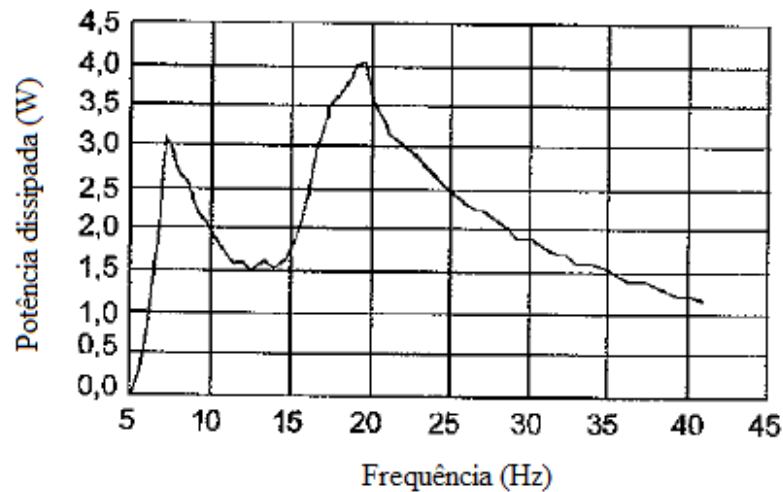


Figura 2.27 – Curva típica de potência dissipada de um stockbridge (IEC 61897-1998-09).

Para utilizar os amortecedores *stockbridge* no seu máximo desempenho é também necessário posicioná-los próximo dos pontos de fixação dos cabos das linhas elétricas aéreas, que são os pontos críticos em termos de fadiga.

A utilização de absorvedores dinâmicos de vibração apresenta algumas desvantagens, tais como:

- Os absorvedores atuam apenas em pequenas faixas de frequências, um bom rendimento requer um conhecimento detalhado das condições de vento do terreno e das características de dissipação do absorvedor. A obtenção dessas informações requer um investimento em ensaios experimentais para os absorvedores e na instalação na linha de transmissão de equipamentos que medem vibrações em cabos, conhecidos como vibrógrafos (CIGRÉ, 1995).
- Por serem componentes mecânicos sujeitos a vibrações, também podem ocorrer falhas por fadiga no cabo mensageiro, elevando o custo da manutenção da linha.
- A instalação e aquisição encarecem o custo inicial da linha de transmissão.
- Nos pontos de fixação dos absorvedores podem ocorrer falhas por fadiga por se tratarem de regiões de restrição semelhantes ao grampo de suspensão.

O ideal seria que o próprio cabo condutor fosse capaz de dissipar toda energia inserida pelo vento através do auto amortecimento.

## 2.6 AUTO AMORTECIMENTO DO CONDUTOR

Quando ocorre a vibração eólica no condutor, o vento introduz energia mecânica no cabo que o faz vibrar, ao mesmo tempo iniciasse uma dissipação de energia pelo próprio cabo condutor, essa energia dissipada é denominada auto amortecimento. Essa característica é importante pois governa a resposta



do condutor sem amortecedores às vibrações geradas pelo vento. A medida que a energia introduzida pelo vento aumenta, a amplitude de vibração também aumentará até o ponto em que a energia dissipada pelo cabo irá se igualar a energia de entrada. Na Figura 2.28 é apresentado um exemplo de gráfico com a energia de entrada e duas curvas de energia dissipada, a curva a) representa um cabo que dissipa mais energia e, portanto, terá uma amplitude de vibração menor que o cabo representado pela curva b). O princípio dessa curva é utilizado no Método de Balanço de Energia (MBE), esse método é baseado em uma equação algébrica de balanço de potência (Eq. (2.38)) de um condutor vibrando em regime estacionário (Wolf, et al., 2008).

$$P_v = P + P_D \quad (2.38)$$

Onde  $P_v$  é a potência introduzida pelo vento,  $P$  é a potência dissipada pelo condutor e  $P_D$  é a potência dissipada por amortecedores caso eles estejam instalados na linha de transmissão.

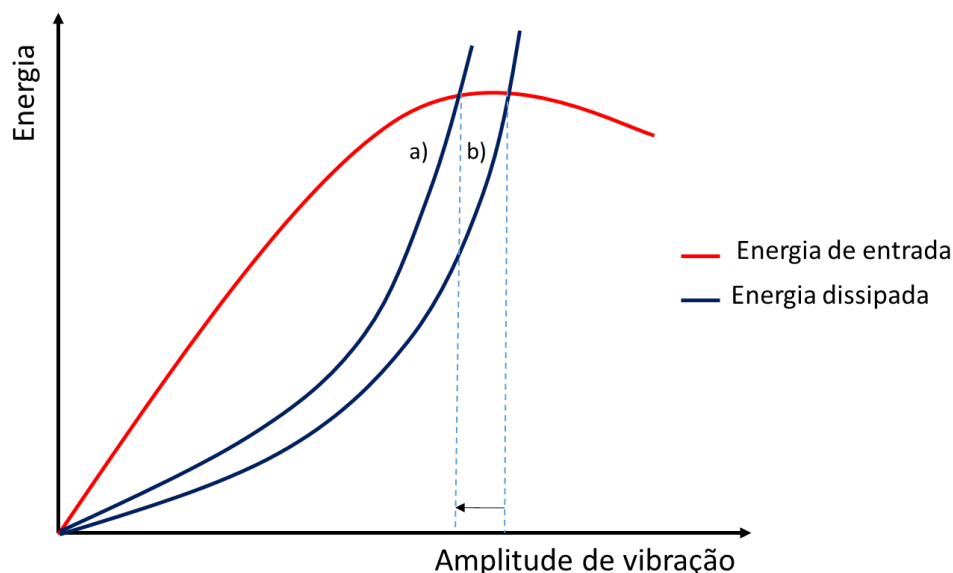


Figura 2.28 – Energia de entrada e dissipada (Diana, 2011)

O auto amortecimento descreve uma característica física do condutor que define sua capacidade de dissipar energia internamente enquanto vibra. Empiricamente se observa que o auto amortecimento apresenta uma dependência não linear com a amplitude de vibração (EPRI, 2006). Na Figura 2.29 estão ilustrados gráficos que representam o comportamento típico da medida de auto amortecimento com a amplitude e a frequência de vibração de condutores, o gráfico está em escala log-log, cada curva foi obtida a partir de uma frequência de excitação diferente. A importância do auto amortecimento também se dá ao fato da dissipação ocorrer em qualquer frequência que o cabo seja excitado e não apenas em frequências específicas, como é o caso dos *stockbridges*.

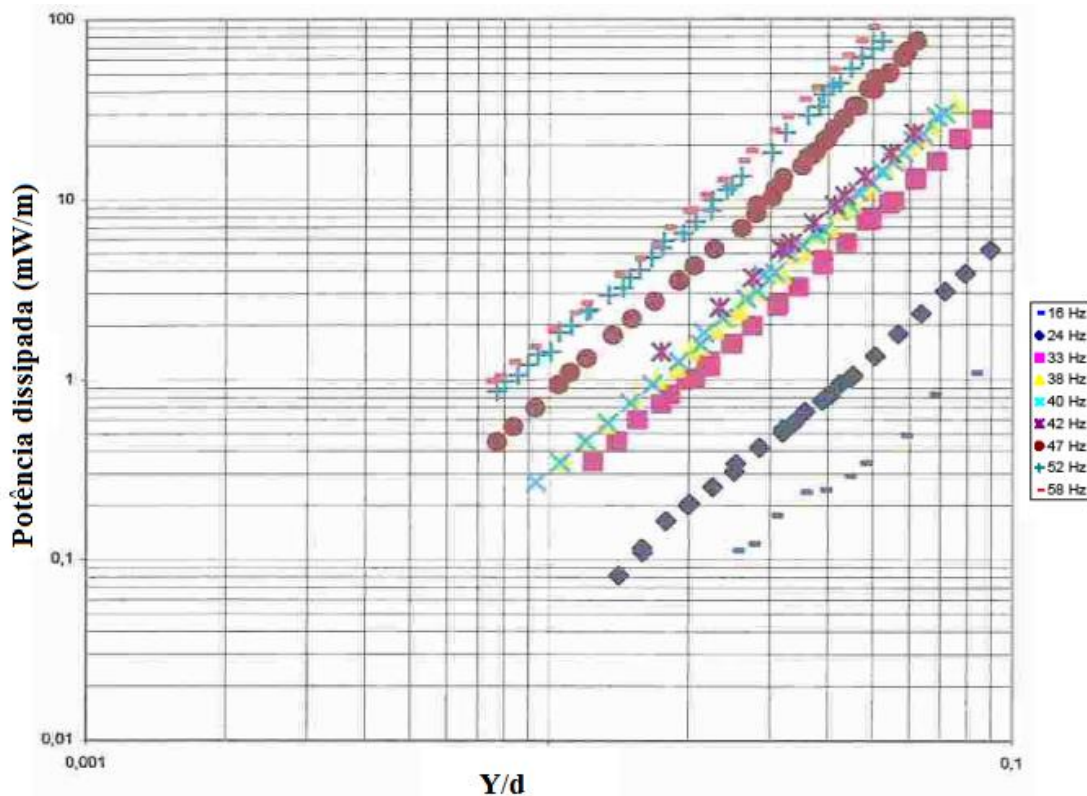


Figura 2.29 - Auto amortecimento do condutor Drake com carga de esticamento de 28,5 kN (CIGRÉ, 2011).

A dissipação de energia mecânica em um cabo condutor pode ocorrer devido a três tipos básicos de amortecimento:

- Amortecimento de Coulomb, que é caracterizado pelo deslizamento entre superfícies secas, neste caso é resultante do deslocamento relativo entre os fios que compõem o condutor;
- Amortecimento viscoso, resultante do movimento vibratório do condutor no ar;
- Amortecimento material ou por histerese, devido ao atrito entre os planos internos, que deslizam ou escorregam enquanto a deformação elástica do material metálico ocorre.

Quando um cabo condutor está instalado em uma linha de transmissão, além desses mecanismos de vibração ainda existe a dissipação nas terminações do vão e a potência dissipada por amortecedores, caso esses estejam instalados na linha.

A maior parte da dissipação de energia de um cabo ocorre devido ao amortecimento de Coulomb, pelo deslocamento relativo entre as camadas que compõem o cabo condutor. O ponto de contato entre dois fios normalmente são áreas com formato elíptico, dentro da elipse se encontra uma região de deslizamento e uma região de adesão, onde não há movimento relativo entre os fios (EPRI, 2006), como pode ser visto na Fig. 2.30.

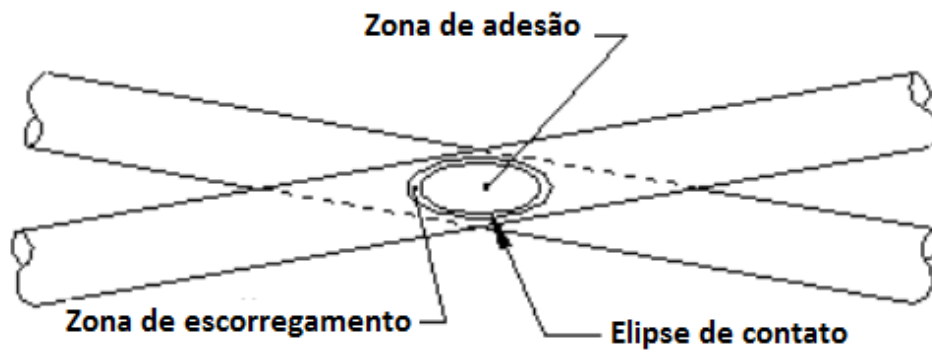


Figura 2.30 – Interface de contato entre dois fios (EPRI, 2006).

A dissipação por atrito de entre duas camadas de fios pode ser dividida em dois processos:

- Micro deslizamento, que ocorre nas bordas da região elíptica, chamada de zona de escorregamento;
- Deslizamento total, quando ocorre o deslizamento completo das superfícies em contato.

A medida que as forças tangenciais de fricção aumentam a zona de escorregamento também aumenta, enquanto a zona de adesão diminui até que o deslizamento total se inicia. A amplitude de vibração que fará com que o primeiro fio da camada mais externa comece a deslizar totalmente pode ser calculado através da Eq. (2.39) que é apresentada no trabalho de Papailiou (1997).

$$u_{esc} = \frac{H}{w} \frac{\sigma \mu \sin(\beta)}{\pi^2 f^2 E (D - d)} \quad (2.39)$$

onde  $\sigma$  é a tensão,  $E$  é o modulo de elasticidade do fio,  $d$  o diâmetro do fio,  $\beta$  o ângulo hélice da última camada,  $D$  o diâmetro do condutor e  $\mu$  o coeficiente de atrito.

O auto amortecimento é inversamente proporcional à tensão de esticamento, como pode ser visto na Fig. 2.31. À medida que aumenta a tensão o auto amortecimento diminui e conseqüentemente aumentando as amplitudes de vibração. Esse efeito apresenta maior influência em frequências mais elevadas (Fig. 2.31), onde a diferença entre o auto amortecimento é maior para as diferentes tensões. Com o aumento da tensão os fios do cabo condutor ficam mais pressionados entre si, diminuindo o escorregamento e a energia dissipada nesse movimento.

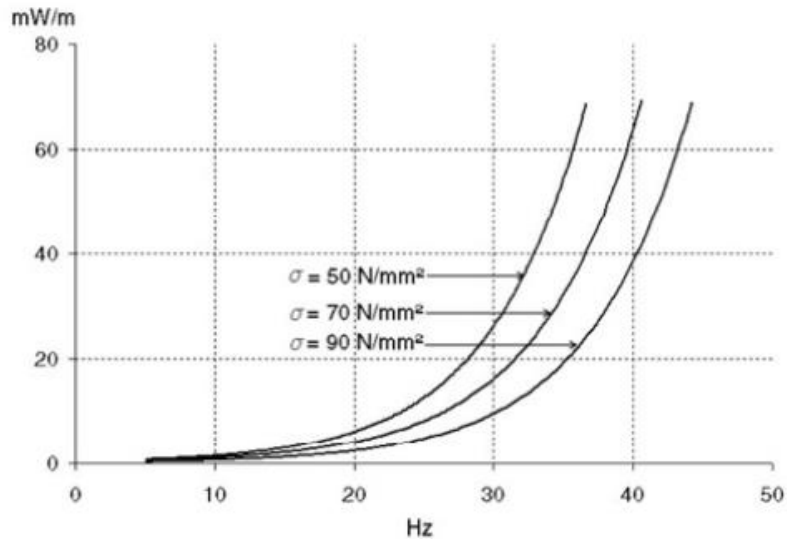


Figura 2.31 – Auto amortecimento em função da frequência para diferentes tensões de esticamento (Kiessling, et al., 2003).

### 2.6.1 Métodos de Medição de Auto Amortecimento

Devido à grande influência das vibrações eólicas na vida útil do cabo condutor, há uma crescente demanda por informações confiáveis para o estudo do fenômeno e também para projetos de linhas de transmissão mais eficazes contra falhas por fadiga devido as vibrações geradas pelo vento. Uma das variáveis envolvidas nesse fenômeno é o auto amortecimento do condutor, para a caracterização dessa grandeza do condutor, existem métodos experimentais que são descritos nas normas (IEEE, 1978) e da (CIGRE, 1979).

Existem três métodos para a avaliação da potência dissipada por um cabo condutor enquanto este vibra em uma de suas frequências naturais. Os métodos podem ser divididos em dois principais grupos, normalmente chamados de métodos de vibração livre e vibração forçada.

O método por vibração livre é realizado quando há a introdução de uma perturbação inicial no cabo deixando-o vibrar livremente após a força de excitação ter sido desconectada. A energia dissipada pode ser derivada da taxa de decaimento da vibração. Esse método pode ser afetado pelo processo usado para desconectar o cabo do dispositivo que aplica a força de excitação já que a menor perturbação adicional no condutor introduzirá outros modos de vibração, devendo isto ser evitado. Os métodos por vibração forçada acontecem quando uma força externa atua sobre o cabo condutor excitando-o em um de seus modos naturais de vibração.

#### 2.6.1.1 - Método da Potência

Para medir o auto amortecimento do condutor utilizando o Método da Potência, o cabo condutor deve ser tracionado em um vão experimental e forçado a vibrar em uma de suas frequências naturais,

com amplitude de vibração no antinó e frequência sendo controladas por um excitador eletromecânico. Esse método determina a capacidade de dissipação de energia do condutor pela medição da força e do nível de vibração (deslocamento, velocidade ou aceleração) no ponto de acoplamento entre o *shaker* e o cabo.

Quando a condição de estacionária é alcançada, a energia introduzida no sistema ( $E_{int}$ ) pelo *shaker* se torna igual a energia dissipada ( $E_{diss}$ ) ao longo do vão experimental. Grande parte dessa energia é dissipada pelo mecanismo de auto amortecimento do condutor. A energia dissipada pode ser calculada em função da potência dissipada ( $P$ ), a frequência de vibração e o comprimento ( $L$ ) do vão.

$$E_{int} = E_{diss} = P \frac{L}{f} \quad (2.40)$$

A potência inserida no cabo pode ser calculada pela multiplicação dos valores de força ( $F$ ), velocidade ( $V$ ) e do cosseno do ângulo de fase ( $\varphi$ ) entre essas duas grandezas que são medidas no ponto de excitação do condutor.

$$P = \frac{1}{2} F \cdot V \cdot \cos(\varphi) \quad (2.41)$$

Uma outra forma de expressar o auto amortecimento do condutor é através do coeficiente de adimensional de amortecimento ( $\xi$ ), que pode ser calculado dividindo a energia dissipada pelo cabo pela máxima energia cinética do cabo ( $E_{max}$ ), de acordo com a seguinte relação:

$$\xi = \frac{1}{4\pi} \frac{E_{diss}}{E_{max}} \quad (2.42)$$

Sendo a energia máxima dada pela Eq. (2.43).

$$E_{max} = \frac{1}{4} wL\omega^2 Y^2 \quad (2.43)$$

sendo  $Y$  a amplitude de vibração e  $\omega$  a frequência angular de vibração.

O Método da Potência é mais simples por requerer um número pequeno de pontos de medição, em contrapartida os *loops* no fim do vão e na conexão com o *shaker*, se comportam de maneira diferente do resto do vão, podendo apresentar uma dissipação de energia muito maior. Sendo assim, toda energia dissipada nos pontos de fixação do cabo na bancada de ensaios, também são contabilizados no cálculo da potência dissipada pelo condutor.

### 2.6.1.2 – Método da Onda Estacionária

O Método da Onda Estacionária utiliza a reflexão da onda inserida pelo *shaker* para calcular a dissipação de potência em uma porção definida do cabo condutor, entre dois nós. Caso a dissipação fosse nula em uma frequência de ressonância, a onda refletida pelas extremidades do vão teria amplitude idêntica à incidente, fazendo com que a amplitude nos nós fosse zero. Como existe a dissipação de energia mecânica, as ondas não se anulam completamente nos nós, fazendo com que estes tenham amplitude diferente de zero. A potência dissipada entre dois nós é então definida pela diferença entre as potências transferidas a cada nó pelo *shaker* e é calculada a partir da Eq. (2.44).

$$P_{n-1,n} = P_n - P_{n-1} \quad (2.44)$$

onde  $P_{n-1,n}$  é a potência dissipada entre os nós  $n-1$  e  $n$ ,  $P_n$  é a potência transmitida pelo *shaker* ao nó  $n$  e  $P_{n-1}$  é a potência transmitida pelo *shaker* ao nó  $n-1$ .

Já a potência transferida pelo *shaker* ao nó  $n$  pode ser calculada com base na Eq. (2.45).

$$P_n = \sqrt{Tw} \frac{V^2}{2} \left( \frac{a_n}{Y_0} \right) \quad (2.45)$$

onde  $T$  é a carga de esticamento em Newtons,  $a_n$  (mm) é a amplitude de deslocamento no enésimo nó e  $Y$  é o comprimento de onda em milímetros,  $w$  é a massa por unidade de comprimento (Kg/m) do condutor.

A potência dissipada entre dois nós consecutivos é dividida pela distância entre nós, também conhecido como comprimento de onda  $\lambda$ .

$$P = \frac{P_n - P_{n-1}}{\lambda} \quad (2.46)$$

A grande vantagem da utilização deste método é que não é necessário desconsiderar perdas nas extremidades, permitindo a obtenção de resultados mais precisos em relação ao Método da Potência. Porém, o uso dessa metodologia implica na necessidade de utilizar-se de procedimentos experimentais mais complexos e cuidadosos. Os sensores devem ser reposicionados a cada variação na frequência ou carga de tração utilizada. Falhas na localização dos nós e antinós para instalação dos acelerômetros podem gerar grandes erros nas estimativas dos níveis de auto amortecimento (EPRI, 2006).

### 2.6.1.3 – Método do Decaimento

O Método do Decaimento é um método de vibração livre que determina a potência dissipada pelo condutor pela medição da taxa de decaimento da amplitude de vibração, quando o cabo é excitado em uma de suas frequências naturais e em uma amplitude fixa.

O método consiste em excitar o cabo em um de seus modos naturais até que se alcance o regime estacionário (quando o deslocamento, velocidade e aceleração se mantem constantes) e então remover a fonte de excitação, no caso, desacoplando o *shaker* do cabo. Para a medição da taxa de decaimento um acelerômetro é instalado no nó mais próximo ao centro do vão.

A taxa de decaimento é expressa em termos do decremento logaritmo ( $\delta$ ) que basicamente é o logaritmo natural da razão entre duas amplitudes de vibração sucessivas.

$$\delta = \frac{1}{n_{ab}} \ln \frac{Y_a}{Y_b} \quad (2.47)$$

onde  $Y_a$  é a amplitude de vibração no primeiro ciclo considerado,  $Y_b$  é a amplitude do ultimo ciclo considerado e  $n_{ab}$  é o número de ciclos considerados.

A potência dissipada pelo condutor é então calculada pela Eq. (2.48).

$$P = \frac{1}{2} f \cdot w \cdot V_a^2 \cdot L \cdot \delta \quad (2.48)$$

onde o  $V_a$  é a velocidade inicial no antinó.

Um exemplo de gráfico gerado por esse ensaio é apresentado na Fig. 2.32, onde nesse caso é apresentado o sinal de tensão gerado pelo acelerômetro em função tempo. A taxa de decaimento é função das perdas do sistema, quanto menor a dissipação de energia, maior será o tempo de decaimento.

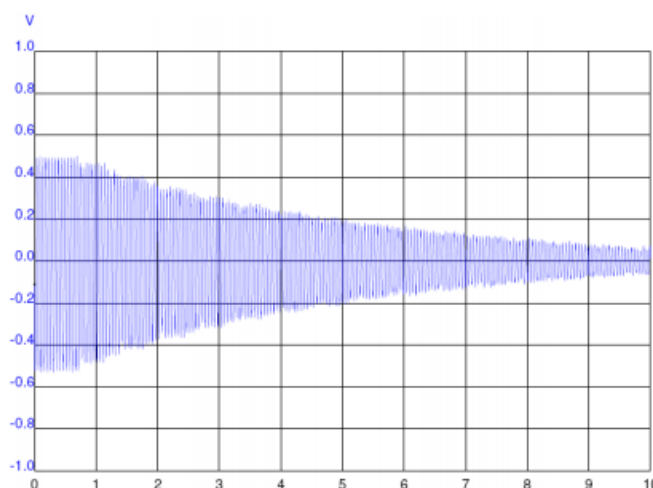


Figura 2.32 – Curva de decaimento para o condutor 264-AL3 tensionado com a 20% da carga de ruptura.

Esse método apresenta a vantagem de abranger uma grande faixa de amplitudes em um único ensaio, sendo também de fácil instrumentação. Por outro lado, esse método não despreza as perdas nas terminações do vão, inserindo essas perdas no cálculo da dissipação do condutor. Outro fator que afeta

a medição é o método para desacoplar o *shaker* do cabo condutor, o desacoplamento pode adicionar uma perturbação adicional ao sistema, podendo gerar diferentes modos de vibração. Um exemplo de sistema de desacoplamento é mostrado na Fig. 2.33

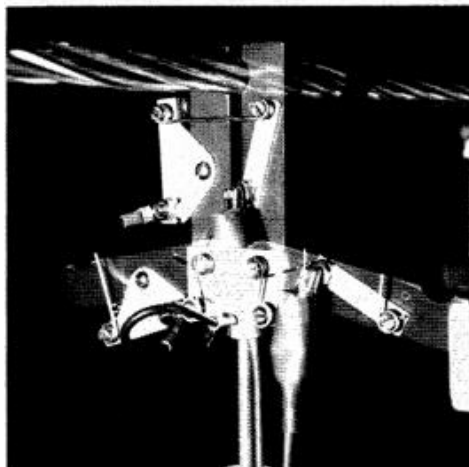


Figura 2.33 – Sistema de desacoplamento para o Método do Decaimento (EPRI, 2006).

Cada um dos métodos de medição do auto amortecimento do condutor apresenta vantagens e desvantagens. A Tabela 2.4 apresenta resumidamente as características gerais de cada método.

Tabela 2.4 – Comparação entre os métodos de medição do auto amortecimento (CIGRÉ, 2011).

Características Gerais	Método da Onda Estacionária	Método da Potência	Método do Decaimento	Nota
Ensaio com perdas desconhecidas no final do vão e no ponto de excitação	Requerido	Não recomendável	Não recomendável	Perdas no fim do vão devem ser minimizadas em todos os casos
Baixo auto amortecimento do condutor	Aplicável	Aplicável	Aplicável	Cabos para-raios, ADSS, OPGW
Alto auto amortecimento do condutor	Não aplicável para condutores com espaçamentos	Preferível	Aplicável	Condutores especiais e baixas tensões de esticamento
Tempo estimado por corpo de prova	36 h	24 h	12 h	Baseado em três tensões, três amplitudes e dez frequências
Tipo de vibração	Forçada	Forçada	Livre	-
Principal vantagem	Insensível as perdas no fim do vão	Simple aquisição e análise de dados	Ampla gama de amplitudes de em um ensaio	-
Principal desvantagem	Difícil de medir a amplitude nos nós	Possíveis erros devido as perdas no fim do vão	Possíveis erros devido as perdas no fim do vão	-



#### 2.6.1.4 - Considerações sobre a medição de auto amortecimento

Existem diversos fatores que podem levar a diferentes resultados e em erros na medição do auto amortecimento do condutor. Esses fatores são listados a abaixo:

- Perdas de energia nas terminações no vão experimental: Quando o movimento oscilatório se propaga no cabo e alcança o final do vão parte da energia do movimento é perdida quando a onda é refletida de volta para o vão. Essas perdas são mais significativas em vão menores ou em baixas frequências de vibração;
- Influência da massa do *shaker* no sistema: O *shaker* é o dispositivo que irá gerar a excitação artificial no cabo no momento do ensaio, a massa desse equipamento irá fazer parte do sistema que está sendo medido. Se a massa do *shaker* é relativamente grande (superior a 10% da massa por unidade de comprimento do condutor (IEEE, 1978)) acarretará em uma distorção do movimento na região próxima ao acoplamento entre o cabo e o *shaker*;
- Perda de energia devido ao arrasto aerodinâmico: O movimento do condutor em atrito com o ar gera um amortecimento viscoso, esse amortecimento é maior em baixas frequências e tendendo a zero em maiores frequências de vibração geradas pela ação do vento (CIGRÉ, 2011). As perdas devido a aerodinâmicas foram estudadas por (Rawlins, 1998), podendo essas serem calculadas e subtraídas do valor medido do auto amortecimento.
- Perdas de energia devido a movimentos torcionais e outros movimentos transversais: Esses movimentos podem ser inseridos no sistema devido a algum desalinhamento no acoplamento, assimetria do cabo ou por contatos acidentais no condutor.

Segundo (CIGRÉ, 2011) ainda existem outras variáveis que influenciam as medições que podem ser observadas quando o teste é realizado em diferentes laboratórios:

- Diferentes métodos adotados na medição do auto amortecimento;
- Diferentes tamanhos de vão;
- Diferentes condições de fim de vão;
- Diferentes tipos de conexão entre o *shaker* e o condutor (rígido ou flexível);
- Diferentes localizações do *shaker* ao longo do vão experimental;
- Diferentes processos de fabricação do condutor;
- Diferentes condições pré-teste do condutor.

### 3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A metodologia experimental aplicada nesse trabalho tem como finalidade gerar as curvas de auto amortecimento dos cabos CAL 900, Tern e Orchid em três níveis da relação  $H/w$ , a partir das quais poderão ser realizadas as comparações que avaliam a influência do parâmetro  $H/w$  em cada cabo condutor.

Os ensaios foram conduzidos seguindo recomendações da norma IEEE 563-1978 e da brochura 482 da CIGRÉ, utilizando o Método da Potência para a medição do auto amortecimento dos condutores.

#### 3.1 BANCADA EXPERIMENTAL

O auto amortecimento é geralmente medido em laboratório com ambiente controlado. A maior limitação para esse tipo de teste está associada ao espaço disponível para acomodar o maior comprimento de vão possível. O IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) recomenda em sua norma que o vão experimental deve ser de no mínimo 30 metros. A quantidade de energia dissipada pelas terminações do vão experimental pode ser confundida com a energia dissipada pelo cabo, por isso é necessário o atendimento da recomendação da norma para minimizar o efeito das perdas de energia nas extremidades do vão durante o ensaio.

A bancada de ensaios de auto amortecimento do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores da Universidade de Brasília possui um vão ativo de 43 metros e é composta por: A) Dois blocos de concreto fixos ao chão nas extremidades do vão que servem de apoio para o esticamento do cabo no vão, esses blocos possuem um amortecimento elevado para garantir a máxima reflexão das ondas do movimento oscilatório; B) Um bloco fixo que é utilizado para o apoio do *shaker*; C) Sistema de contrapeso para o tracionamento do cabo; D) Uma talha de alavanca posicionada na extremidade oposta aos contrapesos, a talha serve para realizar um pré-tensionamento no cabo condutor; E) Uma célula de carga conectada entre o cabo o sistema de contrapeso para medir a carga de esticamento que o cabo está submetido; F) Dois grampos de ancoragem que fixam o cabo e conecta-o ao sistema de tracionamento; G) Dois grampos rígidos, esses grampos servem para fixar o cabo aos blocos de ancoragem e também possuem um elevado amortecimento para isolar a energia vibratória do cabo; H) Um *shaker* eletromecânico que é conectado ao condutor com o objetivo de inserir potência no sistema e provocar o movimento oscilatório e I) O cabo condutor de energia a ser ensaiado. Um esquema da bancada com cada componente é apresentado na Fig. 3.1.

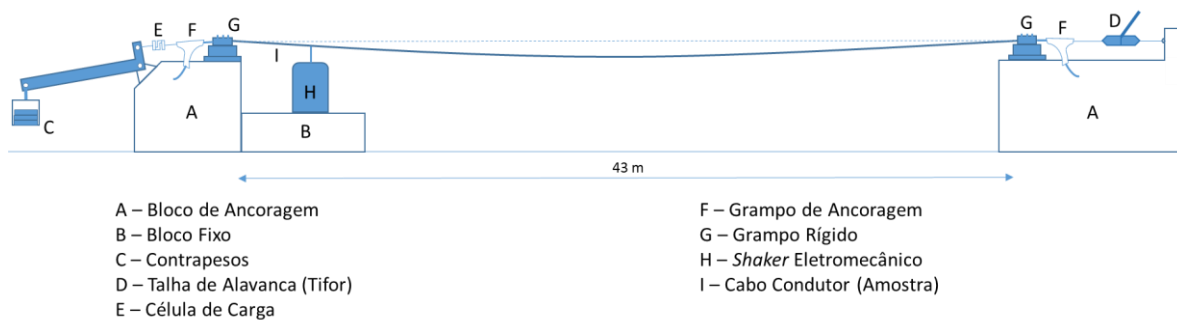


Figura 3.1 - Representação esquemática da bancada de ensaio.

Além dos itens já mencionados a bancada ainda conta com o sistema de controle vibratório (Computador, controlador, amplificador e sensores) e um sistema de condicionamento de ar e isolamento térmico para que a temperatura seja mantida aproximadamente constante durante toda a realização do ensaio.

## 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS NO ENSAIO

Nos tópicos seguintes serão detalhados cada componente da bancada de ensaios.

### 3.2.1 Cabo condutor

Este trabalho visa a comparação entre diferentes tipos de condutores, com a utilização do  $H/w$  como parâmetro para a avaliação do auto amortecimento. Para isso foram definidos três tipos de cabos com constituições diferentes: um Cabo de Alumínio Liga (CAL 900 MCM), um Cabo de Alumínio (CA 636 MCM – Orchid) e um Cabo de Alumínio com Alma de Aço (CAA 795 MCM - Tern). A Tabela 3.1 apresenta as características mecânicas de cada cabo, com interesse para a realização dos ensaios. Uma foto do perfil dos cabos também é mostrada na Figura 3.2.

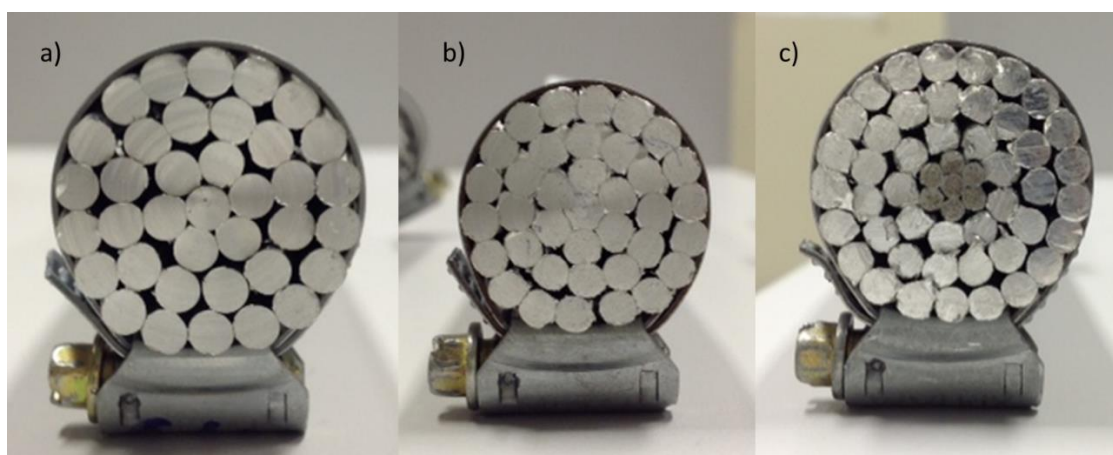


Figura 3.2 – Cabos condutores. a) CAL 900; b) Orchid; c) Tern.

Tabela 3.1 – Propriedades dos cabos condutores.

Propriedade	Cabo Condutor		
	Orchid	Tern	CAL 900
Carga de Ruptura (kN)	51,4	100,1	131,6
Massa Linear (kg/km)	888,7	1335,8	1250,9
Liga de Alumínio dos Fios	1350	1350	6201
Tratamento Térmico da Liga	H19	H19	T81
Densidade da Liga de Alumínio (kg/m <sup>3</sup> )	2703	2703	2690
Diâmetro Nominal do Cabo (mm)	23,30	27,03	27,72
Diâmetro dos Fios (mm)	3,33	3,38/2,25*	3,96
Número de Fios	37	45/7*	37

\* Os primeiros valores se referem aos fios de alumínio e o valor após a barra se refere aos fios de aço.

### 3.2.2 Shaker Eletromecânico

O *shaker* é o equipamento responsável por inserir potência no sistema, simulando o processo vibratório gerado pela ação do vento. Esse equipamento é capaz de gerar movimentos senoidais nas frequências modais do condutor.

No decorrer desse trabalho foi construído um bloco de concreto em uma das extremidades do vão para que o *shaker* fosse posicionado acima desse bloco, o *shaker* fica então a uma distância de 1,0 m de um dos grampos rígidos. Essa posição foi escolhida para possibilitar a excitação em maiores amplitudes e diminuir a força imposta pelo *shaker* para realizar o movimento vibratório. Esse posicionamento também permite a investigação de modos naturais ímpares, o que não é possível se o *shaker* estiver posicionado no centro no vão.

Nos ensaios foi utilizado um *shaker* eletromecânico da *Data Physics*, modelo V400/DSA5-2k. Este equipamento tem um limite de força senoidal de 4,6 kN e de força randômica de 1,38 kN, deslocamento máximo de 25,4 mm pico-pico e faixa de frequência DC-3kHz. Na Figura 3.3 é apresentada uma foto do excitador utilizado nos ensaios de auto amortecimento deste trabalho.



Figura 3.3 – Shaker modelo V400

### 3.2.3 Sensores

Para a aquisição dos dados e controle do ensaio são utilizados quatro acelerômetros e um transdutor de força, esses sensores possuem uma massa pequena o suficiente para não interferir no sistema analisado. Além disso é utilizada uma célula de carga para medir a carga de esticamento sobre o condutor e dois termômetros distribuídos ao longo do vão para a verificação da temperatura durante a realização do ensaio. A Figura 3.4 apresenta uma imagem de todos os sensores utilizados.

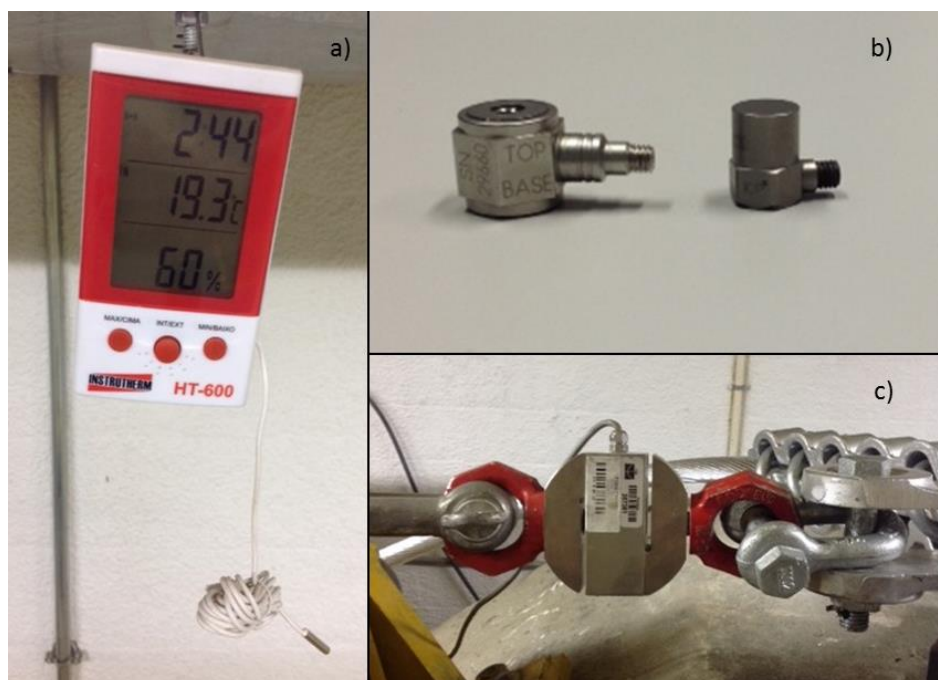


Figura 3.4 - Sensores. a) Termômetro; b) Transdutor de força (esquerda) e acelerômetro (direita) c) Célula de carga.

### 3.2.4 Sistema de Controle Vibratório

Os sensores de controle e aquisição de dados são conectados a um controlador, com *software* específico para a prescrição dos parâmetros de ensaio, o controlador tem a função de manter as condições de vibração do ensaio. Nesse trabalho foi utilizado um sistema de controle de vibração da marca LDS, modelo LASER USB LAS-200, contendo oito canais para leitura e um canal de saída utilizado no controle do *shaker*. O sistema ainda inclui um pacote de *software* LDS SW BUNCLE 1 PREMIER (SCO- 101). A Figura 3.5 apresenta uma foto desse equipamento.



Figura 3.5 – Controlador Laser LDS

O sistema de controle do *shaker* ainda conta com um computador conectado ao controlador e um amplificador de sinal (Fig. 3.6) que recebe o sinal do controlador e amplifica-o para gerar o movimento do *shaker*.



Figura 3.6 – Amplificador de sinal DSA5-2k

### 3.2.5 Sistema de Tracionamento e Fixação de Amostra na Bancada

Para a realização dos ensaios de auto amortecimento o cabo é tracionado ao longo do vão experimental, para isso o cabo é preso por meio de dois grampos de ancoragem do modelo 55121/004, fabricado pela Forjasul, esses grampos são selecionados de acordo com o diâmetro do cabo, sendo esse modelo sendo suficiente para atender todos os condutores utilizados nesse trabalho. O grampo de suspensão é posiciona após os grampos rígidos que são utilizados para garantir a máxima reflexão da energia vibratória. Do lado direito do vão (Fig. 3.7 a)) o grampo de suspensão é conectado a uma talha de alavanca, com capacidade de carga de 5200 kgf, para pre-tencionar o cabo, já no lado esquerdo do vão (Fig 3.7 b)) o grampo de suspensão é interligado a uma célula de carga que em seguida é vinculado ao braço de alavanca, esse é responsável pelo ajuste final da carga de esticamento de ensaio do cabo condutor.



a)



b)

Figura 3.7 – Ancoragem do cabo nos dois lados do vão.

### 1.1.1 Sistema de Acoplamento

A conexão entre o *shaker* e o cabo condutor é feita por meio de um acoplamento flexível, esse acoplamento foi desenvolvido de forma que fosse leve para evitar a inserção de forças inerciais indesejadas. A conexão é composta por 15 peças de alumínio e parafusos de 5/16 polegadas, para união. No acoplamento é possível instalar um acelerômetro e uma célula de carga de forma que essa possa medir toda a força transmitida ao cabo pelo *shaker*. Além disso, o dispositivo conta com lâminas de aço-mola instaladas verticalmente e horizontalmente. A altura das lâminas verticais e a quantidade das horizontais podem ser modificadas, alterando a rigidez da estrutura, neste trabalho foram utilizadas duas chapas de aço mola.

Uma foto da conexão é apresentada na Figura 3.8. Uma vista explodida da conexão desenvolvida com indicação das partes é apresentada na Figura 3.9.

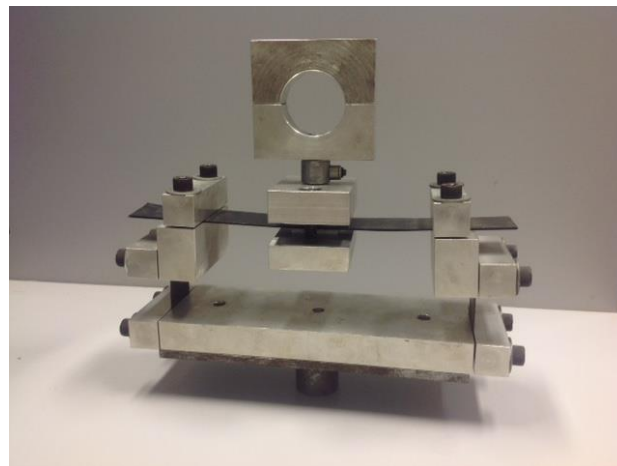


Figura 3.8 – Conexão flexível utilizada nos ensaios de auto amortecimento.



Figura 3.9 – Vista explodida da conexão flexível utilizada nos ensaios de auto amortecimento.



Foi utilizado um acoplamento desse tipo visando a redução da distorção gerada pelo *shaker* na região próxima à conexão, além disso o acoplamento foi desenvolvido com a capacidade de desacoplar o condutor de possíveis desalinhamentos entre o centro do *shaker* e o ponto de conexão no condutor, evitando assim o risco de danos à armadura do *shaker*.

### 3.3 METODOLOGIA DOS ENSAIOS

#### 3.3.1 Montagem da Amostra

Para a realizar a medição do auto amortecimento o cabo condutor é tracionado ao longo do vão experimental. Os seguintes procedimentos são adotados para a montagem do ensaio:

- I. Inicialmente o cabo condutor se encontra nas bobinas (Fig 3.10), o cabo é então desenrolado e o tracionamento é feito com o auxílio de polias (Fig. 3.11) posicionadas ao longo do vão para o apoio e evitando danificar a superfície do cabo.



Figura 3.10 – Cabo enrolado na bobina.



Figura 3.11 – Condutor apoiado em polias ao longo do vão.

- II. Em seguida os grampos de ancoragem são fixados nas extremidades do cabo. Cada grampo é posicionado e acoplado a uma parte do sistema de tracionamento.
- III. O cabo é então tracionado pela talha de alavanca até que este esteja completamente esticado, a carga final é ajustada pelo braço de alavanca através do posicionamento de pesos na gaiola e ajuste da altura por meio da talha (Fig. 3.12).

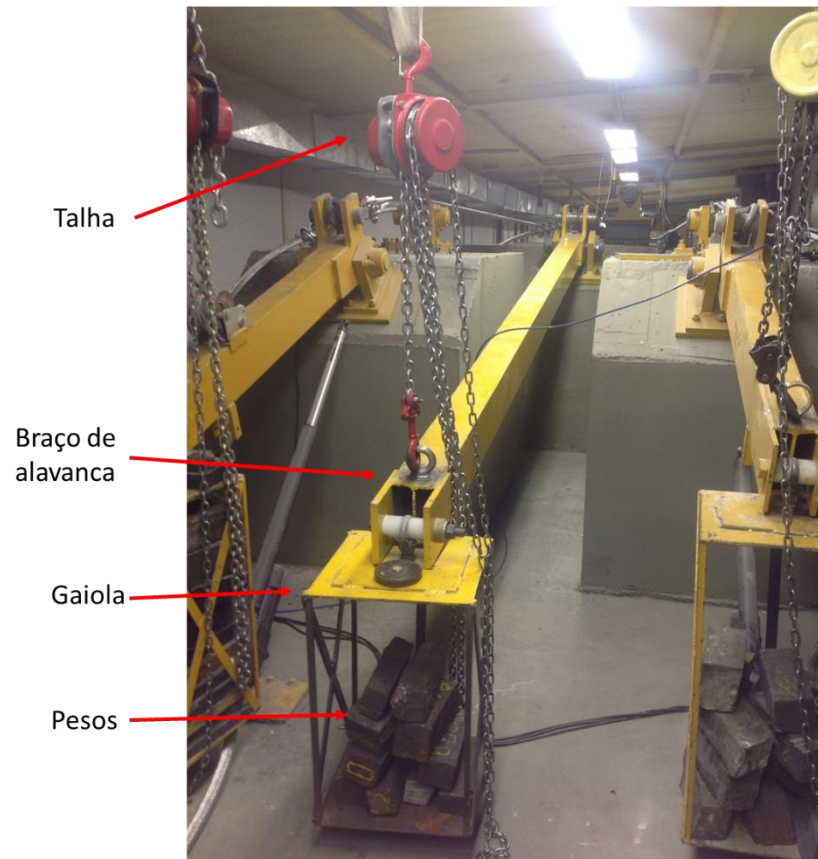


Figura 3.12 – Sistema de tracionamento do cabo por meio de braço de alavanca.

- IV. O cabo é deixado esticado por cerca de oito horas na maior tensão de ensaio, esse procedimento tem o objetivo de distribuir uniformemente a carga de tração entre todos os fios do condutor.
- V. Após o tempo de pré-tensionamento a carga é ajustada para o nível de tensão desejado no ensaio e o condutor é fixado aos grampos rígidos. São utilizadas buchas de alumínio entre o cabo e o grampo para garantir o maior aperto e para a adaptação de diferentes diâmetros de cabos em um mesmo grampo. Detalhes dessa montagem são apresentados na Fig. 3.13.



Figura 3.13 - Montagem do grampo rígido com bucha de alumínio.

- VI. Após a montagem do cabo na bancada o *shaker* é unido ao cabo através do acoplamento flexível.

### 3.3.2 Instrumentação da Bancada

Nesse trabalho foi utilizado o Método da Potência para a medição do auto amortecimento, para isso são necessários os valores de força e velocidade no ponto de aplicação da excitação. Para a medição da velocidade é posicionado um acelerômetro acima da abraçadeira utilizada para unir o cabo ao acoplamento flexível e a força é medida por uma célula de carga fixada entre a abraçadeira e o acoplamento flexível. O controle do ensaio é realizado através do sinal gerado por um acelerômetro localizado no segundo antinó após o *shaker*, esse transdutor é instalado diretamente no cabo condutor e sua fixação é feita através de uma cera especial (Fig. 3.14).



Figura 3.14 – Acelerômetro que realiza o controle do ensaio.

Outros dois transdutores são utilizados para a determinação das frequências naturais do cabo condutor, um deles é posicionado na base do *shaker* e é responsável pelo controle do ensaio do ensaio no momento da varredura. O segundo é fixo ao cabo a 100 mm do acoplamento, esse acelerômetro mede a resposta do condutor a excitação gerada pelo *shaker*. A Figura 3.15 apresenta a imagem do acoplamento entre o *shaker* e o cabo condutor, juntamente com os demais sensores. A Tabela 3.2 contém uma lista de todos os transdutores utilizados e suas respectivas funções no ensaio.

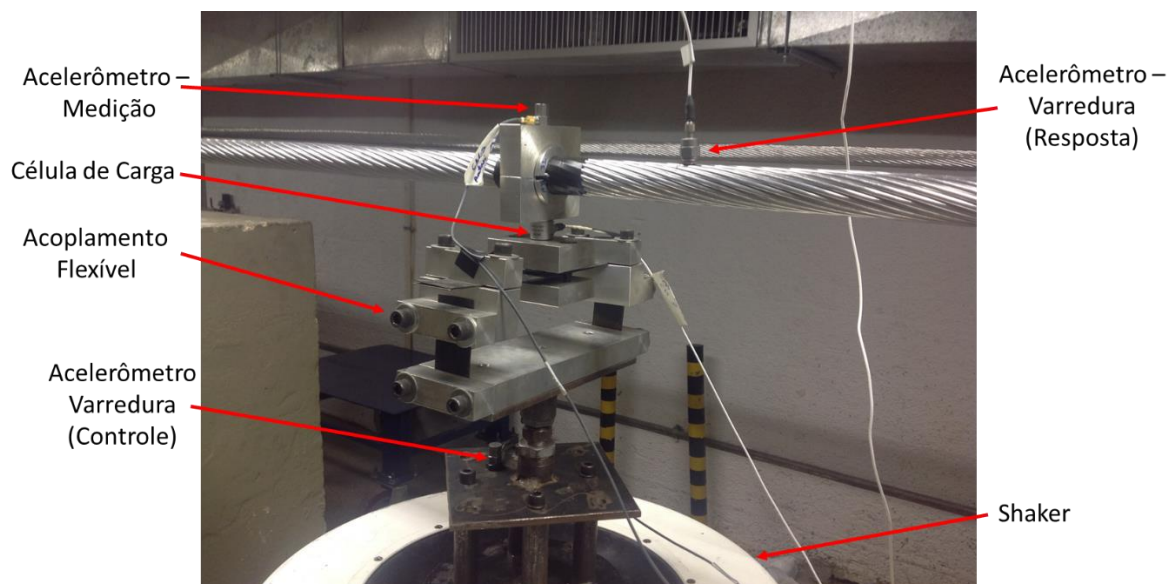


Figura 3.15 - Acoplamento flexível conectado ao cabo.

Tabela 3.2 – Descrição dos sensores.

Sensor	Função	Sensibilidade (mV/g)
Acelerômetro – Medição	Medir a velocidade no ponto de aplicação da excitação	99,9
Acelerômetro – Controle	Controle do ensaio de auto amortecimento	99,7
Acelerômetro – Varredura (Controle)	Controle do processo de varredura	99,7
Acelerômetro – Varredura (Resposta)	Medir a resposta da excitação durante a varredura	102,5
Célula de carga	Medir a força imposta pelo <i>shaker</i> ao condutor	0,243*

\* A sensibilidade da célula de carga tem como unidade mV/N

### 3.3.3 Parâmetros de Ensaio

Os ensaios foram realizados considerando três níveis de  $H/w$ , três frequências de excitação e cinco amplitudes de vibração. A Figura 3.16 contém resumidamente os parâmetros utilizados nos ensaios de auto amortecimento.

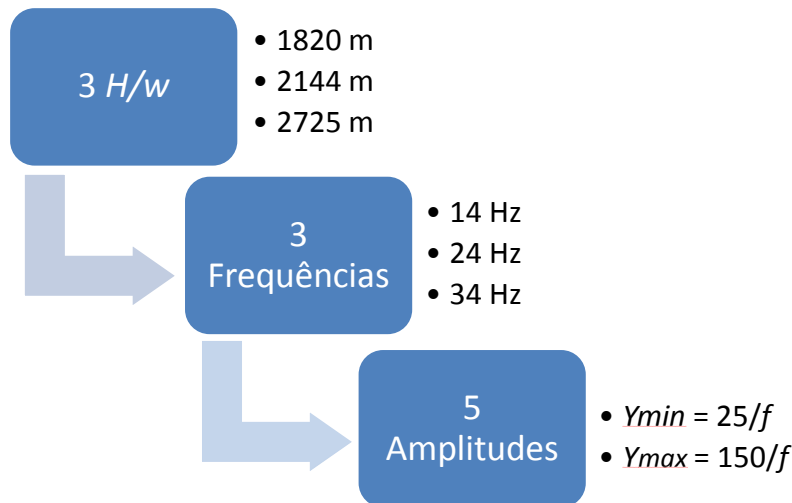


Figura 3.16 – Resumo dos parâmetros de ensaio.

Conforme recomendado pela norma IEEE 563-1978, a faixa de interesse para a realização do processo de varredura em frequência corresponde a uma vibração gerada por ventos com velocidades variando entre 3 e 30 km/h. A relação entre frequência de vibração ( $f$ ), a velocidade do vento ( $V$ ) e o diâmetro do cabo ( $D$ ) é dada pela Equação (3.1). Para  $V$  em km/h e  $D$  em mm. Dentro dessa faixa foram selecionadas três frequências ressonantes para a realização dos ensaios.

$$f[\text{Hz}] = 50 \cdot \frac{V}{D} \quad (3.1)$$

Para realizar a comparação do auto amortecimento entre diferentes cabos, idealmente seria necessário a realizar os ensaios na mesma frequência, porém existe uma grande dificuldade que isso aconteça na prática, devido as diferentes frequências naturais que os cabos apresentaram na bancada. Para contornar essa dificuldade prática, define-se uma frequência nominal de ensaio e seleciona-se para cada ensaio frequências de ressonância cujos valores variem dentro de uma faixa de no máximo 1 Hz em relação a frequência nominal. As frequências nominais foram selecionadas pela Eq. 3.1 e dentro de uma faixa que facilite o controle do movimento vibratório pelo *shaker*. No desenvolvimento experimental foram adotadas as frequências nominais de 14 Hz, 24 Hz e 34 Hz, identificadas por I, II e III, respectivamente.

As amplitudes de deslocamento no antinó foram selecionados em função da frequência de excitação do ensaio. Conforme indicado em (IEEE, 1978), a seleção da amplitude de vibração máxima ( $Y_{max}$ ) e mínima ( $Y_{min}$ ) do antinó foi realizada utilizando-se as Equações (3.2) e (3.3).

$$Y_{max} = \frac{150}{f} \quad (3.2)$$

$$Y_{min} = \frac{25}{f} \quad (3.3)$$

Na Tabela 3.3 são apresentados os valores das amplitudes de deslocamento impostas ao cabo para a realização do ensaio nas diferentes faixas de frequência.

Tabela 3.3 - Amplitudes de deslocamento utilizadas no ensaio.

Frequência nominal	Amplitude de deslocamento Y (mm)				
	I	2,00	4,00	6,00	8,00
II	1,02	2,00	3,00	4,00	6,00
III	0,70	1,50	2,00	3,00	4,00

A análise da influência de diferentes níveis de  $H/w$  sobre o auto amortecimento dos cabos condutores é feita variando o valor da carga de esticamento  $H$ . Foram utilizados três valores de  $H/w$ , sendo eles 1820 m, 2144 m e 2725 m. Esses valores foram selecionados por já existirem dados de vida em fadiga para esses condutores, nesses níveis de  $H/w$ . Possibilitando uma análise futura ampla no que se refere as falhas de cabos condutores em linhas de transmissão.

Para cada  $H/w$  foram avaliados três frequências de excitação e cinco amplitudes de deslocamento, totalizando 135 pontos experimentais para os três cabos. A Tabela 3.4 apresenta resumidamente os parâmetros de ensaio utilizados para levantamento da curva de auto amortecimento.

Tabela 3.4 - Frequências e cargas de esticamento para cada nível de  $H/w$ .

Cabo	H/w (m)	Carga de tração (kgf)	Frequência (Hz)		
			I	II	III
CAL 900 MCM	1820	2282	14,28	23,82	34,16
	2144	2684	13,50	24,01	34,55
	2725	3409	13,19	24,72	33,67
Orchid	1820	1615	14,41	24,26	34,42
	2144	1903	13,64	23,64	33,88
	2725	2422	13,96	24,72	34,54
Tern	1820	2432	14,13	24,73	34,82
	2144	2873	14,02	24,66	34,08
	2725	3644	13,32	24,67	34,23

### 3.3.4 Procedimento Para os Ensaios de Auto Amortecimento

A medição do auto amortecimento do condutor foi feita pelo Método da Potência, os procedimentos para a medição se dividem em três etapas: Varredura para descobrir e selecionar a frequência natural de ensaio, localização do antinó para a fixação do acelerômetro de controle e por último o ensaio de auto amortecimento. A Figura 3.16 contém um esquema do controle dos ensaios para essas três etapas.

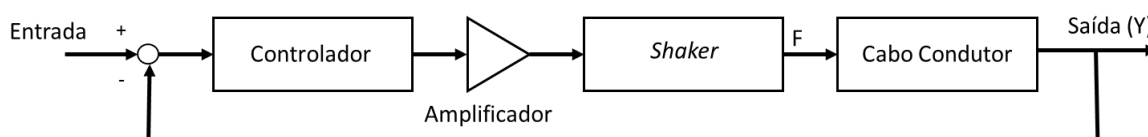


Figura 3.17 - Esquema de controle da bancada.

#### 3.3.4.1 Varredura

Pelo Método da Potência a frequência de excitação do ensaio deve ser igual a uma das frequências naturais do cabo condutor. Para determinar a frequência de excitação do condutor que será utilizada no ensaio é realizado um procedimento de varredura em frequência, processo em que a frequência de

excitação do condutor aumenta continuamente, neste caso o controlador é programado para realizar uma variação de 0,1 Hz/s.

Na implementação do procedimento de varredura são utilizados dois acelerômetros, um é responsável pelo controle do deslocamento do *shaker*, esse transdutor fica posicionado na base do *shaker* e é prescrito um deslocamento constante de 0,5 mm neste ponto. Enquanto o outro acelerômetro é posicionado a 100 mm do acoplamento, conforme ilustrado na Figura 3.15. Com o sinal do acelerômetro posicionado a 100 mm do acoplamento é possível medir a resposta vibratória do condutor, ou seja, a amplitude e a frequência de excitação nessa posição. Isso é realizado com o objetivo de levantar a curva que caracteriza a função resposta em frequência (FRF) e com base na análise da curva da FRF identificar as frequências naturais do condutor nessa montagem específica. Na Figura 3.17 é ilustrado o comportamento típico de uma FRF, onde é possível observar a curva rosa mostrando os picos de ressonância, locais onde as respostas a uma excitação constante são maiores, caracterizando as frequências de naturais do condutor. Já a curva branca representa o comportamento da aceleração no ponto de ligação do cabo com o *shaker*.

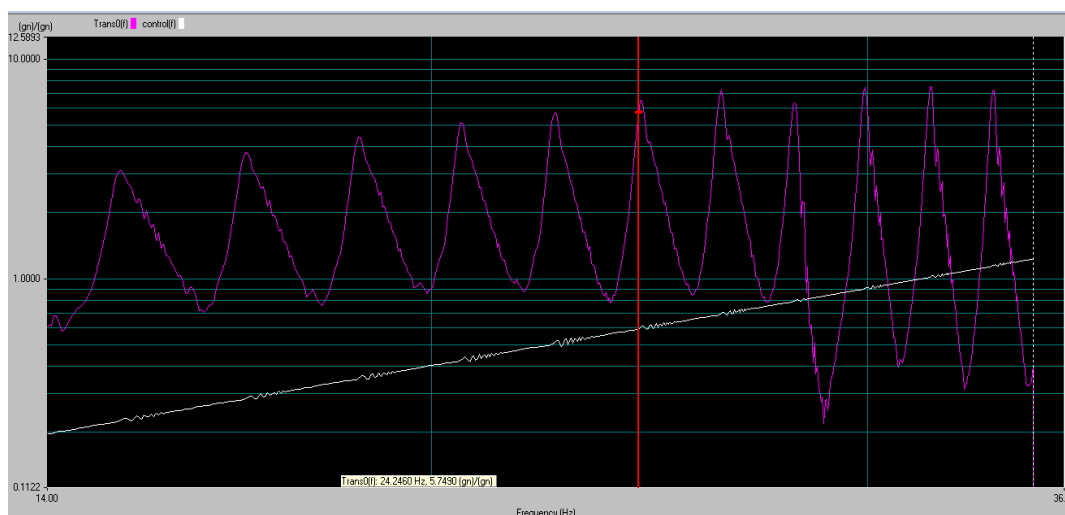


Figura 3.18 - Gráfico resultante do processo de varredura em frequência.

Para cada ensaio é necessária uma nova varredura em frequência, pois devido as variações de temperatura no interior do laboratório, as frequências naturais do condutor variam de um ensaio para outro. Em cada ensaio a programação do controlador é feita para que seja analisado uma faixa de frequência entre mais ou menos um hertz da frequência nominal desejada.

### 3.3.4.2 Localização do Antinó

O controle do ensaio de auto amortecimento é realizado através da prescrição do deslocamento em um dos antinós do cabo condutor ao ser excitado em uma de suas frequências naturais. Para isso é fixado um acelerômetro nesse local.



Uma vez terminado o processo de identificação da frequência que será usada durante o ensaio de auto amortecimento, um outro acelerômetro deverá ser montado no segundo antinó após o *shaker* (Figura 3.14). Isso é realizado primeiramente excitando o condutor na frequência selecionada para o ensaio. Nessa etapa o acelerômetro de controle passa a ser o acelerômetro posicionado a 100 mm do acoplamento (acelerômetro – varredura (resposta) da Figura 3.15).

Existe uma grande dificuldade de localizar o antinó, pois se trata do ponto de máxima vibração do cabo. Então, após o sistema alcançar a condição de regime permanente, são identificados visualmente os segundos e terceiros nós que são pontos mais facilmente identificáveis por se tratarem da região do cabo que apresenta uma amplitude de vibração praticamente nula.

Com os nós identificados a excitação do condutor é interrompida e com o auxílio de uma trena faz-se a medição da distância entre os dois nós. O antinó fica localizado exatamente na metade da distância entre os dois nós. Após a localização do antinó o acelerômetro que realizará o controle durante o ensaio de auto amortecimento é montado nessa posição.

### **3.3.4.3 Ensaio de Auto Amortecimento**

Com todas as etapas descritas nesse capítulo concluídas, é possível então realizar a medição do amortecimento próprio do condutor. O Método da Potência utiliza o conceito de balanço de energia para o cálculo da potência dissipada pelo condutor, para isso é assumido que toda energia introduzida pelo *shaker* é dissipada pelo condutor. A potência é calculada com base nos dados lidos por sensores que medem a força e a velocidade no ponto de aplicação da excitação.

O controle do ensaio de auto amortecimento é realizado por meio de um acelerômetro localizado no antinó, nesse ponto é prescrito o deslocamento do movimento oscilatório. O cabo é excitado na frequência encontrada no processo de varredura e os valores de deslocamento utilizados são apresentados na Tabela 3.3.

A tomada dos valores de força, velocidade e ângulo de fase entre essas duas grandezas é feita a partir do momento em que o cabo se encontra vibrando em regime estacionário, ou seja, quando tanto frequência quanto deslocamento se apresentam constantes. A potência dissipada pelo cabo é calculada a partir da Equação 2.42. A Figura 3.18 apresenta a tela do *software* do controlador de onde é possível observar quando o ensaio se torna estável e também as janelas onde são lidos os valores medidos para o cálculo da potência dissipada.

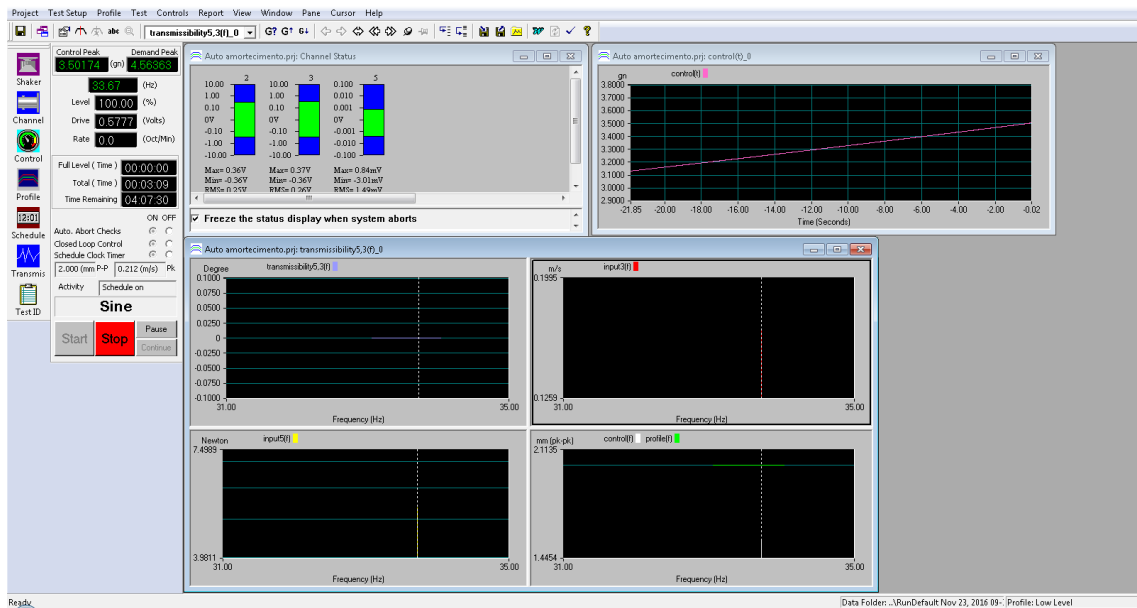


Figura 3.19 – Tela de controle do ensaio de auto amortecimento.

Essa etapa é repetida para os cinco valores de deslocamento, após isso é realizado uma nova varredura e nova localização do antinó até que sejam avaliadas as três frequências nominais, posteriormente a carga de esticamento é alterada para que um novo valor de  $H/w$  seja analisado.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O auto amortecimento do cabo condutor é expresso pela potência dissipada durante o movimento de vibração. As medições de auto amortecimento foram realizadas utilizando o Método da Potência descrito na norma IEEE 563-1978(R2007). Durante os ensaios o cabo foi tensionado no vão experimental e excitado em uma de suas frequências naturais para que então fosse realizado a medição da potência dissipada pelo condutor. O parâmetro utilizado para selecionar a carga de esticamento foi o  $H/w$ , sendo usados três valores diferentes, 1820 m, 2144 m e 2725 m, além disso foram realizados testes em diferentes frequências e amplitudes de deslocamento, para três tipos de condutores. A Tabela 3.4 apresenta resumidamente os parâmetros de ensaio utilizados para levantamento da curva de auto amortecimento.

### 4.1 CURVAS DE AUTO AMORTECIMENTO

Os resultados finais da aplicação do Método da Potência são gráficos de potência dissipada por unidade de comprimento, em função da amplitude de vibração normalizada (razão entre o deslocamento pico-a-pico do antinó pelo diâmetro do condutor). Os gráficos são apresentados em escala logarítmica com os pontos experimentais sendo ajustados por funções exponenciais. Cada gráfico é referente a um tipo de cabo condutor, tracionado a um nível de  $H/w$  e possui um conjunto de dados para três frequências diferentes.

Em todos os casos foi observado um aumento exponencial do auto amortecimento a medida que o a amplitude de vibração era aumentada. As curvas de frequências mais elevadas sempre se mantiveram acima das curvas de menor frequência, mostrando assim que o auto amortecimento é maior para frequências de vibração maiores.

Os pontos experimentais dessas curvas se aderiram muito bem ao ajuste exponencial, com valores de  $R^2$  em torno de 0,99. As curvas para diferentes frequências se mostraram aproximadamente paralelas, com inclinação angular em torno 2,0, mostrando que para o caso de variação da amplitude de vibração o comportamento das curvas foi parecido para diferentes frequências.

As curvas de auto amortecimento apresentam uma importância prática para a estimação da amplitude de vibração pelo Método de Balanço de Energia, caso sejam conhecidas as condições de vento no local de instalação da linha de transmissão.

A Figura 4.1 apresenta as curvas de auto amortecimento do cabo Tern tracionado com  $H/w$  de 2725 m. Os demais gráficos referentes as curvas de auto amortecimento para todos os cabos e  $H/w$  analisados estão disponíveis no Anexo desse trabalho.

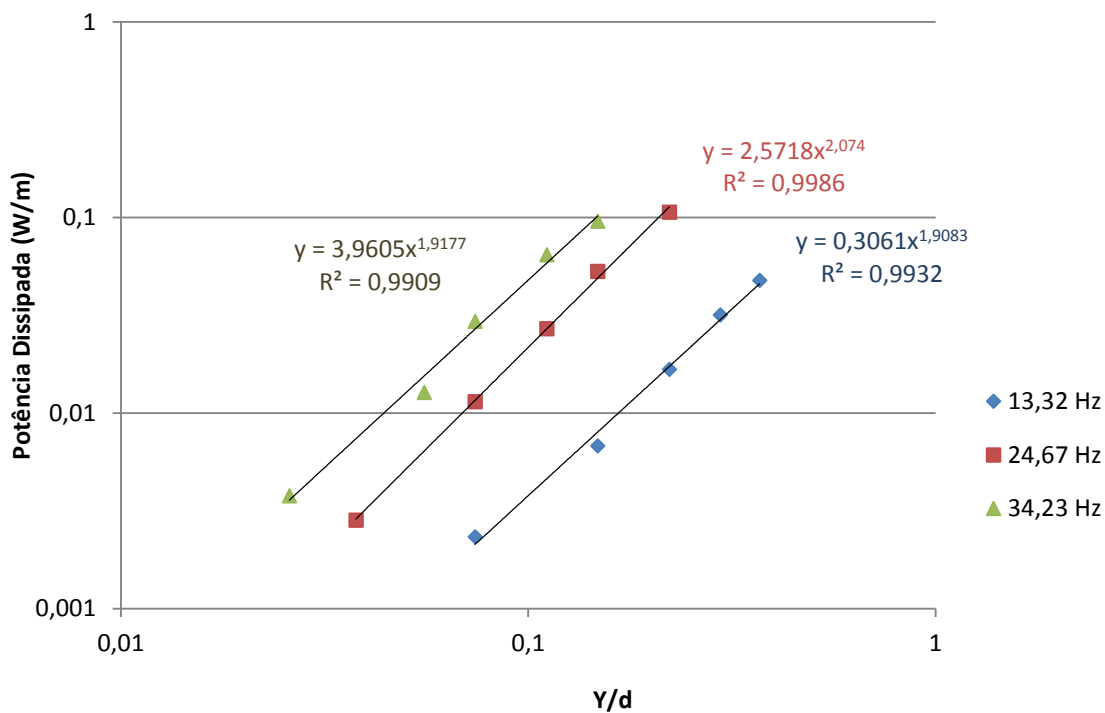


Figura 4.1 - Auto amortecimento do condutor Tern,  $H/w = 2725m$ .

## 4.2 INFLUÊNCIA DO $H/w$ SOBRE O AUTO AMORTECIMENTO PARA CADA CABO

As Figuras 4.2 a 4.7 são curvas de auto amortecimento de cada cabo testado em função da frequência para uma amplitude de vibração no antinó iguais a 2 mm ou 4 mm pico-a-pico. Cada curva apresentada nas figuras é referente a um diferente nível de  $H/w$ , sendo cada nível representado por uma cor.

Esses gráficos foram feitos a partir dos pontos experimentais obtidos das curvas de auto amortecimento, foi utilizado um ponto de cada curva, sempre mantendo a mesma amplitude de deslocamento.

Esses gráficos foram gerados com o objetivo de avaliar a influência do parâmetro  $H/w$  sobre o auto amortecimento de cada cabo condutor, considerando diferentes frequências de excitação.

O cabo condutor de alumínio com alma de aço, Tern, apresentou um crescimento exponencial da potência dissipada com o aumento da frequência de vibração. Analisando as curvas para diferentes níveis de  $H/w$ , sob a perspectiva da variação percentual entre os valores das curvas foi observado que tanto para a amplitude de deslocamento de 2 mm e 4 mm ocorreu um acréscimo de 59% com a diminuição do  $H/w$  de 2725 m para 1820 m, sendo essa a maior variação percentual. A menor variação ocorreu no aumento do  $H/w$  de 1820 m e 2725 m para a amplitude de vibração de 4 mm.

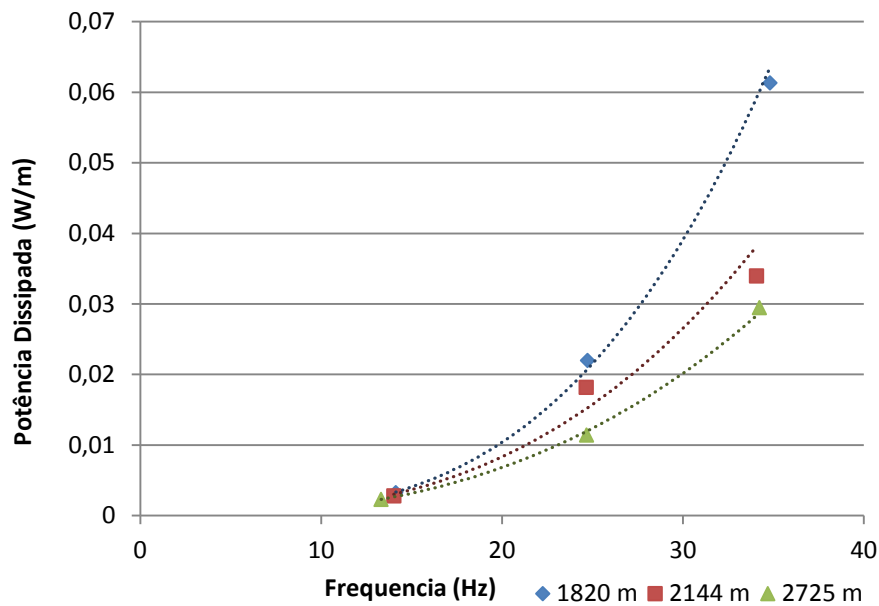


Figura 4.2 - Auto amortecimento do cabo Tern em função da frequência para diferentes valores de  $H/w$  e  $Y = 2\text{mm}$ .

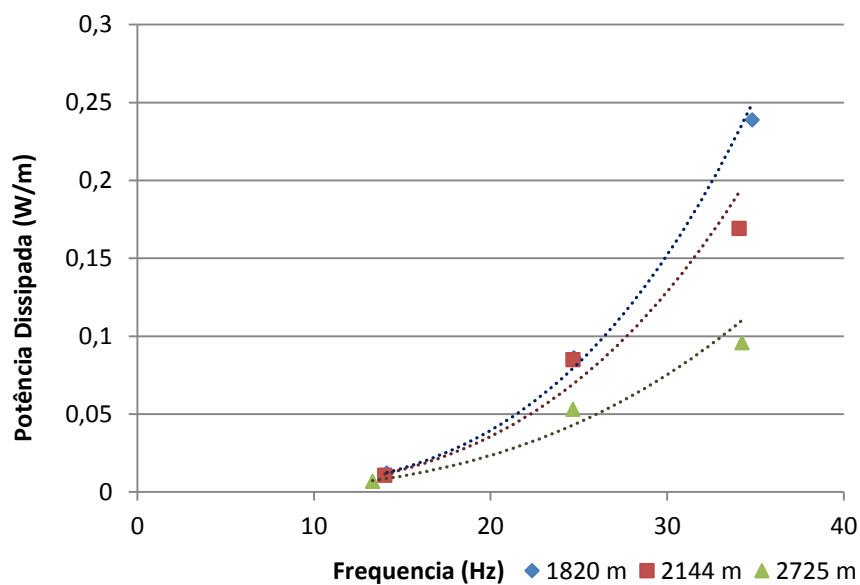


Figura 4.3 - Auto amortecimento do cabo Tern em função da frequência para diferentes valores de  $H/w$  e  $Y = 4\text{mm}$ .

A Figura 4.4 é referente ao cabo Orchid para amplitude de vibração de 2 mm e a Figura 4.5 para amplitude de 4 mm. Foi observado que entre os dois gráficos a diferença percentual entre os valores de potência dissipada à medida que se variou o  $H/w$ , ocorreu de forma mais acentuada no caso para amplitude de 2 mm. Para a variação do  $H/w$  de 1820 m para 2725 m, o que representa uma redução de 50% do valor de  $H/w$ , o auto amortecimento foi reduzido em 64% no caso de amplitude de vibração de 2 mm, enquanto que para 4 mm a redução foi de 32%.

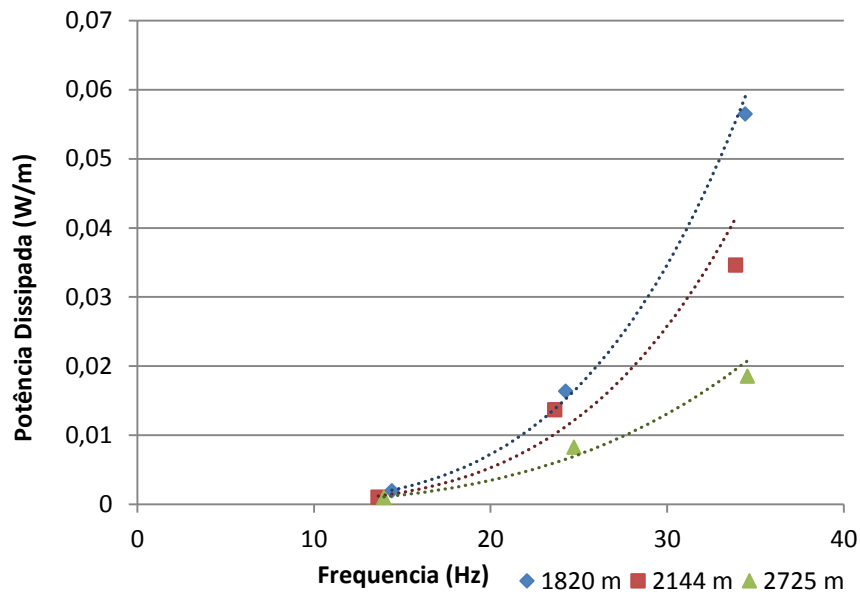


Figura 4.4 - Auto amortecimento do cabo Orchid em função da frequência para diferentes valores de  $H/w$  e  $Y = 2\text{mm}$ .

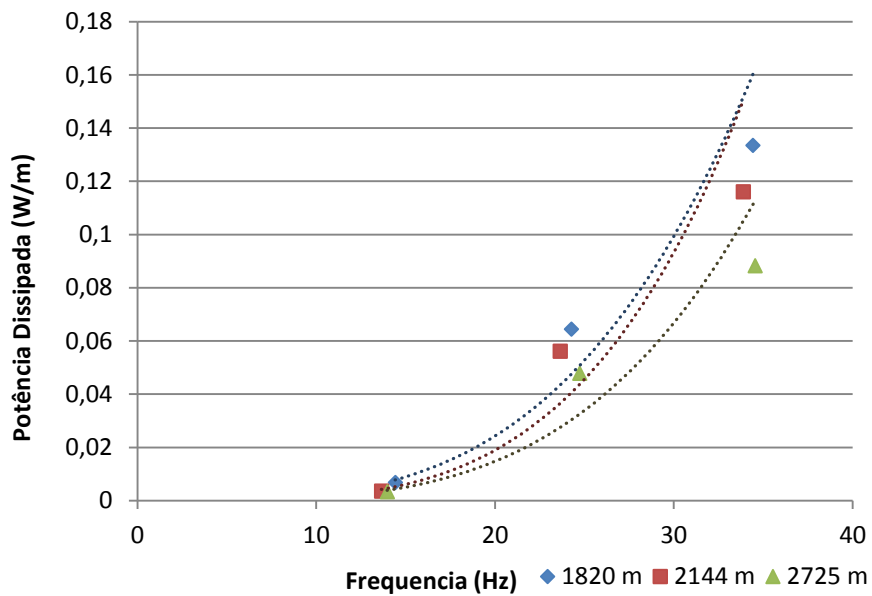


Figura 4.5 - Auto amortecimento do cabo Orchid em função da frequência para diferentes valores de  $H/w$  e  $Y = 4\text{mm}$ .

Os dados do cabo CAL 900 são apresentados nas Figuras 4.6 e 4.7 o comportamento em relação a comparação entre os dois gráficos foi semelhante ao Orchid. Para a amplitude de 4 mm as curvas para diferentes valores de  $H/w$  tendem a convergir, sendo que as curvas de 1820 m e 2144 m se cruzam próximas de 30 Hz.

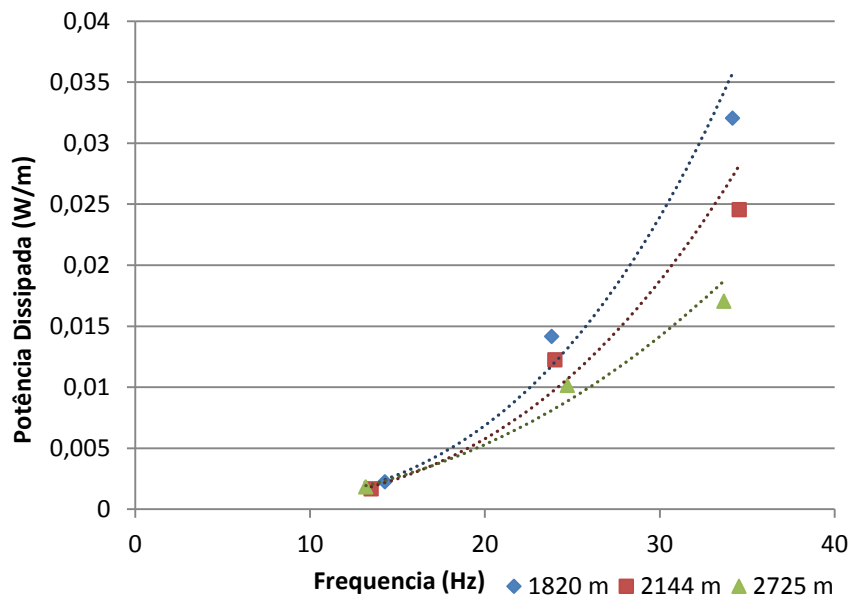


Figura 4.6 - Auto amortecimento do cabo CAL 900 em função da frequência para diferentes valores de  $H/w$  e  $Y = 2\text{mm}$ .

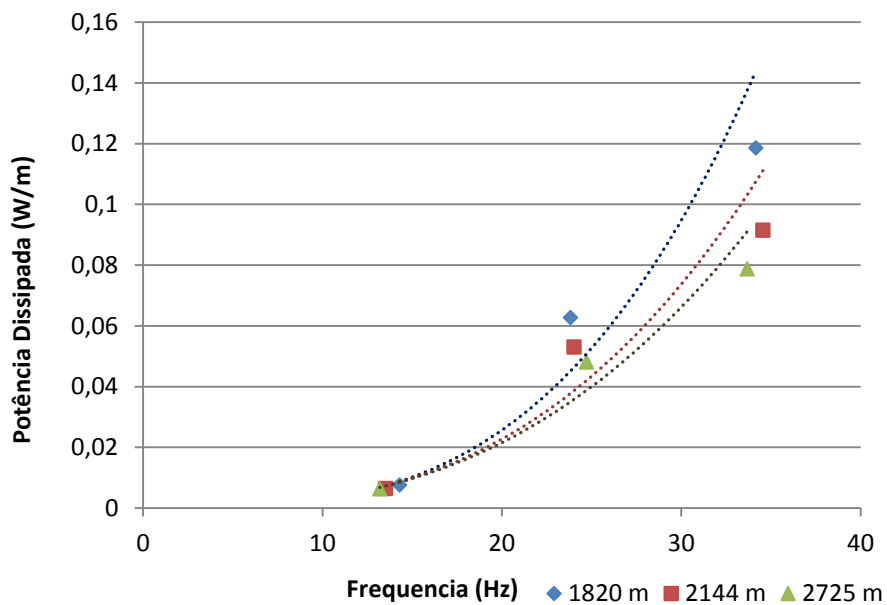


Figura 4.7 - Auto amortecimento do cabo CAL 900 em função da frequência para diferentes valores de  $H/w$  e  $Y = 4\text{mm}$ .

Para todos os cabos condutores analisados o auto amortecimento aumentou a medida que se é reduzida a relação  $H/w$ , isso se dá ao fato de que a principal fonte de dissipação de energia mecânica durante o processo vibratório vem da interação entre os fios que compõe o cabo condutor. Com o aumento da carga de esticamento os ficam mais tensionados e o movimento relativo entre eles é diminuído, logo diminuindo a energia dissipada pelo atrito.

A frequência de excitação impactou exponencialmente no auto amortecimento do condutor, isso dá ao fato de que com frequências maiores existe um maior número ciclos de vibração por segundo e consequentemente maior será a potência dissipada pelo condutor. Adicionalmente foi observado que a diferença no auto amortecimento em diferentes valores de  $H/w$  é maior para frequências maiores, sendo nas frequências mais baixas o auto amortecimento apresentou valores muito próximos um dos outros. Demonstrando assim que para casos onde os ventos geram frequências de vibração da ordem de 14 Hz, a variação do parâmetro  $H/w$  não acarretaria em mudanças na resposta vibratória do cabo condutor.

### 4.3 COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE AUTO AMORTECIMENTO

Para a comparação entre os três tipos de cabos condutores, foram plotados gráficos de potência dissipada por unidade de comprimento em função da amplitude de vibração normalizada, onde em cada gráfico foi escolhido uma condição específica de frequência de excitação e  $H/w$ .

Os pontos experimentais são representados por diferentes figuras geométricas para os diferentes cabos e as curvas de ajuste são ilustradas por linhas pontilhadas.

#### 4.3.1 $H/w = 2725$ m

Os resultados para valores de  $H/w$  igual a 2725 m são mostrados nos Figuras 4.8, 4.9 e 4.10. O cabo condutor Tern a maior capacidade de dissipação de energia dentre os três cabos estudados e o cabo Orchid teve a menor dissipação. Para frequências menores e deslocamentos maiores a diferença entre o auto amortecimento dos condutores se mostrou maior do que na situação contrária.

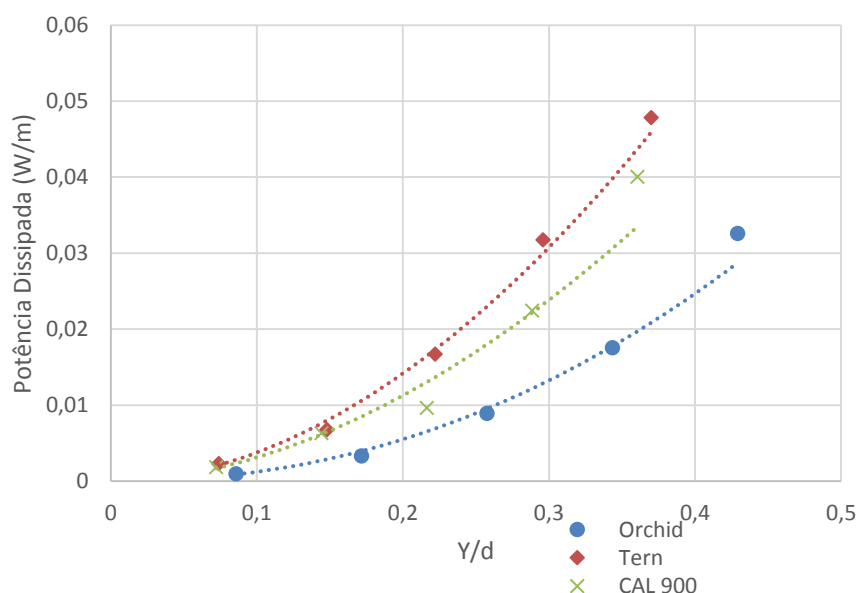


Figura 4.8 - Auto amortecimento para frequência nominal de 14 Hz e  $H/w = 2725$  m, para diferentes cabos.



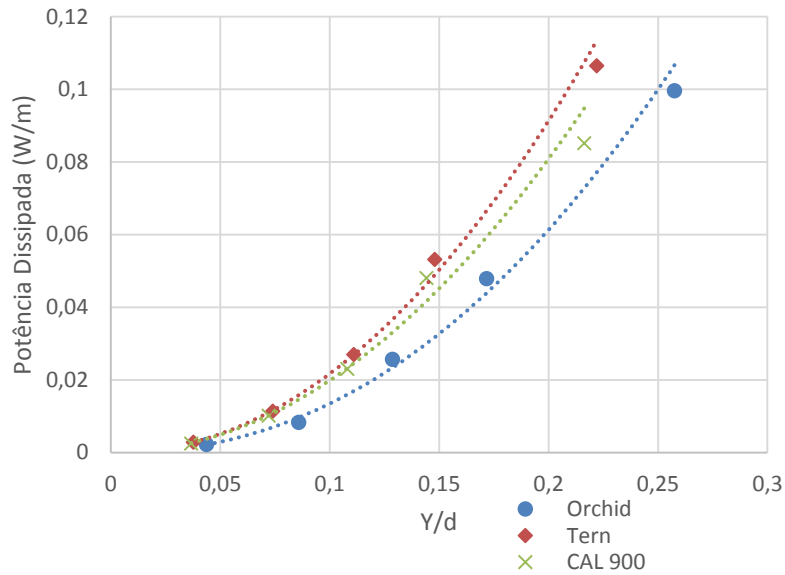


Figura 4.9 - Auto amortecimento para frequência nominal de 24 Hz e  $H/w = 2725$  m, para diferentes cabos.

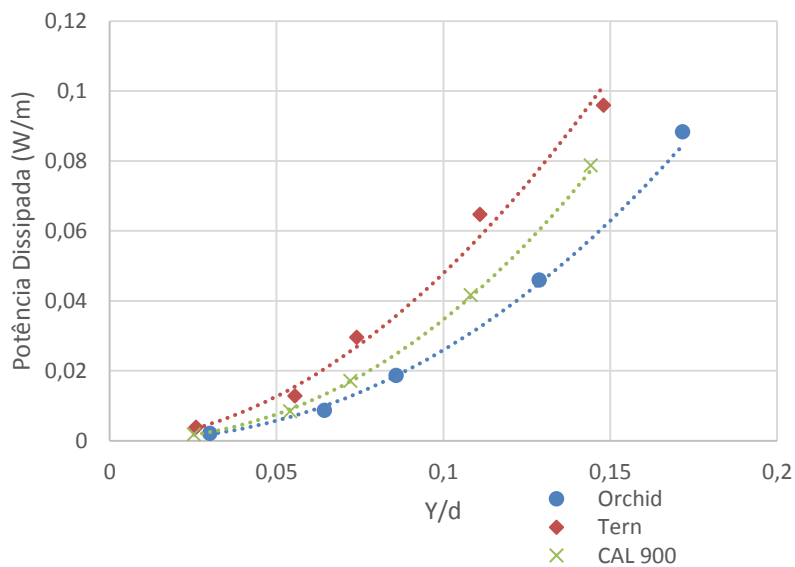


Figura 4.10 - Auto amortecimento para frequência nominal de 34 Hz e  $H/w = 2725$  m, para diferentes cabos.

### 4.3.2 $H/w = 2144$ m

Nas Figuras 4.11 a 4.13 são apresentadas as curvas de auto amortecimento para um nível de  $H/w$  igual a 2144 m. Para esse  $H/w$  intermediário o comportamento foi bem semelhante ao anterior, apresentando apenas valores superiores ao  $H/w$  de 2725m. Foi observado também que as curvas dos cabos CAL 900 e Orchid tiveram um desempenho muito parecido para a condição de frequência nominal de 34 Hz.

O ajuste das curvas aos pontos experimentais se mostrou melhor para esses casos. Nesse nível de  $H/w$  o controle do ensaio foi mais fácil que os demais, uma vez que a amplitude de deslocamento prescrita era alcançada rapidamente e o ensaio se tornava estável, de forma que havia uma variação muito pequena na amplitude de vibração do cabo.

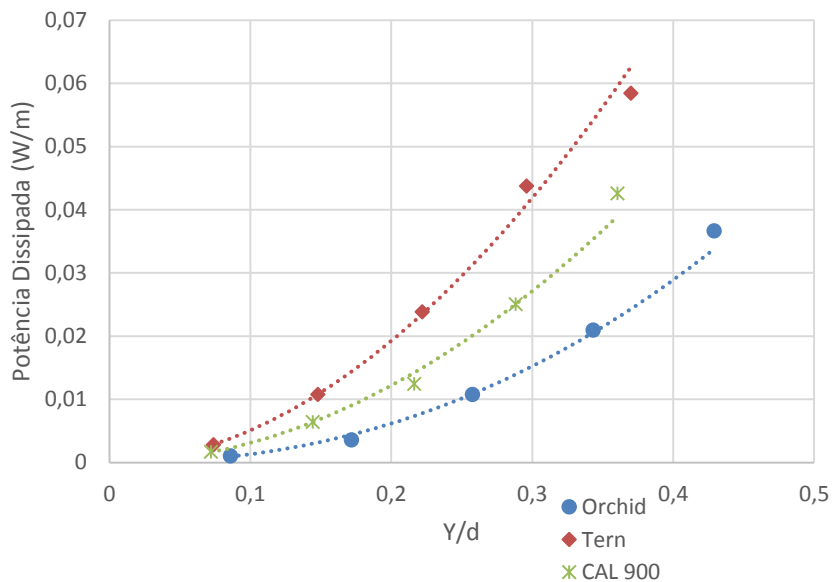


Figura 4.11 - Auto amortecimento para frequência nominal de 14 Hz e  $H/w = 2144$  m, para diferentes cabos.

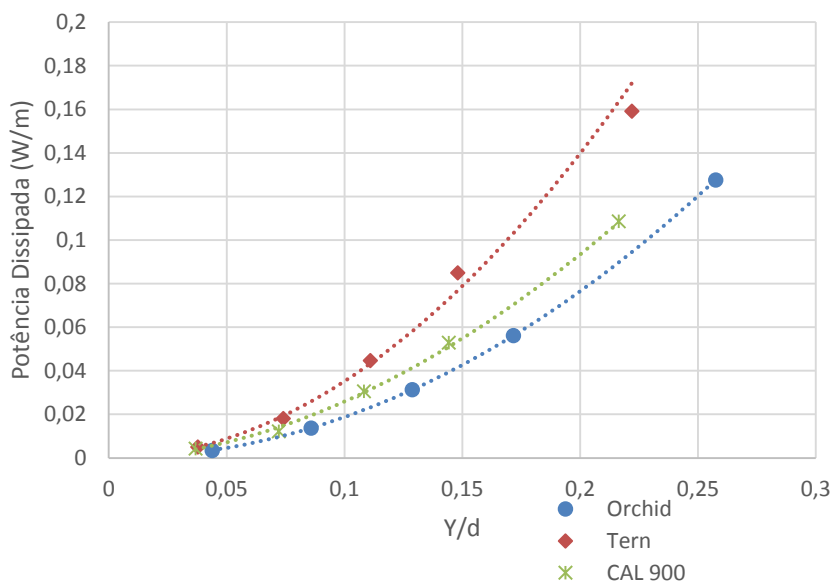


Figura 4.12 - Auto amortecimento para frequência nominal de 24 Hz e  $H/w = 2144$  m, para diferentes cabos.

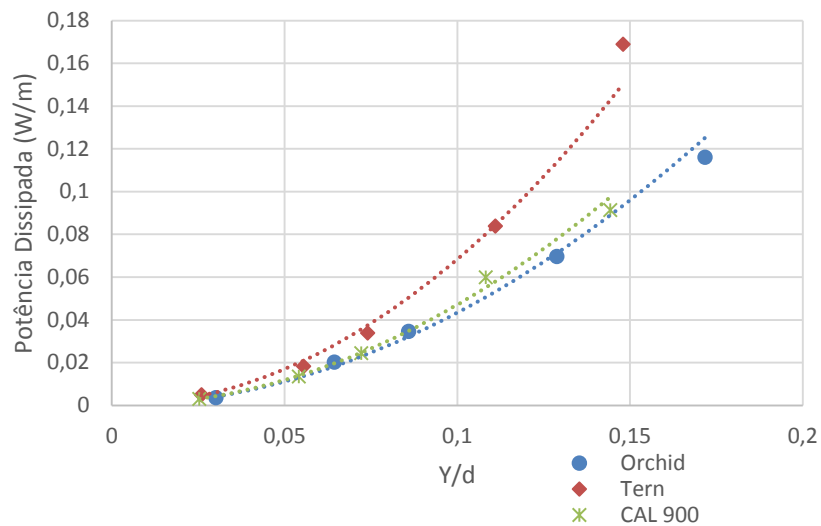


Figura 4.13 - Auto amortecimento para frequência nominal de 34 Hz e  $H/w = 2144$  m, para diferentes cabos.

### 4.3.3 $H/w = 1820$ m

Comparando os gráficos das Figuras 4.14 a 4.16 pode-se observar a existência de um distanciamento maior entre as curvas do que quando comparado ao que se vê na Figura 4.16 onde a frequência é maior, mas é importante observar que os gráficos possuem escalas diferentes, o gráfico da Figura 4.14 abrange um deslocamento normalizado superior ao das Figuras 4.15 e 4.16. Em todos os três gráficos as curvas de ajuste estão bem próximas quando se analisa amplitudes normalizadas próximas a 0,1. Para as três frequências mostrada nesses gráficos o cabo Tern dissipou mais energia enquanto vibrava, implicando em um melhor desempenho, uma vez que a capacidade de dissipar energia mecânica é fundamental para diminuir as amplitudes de vibração devido ao fenômeno de vibração eólica em cabos condutores.

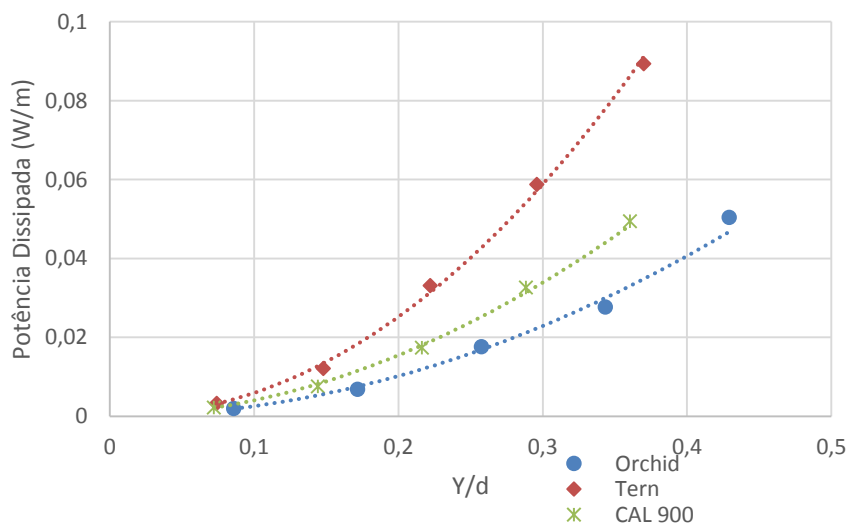


Figura 4.14 - Auto amortecimento para frequência nominal de 14 Hz e  $H/w = 1820$  m, para diferentes cabos.

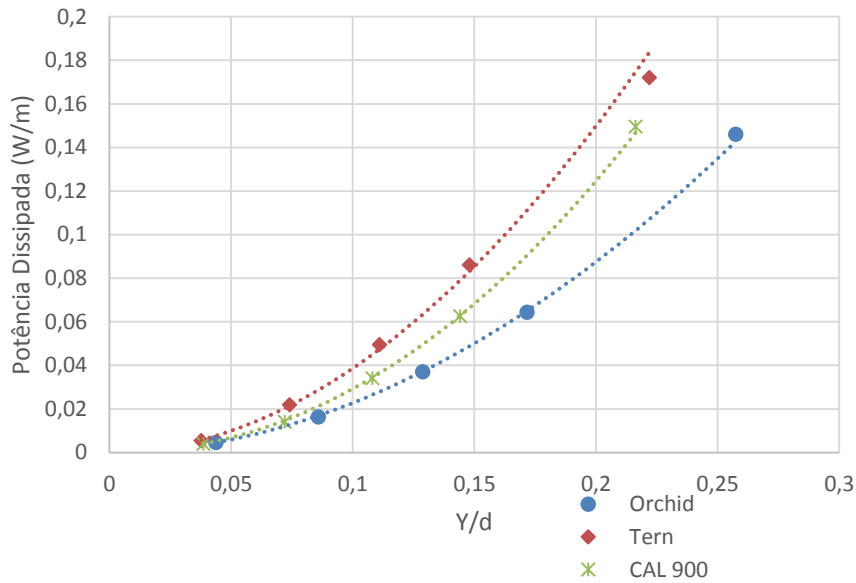


Figura 4.15 - Auto amortecimento para frequência nominal de 24 Hz e  $H/w = 1820$  m, para diferentes cabos.

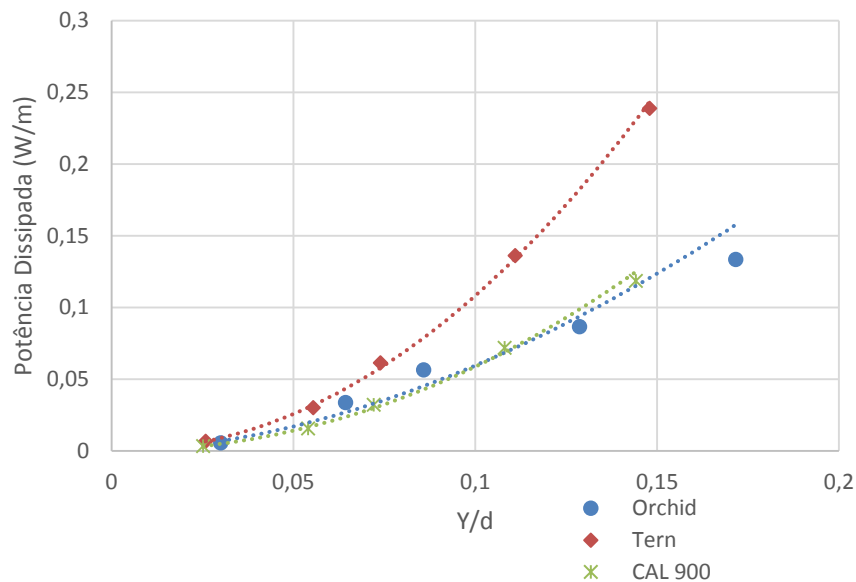


Figura 4.16 - Auto amortecimento para frequência nominal de 34 Hz e  $H/w = 1820$  m, para diferentes cabos.

#### 4.4 POTÊNCIA DISSIPADA EM FUNÇÃO DO $H/w$

O auto amortecimento do condutor é função da amplitude e frequência de vibração e da carga de esticamento do cabo condutor, que está relacionada diretamente com o parâmetro  $H/w$ . Para avaliar apenas a influência da razão  $H/w$ , foram considerados duas amplitudes de vibração constantes, uma para cada gráfico, e três níveis de frequência de vibração.

As Figuras 4.17 e 4.18 são gráficos em escala mono-log de potência dissipada em função do  $H/w$ , cada gráfico possui três conjuntos de dados de frequências nominais e dados para os três condutores.

Esses conjuntos são diferenciados pela linha de ajuste, as frequências nominais de 14 Hz, 24 Hz e 34 Hz são representadas respectivamente por linhas pontilhadas, contínuas e tracejadas. Os pontos experimentais de cada cabo são identificados por diferentes figuras geométricas, sendo o Tern identificado por losangos, CAL 900 por quadrados e o Orchid por círculos.

Os dados das curvas de auto amortecimento com amplitude de vibração igual a 2 mm foram utilizados para plotar o gráfico que é apresentado na Figura 4.17. O cabo condutor Tern em todas as condições de frequência deve um melhor desempenho, no que se refere ao auto amortecimento, essa superioridade pode ser explicada pelo fato do condutor Tern ter mais fios, 52 no total, do que quando comparado com os outros dois cabos condutores que possuem apenas 37 fios em suas camadas, além disso o cabo condutor Tern possui alma de aço, fazendo com que uma parte da tensão de esticamento fique distribuída nesses fios e deixando os fios de alumínio com uma tensão menor, possibilitando uma maior movimento relativo durante a vibração do cabo. O número de fios é importante no processo de dissipação de energia, pois isso implica em mais regiões de contato e deslocamentos relativo, elevando o nível de auto amortecimento.

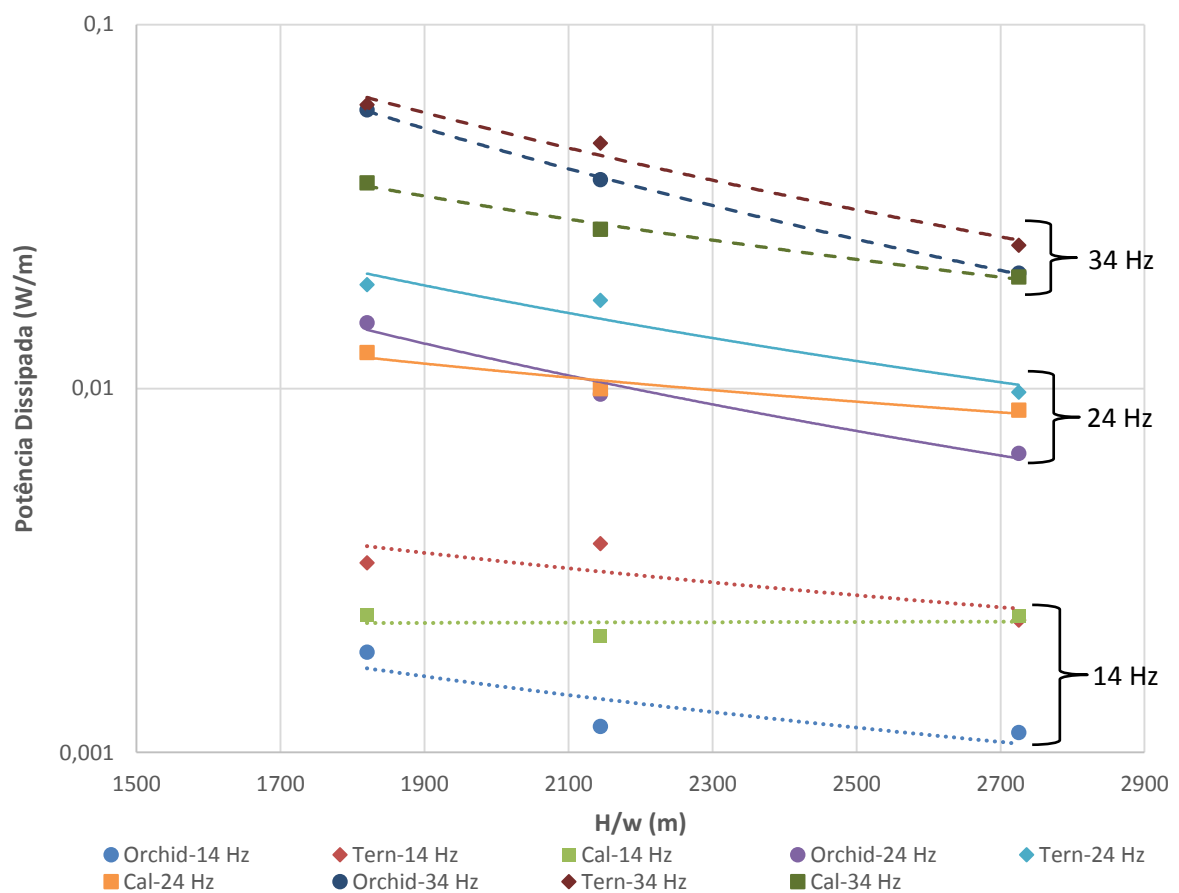


Figura 4.17 – Auto amortecimento em função do  $H/w$ ,  $Y = 2$  mm.

A Figura 4.18 é referente aos dados de auto amortecimento gerados a partir de deslocamentos iguais a 4 mm. Com exceção ao  $H/w$  de 2725 m e frequência nominal de 34 Hz em todos os outros casos testados o auto amortecimento do cabo condutor CAL 900 foi superior ao cabo Orchid. Apesar de terem um mesmo número de fios em suas camadas o cabo CAL 900 possui diâmetro dos fios e diâmetro nominal maior que o Orchid. A diferença no valor medido no auto amortecimento dos dois condutores pode estar associado tanto ao diâmetro dos fios, uma vez que existe o atrito a nível molecular que também dissipa energia como também da diferença entre os materiais utilizados na fabricação dos fios que compõe os condutores.

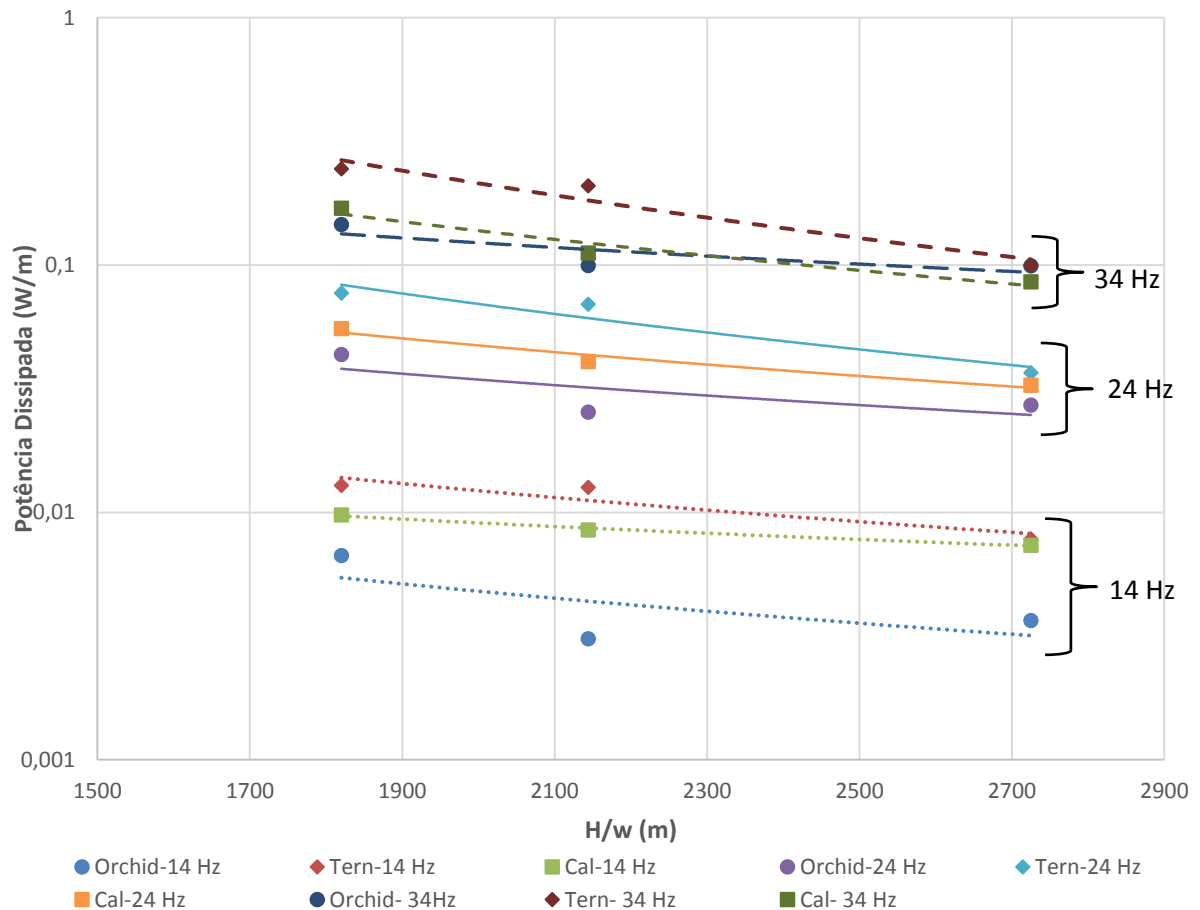


Figura 4.18 - Auto amortecimento em função do  $H/w$ ,  $Y = 4$  mm.

Independentemente das condições de vibração do cabo condutor, foi observado que com o aumento no valor de  $H/w$ , ocorreu um decréscimo nos valores de potência dissipada por todos os três tipos de condutores, porem os valores registrados para cada foram diferentes, mostrando que apesar o parâmetro  $H/w$  levar em consideração o peso linear do condutor, ainda não é capaz de prever o comportamento do cabo em relação ao auto amortecimento, uma vez que diferentes cabos apresentaram diferentes medidas de potência dissipada para um mesmo nível de  $H/w$ .

## 4.5 BALANÇO DE ENERGIA

A amplitude de vibração em cabos condutores não é apenas função do auto amortecimento, mas também da energia introduzida ao condutor pelo vento. As Figuras 4.19 a 4.21 são gráficos que mostram a potência de entrada, indicada por uma linha preta, e as curvas de auto amortecimento para três níveis de  $H/w$  (1820 m, 2144 m e 2725 m). Nos pontos de intercessão entre as curvas ocorre o equilíbrio entre a energia de entrada e a energia dissipada, fazendo com que a oscilação do condutor passe para um regime estacionário, ou seja, a partir do momento em que a energia de entrada se iguala a energia dissipada, a amplitude de vibração alcança o seu máximo para aquela condição e passa a ser constante.

As curvas de auto amortecimento são referentes aos ensaios realizados nos três níveis de  $H/w$  e com frequência nominal de vibração igual a 24 Hz, e a curva de potência introduzida se refere a um regime de ventos com escoamento laminar, transversal ao cabo condutor e que geram uma frequência de vibração de 24 Hz, a função que descreve essa curva é apresentada no Capítulo 2 e dada pela da Eq. (2.6).

A potência máxima introduzida ao cabo Tern é mostrada na Figura 4.19. Para os valores de  $H/w$  iguais a 1820 m e 2144 m a amplitude de vibração normalizada se estabeleceria em valores muito próximos um do outro, ambos de 0,09, já para o maior nível de  $H/w$  o cabo teria uma amplitude de vibração normalizada bastante superior, em torno de 0,21. Mostrando nesse caso uma grande influência do parâmetro  $H/w$  na resposta vibratória do cabo quando o mesmo foi variado de 2144 m para 2725 m.

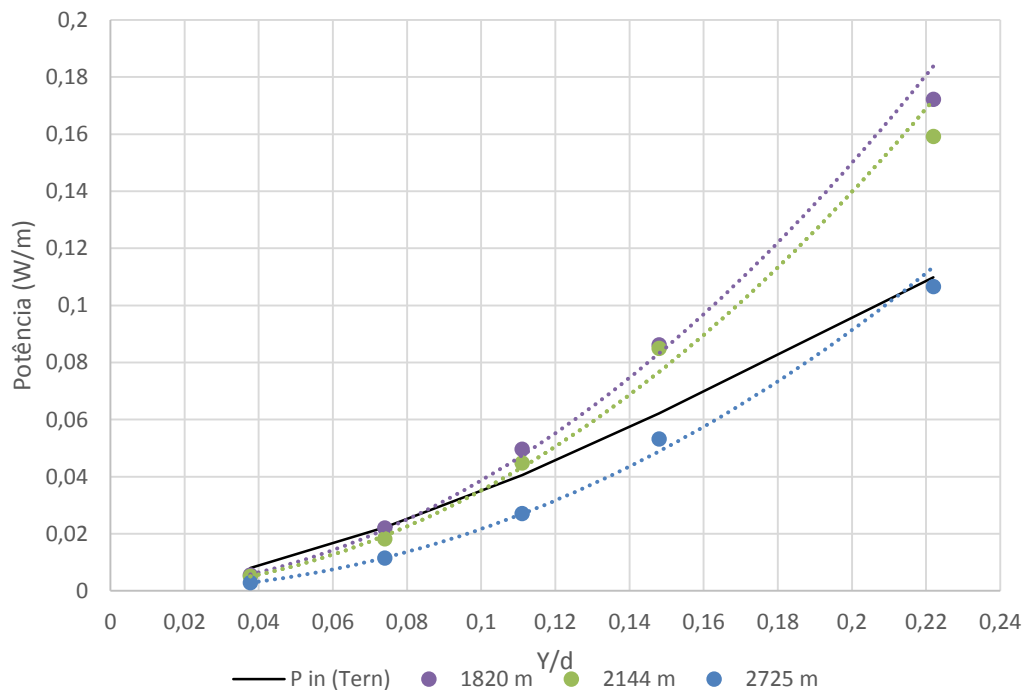


Figura 4.19 – Balanço de energia do cabo Tern, frequência nominal de 24 Hz.

Pelo balanço de energia do cabo Orchid (Fig. 4.20), é possível observar que apesar desse cabo ter um menor auto amortecimento dentre os demais, suas amplitudes de vibração normalizada são menores que o do cabo Tern. As amplitudes normalizadas para essa situação variam de 0,07 para um  $H/w$  igual a 1820 m até 0,16 para  $H/w$  igual a 2725 m.

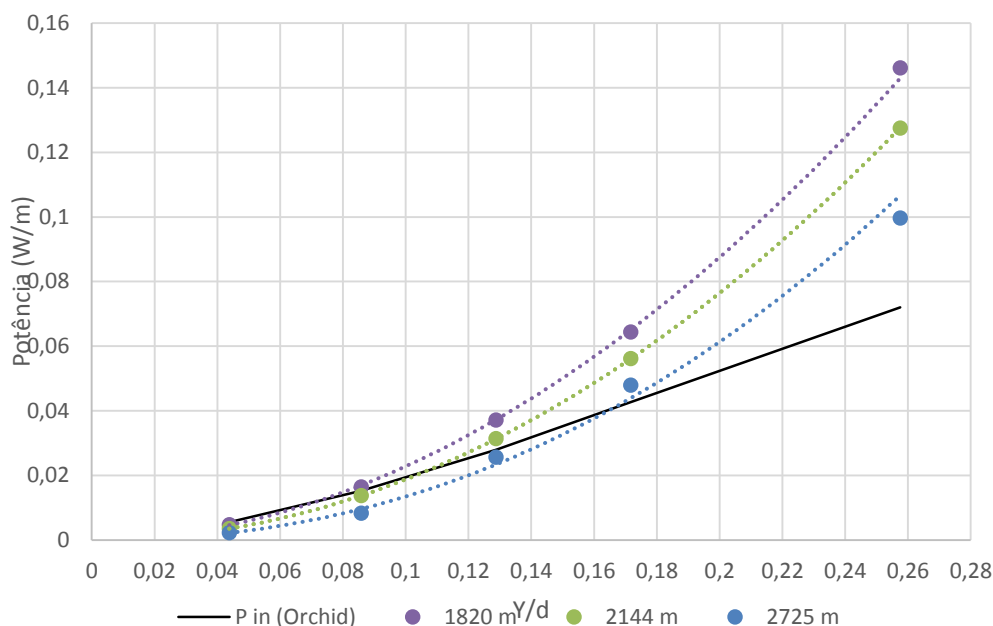


Figura 4.20 - Balanço de energia do cabo Orchid, frequência nominal de 24 Hz.

O cabo CAL 900 apresentou o pior resultado quando seu auto amortecimento é comparado a potência introduzida pelo vento (Fig. 4.21). Apesar do CAL 900 ter na maioria dos casos um auto amortecimento superior ao do Orchid, a potência de entrada varia com o cubo do diâmetro do condutor, sendo que o Orchid tem o menor diâmetro entre os condutores e o CAL 900 o maior. Apenas para o  $H/w$  de 1820 m a curva de potência inserida pelo vento se igualou a curva de auto amortecimento, para esse caso a amplitude de vibração seria de 4,44 mm. Para determinar a amplitude de vibração nos outros dois níveis de  $H/w$  seria necessário realizar uma extrapolação dos resultados ou novos ensaios com amplitudes de vibração maiores, pois os valores de auto amortecimento não conseguiram de igualar a potência de entrada, para a faixa de amplitude analisada.



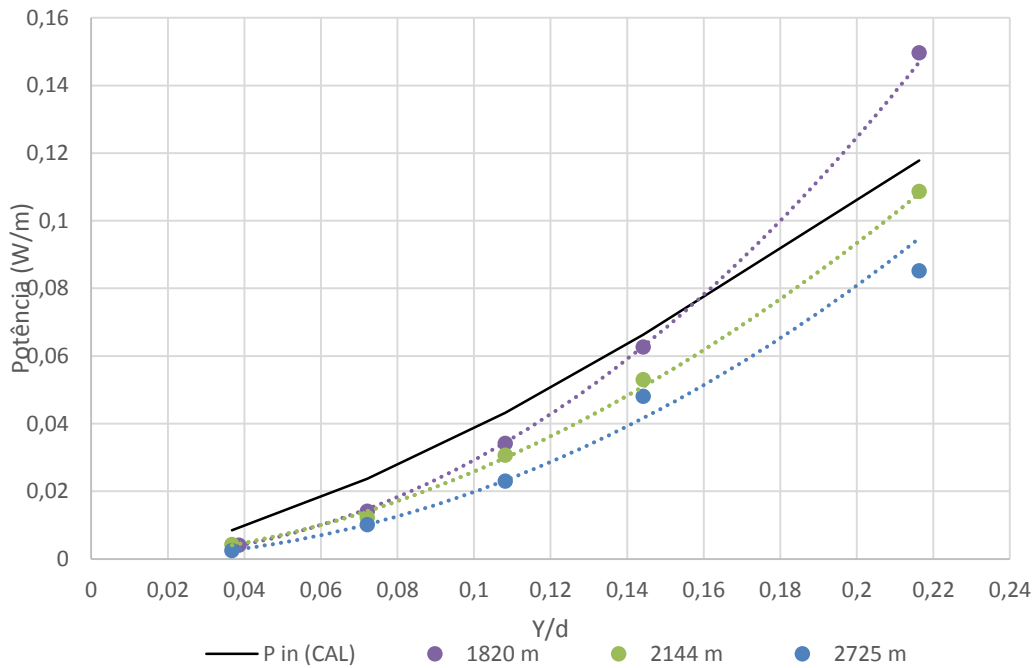


Figura 4.21 – Balanço de energia do cabo CAL 900, frequência nominal de 24 Hz.

#### 4.6 VIDA EM FADIGA

A estimativa de vida útil do cabo em uma linha de transmissão depende essencialmente de dois fatores, a resposta vibratória do cabo, que é obtida pelo Método de Balanço de Energia (MBE), e o comportamento em fadiga do condutor, dada a tensão mecânica gerada pelos movimentos oscilatórios. Conhecendo esses dois fatores, pode-se estimar a vida em fadiga para cada nível de  $H/w$  em uma determinada frequência, nesse estudo foi utilizado a frequência de 24 Hz por se tratar de uma condição intermediária.

O deslocamento no antinó ( $Y$ ), encontrado pelo Método de Balanço de Energia, pode ser relacionado a tensão mecânica nominal ( $\sigma_{max}$ ) no último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão através da Equação (4.1).

$$\sigma_{max} = \pi \cdot d \cdot E \cdot \sqrt{\frac{w}{EI}} \cdot f \cdot \frac{Y}{2} \quad (4.1)$$

Onde  $d$  é o diâmetro do fio,  $E$  o módulo de elasticidade e  $f$  é a frequência de excitação.

A partir então do deslocamento no antinó é possível correlacionar a tensão nominal ( $\sigma$ ) com a vida em número de ciclos ( $N$ ) que o condutor poderá ser submetido antes de sua falha. Porém, como ainda não há dados de vida em fadiga disponíveis na literatura para esses cabos a correlação pode ser feita através da Curva de Segurança da Cigré (CIGRÉ, 2005), a Equação (4.2) descreve essa curva.

$$\sigma = 450N^{-0,2} \quad (4.2)$$

Utilizando-se das Equações 4.1 e 4.2 e dos dados obtidos pelo MBE na seção anterior, foi gerada a Tabela 4.1 que contém o deslocamento no antinó para cada condição de  $H/w$  e frequência de 24 Hz, proveniente das curvas de balanço de energia; a tensão obtida através da Eq. 4.1 e a vida em fadiga com base na Curva de Segurança da Cigré (Eq. (4.2)).

Tabela 4.1 – Vida em fadiga, frequência de 24 Hz, para os condutores CAL 900, Orchid, Tern.

$H/w$ (m)	Y(mm)			$\sigma$ (Mpa)			Vida (Número de ciclos)		
	Tern	Orchid	CAL 900	Tern	Orchid	CAL 900	Tern	Orchid	CAL 900
1820	2,3	1,74	4,44	5,01	3,62	9,21	$5,84 \times 10^9$	$2,98 \times 10^{10}$	$2,79 \times 10^8$
2144	2,7	3,49	-	5,88	7,25	-	$2,62 \times 10^9$	$9,18 \times 10^8$	-
2725	5,68	3,84	-	12,37	7,98	-	$6,36 \times 10^7$	$5,69 \times 10^8$	-

Comparando a vida em fadiga dos cabos condutores quando tracionados com um nível de  $H/w$  de 1820 m existe uma diferença entre as vidas do cabo Tern e do cabo CAL 900 de aproximadamente duas ordens de grandeza ( $10^8$  para  $10^{10}$ ). Essa disparidade vem da diferença entre o auto amortecimento desses cabos, uma vez que a curva que descreve o comportamento em fadiga para ambos foi a mesma e a potência introduzida pelo vento foi semelhante para ambos, pois seus diâmetros são próximos um do outro.

O cabo condutor Orchid obteve o melhor resultado para a vida em fadiga em todos os níveis de  $H/w$  testados, isso se deve ao fato da sua alta relação auto amortecimento por diâmetro nominal. Apesar da potência dissipada por esse condutor ser a menor, a potência introduzida a ele pelo vento também é a mais baixa. Fazendo com que as amplitudes de vibração sejam estabilizadas em níveis menores que nos outros dois cabos condutores.

Quando se analisa o resultado das vidas em fadiga para um mesmo condutor em níveis diferentes de  $H/w$ , nota-se uma diferença da ordem de dez a oitava ciclos nas vidas apresentadas pelos cabos condutores Tern e Orchid quando seu nível de  $H/w$  é variado de 2725 m para 1820 m. O que representa um ganho expressivo no tempo em que o cabo condutor ficará operante na linha de transmissão. É importante ressaltar que as estimativas de vida apresentadas na Tabela 4.1, apesar de utilizarem uma curva de fadiga conservadora, o parâmetro  $H/w$  exerce influência sobre a fadiga do condutor, sendo quanto maior a  $H/w$  menor será a vida para uma mesma tensão nominal (Kalombo, et al., 2017), além disso, foi considerada a situação que o cabo seria excitado apenas em uma vibração de 24 Hz, o que não ocorre de fato em uma linha de transmissão.

## 5 CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi realizada uma comparação do auto amortecimento dos cabos condutores Tern, Orchid e CAL 900, tendo como parâmetro de avaliação a relação  $H/w$ . Para tal, foram geradas curvas de auto amortecimento, a partir do Método da Potência, para os três cabos em níveis de  $H/w$  de 1820 m, 2144 m e 2725 m. Os parâmetros que puderam ser avaliados a partir dessas curvas foram: amplitude de vibração, frequência de excitação, relação  $H/w$  e características construtivas do cabo condutor.

Com base na análise das curvas de auto amortecimento de cada cabo condutor, foi constatado um aumento exponencial da potência dissipada a medida que a amplitude de vibração era aumentada, independentemente do nível de  $H/w$ . Adicionalmente observou-se que a frequência de vibração é diretamente proporcional ao auto amortecimento. A influência tanto da amplitude e da frequência de vibração no auto amortecimento, está ligada ao nível de escorregamento entre os fios do condutor que é o principal mecanismo de dissipação de energia.

Com o auxílio de gráficos que expressam a potência dissipada em função da amplitude de vibração com curvas para cada nível de  $H/w$ , foi notado que para todos os cabos condutores analisados o auto amortecimento diminuiu à medida que aumentou a relação  $H/w$ , isso se deve ao fato da diminuição do movimento relativo entre os fios a medida que os mesmos ficam mais tensionados com o aumento da carga de esticamento ( $H$ ). Aditivamente, percebeu-se que a frequência de excitação impactou exponencialmente no auto amortecimento do condutor, isso dá ao fato de que com frequências maiores existe um maior número eventos de contato por segundo e conseqüentemente maior será a potência dissipada pelo condutor. A diferença no auto amortecimento em diferentes valores de  $H/w$  é maior para frequências maiores, sendo nas frequências mais baixas o auto amortecimento apresentou valores muito próximos um dos outros. Demonstrando assim que para casos onde os ventos geram frequências de vibração da ordem de 14 Hz, a variação do parâmetro  $H/w$  não acarretaria em mudanças significativas na resposta vibratória do cabo condutor.

De forma a realizar a comparação entre os cabos condutores, foram estudados o efeito da amplitude e do parâmetro  $H/w$  sobre a capacidade de auto amortecimento dos condutores por meio de gráficos de potência dissipada em função da amplitude de vibração normalizada e o outro de potência dissipada em função do parâmetro  $H/w$ , ambos com as curvas dos três cabos nas mesmas condições de vibração. Por meio desses estudos pode-se constatar que o cabo condutor Tern em todas as condições de frequência teve um melhor desempenho, no que se refere ao auto amortecimento, essa superioridade pode ser explicada pelo fato do condutor Tern ter mais fios, 52 no total, do que quando comparado com os outros dois cabos condutores que possuem apenas 37 fios em suas camadas. Mostrando que, o número de fios é importante no processo de dissipação de energia, pois isso implica em mais regiões de deslocamentos

relativo, elevando o nível de auto amortecimento. O auto amortecimento do cabo condutor CAL 900 foi superior ao cabo Orchid. Apesar de terem um mesmo número de fios em suas camadas o cabo CAL 900 possui diâmetro dos fios e diâmetro nominal maior que o Orchid. A diferença no valor medido no auto amortecimento dos dois condutores pode estar associado tanto ao diâmetro dos fios, uma vez que existe o atrito a nível molecular que também dissipa energia como também da diferença entre os materiais utilizados na fabricação dos fios que compõe os condutores.

Foi feita também uma análise considerando o Método do Balanço de Energia, que consiste em comparar a potência dissipada pelo condutor com a potência teórica que o vento introduz no cabo, para determinar a amplitude de vibração do condutor e a partir de então determinar a vida em fadiga do condutor. Quando se analisa o resultado das vidas em fadiga para um mesmo condutor em níveis diferentes de  $H/w$ , nota-se uma diferença de aproximadamente duas ordens de grandeza ( $10^8$  para  $10^{10}$ ) nas vidas apresentadas pelos cabos condutores Tern e Orchid quando seu nível de  $H/w$  é variado de 2725 m para 1820 m. O que representa um ganho expressivo no tempo em que o cabo condutor ficará operante na linha de transmissão, mostrando a importância da avaliação da influência do parâmetro  $H/w$  no auto amortecimento de cabos condutores.

Nesse estudo o cabo CAL 900 apresentou os valores mais altos de deslocamento, para as mesmas condições de vento. Apesar do CAL 900 ter apresentado um auto amortecimento superior ao do Orchid, a potência de entrada varia com o cubo do condutor, sendo que o Orchid tem o menor diâmetro entre os condutores e o CAL 900 o maior. O cabo condutor Orchid, apesar de ter o menor auto amortecimento, obteve a maior vida em fadiga para a situação estudada, indicando uma grande importância das configurações construtivas dos cabos. Condutores com diâmetros de fios menores, aliam um auto amortecimento maior, devido ao maior número de fios em suas camadas, com uma potência introduzida pelo vento menor, devido ao diâmetro nominal ser inferior.

Como conclusões gerais podemos destacar que independentemente das condições de vibração do cabo condutor, foi observado que com o aumento no valor de  $H/w$ , ocorreu um decréscimo nos valores de potência dissipada por todos os três tipos de condutores, porém os valores registrados para cada um foi diferente, mostrando que apesar o parâmetro  $H/w$  levar em consideração o peso linear do condutor, ainda não é capaz de prever o comportamento do cabo em relação ao auto amortecimento, uma vez que diferentes cabos apresentaram diferentes medidas de potência dissipada para um mesmo nível de  $H/w$ . Logo a definição de um limite empírico do parâmetro  $H/w$  como parâmetro de projeto para qualquer cabo pode induzir o superdimensionamento da linha sob o ponto de vista mecânico e como consequência podendo tornar o projeto economicamente inviável.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento desse trabalho apontou novos caminhos para pesquisas futuras, que incluem:

- Realizar ensaios de auto amortecimento com os valores de  $H/w$  recomendados pela Cigré, para cabos sem amortecedores (1000 m a 1425 m), de forma a verificar se essas condições limites geram um auto amortecimento grande o suficiente para justificar a utilização das mesmas.
- O levantamento das curvas de auto amortecimento para cabos de diferentes tipos, como por exemplo os cabos CAL com liga 1120 e os cabos do tipo CALA.
- Realizar a comparação de tipos diferentes de condutores, porém com o mesmo diâmetro de forma a padronizar as amostras e comparar apenas a influência do tipo do condutor sob ponto de vista da potência dissipada durante a vibração.
- Analisar a influência da configuração do cabo no auto amortecimento, isso pode ser feito utilizando um mesmo tipo condutor, porém variando o número e diâmetro dos fios.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, K.; HAGEDORN, P. On the Energy Dissipation in Spacer Dampers in Bundled Conductors of Overhead Transmission Lines. **Journal of Sound and Vibration**, 180, 1995.

BARRET, J. S.; Y., M. Allowable Tension Levels for Overhead-Line Conductor. **IEEE Proc. Generation, Transmission, Distribution**, 148, 2001.

BLEVINS, R. D. **Flow-Induced Vibration**. [S.l.]: Krieger Publishing Company, 1994.

CACHUTÉ, R. S.; YAMAMOTO, R. R. **Caracterização dinâmica de um stockbridge pseudoelástico**. Projeto de Graduação: UnB, 2009.

CHEN, Y. N. Fluctuating Lift Forces of Karman Vortex Streets On Single Circular Cylinders and in Tube Bundles. **Transactions ASME Journal of Engineering for Industry**, n. pp. 603-612, 1972.

CIGRE. Guide on the Conductor Self-Damping Measurements, 62, 1979.

CIGRÉ. Guide to Vibration Measurements on Overhead Lines. **WG 22.11 ELECTRA**, 1995.

CIGRÉ. Overhead Conductor Safe Design Tension With Respect to Aeolian Vibrations, Task Force B2.11.04, 2005.

CIGRÉ. State of the Art For Testing Self-Damping Characteristics of Conductors For Overhead Lines. **Working Group B2.25**, 2011.

CLAREN, R. The response of overhead line conductors to vortex shedding under laminar and turbulent air flow. **International Conference on Large High-Tension Electric Systems (CIGRE)**, 1978.

CLAREN, R.; DIANA, G. Mathematical Analysis of Transmission Line Vibration. **IEEE Transmission Power Apparatus System, PAS-88**, 1969.

CLOUTIER, L.; LEBLOND, A. Tutorial: Conductor Fatigue. **Cigré - Study Committee B2**, Bangkok, n. Bangkok, 2011.

COSMAI, U. Assessment of Aeolian Vibration Severity. **Convenor CIGRE WG B2.25**, Bangkok, 2009.

DEN HARTOG, J. P. **Vibrações nos sistemas mecânicos**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1972.

DIANA, G. Modeling of Aeolian Vibrations of Single Conductors and Single Conductors Plus Dampers. **Study Committee B2**, 2011.

DULHUNTY, W. P. **Vibration Damper - An evolution in Australia**. 1984.

- EPRI. **Transmission Line Reference Book - Wind-Induced Motion**. [S.l.]: [s.n.], 2006.
- FADEL, A. . et al. Effect of high mean tensile stress on the fretting fatigue life of an Ibis steel reinforced aluminium conductor. **International Journal of Fatigue**, 2012.
- FREIRE, D. G. Vibrações Eólicas de Condutores Singelos em Linhas de Aéreas de Trasmissão. **Tese (Doutorado)**, Rio de Janeiro, 1997.
- GUÉRARD, S.; B., G.; J., L. Aeolian Vibration on Power-Line Conductors, Evaluation of Actual Self Damping. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 26, n. 4, 2011.
- IEEE. Guide on Self-Damping Measurements, Std 563, n. (R2007), 1978.
- IEC, **Requirements and tests for stockbridge type Aeolian vibration dampers**, in IEC 61897: 1ª edição.1998-09.
- KALOMBO, R. B. et al. Influence of the catenary parameter (H/w) on the fatigue life of overhead. **Tribology International**, 108, 2017.
- KIESSLING, F.; NEFZGER, J.; F, N. **Overhead Power Lines**. [S.l.]: Friedrich Kiessling, 2003.
- KUMAR, R. A.; SOHN, C. H.; GOWDA, B. H. L. **Passive Control of Vortex-Induced Vibrations: An Overview**. [S.l.]: [s.n.], 2008.
- LABEGALINI, P. R. et al. **Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão**. São Paulo: Edgard Blucher, 1992.
- LILIEN, J. L. . S. D. **Awake-Induced Vibration in Power Transmission Line**. Paris: [s.n.], 2004.
- MENEZES, V. P. **Linhas de Transmissão de Energia Elétrica: Aspectos Técnicos, Orçamentários e Construtivos**. Rio de Janeiro. 2015.
- MUNASWANY, K.; HALDAR, A. Self-Damping Measurements of Conductors with Circular and Trapezoidal Wires. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 15, n. 2, 2000.
- PAPAILIOU, K. O. On the bending stiffness of transmission line conductors. **IEEE Transmission Power Delivery**, 12, 1997.
- RAO, S. **Vibrações Mecânicas**. [S.l.]: Pearson Prentice, 2008.
- RAWLINS, C. B. Measurements of Fluid-Dynamic Damping of Stranded Cable Models at Low Oscillation Amplitudes. **ASME Fluid Engineering Division Summer Meeting**, 1998.
- RAYLEIGH, J. W. S. The Theory of Sounds, Cambridge University Press, II, 1896.
- SANTOS, A. S. D. Estudo de vibrações eólicas em linhas de transmissão de energia elétrica de alta tensão. **Dissertação (mestrado)**, Belém, 2008.

SEPPA, T. **Self-Damping Measurement and Energy Balance of ACSR Drake**. New York: [s.n.], 1971.

SILVA JUNIOR, A. Caracterização dinâmica de um protótipo de stockbridge pseudoelástico. **Dissertação (Mestrado)**, Brasília, 2011.

SIMPSON, A.; SALMON, N. J.; TAYLOR, C. N. **Computational Comparison of Efficacies of Aeolian Vibration Damping Devices for Multiconductor Overhead Power Lines**. [S.l.]: [s.n.], 1990.

SOUZA, D. M. Estudo do Comportamento Estrutural de Cabos em Linhas Elétricas Aéreas de Muito Alta Tensão. **Tese (Doutorado)**, Porto, 2012.

STEIDEL, R. . **An Introduction To Mechanical Vibrations**. 3. ed. Toronto: John Wiley & Sons, 1989.

WOLF, H. et al. Using the Energy Balance Method in Estimation of Overhead Transmission Line Aeolian Vibrations. **CODEN STJSAO**, 2008.

ZASSO, A. et al. Vortex Formation in the Wake of Oscillating Cylinder. **Journal of Fluids and Structures**, 2, 1988.

ZETTERHOLM, O. D. Bare Conductors and Mechanical Calculation of Overhead Conductor. **CIGRÉ Session Report No. 223**, 1960.



Cabo Tern

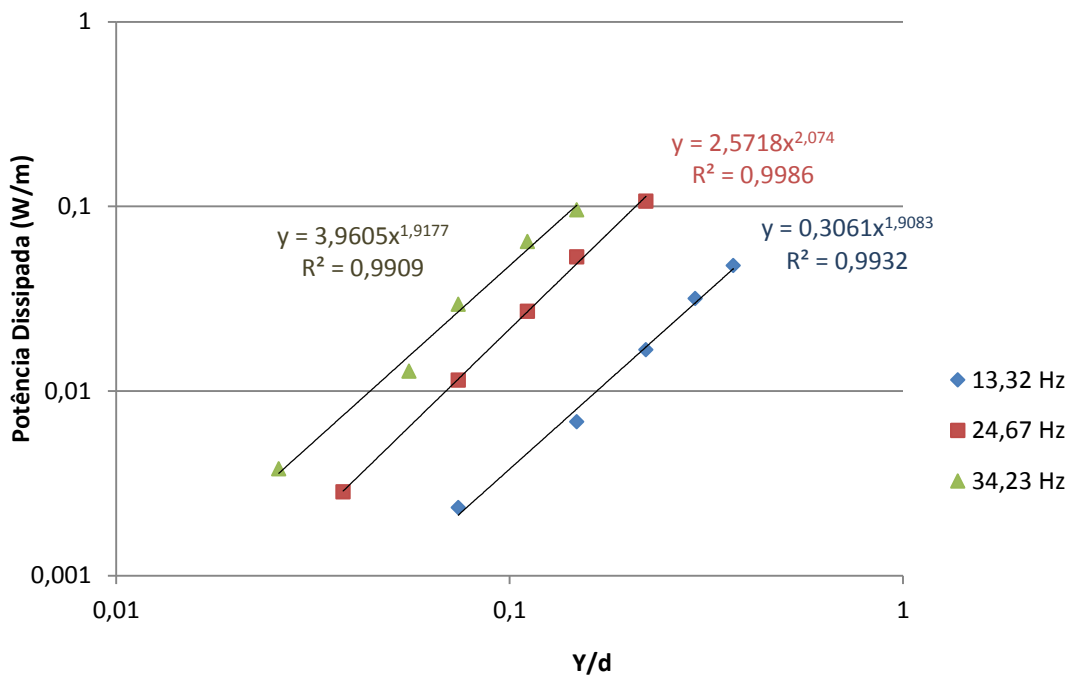


Figura A.1 - Auto amortecimento do condutor Tern, H/w = 2725m.

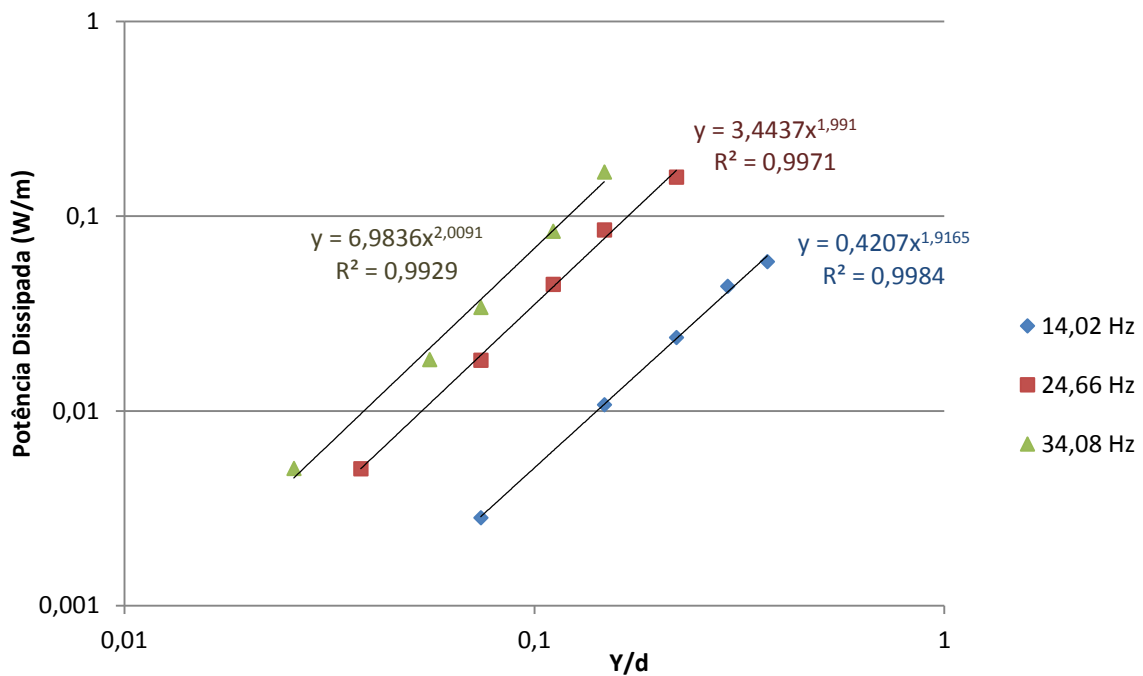


Figura A.2 - Auto amortecimento do condutor Tern, H/w = 2144m.

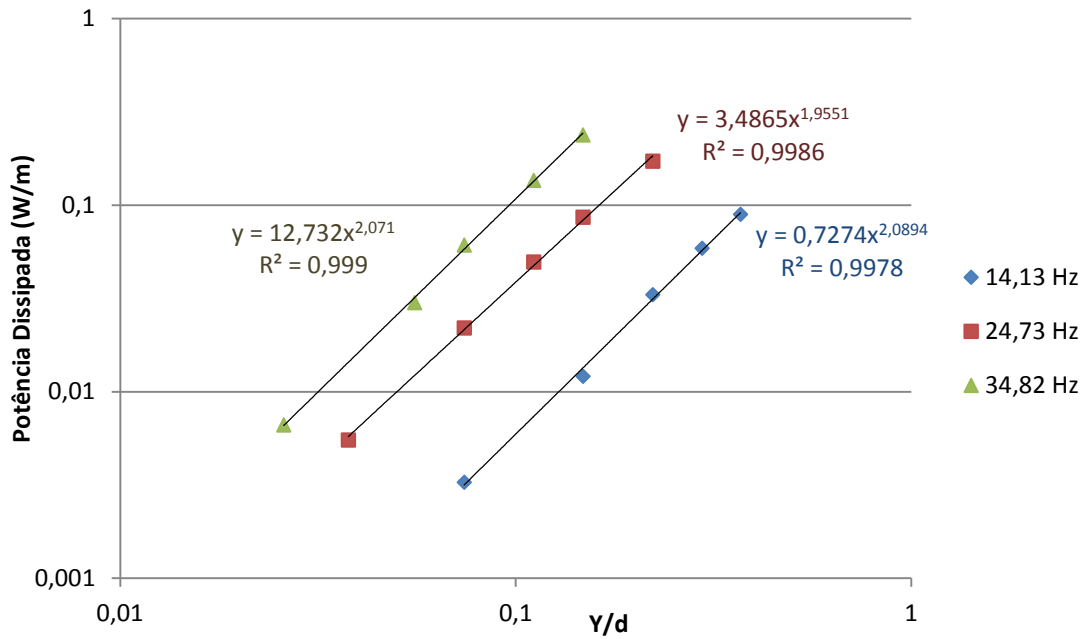


Figura A.3- Auto amortecimento do condutor Tern, H/w = 1820m.

### Cabo Orchid

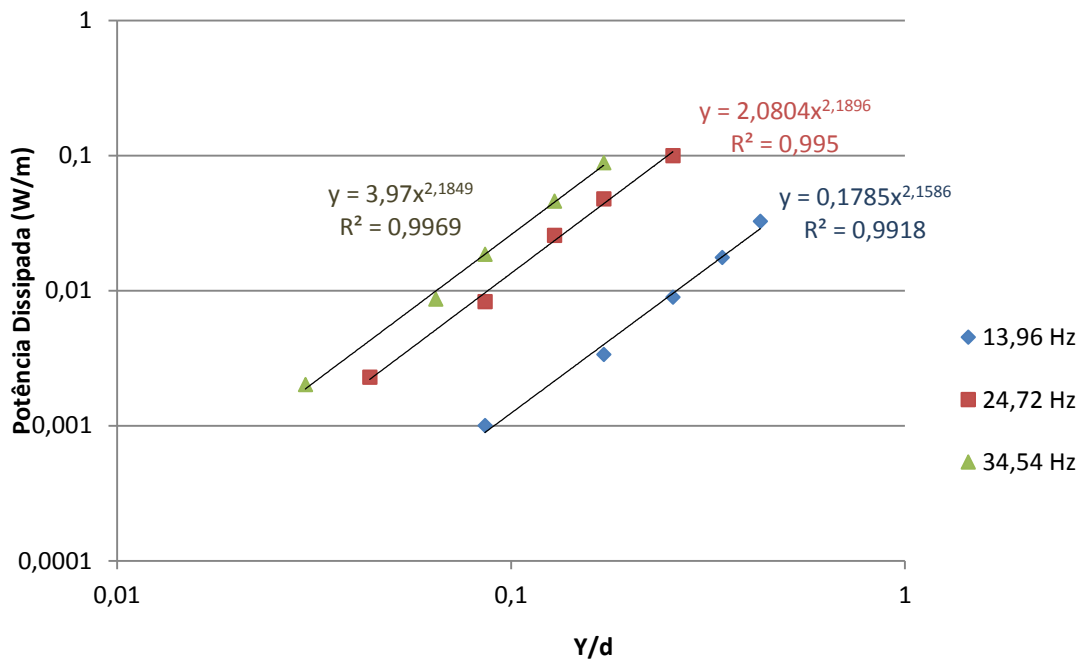


Figura A.4- Auto amortecimento do condutor Orchid, H/w = 2725m.

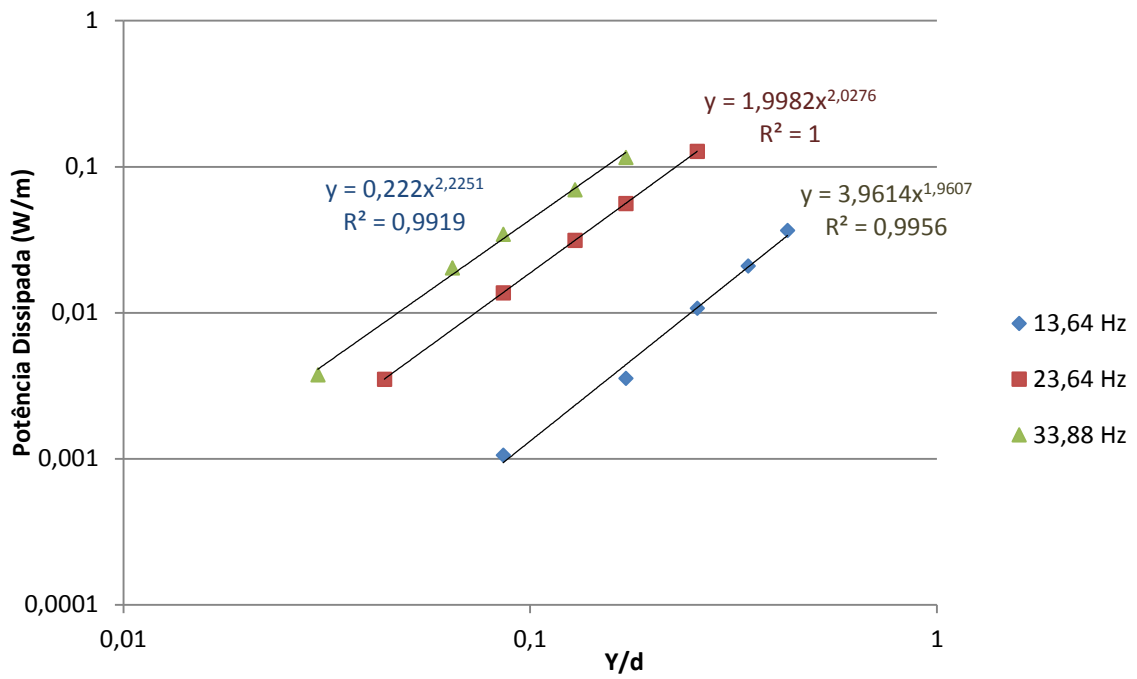


Figura A.5 - Auto amortecimento do condutor Orchid, H/w = 2144m.

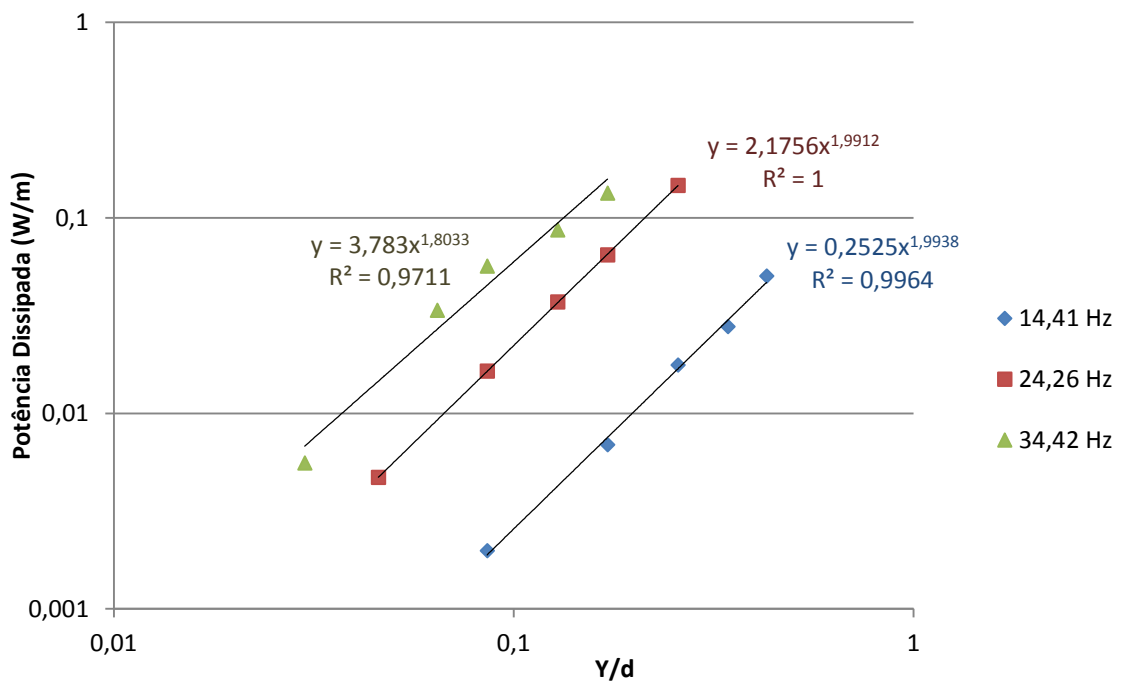


Figura A.6 - Auto amortecimento do condutor Orchid, H/w = 1820m.

### Cabo CAL 900

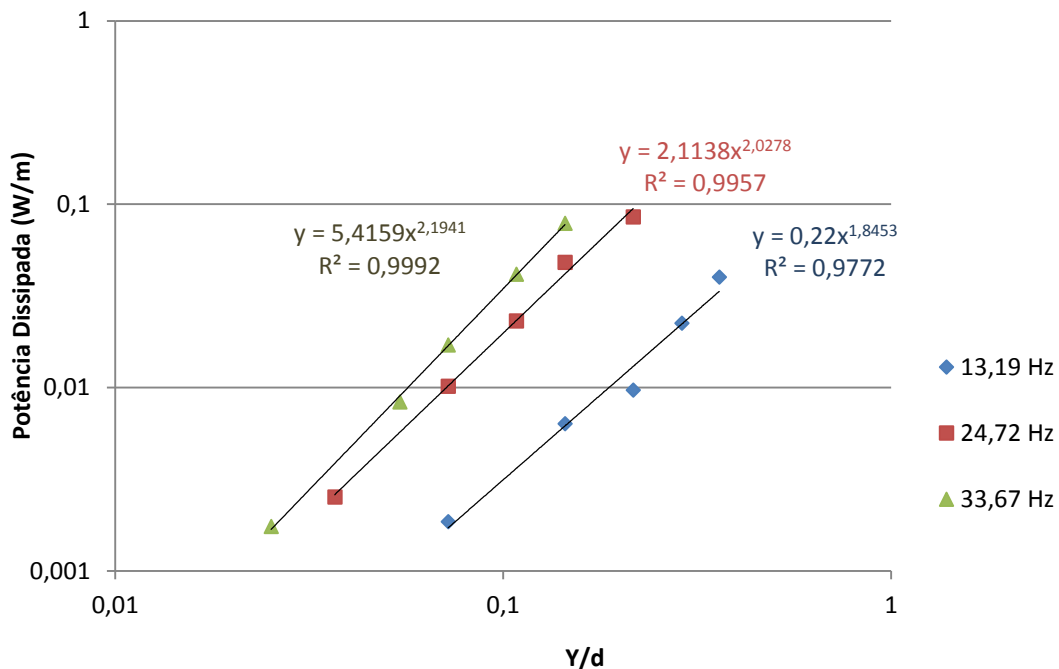


Figura A.7 - Auto amortecimento do condutor CAL 900, H/w = 2725m.

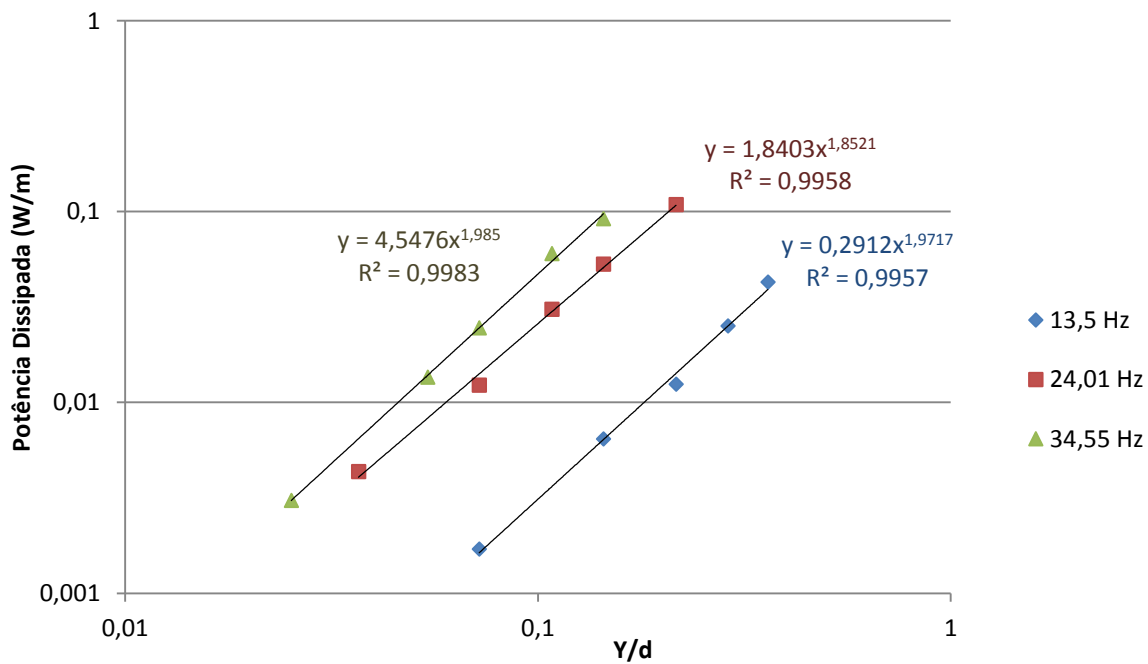


Figura A.8 - Auto amortecimento do condutor CAL 900, H/w = 2144m.

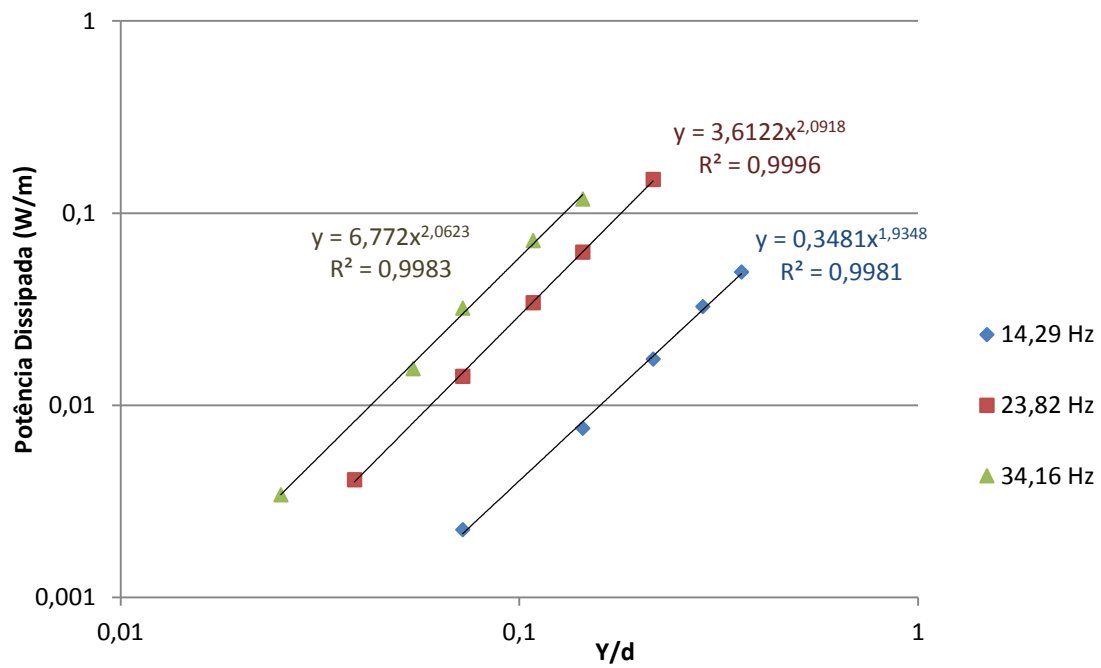


Figura A.9 - Auto amortecimento do condutor CAL 900, H/w = 1820m.