



# **DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA PARA A  
REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE AUTO-AMORTECIMENTO  
EM CABOS CONDUTORES DE ENERGIA ELÉTRICA**

**TÚLIO AVELAR GUIMARÃES**

**Brasília, Setembro de 2015**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS**

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

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA PARA A  
REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE AUTO-AMORTECIMENTO EM  
CABOS CONDUTORES DE ENERGIA ELÉTRICA**

**TÚLIO AVELAR GUIMARÃES**

**ORIENTADOR: JORGE LUIZ DE ALMEIDA FERREIRA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS**

**BRASÍLIA/DF: SETEMBRO DE 2015**

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

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA PARA A  
REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE AUTO-AMORTECIMENTO EM  
CABOS CONDUTORES DE ENERGIA ELÉTRICA**

**TÚLIO AVELAR GUIMARÃES**

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

**APROVADA POR:**

---

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

---

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

---

**Profª Aida Alves Fadel, Dr. (ENM-UnB)  
(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, 30 DE SETEMBRO DE 2015.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

GUIMARÃES, TÚLIO AVELAR

Desenvolvimento de uma bancada para a realização de ensaios de auto-amortecimento em cabos condutores de energia elétrica [Distrito Federal] 2015.

88p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2015).

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. Bancada de Ensaios

4. Auto-amortecimento

5. Método da Potência

6. Método da Onda Estacionária

**I. ENM/FT/UnB**

**II. Título ENM. DM – 234/2015**

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GUIMARÃES, T.A. (2015). Desenvolvimento de uma bancada para a realização de ensaios de auto-amortecimento em cabos condutores de energia elétrica. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas. Publicação ENM.DM - 234/2015, Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 88p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Túlio Avelar Guimarães

TÍTULO: Desenvolvimento de uma bancada para a realização de ensaios de auto-amortecimento em cabos condutores de energia elétrica [Distrito Federal] 2015

GRAU: Mestre

ANO: 2015

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 dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Túlio Avelar Guimarães  
tulio.a.guimaraes@gmail.com

## **AGRADECIMENTOS**

*Agradeço à minha mãe Gislene Margaret Avelar Guimarães, pelo apoio e conselhos em todas as decisões que tomei, e a meu pai Cláudio Ricardo Garcia Guimarães (in memoriam) por tudo que me ensinou no tempo em que estivemos juntos.*

*Aos meus irmãos Poliana, Paulo e Taís, pelas experiências de vida divididas e compartilhadas.*

*Aos professores do Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais, em especial ao meu orientador, Jorge Luiz de Almeida Ferreira, pela atenção dada, auxílio na solução dos problemas e por todo o conhecimento transmitido. E ao professor José Alexander Araújo, que também me acompanhou durante todo período de realização do trabalho, dando importantes conselhos e direcionamentos.*

*Aos meus amigos, em especial Marcos, Álvaro, Victor e Kallyandra, por me acompanharem na produção deste projeto, ajudando a manter a cabeça no lugar e deixando a vida mais divertida.*

*À Natália Mastrela, pelo ânimo que me trouxe nos momentos mais difíceis e pela felicidade nos momentos mais fáceis.*

*Aos colegas e funcionários do laboratório Marcus, Maurício, Miélle, Silmar, Pereira, Marcão, Tarsis, Artur, Xavier, Teniel, Fernando e Wesley, pela amizade e ajuda em todas as etapas. Em especial ao Remy, pelos ensinamentos e troca de ideias que facilitaram muito a realização do projeto.*

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

## DEDICATÓRIA

*A meus pais Gislene e  
Ricardo (in memoriam).*

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma bancada para a realização de ensaios de auto-amortecimento em cabos condutores de energia elétrica. Para isso, foi realizado um estudo sobre os conceitos utilizados nas metodologias para a obtenção da potência dissipada pelo condutor, buscando recomendações de entidades mundialmente atuantes em pesquisas envolvendo condutores e linhas de transmissão, dentre elas: CIGRE, IEEE e EPRI. Problemas para a realização dos ensaios foram levantados e soluções adotadas ou propostas. Foi verificado que a massa da parte vibrante do *shaker* eletromecânico era alta em relação à massa por unidade de comprimento do condutor. Para diminuir a influência do peso concentrado do excitador, que modifica a resposta em frequência do cabo, foi desenvolvido um projeto para uma conexão flexível entre o *shaker* e o condutor, apresentado também neste trabalho. Ensaios preliminares foram realizados para verificar a consistência da metodologia utilizada e aplicabilidade da bancada para a obtenção de resultados de auto-amortecimento de condutores. Foram utilizadas duas metodologias diferentes: O Método da Potência e o Método da Onda Estacionária. A análise dos dados destes testes mostrou uma boa proximidade entre os resultados das duas metodologias, além de vários fenômenos esperados, como o aumento da potência dissipada com o aumento da frequência de ensaio ou da amplitude de vibração. Os ensaios também revelaram oportunidades de melhoria na bancada e foram feitas propostas para implementação. Além disso, foram feitos testes para a verificação da influência da rigidez da conexão nos dados obtidos para o auto-amortecimento utilizando o Método da Potência. Estes testes revelaram um aumento nos valores de potência dissipada obtidos para configurações mais rígidas.

## **ABSTRACT**

This work aims the development of a test bench to carry out self-damping measurements on conductors of electric energy. For this, a study was conducted on the concepts used in the methodologies for obtaining the power dissipated by the cable, searching recommendations of globally active institutions on research involving drivers and transmission lines, such as: CIGRE, IEEE and EPRI. Problems for the tests were raised and solutions were adopted or proposed. It was found that the mass of the vibrating part of the electromechanical shaker was high relative to the mass per unit length of the conductor. To reduce the influence of the weight concentrated on the driver, which modifies the frequency response of the cable, a flexible connection between the shaker and the conductor has been developed, also presented in this work. Preliminary tests were performed to verify the consistency of the used methodology and the applicability of the bench to obtain conductor self-damping results. Two different methodologies were used: The Power Method and the Inversed Standing Wave Method. The analysis of the data from these tests showed similar results for both methodologies, and various expected phenomena such as the increase of power dissipation with increasing of frequency or amplitude of vibration. The tests also showed improvement opportunities on the bench and were made proposals for implementation. In addition, tests were performed to verify the influence of connection rigidity on data obtained for the self-damping using the Power Method. These tests showed an increase in power dissipated values obtained for configurations that are more rigid.

# SUMÁRIO

RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xi
ÍNDICE DE TABELAS .....	xiii
LISTA DE ABREVIACÕES .....	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS .....	xv
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 OBJETIVO .....	6
1.2 ESTADO DA ARTE .....	7
1.2.1 Fadiga em cabos condutores .....	7
1.2.2 Auto-amortecimento .....	8
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	10
2 REVISÃO TEÓRICA .....	12
2.1 VIBRAÇÕES – CONCEITOS GERAIS .....	12
2.2 VIBRAÇÕES EM CABOS CONDUTORES .....	16
2.2.1 Excitação eólica .....	18
2.3 AUTO-AMORTECIMENTO .....	22
2.3.1 Métodos de medida de auto-amortecimento .....	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	32
3.1 BANCADA DE ENSAIOS DE CABOS CONDUTORES .....	32
3.1.1 Bancadas já existentes antes do projeto .....	32
3.1.2 Nova bancada construída .....	34
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS NOS ENSAIOS .....	35
3.2.1 Cabo Condutor .....	35
3.2.2 <i>Shaker</i> Eletromecânico .....	36
3.2.3 Sistema de Controle Vibratório .....	37
3.2.4 Sensores .....	38

3.2.5	Fixação da amostra na bancada .....	38
3.3	CONEXÃO FLEXÍVEL .....	39
3.4	METODOLOGIA DOS ENSAIOS.....	41
3.4.1	Montagem da amostra .....	41
3.4.2	Instrumentação da bancada .....	46
3.4.3	Procedimentos para os ensaios de auto-amortecimento .....	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	54
4.1	ENSAIOS DE AUTO-AMORTECIMENTO DO CONDUTOR .....	54
4.2	INFLUÊNCIA DA RIGIDEZ DA CONEXÃO .....	59
5	CONCLUSÕES E PROPOSTA DE TRABALHOS.....	62
	FUTUROS.....	62
5.1	CONCLUSÕES.....	62
5.2	PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS.....	63
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	65
7	ANEXOS.....	68
7.1	ANEXO A – DESENHOS TÉCNICOS DA BANCADA DE ENSAIOS .....	68
7.2	ANEXO B -- DESENHOS TÉCNICOS DA CONEXÃO FLEXÍVEL.....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Quantidade percentual de empreendimentos e potência instalada no Brasil em 2013 por tipo de produção (ANEEL, 2014).....	2
Figura 1.2 – Expansão da rede de transmissão de energia elétrica no Brasil de 2009 a 2013 (ANEEL, 2014).....	3
Figura 1.3 – Potencial para produção de energia elétrica para bacias hidrográficas brasileiras (ANEEL, 2008).....	4
Figura 2.1 – Sistema massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade.....	13
Figura 2.2 – Influência do fator de amortecimento na vibração (COSSOLINO & PEREIRA, 2010).....	15
Figura 2.3 – Regime de ventos brasileiro - Média anual (CEPEL, 2015).....	18
Figura 2.4 – Regime de fluxo em torno de um cilindro liso circular (FADEL, 2010 - Modificado).....	20
Figura 2.5 – escoamento de fluidos em função do Número de Reynolds: (a) $Re = 1,1$ ; (b) $Re = 9,6$ ; (c) $Re = 26$ ; (d) $Re = 140$ ; (e) $Re = 2 \times 10^4$ ; (f) $Re = 1 \times 10^5$ (EPRI, 2006).....	21
Figura 2.6 – Resultados de auto-amortecimento para o cabo Drake, em escala logarítmica (CIGRÉ, 2011).....	24
Figura 2.7 – Auto-amortecimento do cabo CAA 564/72 em função da frequência para várias tensões médias, determinadas pela carga de esticamento do cabo (Kiessling et al., 2003 apud EPRI, 2006).....	25
Figura 2.8 – Terminação Flexível (IEEE, 2007).....	27
Figura 2.9 – Curva de decaimento para o condutor 264-AL3/34-ST1A tensionado a 20% RTS - voltagem do acelerômetro em função do tempo (CIGRE, 2011).....	30
Figura 2.10 – Conexão com sistema de fusível para desconexão entre o shaker o condutor (CIGRE, 2011).....	31
Figura 3.1 - Desenho esquemático das bancadas de ensaios de fadiga em cabos condutores presentes no LABCABOS/UnB.....	33
Figura 3.2 – Desenho esquemático da nova bancada de ensaios de fadiga e auto-amortecimento em cabos condutores, construída no LABCABOS/UnB.....	34
Figura 3.3 – Vista geral das bancadas de ensaios do LABCABOS/UnB.....	35
Figura 3.4 – <i>Shaker</i> utilizado nos ensaios de auto-amortecimento.....	37
Figura 3.5 – Controlador LDS LASER USB LAS-200.....	38
Figura 3.6 – Conexão flexível.....	39
Figura 3.7 – Vista explodida da conexão flexível desenvolvida para os ensaios de auto-amortecimento.....	40

Figura 3.8 – Detalhe das chapas horizontais utilizadas na conexão flexível (na imagem são utilizadas quatro chapas).....	41
Figura 3.9 – Montagem da amostra: (a) grampo de ancoragem anterior; (b) grampo de ancoragem posterior.....	42
Figura 3.10 – Sistema de aplicação da carga de tracionamento no condutor: (a) Talha de alavanca (Tifor) para aplicação da carga inicial; (b) Braço de alavanca e contrapesos para ajuste fino da carga.....	43
Figura 3.11 – Detalhe da montagem do grampo rígido com bucha de alumínio .....	44
Figura 3.12 – Conexão entre o cabo e o <i>shaker</i> : (a) Conexão Rígida; (b) Conexão Flexível.....	45
Figura 3.13 – Localização do <i>shaker</i> para os ensaios de auto-amortecimento .....	46
Figura 3.14 – Desenho esquemático da instrumentação da bancada de ensaios .....	46
Figura 3.15 – Foto da montagem dos sensores na bancada para os ensaios pelo Método da Potência e Método da Onda Estacionária.....	47
Figura 3.16 – Detalhe da diferença entre as alturas do grampo rígido e a mesa do shaker.....	49
Figura 3.17 – Varredura em frequência para a obtenção dos picos de ressonância .....	51
Figura 4.1- Auto-amortecimento - Cabo CAA 795 MCM (Tern) - EDS = 34,4% RTS - Método da Potência - Conexão Flex2.....	55
Figura 4.2 – Auto-amortecimento - Cabo CAA 795 MCM (Tern) - EDS = 34,4% RTS - Método da Onda Estacionária - Conexão Flex2.....	55
Figura 4.3 – Comparação entre os resultados obtidos utilizando o Método da Potência e o Método da Onda Estacionária – Cabo CAA 795 MCM (Tern) - EDS = 34,4% RTS - Conexão Flex2.....	56
Figura 4.4 – Potência dissipada em função da frequência de vibração para carga de esticamento e $Y/d$ constantes.....	58
Figura 4.5 – Auto-amortecimento - Cabo CAA 795 MCM (Tern) - EDS = 30,0% RTS - Método da Potência - Conexão Flex2.....	59
Figura 4.6 – Influência da rigidez do acoplamento nos resultados de auto-amortecimento – frequências próximas a 40 Hz – Cabo CAA 795 MCM (Tern) - EDS = 30,0% RTS - Método da Potência.....	60
Figura 4.7 – Influência da rigidez do acoplamento nos resultados de auto-amortecimento – frequências próximas a 50 Hz – Cabo CAA 795 MCM (Tern) - EDS = 30,0% RTS - Método da Potência.....	60

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparação entre os tipos mais comuns de processos de vibração induzidos pelo vento em cabos condutores (HENRIQUES, 2006) .....	17
Tabela 2.2 - Intensidade de turbulência do vento em função do terreno (Ref.: Brochura 273) ..	22
Tabela 3.1 – Características estruturais e dimensionais do condutor e propriedades mecânicas do cabo CAA795 MCM (Tern).....	36
Tabela 3.2 - Descrição dos sensores utilizados para aquisição de dados e controle do ensaio ...	48
Tabela 3.3 – Faixas de frequência calculada e utilizada na varredura .....	50
Tabela 3.4 – Parâmetros de ensaio utilizados nos testes de auto-amortecimento .....	52

## LISTA DE ABREVIACÕES

ANEEL	<i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>
ASTM:	<i>American Society for Testing and Materials.</i>
CA (AAC):	Condutores de Alumínio ( <i>All Aluminium Conductor</i> ).
CAA (ASCR):	Condutores de Alumínio com Alma de Aço ( <i>Aluminium Conductor Steel Reinforced</i> ).
CAL (AAAC):	Condutores de Alumínio Liga ( <i>All Aluminium Alloy Conductor</i> ).
CIGRE:	<i>Conseil International des Grands Réseaux Electriques (International Council on Large Electric Systems).</i>
EDS:	<i>Every Day Stress</i> (ou Carga Diária Média de Tracionamento)
EPRI:	<i>Electric Power Research Institute</i>
IEEE:	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos ( <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> )
LABCABOS/UnB	Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia Elétrica
LT:	Linha de Transmissão
MOE:	Método da Onda Estacionária
MP:	Método da Potência
P&D	Programa de Pesquisa e Desenvolvimento
RTS	<i>Rated Tensile Strength</i> (Limite de Ruptura Nominal)
UnB	Universidade de Brasília
UPC	Último Ponto de Contato entre o cabo e o grampo de suspensão

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Latinos

$a_n$	Amplitude de vibração do nó “n”, [mm]
$C$	Coefficiente de amortecimento, [N.s/m]
$C_c$	Coefficiente de amortecimento crítico, [N.s/m]
$d$	Diâmetro do condutor, [mm]
$E_{int}$	Energia introduzida no sistema pelo shaker, [W.s]
$E_{diss}$	Energia dissipada pelo sistema, [W.s]
EDS	<i>Every Day Stress</i> , [% RTS]
$F(t)$	Força de excitação (função do tempo), [N]
$f$	Frequência de vibração do condutor, [Hz]
$f_s$	Frequência com que os vórtices se descolam na esteira de Von Karman, [Hz]
$K$	Constante da mola, [N/m]
$L$	Comprimento do vão ativo, [m]
$M$	Massa do corpo vibrante, [Kg]
$P$	Potência dissipada pelo condutor por unidade de comprimento, [W/m]
$pk$	Pico
$P_n$	Potência transmitida ao cabo pelo shaker no ponto “n” [W]
$P_{n-1,n}$	Potência dissipada entre os pontos “n-1” e “n”, [W]
$R_e$	Número de Reynolds
$s$	Variável da equação característica
$S_r$	Número de Strouhal
$T$	Carga de esticamento do cabo condutor, [N]
$T_a$	Período de vibração do sistema subamortecido, [s]
$U$	Velocidade do fluxo livre em escoamento, [m/s]

$V$	Velocidade do Anti-nó, [m/s]
$V_a$	Velocidade no ponto de aplicação da força pelo shaker, [m/s]
$x_i$	Amplitude de vibração do sistema subamortecido no ciclo $i$ , [m]
$Y_0$	Amplitude de vibração do anti-nó no primeiro ciclo, [mm]
$Y_c$	Amplitude de vibração do anti-nó no ciclo “c”, [mm]

### **Gregos**

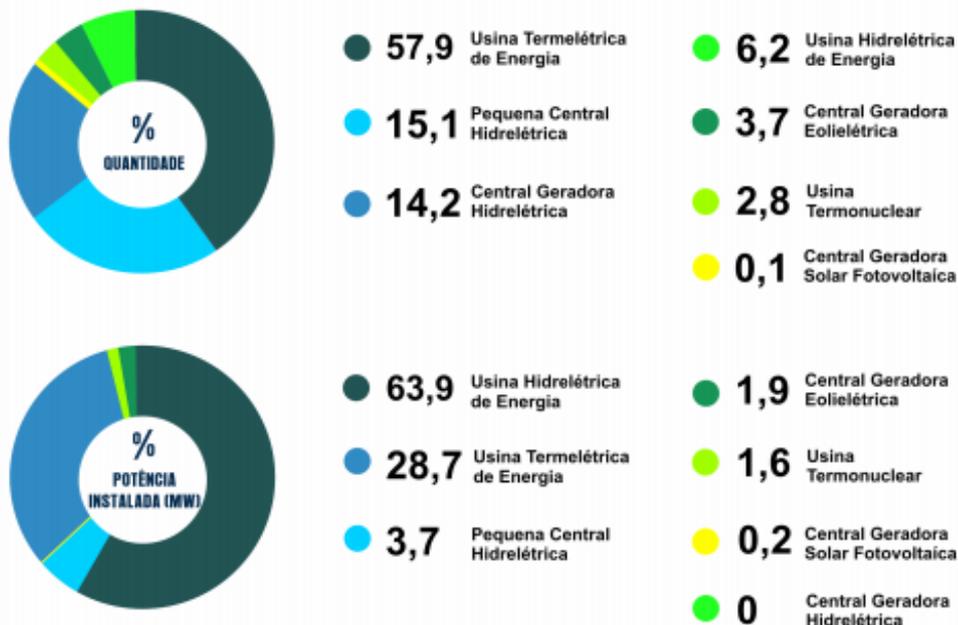
$\xi$	Fator de Amortecimento
$\delta$	Decremento logarítmico
$\lambda$	Comprimento de onda, [m]
$\nu$	Coefficiente de viscosidade cinemática, [m <sup>2</sup> /s]
$\omega_a$	Frequência de vibração sistema amortecido, [Hz]
$\omega_n$	Frequência natural do sistema não amortecido, [Hz]

# 1 INTRODUÇÃO

O crescimento econômico de um país demanda um fornecimento de energia elétrica que possa suprir as necessidades de produtores e consumidores de bens. Segundo dados constantes no Atlas de Energia Elétrica (ANEEL, 2008) e no Banco de Informações de Geração (ANEEL, 2015), a capacidade de geração de energia no Brasil, em potência instalada, passou de 96.296 MW, em 2006, para mais de 138.554 MW em 2015. Ainda existe uma previsão de ampliação de 41.489 MW nos próximos anos, com alguns empreendimentos com construção já iniciada.

O imenso potencial hídrico brasileiro, associado a um clima tropical, fez com que nossa matriz energética fosse baseada em hidroelétricas. Segundo dados apresentados no Relatório ANEEL 2013, publicado em 2014, no ano de referência do relatório, as grandes usinas hidroelétricas representavam apenas 6,3% do total de empreendimentos de geração de energia elétrica. Apesar desta quantidade elas eram responsáveis por 63,9% da potência instalada no país (Figura 1.1). Isto mostra a concentração da produção em um número reduzido de usinas com grande capacidade. Este tipo de energia é mais limpo, quando comparada à energia térmica e mais seguro, considerando a possibilidade de usinas nucleares, porém as usinas só podem ser construídas em locais propícios nos rios, o que faz com que, em geral, se encontrem longe de grandes centros consumidores.

## EMPREENDIMENTOS EM OPERAÇÃO



Fonte: Banco de Informações de Geração

Figura 1.1 – Quantidade percentual de empreendimentos e potência instalada no Brasil em 2013 por tipo de produção (ANEEL, 2014)

A distância faz com que sejam necessários altos investimentos para a transmissão da energia produzida, fator que é ainda mais relevante devido à grande extensão do território do país. A Figura 1.2 mostra que a rede de transmissão de energia elétrica brasileira está sofrendo um processo de expansão nos últimos anos, chegando a mais de 111 mil quilômetros em 2013. Além disso, está em construção a linha conhecida como “Linha do Madeira”, que ligará Rondônia ao estado de São Paulo e terá duas linhas, com 2.375 km cada.

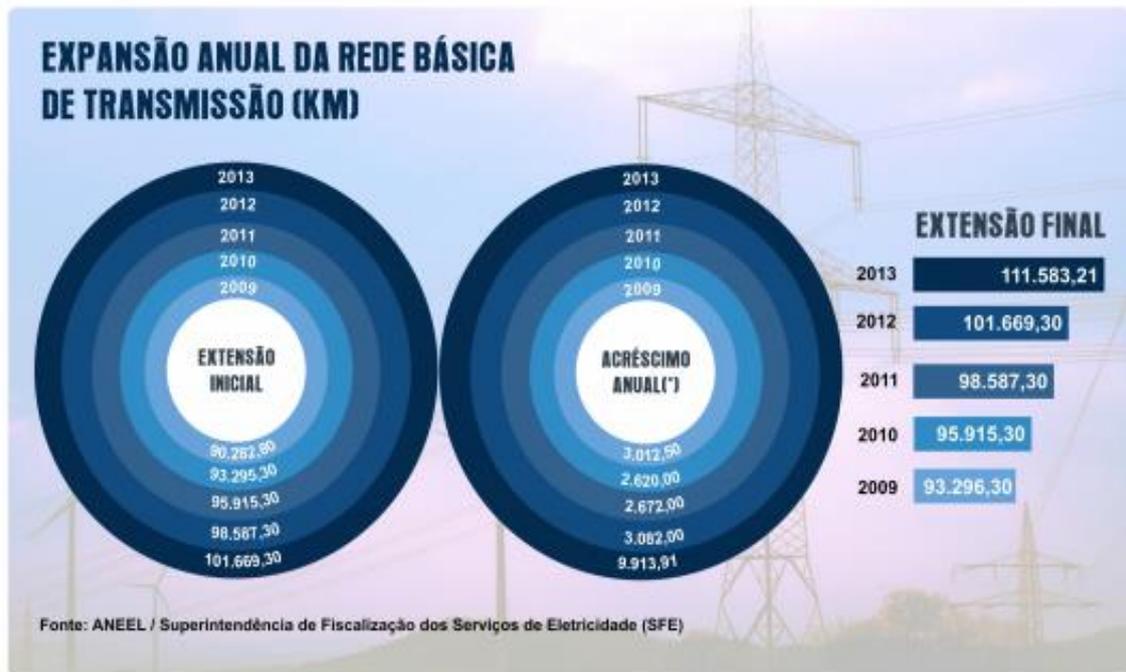


Figura 1.2 – Expansão da rede de transmissão de energia elétrica no Brasil de 2009 a 2013 (ANEEL, 2014)

Na Figura 1.3 é possível verificar que o maior potencial hídrico do país está localizado nas bacias do Amazonas, Araguaia-Tocantins e Paraná. Também é possível verificar que o apenas 1% do potencial hídrico do Amazonas, considerando o total inventariado e estimado, é atualmente utilizado. Assim, o desenvolvimento de projetos melhores e mais baratos para a transmissão de energia, possibilitará a utilização de uma grande quantidade de energia disponível em locais mais distantes.

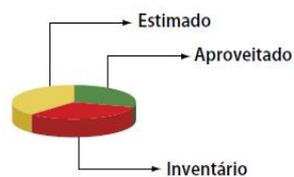


**Convenções Cartográficas**

- Capital Federal
- Capitais
- Divisão Estadual

**Potencial total (MW)**

- Até 1.200
- 1.201 a 6.000
- 6.001 a 18.000
- acima de 18.000



Fonte: EPE, 2008.

ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL - 3ª EDIÇÃO

Escala Gráfica: 0 250 500 km



Figura 1.3 – Potencial para produção de energia elétrica para bacias hidrográficas brasileiras (ANEEL, 2008)

Além da redução no custo de linhas transmissão de energia elétrica, estudos envolvendo cabos condutores podem gerar projetos mais seguros e duráveis. Além do fator da segurança, o custo da falha de uma linha de transmissão pode ser bastante significativo. Em 2001, uma falha em uma linha de transmissão de 460 kV deixou aproximadamente 67 milhões de habitantes do país sem fornecimento de energia por várias horas, afetando também todo o sistema produtivo de 11 estados das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste (AZEVEDO, 2002). Tensões alternadas, provocadas pelo movimento vibratório induzido no cabo pelo vento (vibração eólica) levaram a um processo de fadiga e a consequente falha do condutor. Essa interrupção teve uma duração aproximada de dez horas. Estima-se que o custo associado, apenas considerando o prejuízo pela falta de consumo, tenha atingido 70 milhões de reais. Porém existem fatores que poderiam tornar este valor muito mais alto. Dentre estes fatores, podemos citar indenizações aos consumidores, uma multa imposta pela ANEEL de aproximadamente 4,5 milhões de reais e outros custos não mensuráveis como os danos à imagem da empresa responsável e uma possível redução do interesse em investimento de capital estrangeiro pelo aumento do risco associado à fragilidade da infraestrutura do país. O conhecimento da resposta mecânica dos condutores utilizados em campo hoje também possibilita a realização de cálculos da vida residual para linhas instaladas, diminuindo o risco de eventos como este acontecerem.

A realização de projetos mais seguros e baratos não depende somente do conhecimento do comportamento em fadiga dos condutores, também é necessário conhecer a resposta dinâmica do cabo quando instalado para que se tenha uma previsão das solicitações nele aplicadas. A construção relativamente complexa e cara faz com que existam poucos laboratórios atuantes no mundo na realização de ensaios de fadiga e, principalmente, de auto-amortecimento em condutores. O presente trabalho traz medidas tomadas para a preparação da terceira bancada de ensaios construída no Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia (LABCABOS/UnB). O laboratório está inserido no Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais (GFFM) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília.

O LABCABOS/UnB, no início da realização deste projeto, contava com duas bancadas de ensaios de fadiga em cabos condutores de energia elétrica. Com o financiamento proveniente das empresas TAESA, TBE, BRASNORT, EATE, ATE III, TME e Amazônia Eletronorte, foi possível a criação de uma nova bancada que foi preparada

para, além de ensaios de fadiga, possibilitar a avaliação do auto-amortecimento de condutores e eficiência de amortecedores e outros dispositivos instalados nas linhas. Este financiamento se deu em razão de um projeto do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

A nova bancada de ensaios para fadiga em cabos condutores de energia elétrica, instalada no LABCABOS/UnB, permitirá uma aceleração no processo de levantamento de dados sobre resposta mecânica ao processo de fadiga eólica. Isto se faz necessário devido à pequena quantidade de laboratórios capazes de realizar este tipo de ensaio no país, não sendo capazes de cumprir a alta demanda proveniente do já mencionado aumento na capacidade produtora de energia.

Uma boa maneira de reduzir os riscos de fadiga em cabos condutores é diminuir a amplitude de vibração e, em consequência, a tensão sofrida por eles. Condutores que dissipem mais energia terão uma vibração reduzida e, conseqüentemente, uma vida em fadiga maior. Esta dissipação inerente ao condutor é conhecida como auto-amortecimento. Existem recomendações específicas para a realização dos ensaios de auto-amortecimento em cabos condutores de energia elétrica. Na nova bancada será possível investigar a dissipação de potência por um condutor para vários valores de frequência, observando as faixas em que a redução da amplitude será maior.

A quantidade de dados disponíveis sobre o auto-amortecimento de condutores ainda é pequena. Mais estudos sobre o tema permitirão a comparação de geometrias e materiais que dissipam mais energia eólica, levando a projetos mais modernos e duráveis.

## **1.1 OBJETIVO**

Este trabalho teve como objetivo a preparação da terceira bancada do LABCABOS/UnB para possibilitar ensaios auto-amortecimento em cabos condutores de energia elétrica. Para isso, foram realizados projetos de conectores para acoplamento do cabo condutor ao *shaker* eletromecânico, equipamento responsável por promover a vibração dos condutores durante os ensaios. Durante o trabalho serão verificados possíveis problemas que impeçam ou dificultem a realização dos testes, apresentando ou propondo soluções para estas dificuldades.

Todas as medidas tomadas serão baseadas em estudos das recomendações de entidades de pesquisa mundialmente reconhecidas de forma a garantir a padronização dos ensaios com aqueles realizados nos melhores centros de estudo do mundo. O estudo das metodologias e recomendações também fez parte das atividades a ser desenvolvidas no decorrer deste trabalho.

O projeto visa também a realização de testes preliminares para verificação da capacidade de realização dos ensaios de auto-amortecimento em condutores, bem como a avaliação da metodologia utilizada e consistiram na utilização do Método da Potência e do Método da Onda Estacionária.

## **1.2 ESTADO DA ARTE**

### **1.2.1 Fadiga em cabos condutores**

Os primeiros estudos do processo de fadiga eólica em cabos condutores de energia elétrica são datados do início do século XX, com pesquisas publicadas por Varney, em 1926 e Nefzger, em 1933. Estes estudos, apesar de caracterizar o processo de falha como fadiga, não explicavam de forma consistente o processo de iniciação de trincas.

No ano de 1921, foi fundada em Paris, na França, a CIGRÉ (*Conseil International des Grands Réseaux Electriques*), para realizar pesquisas na área de eletricidade, em especial na utilização de sistemas de alta voltagem. Em 1953 este órgão designou o subcomitê SC6 para investigar danos em linhas de transmissão instaladas causados pela vibração eólica, o chamado *EDS Panel* (ZETTERHOLM, 1960). Os estudos deste grupo geraram o Relatório 223, que definia parâmetros para a realização de projetos de LTs.

Poffenberger e Swart publicaram em 1965 a dedução de um modelo matemático que correlacionava a amplitude de vibração a uma distância definida do Último Ponto de Contato (UPC) entre o cabo e o grampo de suspensão, com a tensão nominal no ponto mais solicitado, o próprio UPC. Um ano depois, em 1966, o *Institute of Electrical & Eletronic Engineers* (IEEE), propôs a padronização para as medições de vibrações em condutores baseado nesta equação. A metodologia de Poffenberger-Swart, associada às curvas S-N levantadas experimentalmente é a mais utilizada até hoje para a realização de projetos de Linhas de Transmissão.

Somente em 1968 foi publicado um estudo por Fricke e Rawlins que relacionava as falhas por fadiga em cabos condutores com o *fretting*. Este processo é caracterizado pelo escorregamento parcial entre fios de camadas adjacentes ou fios da camada externa e ferragens instaladas na linha, como grampos de suspensão, amortecedores e sinalizadores. Os autores fizeram observações de linhas em operação e realizaram ensaios em laboratório e observaram que todas as trincas que provocaram falhas nos fios foram originadas nas marcas de *fretting*. Isto permitiu verificar a importância deste fenômeno na aceleração do processo de fadiga nos condutores.

O EDS, apresentado ainda em 1960 é utilizado até hoje em vários estudos e como referência para realização de projetos de novas linhas de transmissão. Apesar disso, estudos recentes como o publicado na brochura 273 (2005), também da CIGRÉ, apontam que o EDS pode não ser o melhor método para se definir os limites de segurança de uma LT. Esta brochura apresenta o H/w (razão entre a carga horizontal de esticamento do cabo na temperatura média do mês mais frio do ano e o peso por unidade de comprimento do condutor) como um parâmetro para ser utilizado em substituição ao EDS.

### **1.2.2 Auto-amortecimento**

Os primeiros estudos do processo vibratório em cabos condutores surgiram na década de 1920, após a observação das primeiras falhas por fadiga causada pelo vento. Varney, em 1926, foi capaz de mensurar a velocidade da onda no condutor, fazendo uma relação entre valores obtidos experimentalmente e analiticamente.

Porém, somente entre os anos de 1950 e 1960 foram apresentados trabalhos mais focados no amortecimento inerente aos cabos e considerada sua importância para a redução da severidade do fenômeno de fadiga. Até meados dos anos 50, foram produzidos alguns trabalhos envolvendo o problema de amortecimento em cabos condutores, porém existia pouca informação sobre as relações quantitativas, conforme mostrado no artigo de Tompkins et al. (1956). Os autores apresentaram uma forma de medir a dissipação de energia a partir de medidas das amplitudes de vibração de nós e anti-nós, conhecido atualmente como Método da Onda Estacionária. Os resultados foram comparados com a potência consumida pelo *shaker*, retiradas as perdas internas do aparelho, que poderia ser considerada a mesma dissipada pelo sistema, em uma

versão inicial do Método da Potência. Neste artigo também foram feitas considerações para utilização de amortecedores do tipo stockbridge, como forma de aumentar a dissipação de energia. Em 1958, Rawlins apresentou desenvolvimentos na metodologia introduzida por Tompkins.

Em seu artigo de 1967, Hard e Holben ponderam que, com o avanço de instrumentos de gravação e medida, a obtenção da dissipação de energia de um condutor pelo Método do Decaimento passou a ser mais atrativo. A partir desta metodologia é possível medir o amortecimento em vários níveis de amplitude em apenas um ensaio.

Com o aumento do número de laboratórios realizando trabalhos em auto-amortecimento de cabos condutores, surgiu a necessidade de padronização dos ensaios, buscando a repetitividade e possibilidade de comparação de dados obtidos por diferentes pesquisadores. Para isso, o Grupo de Trabalho em Vibrações de Condutores, do IEEE, em conjunto com o Grupo de Trabalho 01 do Subcomitê 22 da CIGRÉ desenvolveram uma metodologia para a realização dos testes, apresentando recomendações para preparação da bancada, terminações e condicionamento do condutor. Foram citados os métodos da Onda Estacionária, da Potência e do Decaimento. Este trabalho foi publicado pelo IEEE no Std. 563-1978, revisado em 2007, e pela CIGRÉ no Electra n° 62-1979.

Em paralelo, no ano de 1969, Claren e Diana apresentaram uma análise matemática do processo de vibração em linhas de transmissão, fazendo simulações computacionais do fenômeno para gerar um modelo semi-empírico do amortecimento e uso de amortecedores stockbridge. Outros modelos matemáticos e semi-empíricos foram desenvolvidos para avaliar características de auto-amortecimento de condutores, porém levando a diferentes resultados, como foi relatado no Relatório 482 da CIGRÉ (2011). Além disso, a utilização de novos condutores de diferentes materiais ou geometrias poderia inviabilizar o uso destas metodologias.

Em 1980, o IEEE publicou o Std. 664, com revisão em 2007, que traz recomendações para realização de ensaios laboratoriais para avaliação da dissipação de potência de amortecedores instalados em linhas de transmissão. Além disso, traz considerações sobre medidas de auto-amortecimento, necessárias para a determinação da eficiência dos amortecedores.

Mesmo seguindo as recomendações para padronização dos ensaios de auto-amortecimento, apresentadas a partir de 1978, testes realizados nos anos seguintes ao redor do mundo levaram a resultados discrepantes. Para tentar explicar e contornar o problema, em 2011 a CIGRÉ apresentou o Relatório 482, intitulado *State of the Art for Testing Self-Damping Characteristics of Conductors for Overhead Lines* (Estado da Arte para Ensaio de Características de Auto-amortecimento em Condutores de Linhas de Transmissão Aéreas), levantando uma lista de principais motivos para as diferenças. Este relatório foi produzido pelo Grupo de Trabalho B2.25 e traz uma revisão da metodologia dos ensaios realizados por vários pesquisadores. Também são apresentadas recomendações básicas para os ensaios em laboratório e as vantagens e desvantagens de cada método.

Apesar dos quase 60 anos de estudo sobre auto-amortecimento em cabos condutores, ainda existe uma deficiência na quantidade de dados levantados. Além disso, inovações em materiais e geometrias de cabos condutores surgem a todo momento, gerando a necessidade de mais ensaios para os novos produtos.

### **1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este trabalho é dividido em seis capítulos. O primeiro, no qual está inserido este item, traz a justificativa para a realização deste projeto, além dos objetivos almejados. É também apresentado um histórico dos estudos de vibração em condutores e do fenômeno causado por ele que mais gera dano em cabos: a fadiga.

O segundo capítulo traz uma revisão dos conceitos importantes para a compreensão do processo vibratório introduzido pelo vento nos cabos de alta tensão. Esta sessão também traz a formulação e recomendações para a realização dos ensaios de auto-amortecimento em cabos condutores, além dos métodos de avaliação mais utilizados.

No Capítulo 3 são apresentados os materiais utilizados para a realização dos ensaios de auto-amortecimento, incluindo a conexão flexível desenvolvida no âmbito deste projeto. Além disso, são descritos os procedimentos para a realização dos testes preliminares para validação das alterações feitas no projeto da bancada. Os resultados destes ensaios são apresentados no quarto capítulo deste texto.

As conclusões levantadas após a realização do projeto são apresentadas no Capítulo 5, em conjunto com as propostas de trabalhos futuros que tenham como base o conhecimento e equipamentos desenvolvidos.

O sexto capítulo traz a bibliografia utilizada como base para o desenvolvimento das atividades descritas neste trabalho. Ao final são apresentados anexos ao texto, trazendo desenhos técnicos para permitir a compreensão e reprodução de itens do projeto.

## 2 REVISÃO TEÓRICA

Este capítulo pretende oferecer ao leitor os conhecimentos necessários à compreensão dos ensaios para os quais a bancada foi projetada. Ele traz uma revisão dos conceitos de vibrações e como ocorre o processo de excitação eólica em cabos condutores de energia elétrica. Além disso, traz a base teórica utilizada na formulação dos ensaios de auto-amortecimento em condutores.

### 2.1 VIBRAÇÕES – CONCEITOS GERAIS

As vibrações mecânicas estão presentes em quase todos os momentos da vida dos seres humanos. Entre muitos outros exemplos, o som que escutamos ou produzimos é resultado de vibrações que se propagam no ar. Povos primitivos utilizavam vibrações em instrumentos como apitos e tambores para comunicação, porém sem entender o fenômeno que produzia os sons. Somente com o desenvolvimento da matemática e física, o processo pôde ser melhor compreendido.

O movimento vibratório pode ser definido como a oscilação de uma partícula, com uma massa associada, em torno de uma posição de equilíbrio. Em casos reais, muitas vezes esta partícula é parte de um corpo elástico se movimentando em relação a outro ponto do próprio corpo. Porém, para simplificar o estudo, considera-se um corpo rígido se movimentando em relação a outro, tomado como referência.

As vibrações podem ser classificadas como livres ou forçadas. Na vibração livre é aplicada uma força ou deformação inicial e após isso o sistema é liberado, não havendo forças externas atuando durante o período de observação do movimento. Na vibração forçada, existe uma força externa que mantém o sistema vibrando durante o ensaio.

Um conceito importante para o estudo de vibrações é o de grau de liberdade (gdl), ou seja, a quantidade de coordenadas independentes, necessárias para a descrição completa do movimento. Para simplificar a formulação do problema de vibração, consideraremos o modelo por uma massa, uma mola e um amortecedor, conforme apresentado na Figura 2.1. Neste caso, considera-se que a massa só pode se movimentar na direção vertical, caracterizando um sistema com um grau de liberdade. Na imagem, as letras  $m$ ,  $k$ ,  $c$ ,  $x$  e  $F$  representam, respectivamente, a massa do corpo, a constante da mola, a coeficiente de

amortecimento, o deslocamento e a força aplicada. Muitos sistemas reais podem ser modelados simplificadaamente como demonstrado na figura, considerando o equivalente de cada um destes fatores.

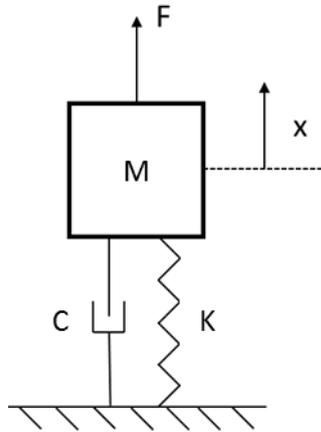


Figura 2.1 – Sistema massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade

Para um movimento forçado, a equação que governa este movimento vibratório para o caso da Figura 2.1 é:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \quad (2.1)$$

Em que:	$F(t)$	é a força de excitação	[N]
	$M$	é a massa do corpo	[kg]
	$C$	é o coeficiente de amortecimento	[N.s/m]
	$K$	é a constante da mola	[kg/s <sup>2</sup> ]
	$x$	é o deslocamento do corpo (deformação da mola)	[m]
	$\dot{x}$	é a velocidade	[m/s]
	$\ddot{x}$	é a aceleração	[m/s <sup>2</sup> ]

Considerando um sistema em vibração livre, a equação 2.1 se torna:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = 0 \quad (2.2)$$

Esta é uma Equação Diferencial Ordinária de segunda ordem, com coeficientes constantes que tem solução da forma:  $x(t) = Ae^{st}$ . A equação característica do problema pode então ser escrita como:

$$Ms^2 + Cs + K = 0 \quad (2.3)$$

As raízes da equação característica são:

$$s = \frac{1}{2M} \left( -C \pm \sqrt{C^2 - 4MK} \right) \quad (2.4)$$

Nota-se que, quando  $C = \sqrt{4MK}$ , a equação característica tem uma raiz real. Este é o limite entre um chamado sistema superamortecido, que não irá vibrar, e um sistema subamortecido, cujo deslocamento irá decair a cada ciclo de vibração. A este valor de  $C$  é dado o nome de “ $C$  crítico” ( $C_c$ ).

Se observarmos somente o valor de  $C$ , não somos capazes de definir se o movimento será sub ou superamortecido, pois esta informação depende da massa e da constante da mola. Por isso é conveniente definir um fator adimensional, conhecido como Fator de Amortecimento ( $\xi$ ) e dado por:

$$\xi = \frac{C}{C_c} \quad (2.5)$$

Quando o valor de  $\xi$  for maior que 1, o sistema será superamortecido, quando for menor que 1, será subamortecido e quando for igual, dizemos que tem um amortecimento crítico. A Figura 2.2 mostra graficamente os três tipos de sistema, além de uma curva não amortecida, cuja amplitude de deslocamento não diminui com os ciclos.

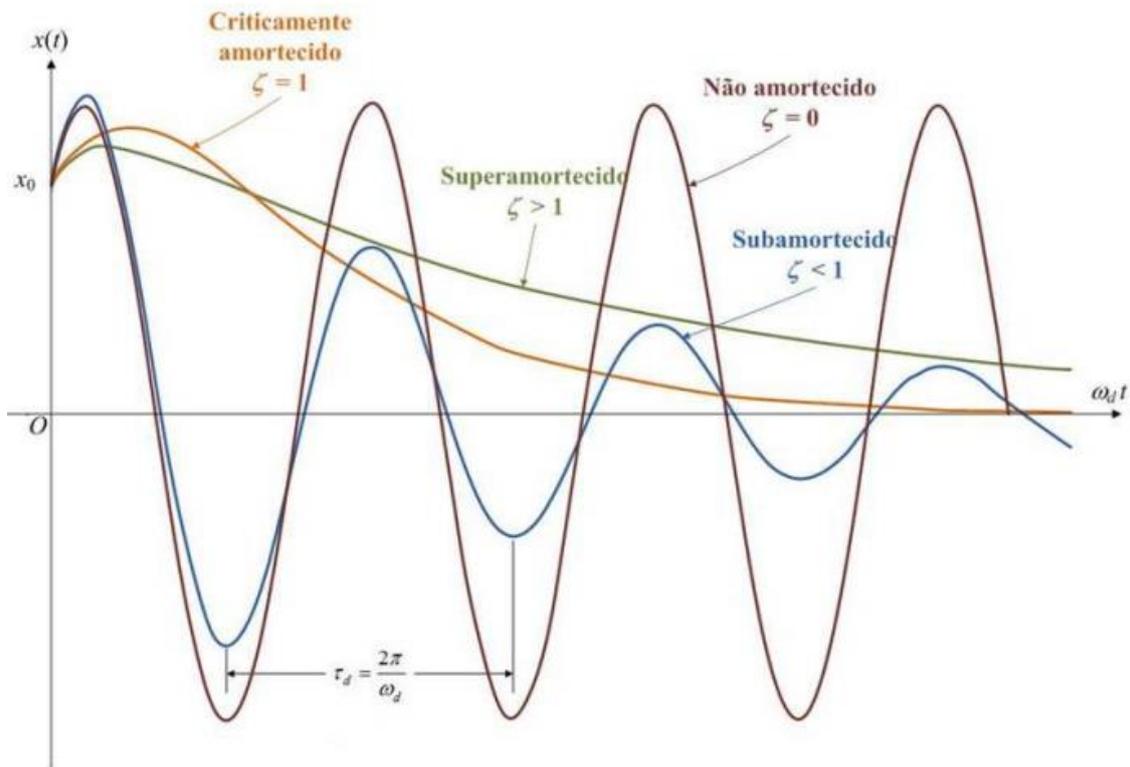


Figura 2.2 – Influência do fator de amortecimento na vibração (COSSOLINO & PEREIRA, 2010)

Um sistema subamortecido vibra com uma frequência natural amortecida ( $\omega_a$ ), dada pela equação:

$$\omega_a = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (2.6)$$

Em que  $\omega_n$  é a frequência natural não amortecida, dada por:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (2.7)$$

Como pode ser visualizado na Figura 2.2, a amplitude de vibração em um sistema subamortecido decresce entre dois picos. A razão com que a amplitude diminui pode ser calculada por:

$$\frac{x_i}{x_{i+1}} = e^{\xi \omega_n T_a} \quad (2.8)$$

Em que  $T_a$  é o período da vibração amortecida, expresso por:

$$T_a = \frac{2\pi}{\omega_a} \quad (2.9)$$

Define-se decremento logarítmico ( $\delta$ ) como a taxa de redução logarítmica em um movimento de vibração livre subamortecido, dado pela equação:

$$\delta = \ln \frac{x_i}{x_{i+1}} = \xi \omega_n T_a = 2\pi \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \quad (2.10)$$

Este conceito, que relaciona a diminuição na amplitude de vibração entre dois ciclos com o fator de amortecimento do sistema é utilizado para obter a potência dissipada pelo condutor no Método do Decaimento, que será descrito no decorrer deste texto.

## 2.2 VIBRAÇÕES EM CABOS CONDUTORES

Um condutor aéreo, após ser instalado, sofre um processo de vibração induzido pelo vento, que provoca desgastes e posterior falha por fadiga. Este processo pode ser dividido em três tipos:

- **Vibração de Galope:** Caracterizada por vibrações com baixa frequência e grandes amplitudes de deslocamento, podendo chegar a 300 vezes o diâmetro do cabo de pico a pico. Este tipo de vibração ocorre devido ao acúmulo assimétrico de gelo na superfície dos condutores, que gera alterações no arrasto do cabo. Devido ao clima brasileiro, este tipo de vibração raramente ocorre no país.
- **Vibração de Esteira:** Também conhecida como vibração de sub-vão, ocorre em feixes de condutores, quando a presença de um cabo a favor do vento, induz a vibração de outro atrás deste. É caracterizada por frequências baixas e amplitudes moderadas a altas, podendo atingir até 80 diâmetros do condutor. Assim como a de galope, este tipo vibração não ocorre com frequência no Brasil, porém, neste caso, devido ao regime de ventos do país.
- **Vibração Eólica:** É a mais comum no país e a que gera maior quantidade de estudos. É caracterizada por frequências altas e baixas amplitudes de vibração, que raramente excedem um diâmetro do condutor. Diferente da vibração de galope ou esteira, que se caracterizam por amplitudes elevadas, o processo de

fadiga decorrente de vibração eólica ocorre após uma grande quantidade de ciclos, no decorrer de anos de utilização em campo.

Na Tabela 2.1 é apresentada uma comparação entre as características de cada um destes processos de vibração induzida pelo vento.

Tabela 2.1 – Comparação entre os tipos mais comuns de processos de vibração induzidos pelo vento em cabos condutores (HENRIQUES, 2006)

PARÂMETRO	Tipo de Vibração		
	Eólica	Galope	Esteira
<b>Tipo de Linhas de Transmissão (LT) afetadas</b>	Todas	Todas	Linhas paralelas no plano horizontal (cabos geminados)
<b>Faixa de frequência (Hz)</b>	3 a 150	0,08 a 3	0,15 a 10
<b>Amplitude pico a pico (<i>nº de diâmetros</i>)</b>	0,01 a 1	5 a 300	0,5 a 80
<b>Tipo de vento que favorece a ocorrência</b>	Laminar	Laminar	Laminar
<b>Velocidade do vento (m/s)</b>	1 a 7	7 a 18	4 a 18
<b>Superfície do condutor</b>	Sem cobertura ou com depósito simétrico de gelo	Com gelo depositado assimetricamente	Limpa e seca
<b>Condições de projeto que influenciam</b>	Tensão de esticamento (EDS), auto-amortecimento dos cabos, uso de amortecedores, armaduras	Razão de frequência natural vertical para a de torção, catenária e condições de suporte	Separação dos condutores, torção do feixe, arranjo dos subcondutores, distância entre espaçadores
<b>Tempo estimado para ocorrência de danos severos na linha</b>	2 meses a mais de 20 anos	1 a 48 horas	1 mês a mais de 8 anos
<b>Causas diretas do dano</b>	Falha devido à fadiga	Altas cargas dinâmicas	Impacto de condutores, desgaste acelerado das ferragens

Como já mencionado, no Brasil a vibração eólica é a mais recorrente e perigosa para Linhas de Transmissão. Isso pode ser verificado pela comparação do gráfico apresentado na Figura 2.3 e a Tabela 2.1 – Comparação entre os tipos mais comuns de processos de vibração induzidos pelo vento em cabos condutores (HENRIQUES, 2006).

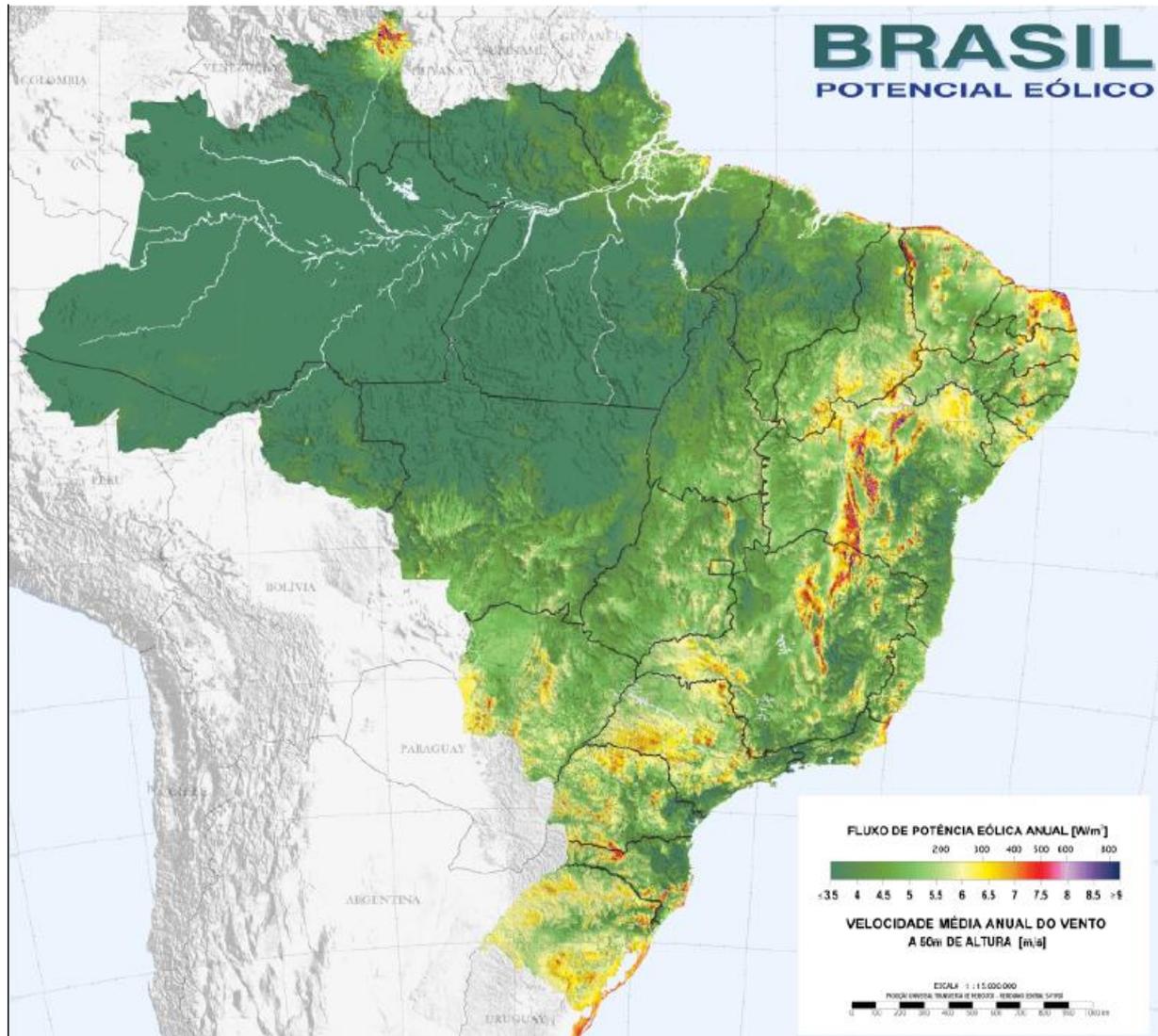


Figura 2.3 – Regime de ventos brasileiro - Média anual (CEPEL, 2015)

### 2.2.1 Excitação eólica

A vibração eólica em cabos condutores, como já mencionado, é provocada pela excitação causada pelo movimento relativo entre o vento e do cabo. O processo de

indução das vibrações eólicas ocorre devido à formação das chamadas esteiras de vórtices de Von Karman. O escoamento do vento sobre o cabo provoca a formação vórtices na parte posterior, como mostrado na Figura 2.4, com direções alternadas, gerando a vibração vertical do cabo. A formação destas esteiras está condicionada ao tipo de escoamento, definido por um valor adimensional denominado número de Reynolds. Este número faz a relação entre efeitos inerciais e viscosos do escoamento e é calculado a partir da equação:

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (2.11)$$

Em que:  $U$  é a velocidade do fluxo livre [m/s]  
 $D$  é o diâmetro do condutor [m]  
 $\nu$  é o coeficiente de viscosidade cinemática [m<sup>2</sup>/s]

Em condições normais, o valor do coeficiente de viscosidade ( $\nu$ ) do ar pode ser aproximado para  $1,5 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s.

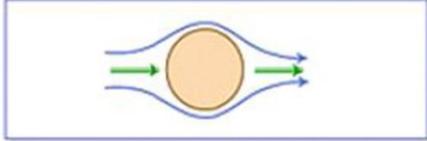
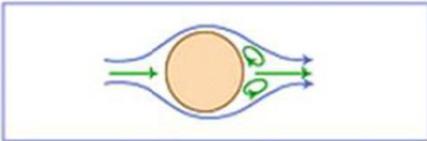
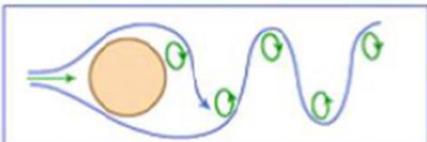
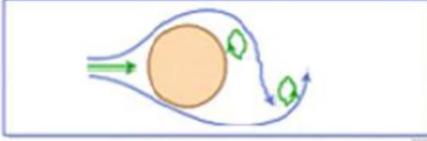
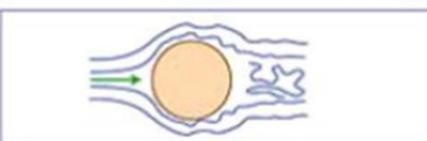
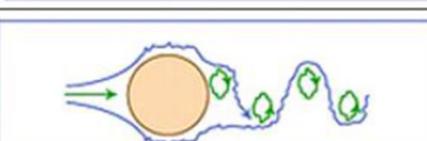
	Regime de fluxo sem separação/deslocamento $Re < 5$
	Formação de par fixo na esteira de vórtices $5 \leq Re < 40$
	Formação de regime duplo com esteira de vórtices laminar $40 \leq Re < 150$
	Regime de transição para vórtices turbulentos $150 \leq Re < 3 \times 10^5$
	Entrada no regime turbulento com esteira de vórtices se tornando desorganizada $3 \times 10^5 \leq Re < 3,5 \times 10^6$
	Reestabelecimento de esteira vórtices em regime turbulento $Re \geq 3,5 \times 10^6$

Figura 2.4 – Regime de fluxo em torno de um cilindro liso circular (FADEL, 2010 - Modificado)

A partir do número de Reynolds é possível determinar se o escoamento é laminar ou turbulento. A influência deste parâmetro na formação das esteiras de vórtices é apresentada nos desenhos esquemáticos da Figura 2.4 e em fotos apresentadas na Figura 2.5. Nesta última, podem ser verificados o regime de fluxo sem separação/deslocamento (foto a), a formação do par fixo na esteira de vórtices (fotos b; c), a formação de regime duplo de esteira de vórtices laminar (foto d) e o regime de transição para vórtices turbulentos (fotos e; f).

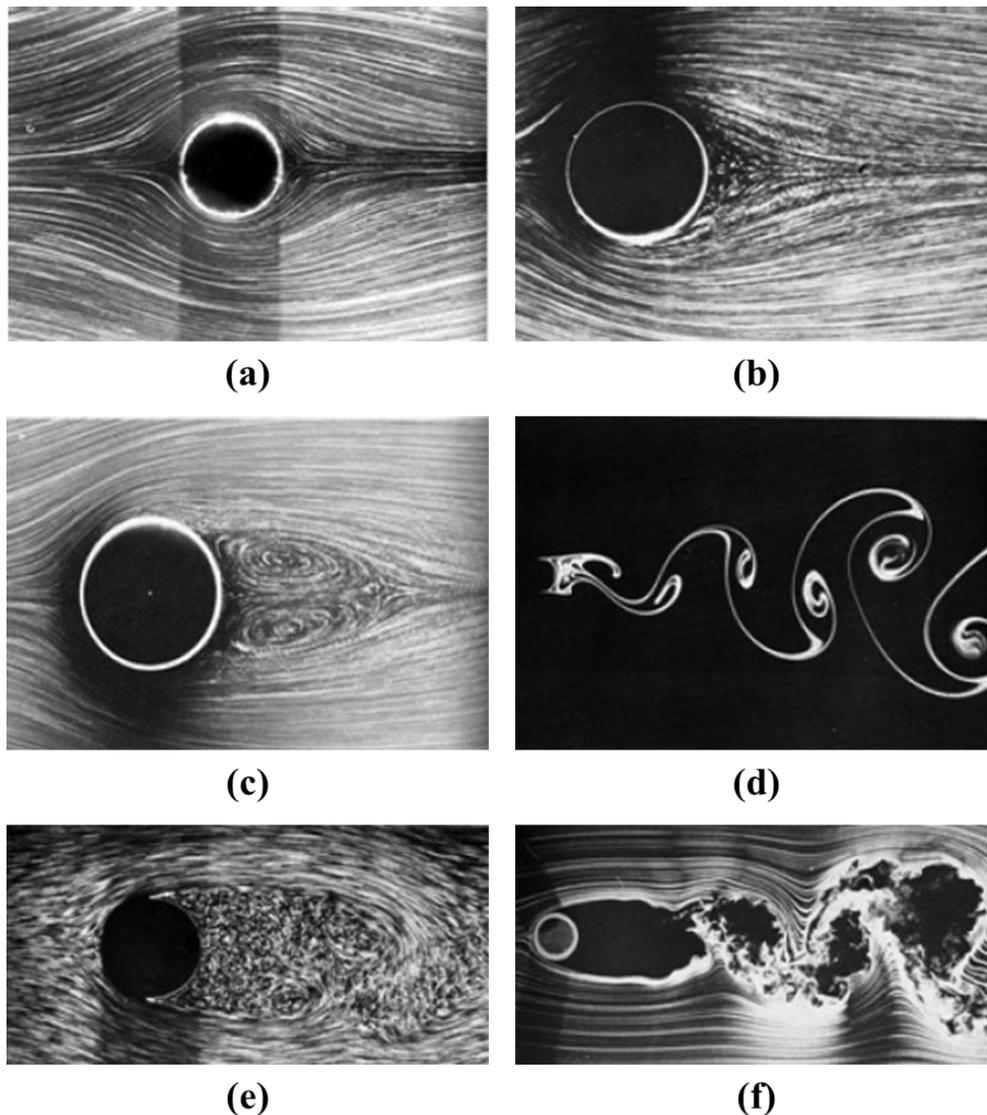


Figura 2.5 – Escoamento de fluidos em função do Número de Reynolds: (a)  $Re = 1,1$ ; (b)  $Re = 9,6$ ; (c)  $Re = 26$ ; (d)  $Re = 140$ ; (e)  $Re = 2 \times 10^4$ ; (f)  $Re = 1 \times 10^5$  (EPRI, 2006)

A frequência de vibração, ou frequência de formação dos vórtices, depende basicamente da velocidade do vento ( $U$ ), do diâmetro do condutor ( $d$ ) e de outro fator adimensional, denominado número de Strouhal ( $K_s$ ); e é dada pela equação:

$$f = \frac{K_s U}{d} \quad (2.12)$$

Quando a CIGRE apresentou os resultados do EDS Panel, com estudos e recomendações para projetos de linhas de transmissão contra fadiga (Zetterholm, 1960), não foram considerados efeitos da região de instalação dos cabos para a definição dos parâmetros. Porém novos estudos, apresentados ainda pela CIGRE na brochura 273

(CIGRE, 2005), mostraram que o escoamento, que depende do terreno, tem grande influência na quantidade de energia que o vento transmite ao cabo condutor. Um escoamento mais turbulento tende a gerar vórtices mais irregulares, fazendo com que a amplitude de vibração do condutor seja menor. A brochura 273 traz valores de intensidade de turbulência para alguns tipos de terreno, apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Intensidade de turbulência do vento em função do terreno (Ref.: Brochura 273)

<b>Tipo de Terreno</b>	<b>Intensidade da Turbulência</b>
Mar aberto ou grandes áreas de água	0,11
Áreas rurais; campos abertos com poucos e baixos obstáculos	0,18
Áreas urbanas com baixa densidade de prédios; pequenas cidades; subúrbios; florestas com árvores baixas	0,25
Cidades com alta densidade de prédios; florestas com árvores altas	0,35

## 2.3 AUTO-AMORTECIMENTO

O auto-amortecimento é uma grandeza física inerente ao condutor, medida pela quantidade de energia que este dissipa durante o processo de vibração. O Relatório 482 da CIGRÉ (2011) traz a seguinte definição, em tradução livre: “o auto-amortecimento de um condutor sujeito a uma carga  $T$  é definido pela potência  $P$  dissipada por unidade de comprimento deste condutor vibrando em um modo natural, com um comprimento de onda  $\lambda/2$ , uma amplitude de anti-nó  $Y_0$  e uma frequência  $f$ ”.

Todos os condutores dissipam parte da energia mecânica fornecida pelo vento. Esta dissipação ocorre, principalmente, devido a:

- Perdas nas extremidades, no contato do condutor com os grampos de suspensão e ancoragem;
- Arrasto provocado pelo movimento do condutor no ar;
- Atrito interno, a nível molecular; e
- Atrito entre os fios que constituem o condutor.

Os dois últimos são os mais severos e relevantes para este estudo. A maior parte da dissipação de energia de um cabo ocorre pelo deslocamento relativo entre a camada mais externa e a que se encontra logo abaixo desta (EPRI, 2006). Um condutor composto por um único fio teria um auto-amortecimento muito pequeno, proveniente apenas da fricção no nível molecular. Para um condutor com várias camadas, a dissipação é consideravelmente maior, uma vez que a dissipação causada pela fricção dos fios é adicionada à molecular. Assim, condutores com diâmetro e número de camadas maiores, nas mesmas condições de instalação, tendem a ter um auto-amortecimento maior.

O auto-amortecimento é não linear para a amplitude de tensão (ou deslocamento) dos cabos. Quando são plotados gráficos de potência dissipada contra amplitude ou tensão, para uma dada frequência, em escala logarítmica, geralmente os dados observados são dispostos em curvas que se aproximam de retas (EPRI, 2006), conforme observado na Figura 2.6. Cada reta nesta figura representa uma frequência ensaiada e os pontos são obtidos para cada valor de amplitude de vibração de anti-nó dividido pelo diâmetro do condutor (amplitude normalizada). Nesta figura, o termo  $P_c$ , representa a potência dissipada por unidade de comprimento do condutor.

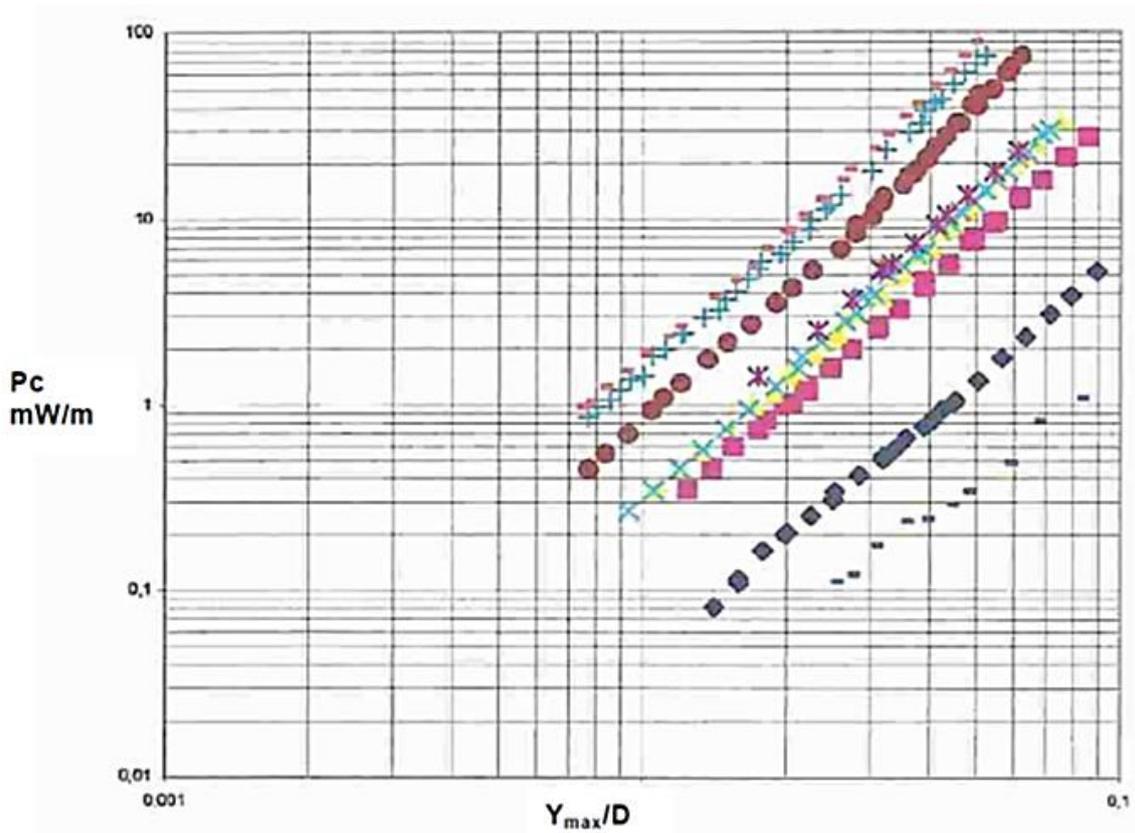


Figura 2.6 – Resultados de auto-amortecimento para o cabo Drake, em escala logarítmica (CIGRÉ, 2011)

Kiessling et al. (2003 apud EPRI, 2006) demonstram que, quando aumenta-se a tensão de esticamento, a quantidade de energia dissipada diminui, especialmente em altas frequências, conforme apresentado na Figura 2.7. Uma explicação para este fenômeno é que, devido à diminuição do deslocamento relativo entre os fios, que ficam mais pressionados entre si e têm menos liberdade de se movimentar, a dissipação por atrito entre as camadas diminui. Para diferentes tipos de condutores (CAA, CA, CAL ou outros tipos) terão diferentes níveis de auto-amortecimento para uma mesma EDS (EPRI, 2006).

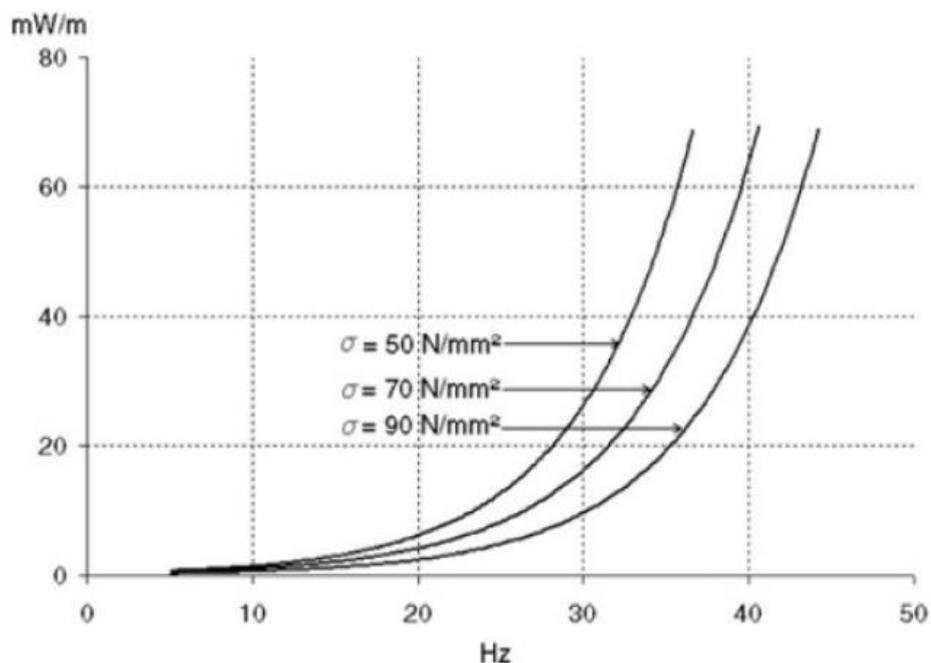


Figura 2.7 – Auto-amortecimento do cabo CAA 564/72 em função da frequência para várias tensões médias, determinadas pela carga de esticamento do cabo (Kiessling et al., 2003 apud EPRI, 2006)

O conhecimento aprofundado no fenômeno de auto-amortecimento é importante por permitir a criação de projetos com cabos que dissipam mais potência. Ao dissipar energia internamente, a amplitude de vibração provocada pelo vento diminui, fazendo com que o cabo seja submetido a tensões menos elevadas e aumentando assim sua vida. Além disso, o estudo possibilita a verificação da necessidade, ou não, de serem utilizados amortecedores nas faixas de frequências de vibração induzidas pelo vento. Com a utilização de cada vez mais tipos de condutores, fabricados com alumínio puro ou ligas de alumínio em substituição a cabos com almas de aço, é importante a avaliação desta grandeza, que ainda não tem dados para grande parte dos cabos utilizados mais recentemente.

### 2.3.1 Métodos de medida de auto-amortecimento

A *IEEE Task Force on Conductor Vibration*, em conjunto com a CIGRÉ, criou um guia para a realização de ensaios de auto-amortecimento em laboratório, visando garantir a uniformidade dos testes a repetibilidade dos resultados. Esta metodologia está descrita pela IEEE no Std. 563-1978, revisado em 2007, e pela CIGRE em Electra n°62-1979.

Os ensaios de auto-amortecimento podem ser divididos em dois grupos principais: métodos de vibração livre e de vibração forçada. Estes consistem na falta ou presença de uma força de excitação durante o processo de aquisição de dados relativos à dissipação de energia. Os métodos mais utilizados são:

### 2.3.1.1 Método da Potência

Este método de vibração forçada utiliza o conceito de balanço de energia para calcular o amortecimento nos cabos condutores. Quando o movimento de vibração se estabiliza, pode-se dizer que ele atingiu um estado denominado “Regime Permanente”. Neste estado, as amplitudes de aceleração, velocidade e deslocamento, assim como a frequência, permanecem constantes. Para que isso ocorra, toda a energia introduzida ( $E_{int}$ ) no sistema deve ser dissipada por ele. A energia dissipada ( $E_{diss}$ ) pode ser calculada em função da potência dissipada ( $P$ ), a frequência de vibração ( $f$ ) e o comprimento ( $L$ ) do vão, de acordo com a equação (EPRI, 2006):

$$E_{int} = E_{diss} = P \frac{L}{f} \quad (2.13)$$

Segundo Hard e Holben (1967) uma forma óbvia de se obter a energia dissipada pelo cabo seria pela medida energia consumida pelo gerador de vibrações (*shaker*), retirando as perdas internas do equipamento. Esta forma foi utilizada por alguns pesquisadores nos primeiros trabalhos que apresentaram medidas quantitativas do auto-amortecimento em cabos condutores, como a apresentada por Tompkins et al. (1956). Porém esta medida requer um conhecimento profundo da eficiência do *shaker*, o que pode gerar erros. Uma solução para este problema seria a aquisição direta da potência ( $P$ ) transmitida ao cabo, que pode ser calculada pela metade do produto entre a força ( $F$ ), velocidade ( $V$ ) e o cosseno do ângulo de fase ( $\varphi$ ) entre estes dois fatores (CIGRÉ, 2011):

$$P = \frac{1}{2} F \cdot V \cdot \cos(\varphi) \quad (2.14)$$

Este método é mais simples e requer uma instrumentação menor quando comparado com o Método da Onda Estacionária, abordado no item 2.3.1.2 deste texto, porém não

são consideradas as perdas nas extremidades (ou são consideradas desprezíveis em relação à dissipação de energia no cabo). Assim, sua utilização é preferível em condutores maiores e com mais camadas, que terão um auto-amortecimento grande em relação às perdas nos grampos.

Para minimizar a influência da perda nas extremidades, é recomendada a utilização de vãos ativos acima de 50 m, porém em vãos maiores que 30 m já são observados resultados satisfatórios (IEEE, 2007). Outra possibilidade apresentada é a utilização de um grampo com haste flexível em uma das extremidades (Figura 2.8), diminuindo a dissipação de potência. A utilização deste grampo diminui as perdas na extremidade, porém insere um novo equipamento no vão ensaiado, podendo ser mais uma fonte de erro nos resultados.

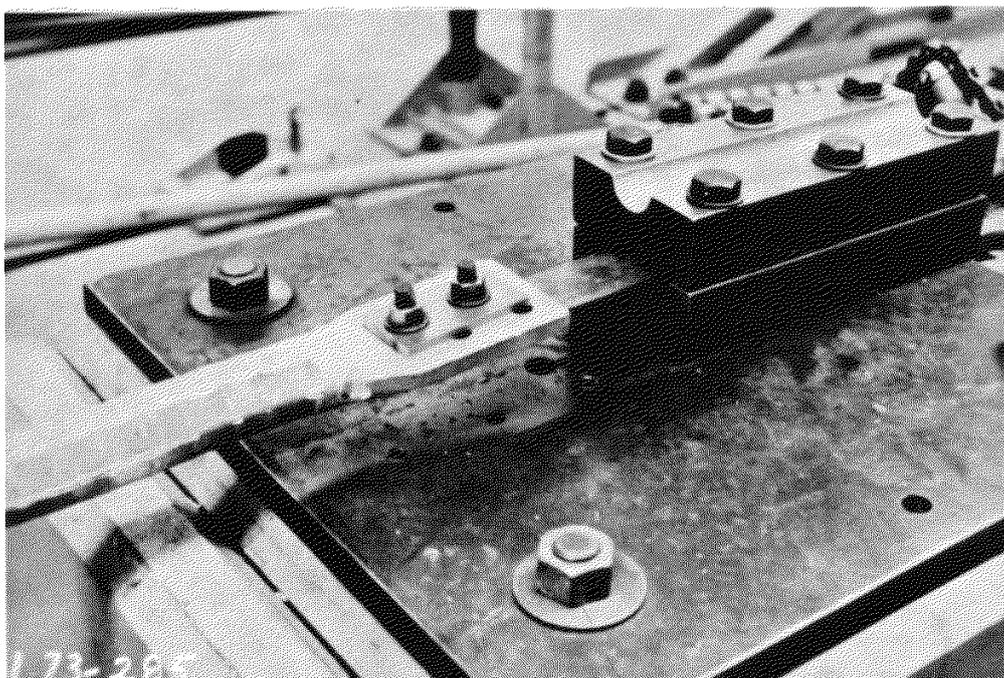


Figura 2.8 – Terminação Flexível (IEEE, 2007)

### 2.3.1.2 Método da Onda Estacionária (ou Método da Onda Estacionária Inversa)

O Método da Onda Estacionária Inversa foi apresentado inicialmente por Tompkins et al. (1956) e ganhou desenvolvimentos com Rawlins (1958). Também de vibração forçada, esta metodologia utiliza a reflexão da onda inserida pelo *shaker* para calcular a

dissipação de potência em uma porção definida do cabo, 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, 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 equação:

$$P_{n-1,n} = P_n - P_{n-1} \quad (2.15)$$

Em que:  $P_{n-1,n}$  é a potência dissipada entre os nós  $n-1$  e  $n$  [W]  
 $P_n$  é a potência transmitida pelo *shaker* ao nó  $n$  [W]  
 $P_{n-1}$  é a potência transmitida pelo *shaker* ao nó  $n-1$  [W]

A potência transferida pelo *shaker* ao nó  $n$  pode ser calculada por:

$$P_n = \sqrt{Tm} \frac{V^2}{2} \left( \frac{a_n}{Y} \right) \quad (2.16)$$

Em que:  $T$  é a carga de esticamento do cabo [N]  
 $m$  é a massa por unidade de comprimento do condutor [kg/m]  
 $V$  é a amplitude de velocidade no anti-nó (zero-pk) [m/s]  
 $a_n$  é a amplitude de deslocamento no enésimo nó (pk-pk) [mm]  
 $Y$  é a amplitude de deslocamento no anti-nó (pk-pk) [mm]

A potência dissipada por unidade de comprimento será:

$$P = \frac{P_n - P_{n-1}}{(\lambda/2)} \quad (2.17)$$

Em que  $\lambda/2$  representa a distância entre dois nós consecutivos (metade do valor do comprimento de onda).

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, estes ensaios têm uma complexidade maior, os sensores devem ser reposicionados a cada variação na frequência ou carga de tração utilizada.

Falhas na localização dos nós e anti-nós para instalação dos acelerômetros podem gerar grandes erros nos dados de auto-amortecimento obtidos.

### 2.3.1.3 Método do Decaimento

Neste método de vibração livre, a energia dissipada é derivada da taxa de decaimento da vibração após a retirada da força de excitação. Ele consiste em vibrar o cabo através de um *shaker*, em uma frequência de ressonância, até que o movimento esteja estável, com amplitude de deslocamento (assim como de velocidade e aceleração) constante. Após isso, a força de excitação é retirada e observa-se o decaimento da amplitude de deslocamento.

O Método do Decaimento utiliza o conceito de decremento logarítmico para estimar a potência dissipada pelo condutor. No caso do cabo vibrando, o decremento ( $\delta$ ) pode ser calculado pela seguinte equação:

$$\delta = \frac{1}{n_c} \ln \frac{Y_0}{Y_c} \quad (2.18)$$

Em que:  $n_c$  é o número de ciclos no intervalo considerado

$Y_0$  é a amplitude de vibração no anti-nó no primeiro ciclo [mm]

$Y_c$  é a amplitude de vibração no anti-nó no ciclo  $c$  [mm]

A potência dissipada pelo condutor é dada por:

$$P = \frac{1}{2} f \cdot m \cdot V_0^2 \cdot L \cdot \delta \quad (2.19)$$

Em que  $V_0$  é a velocidade no anti-nó para o primeiro ciclo.

O gráfico gerado para este ensaio terá a forma apresentada na Figura 2.9. Uma curva para o decremento logarítmico pode ser ajustada utilizando a equação 2.15 e a potência dissipada calculada de acordo com a equação 2.16.

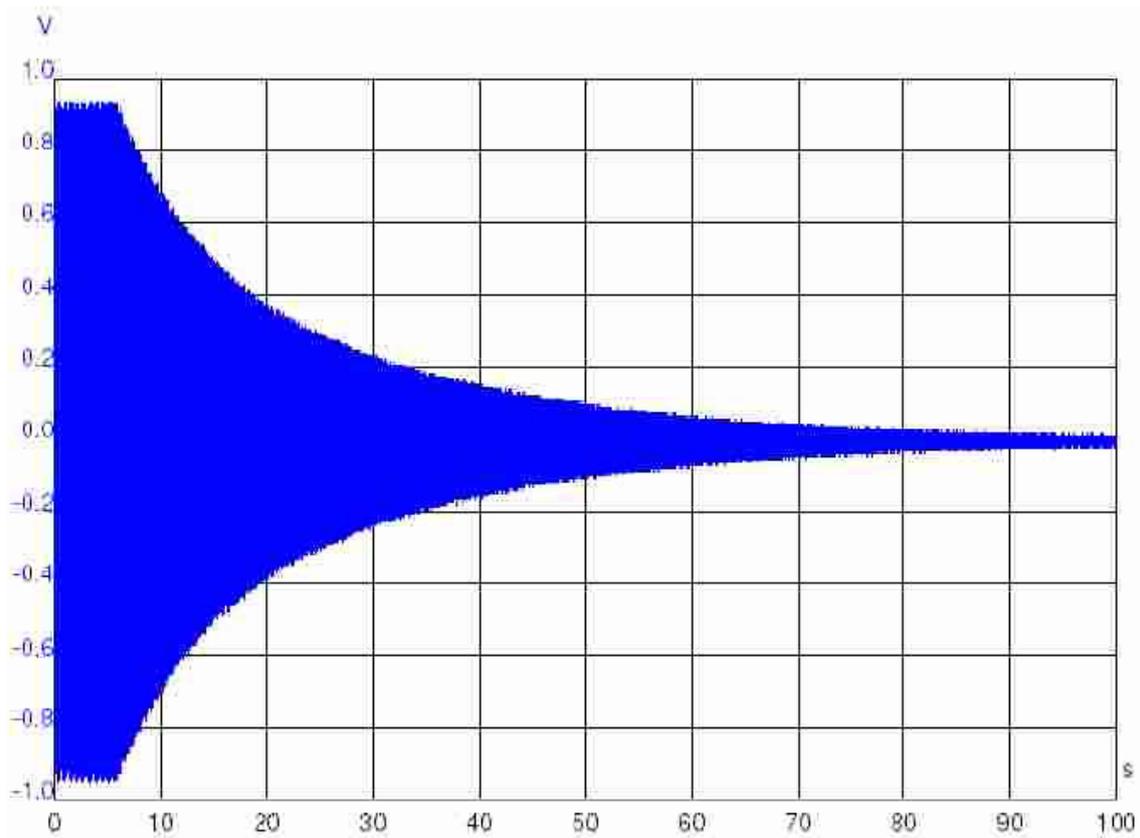


Figura 2.9 – Curva de decaimento para o condutor 264-AL3/34-ST1A tensionado a 20% RTS - voltagem do acelerômetro em função do tempo (CIGRE, 2011)

Uma grande vantagem do Método do Decaimento é que são gerados dados de auto-amortecimento em várias amplitudes de deslocamento para cada teste. Além disso, a instrumentação dos ensaios é bem reduzida, sendo necessário apenas um acelerômetro instalado em um anti-nó.

Porém o método requer a desconexão entre o cabo e o shaker, o que pode causar a inserção diferentes modos de vibração no sistema. Para evitar isso, a desconexão deve ser feita de forma rápida e sem a aplicação de esforços adicionais (IEEE Std. 563, 2007). Uma forma de produzir um desacoplamento rápido é com a utilização de uma conexão com molas, liberada mecanicamente por um fusível. A Figura 2.10 mostra um exemplo deste tipo de acoplamento. A foto é apresentada com dupla exposição, mostrando a peça antes e após a desconexão.

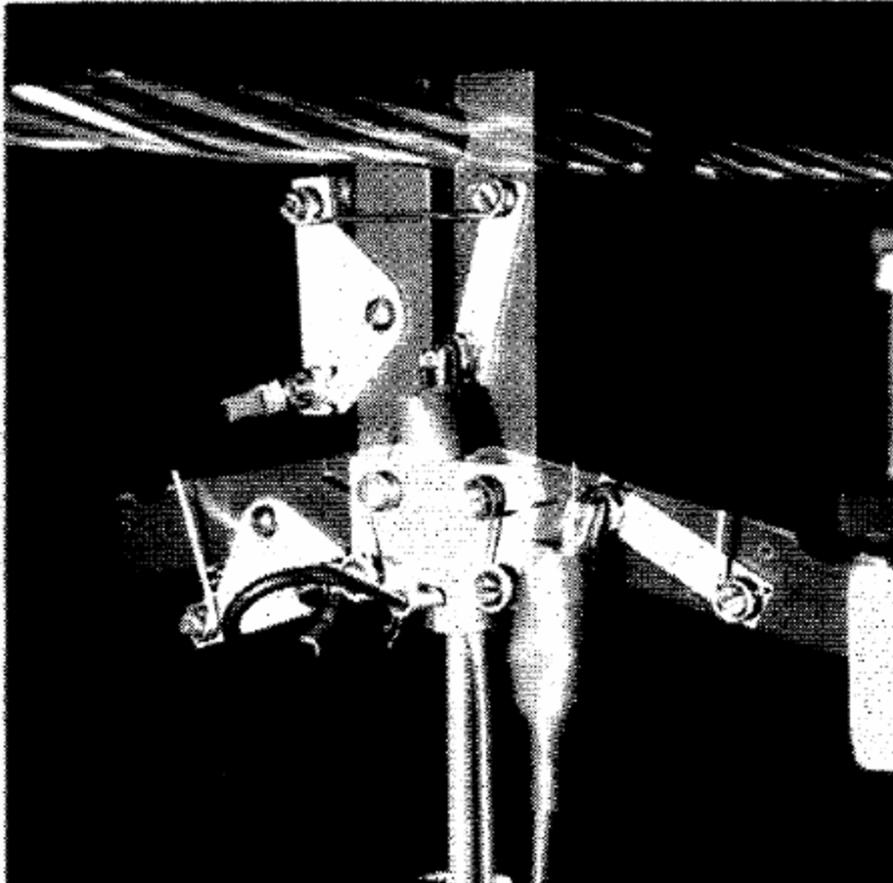


Figura 2.10 – Conexão com sistema de fusível para desconexão entre o shaker o condutor (CIGRE, 2011)

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os equipamentos já existentes no LABCABOS/UnB, assim como a nova bancada construída e preparada para a realização dos ensaios no decorrer deste projeto. Também mostra os materiais necessários e equipamentos desenvolvidos para a realização dos ensaios de auto-amortecimento em cabos condutores de energia elétrica.

### 3.1 BANCADA DE ENSAIOS DE CABOS CONDUTORES

Para a realização de ensaios de fadiga e auto-amortecimento em cabos, é utilizada uma bancada que simula a instalação do condutor em campo, com dimensões do vão próximos a valores reais. Abaixo são descritas as bancadas de ensaio existentes no laboratório e aquela desenvolvida no projeto em que este trabalho está inserido.

#### 3.1.1 Bancadas já existentes antes do projeto

Até meados do ano de 2013, data de início deste projeto, o LABCABOS/UnB contava com duas bancadas de ensaios capazes de realizar testes de fadiga em cabos condutores. Cada uma tem quatro blocos de concreto, sendo dois blocos de ancoragem nas pontas (posterior e anterior), um fixo para suporte do *shaker* eletromecânico e um móvel, no qual é instalado o grampo de suspensão para o cabo. O bloco móvel é montado sobre um carrinho de metal que se desloca sobre dois trilhos de 12 m de comprimento fabricados em aço. A distância entre o início do trilho e o bloco de ancoragem posterior é de 4,5 m, bem superior ao mínimo de um metro estabelecido pela CIGRE, (1985). A Figura 3.1 apresenta um desenho esquemático da bancada de ensaios com seus componentes principais.

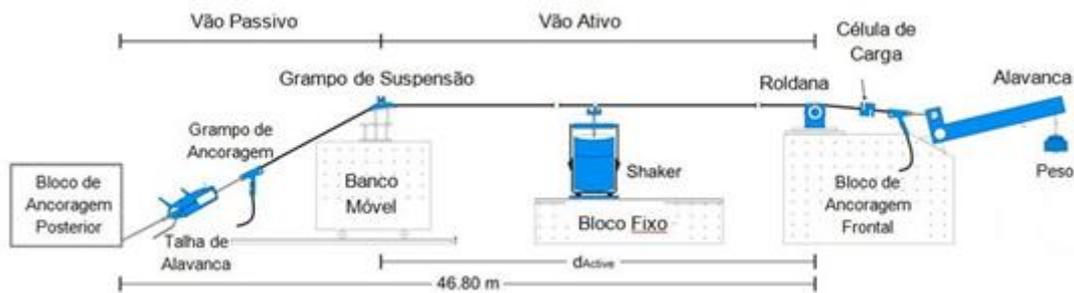


Figura 3.1 - Desenho esquemático das bancadas de ensaios de fadiga em cabos condutores presentes no LABCABOS/UnB

A região de teste pode ser dividida em duas partes: vãos ativo e passivo. O vão ativo, localizado entre o bloco móvel (grampo de suspensão) e o bloco de ancoragem anterior ou frontal (roldana) e no qual será imposta a vibração do cabo. Neste vão ocorrem os eventos de maior interesse para o ensaio e nele são realizadas as medidas e o controle. O bloco fixo, localizado no vão ativo, apresenta dois trilhos de aço com 3,10 m de comprimento, permitindo uma variação na posição do *shaker* em relação ao cabo. O vão passivo é onde são feitas a ancoragem e aplicação da carga de tensão no cabo, nele estão localizados equipamentos para o tracionamento (talha de alavanca e braço com contrapeso) e a célula de carga pela qual será feito o controle da carga aplicada.

A amostra utilizada nos ensaios de fadiga é instalada utilizando dois grampos de ancoragem idênticos aos utilizados nas linhas de transmissão, que farão a fixação nas extremidades e permitirão a aplicação da carga de tração. O dimensionamento do grampo de ancoragem se dá em função do diâmetro do condutor utilizado. Nas extremidades do vão ativo, o cabo é apoiado em um lado por uma roldana, situado no bloco de ancoragem anterior, e do outro por um grampo de suspensão, localizado no bloco móvel, também de mesmo modelo dos utilizados em campo. O grampo de suspensão é instalado sobre um “castelo” fabricado em aço e que permite regulagem de altura e ângulo de saída do cabo. Para ensaios de fadiga, a CIGRE (1985) recomenda que a distância mínima de cinco metros entre o grampo de suspensão e o ponto de excitação. Nas bancadas existentes no laboratório, essa distância pode variar entre 22 m e 37 m, dependendo do posicionamento do bloco móvel e do *shaker*.

### 3.1.2 Nova bancada construída

O projeto da nova bancada, desenvolvida para a construção no LABCABOS/UnB, foi concebido por uma equipe de pesquisadores da Universidade de Brasília. Por condição de projeto essa nova bancada deveria atender os critérios do Electra nº 100 (1985), para ensaios de fadiga e do Std. 563 (2007), para ensaios de auto-amortecimento. Para isso, além dos componentes apresentados no item 3.1.1 deste trabalho, foi confeccionado outro bloco fixo no centro do vão (entre os dois blocos de ancoragem). Este bloco serviu de suporte para o *shaker* na realização dos ensaios de auto-amortecimento dos cabos.

Nos ensaios de auto-amortecimento, os grampos rígidos (extremidades do vão de ensaio) são instalados diretamente nos dois blocos de ancoragem. O castelo no qual é instalado o grampo de suspensão para os ensaios de fadiga é retirado para que o cabo possa passar acima do bloco móvel sem tocá-lo. Na Figura 3.3 é apresentado um desenho esquemático da nova bancada de ensaios construída, com os equipamentos montados para o ensaio de auto-amortecimento, porém mostrando também os blocos utilizados nos ensaios de fadiga. Uma vista geral, em escala, da disposição das três bancadas de ensaios é apresentada na Figura 3.3. Os blocos em cor cinza correspondem às bancadas já existentes e os blocos azuis pertencem à nova bancada construída no laboratório. As plantas correspondentes a cada peça e ao conjunto de peças projetadas para a nova bancada são apresentadas em detalhe no Anexo A deste texto.

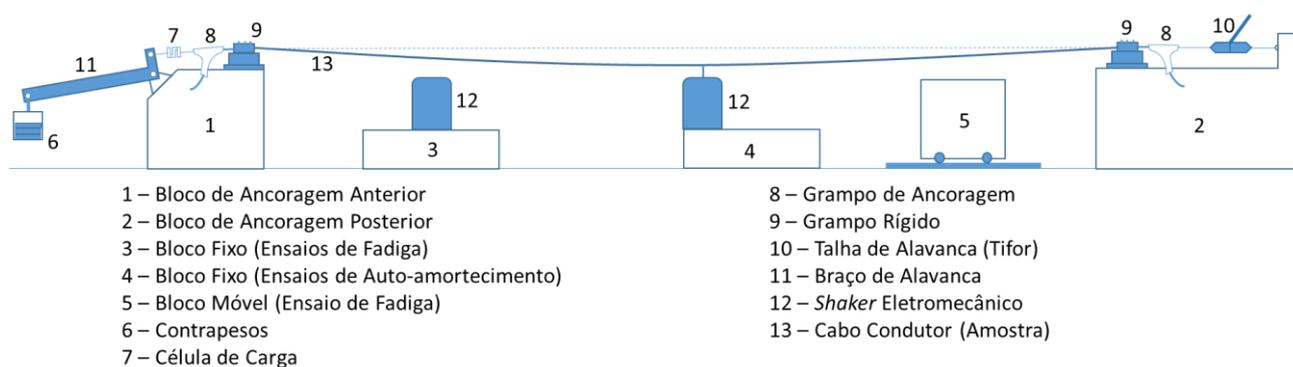


Figura 3.2 – Desenho esquemático da nova bancada de ensaios de fadiga e auto-amortecimento em cabos condutores, construída no LABCABOS/UnB

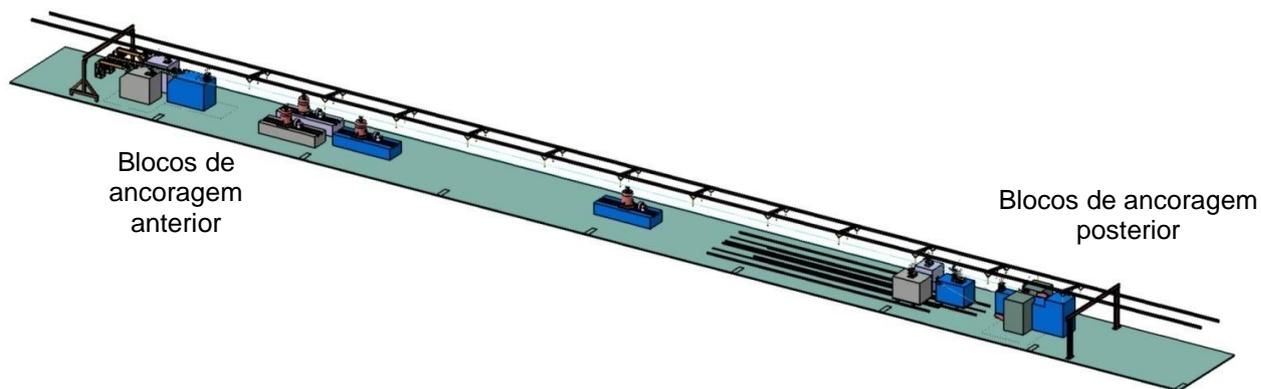


Figura 3.3 – Vista geral das bancadas de ensaios do LABCABOS/UnB

Os ensaios de auto-amortecimento requerem um controle da carga de esticamento preciso, não podendo sofrer variações superiores a 2% durante o teste. Porém, após o aperto nos parafusos do grampo rígido, nas extremidades do vão ativo, não é mais possível verificar a força no cabo, uma vez que a célula de carga está localizada após o grampo. Mudanças na temperatura do ambiente e, conseqüentemente, do condutor, geram dilatação ou contração da amostra, alterando a carga de tração. Com isso, para garantir que a força de tracionado não varie, é necessário um controle de temperatura. O LABCABOS/UnB conta com um sistema de condicionamento de ar que permite a manutenção da temperatura durante os ensaios.

## 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS NOS ENSAIOS

Neste item são apresentados os equipamentos e materiais utilizados nos ensaios de auto-amortecimento, realizados para validação da bancada.

### 3.2.1 Cabo Condutor

Os ensaios realizados para este trabalho utilizaram um cabo CAA 795MCM (Tern). Este é um Condutor de Alumínio com alma de Aço (CAA, ou ACSR, na sigla em inglês), composto por 45 fios de alumínio e sete de aço. As características do cabo de interesse para o projeto são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Características estruturais e dimensionais do condutor e propriedades mecânicas do cabo CAA795 MCM (Tern)

PROPRIEDADE DO CONDUTOR	VALOR	UNIDADE
Carga de Ruptura	10.010 / 98.200	Kgf / N
Massa Linear	1,339	kg/m
Peso Linear	13,134	N/m
Densidade	2.703	kg/m <sup>3</sup>
Diâmetro Nominal	27,03	mm
Número de fios	45/7*	-

\*O número de fios 45/7 corresponde para este tipo de cabo como 45 fios de alumínio e 7 de aço na alma.

### 3.2.2 Shaker Eletromecânico

O *shaker* é responsável por inserir potência no sistema ensaiado, simulando o processo vibratório causado pelo escoamento do vento em relação ao cabo. 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 3.4 é apresentada uma foto do excitador utilizado nos ensaios de auto-amortecimento deste trabalho.



Figura 3.4 – *Shaker* utilizado nos ensaios de auto-amortecimento

A massa da armadura é 5,22 kg. A IEEE (Std. 563, 2007) recomenda que, seja utilizado um excitador com massa inferior a 10% da massa do cabo por unidade de comprimento. No caso do cabo ensaiado, o valor teria que ser menor que 0,134 kg. Uma massa concentrada no local de aplicação da carga varia a resposta vibratória do cabo como um todo, afetando os resultados do ensaio. Como não é possível a utilização de um *shaker* mais leve, é recomendado que seja utilizada uma conexão flexível, que seja capaz de transmitir a potência para o cabo mas diminua a influência da massa concentrada do *shaker*. Um projeto para a construção da conexão flexível foi feito e será apresentado com detalhes no item 3.3 deste texto.

### 3.2.3 Sistema de Controle Vibratório

Para manter a vibração do *shaker* dentro das condições requeridas, é necessária a utilização de um controlador, com software específico para inserção dos parâmetros de ensaio e controle. Neste projeto foi utilizado um sistema de controle de vibração da marca LDS, modelo LASER USB LAS-200, contendo oito canais para leitura. O sistema ainda inclui um pacote de software LDS SW BUNCLE 1 PREMIER (SCO-101). Neste programa são inseridos os limites e faixas de funcionamento do *shaker*,

além de dados de calibração dos sensores utilizados. A Figura 3.5 apresenta uma foto do equipamento utilizado.



Figura 3.5 – Controlador LDS LASER USB LAS-200

### 3.2.4 Sensores

A obtenção dos dados do ensaio foi feita por meio de cinco acelerômetros e uma célula de carga. Além disso é utilizada mais uma célula de carga para possibilitar a verificação da carga de esticamento do cabo e um acelerômetro para controle da amplitude e frequência de vibração. A descrição detalhada destes equipamentos será apresentada em conjunto com a metodologia dos ensaios, nos itens 3.3.1 e 3.3.2 deste trabalho.

### 3.2.5 Fixação da amostra na bancada

Para o tracionamento do cabo, são utilizados dois grampos de ancoragem ligados às extremidades do cabo e fixados nos blocos de ancoragem, que são selecionados de acordo com o diâmetro do condutor. Para o cabo Tern, foram utilizados grampos fornecidos pela Forjasul, modelo 55121/004 (Figura 3.2). Após a aplicação da carga de esticamento do cabo, é fixado um grampo de rígido em cada extremidade do vão ativo. Estes grampos foram desenvolvidos apenas para os ensaios, não tendo aplicação em campo. O grampo rígido, fixado no bloco de ancoragem, minimiza a transmissão de potência para o vão passivo, fazendo com que a onda incidente seja refletida de forma

adequada. A transmissão da vibração para o vão passivo que poderia gerar erros na estimativa da potência dissipada pelo cabo. Estes grampos poderão ser visualizados na Figura 3.7, no item 3.4.1 deste texto.

### 3.3 CONEXÃO FLEXÍVEL

No decorrer deste projeto foi desenvolvida uma conexão flexível para diminuir a influência do peso do *shaker* na resposta em frequência do cabo condutor, possibilitando o atendimento às recomendações do IEEE. O projeto teve como base a conexão utilizada na Universidade de KwaZulu-Natal, na África do Sul. A conexão é composta por 11 peças de alumínio e parafusos de  $\frac{5}{16}$  polegadas, para união. Além disso, é utilizada uma célula de carga entre para medida de força, e mais quatro peças de alumínio responsáveis pela fixação do cabo no acoplamento. No Anexo B são apresentados desenhos técnicos para a produção dos componentes da conexão. São necessárias duas unidades do bloco de junção (Desenho nº 4) e 6 unidades do bloco de aperto (Desenho nº 5). 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.

Uma foto da conexão montada é apresentada na Figura 3.6. Uma vista explodida da conexão desenvolvida com indicação das partes é apresentada na Figura 3.7.

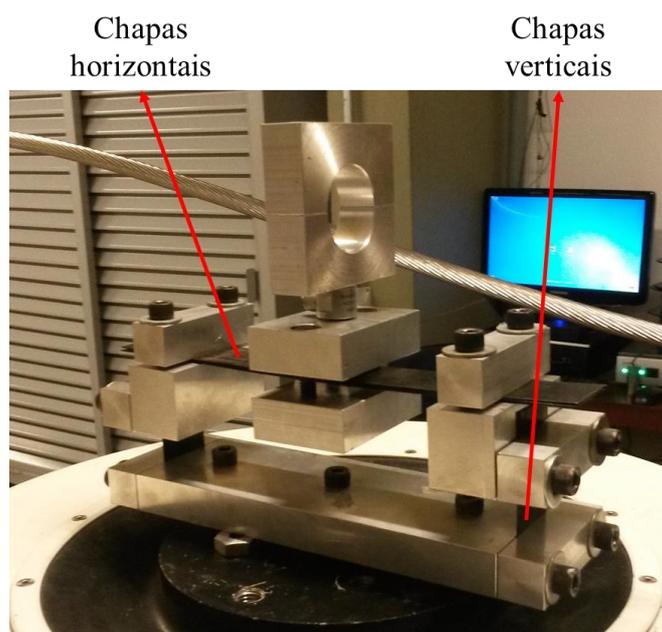


Figura 3.6 – Conexão flexível

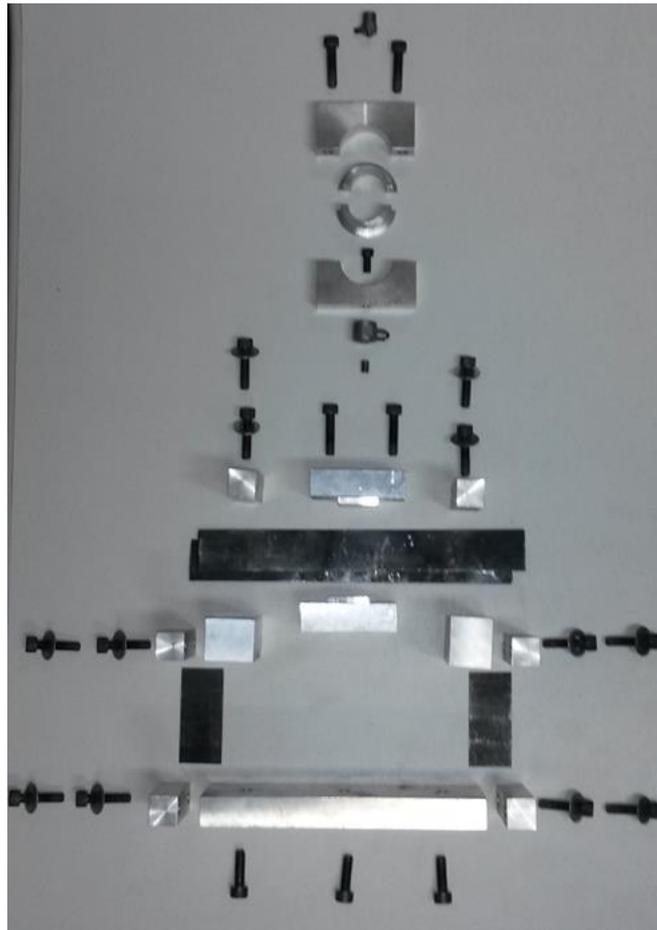


Figura 3.7 – Vista explodida da conexão flexível desenvolvida para os ensaios de auto-amortecimento

A barra horizontal tem comprimento fixo, porém é possível modificar o número de chapas de aço mola utilizadas. Aumentando o número de chapas, observa-se um aumento na rigidez do acoplamento. A Figura 3.8 apresenta uma foto mostrando em detalhe as chapas horizontais utilizadas. Testes foram realizados para a verificação da influência da rigidez da conexão nos dados de auto-amortecimento do condutor ensaiado. Os resultados destes testes são apresentados no item 4.2 deste trabalho.

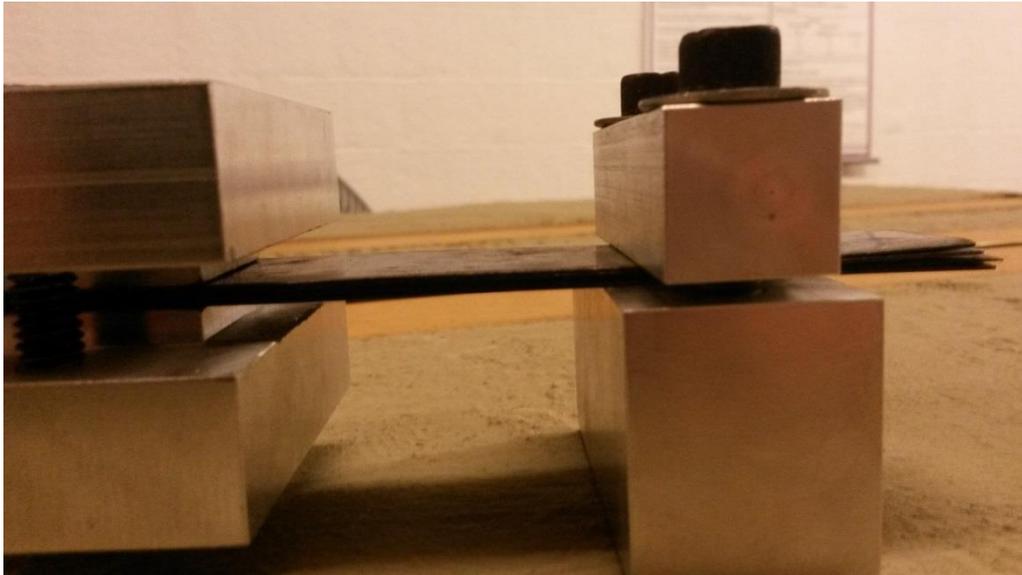


Figura 3.8 – Detalhe das chapas horizontais utilizadas na conexão flexível (na imagem são utilizadas quatro chapas)

### **3.4 METODOLOGIA DOS ENSAIOS**

Neste item serão apresentados os procedimentos para montagem e realização dos ensaios de auto-amortecimento, assim como a descrição dos sensores utilizados para a leitura dos dados.

#### **3.4.1 Montagem da amostra**

A montagem do condutor na bancada é feita com dois grampos de ancoragem, selecionados de acordo com o diâmetro do cabo e fixados nos blocos de ancoragem. Entre o grampo de ancoragem e o bloco posterior é instalada uma talha de alavanca, responsável por fazer o esticamento inicial do cabo, até uma carga próxima ao desejado. O controle mais fino da carga de tração é feito através de contrapesos colocados em um braço de alavanca instalado no bloco anterior. Estes equipamentos podem ser verificados no desenho esquemático apresentado na Figura 3.1. Fotos da montagem dos grampos e do sistema de aplicação da carga de tracionamento são apresentadas nas Figura 3.9 e Figura 3.10. A leitura da força aplicada no cabo é realizada por uma célula de carga instalada entre o grampo de ancoragem e o braço de alavanca, no bloco de ancoragem anterior (Figura 3.8 (a)). Esta força é utilizada como parâmetro para

planejamento e tratamento de dados, tanto para ensaios de fadiga quanto para de auto-amortecimento de condutores. A bancada conta com uma célula de carga com capacidade de até 5000 kgf.

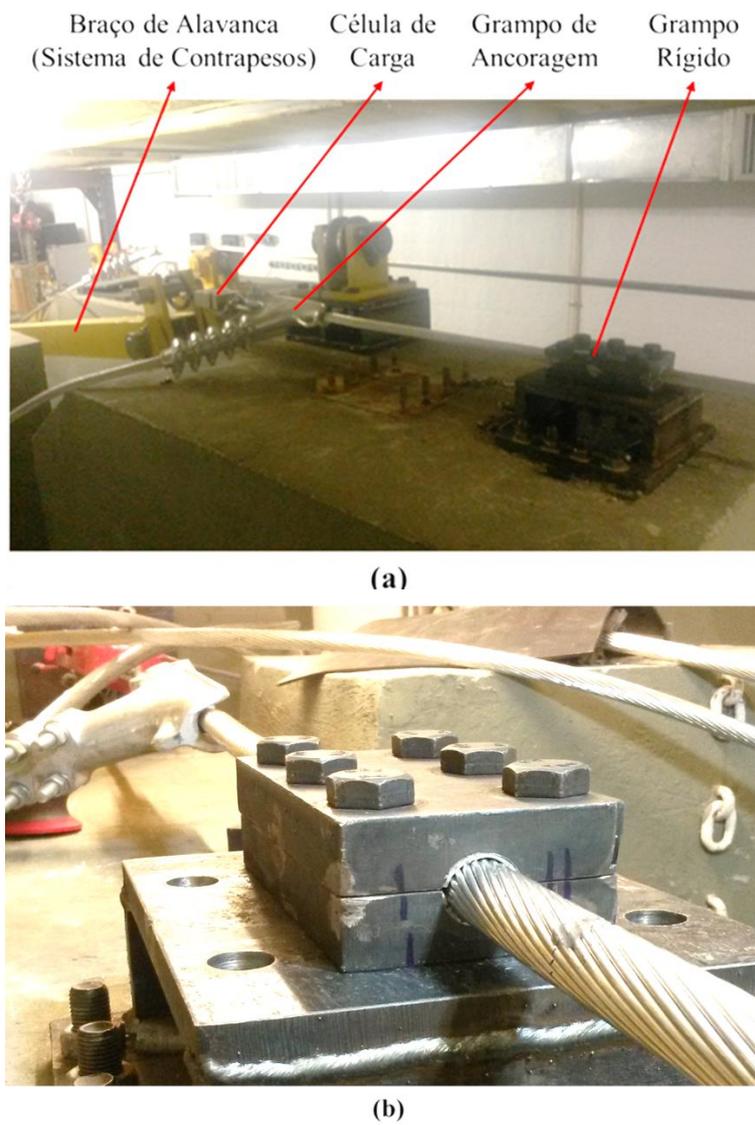


Figura 3.9 – Montagem da amostra: (a) grampo de ancoragem anterior; (b) grampo de ancoragem posterior



(a)



(b)

Figura 3.10 – Sistema de aplicação da carga de tracionamento no condutor: (a) Talha de alavanca (Tifor) para aplicação da carga inicial; (b) Braço de alavanca e contrapesos para ajuste fino da carga

O Std. 563 (2007) recomenda que o condutor seja deixado na maior tensão aplicada nos testes, por um período de pelo menos duas horas, preferencialmente durante à noite. Este procedimento faz com que os fios que compõem o cabo se acomodem e as tensões sejam distribuídas de forma mais uniforme. Para os testes realizados no decorrer deste trabalho, a amostra é pré-tensionada por um período aproximado de 12 horas (uma noite).

Para obter um maior aperto entre o cabo e o grampo rígido, evitando escorregamento e perda de potência nas extremidades da amostra, foi desenvolvida uma bucha a partir de uma chapa de alumínio para ser colocada entre o grampo e o cabo. A troca da espessura

da chapa, fabricando novas buchas, permitirá uma maior precisão no ajuste para diversos diâmetros de condutores. Os grampos rígidos montados podem ser visualizados nas fotos da Figura 3.9 e o detalhe da bucha de alumínio é mostrado na Figura 3.11.

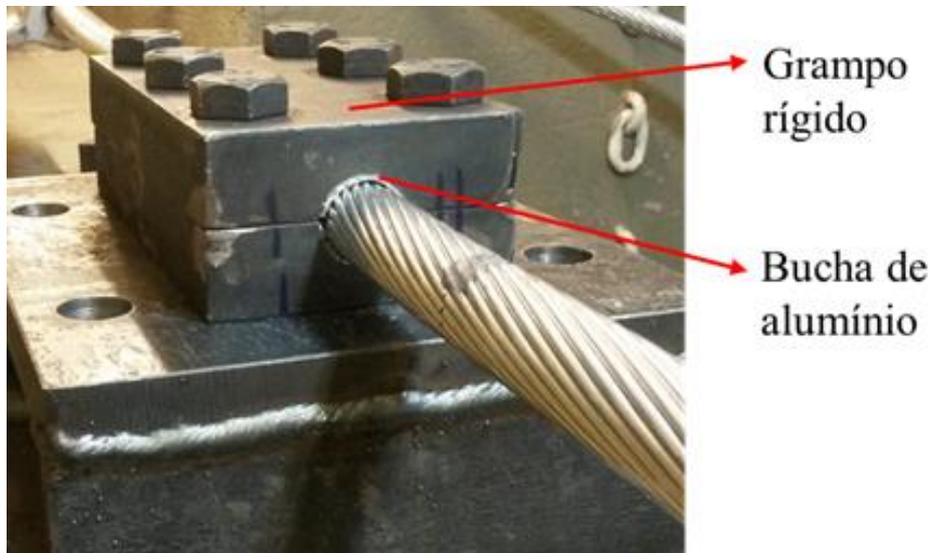


Figura 3.11 – Detalhe da montagem do grampo rígido com bucha de alumínio

Ao final da aplicação de carga e fixação dos grampos rígidos, o cabo é então conectado ao *shaker*. Foram utilizadas duas formas de conexão: flexível e rígida. A conexão flexível foi desenvolvida no âmbito deste trabalho, seguindo recomendações do IEEE (2007). A Figura 3.12 mostra a montagem entre o cabo e o *shaker* utilizando os dois tipos de conexão.

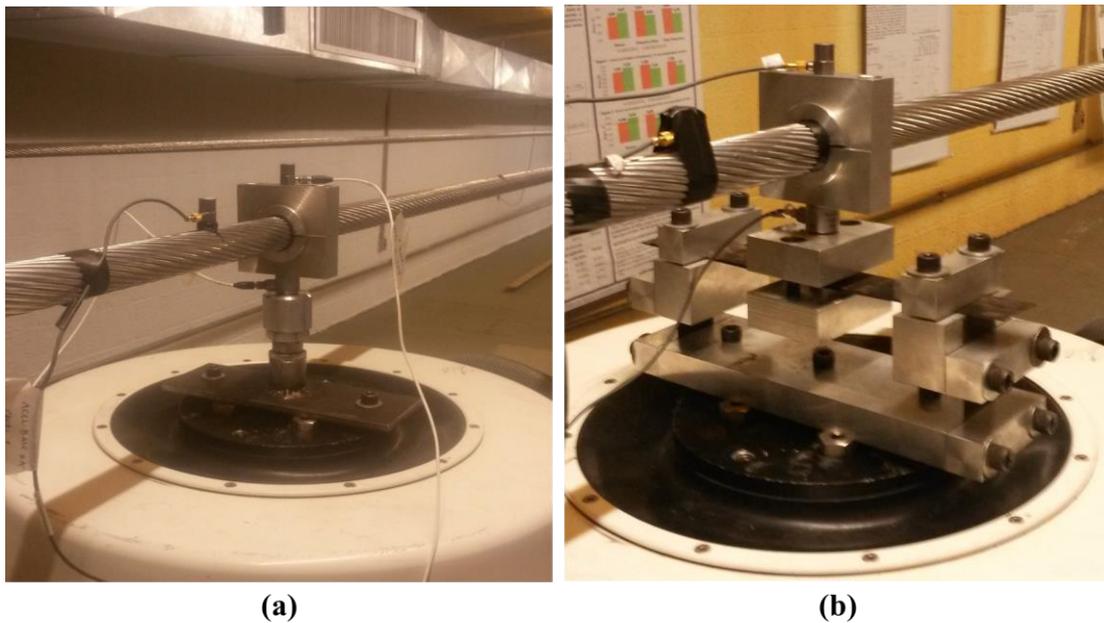


Figura 3.12 – Conexão entre o cabo e o *shaker*: (a) Conexão Rígida; (b) Conexão Flexível

Segundo o Std. 563 (2007), é recomendado que o *shaker* seja posicionado no centro do vão ativo para que a aplicação da carga ocorra em um anti-nó. Cabe ressaltar que existem divergências quanto a esta recomendação. A brochura 482 da CIGRÉ (CICRÈ, 2011), recomenda que o *shaker* seja posicionado, para todos os comprimentos de onda testados, entre o grampo de suspensão e o primeiro nó. Toda a metodologia da bancada foi baseada nas recomendações oferecidas pela IEEE, no Std. 563, portanto todas as ações e recomendações deste trabalho serão para o *shaker* posicionado no centro do vão ativo. Porém, durante a fase de projeto da bancada, foi utilizado o vão total para cálculo do posicionamento do *shaker*, fazendo com que o bloco ficasse um pouco deslocado para próximo do bloco de ancoragem posterior, conforme esquema apresentado na Figura 3.3. Com isso, o equipamento foi instalado na ponta do bloco fixo, mais próximo ao bloco de ancoragem anterior, conforme mostrado na Figura 3.12. Porém, ainda assim, o *shaker* ficou deslocado aproximadamente 100 mm em relação ao centro do vão ativo. Durante o processo de varredura para definição das frequências de ressonância, um acelerômetro foi colocado no ponto central do vão para garantir que os modos ímpares de ressonância sejam observados, quando o centro do vão ativo está em um anti-nó.

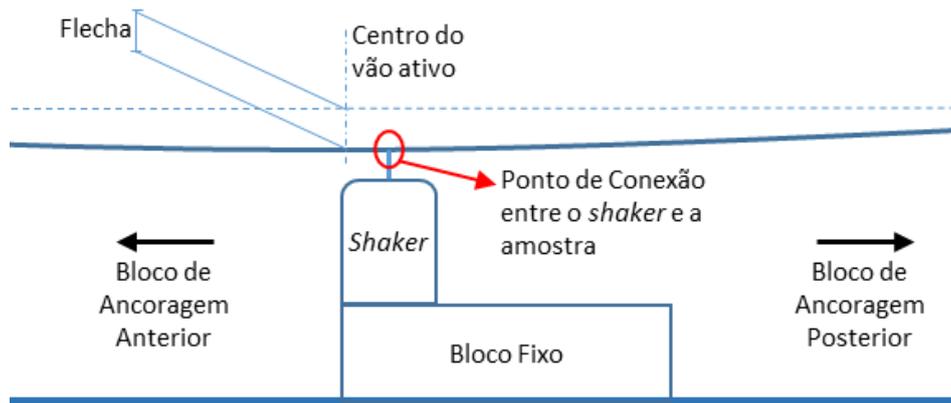


Figura 3.13 – Localização do *shaker* para os ensaios de auto-amortecimento

### 3.4.2 Instrumentação da bancada

Foram utilizados dois métodos para a estimativa das características de auto amortecimento de condutores neste trabalho e cada um deles requer sensores específicos. O Método da Potência utiliza as medidas da velocidade e força na aplicação da carga, assim, são necessários um acelerômetro e uma célula de carga posicionados no *shaker*. Já o Método da Onda Estacionária faz uso de medidas de deslocamento em dois nós e velocidade e deslocamento no anti-nó, requerendo a utilização de três acelerômetros. Um desenho esquemático mostrando a localização dos sensores para o teste é apresentado na Figura 3.14 e fotos dos equipamentos podem ser visos na Figura 3.15. Os números associados a cada sensor são os mesmos nas duas figuras. O sensor representado pelo número quatro é a célula de carga utilizada para verificação da força no Método da Potência. Na Figura 3.14, o acelerômetro de controle não estava instalado, apenas está indicado o local em que ele foi colocado, na mesa do *shaker*.

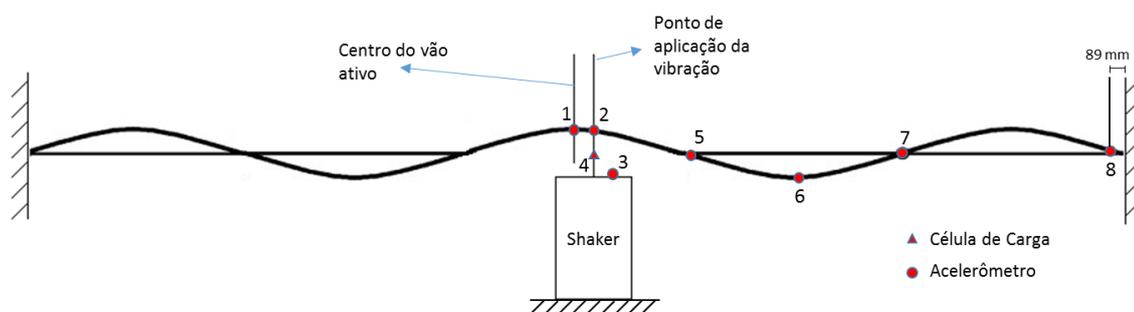


Figura 3.14 – Desenho esquemático da instrumentação da bancada de ensaios

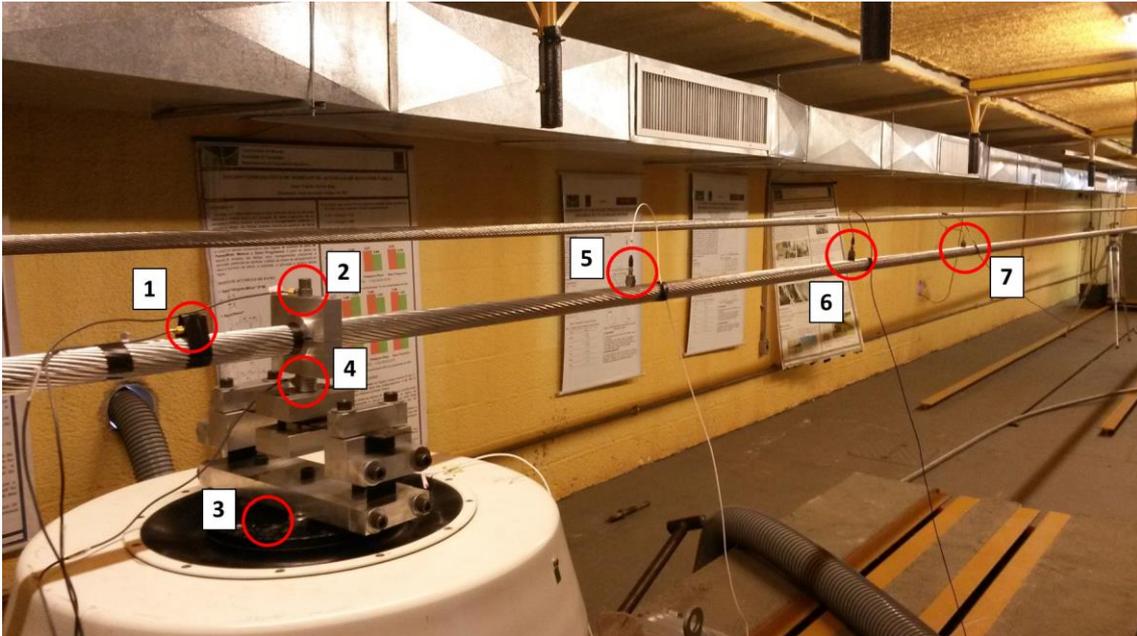


Figura 3.15 – Foto da montagem dos sensores na bancada para os ensaios pelo Método da Potência e Método da Onda Estacionária

Nas figuras acima, o acelerômetro indicado por dois e a célula de carga indicada pelo número quatro são utilizados para aquisição dos dados nos ensaios utilizando o Método da Potência. Os acelerômetros indicados pelos números cinco, seis e sete são utilizados no Método da Onda Estacionária.

Nos testes com a conexão flexível, o controlador apresentou instabilidade, não conseguindo manter o teste nos parâmetros inseridos e desarmando o *shaker*. Para solucionar o problema, foi utilizado outro acelerômetro na base do equipamento, representado pelo número três nas figuras 3.14 e 3.15, responsável pelo controle do ensaio.

Ao todo, para aquisição e controle dos ensaios foram utilizados cinco acelerômetros e uma célula de carga, todos da marca Brüel & Kjær (B&K). O software do controlador requer que seja inserida a sensibilidade de cada sensor, permitindo a verificação dos parâmetros de calibração. A Tabela 3.2 mostra a sensibilidade de cada sensor utilizado para aquisição de dados e controle do ensaio. Para a leitura da amplitude de deslocamento dos nós, no Método da Onda Estacionária, foram utilizados acelerômetros com uma sensibilidade maior, ou seja, que têm uma faixa de leitura menor, porém com maior precisão. Isso foi feito para que as leituras fossem mais precisas, uma vez que os

deslocamentos no nó são baixos e a utilização de um acelerômetro pouco sensível poderia gerar perda de informação.

Tabela 3.2 - Descrição dos sensores utilizados para aquisição de dados e controle do ensaio

NOME DADO AO SENSOR	UTILIZAÇÃO E DADOS AQUISITADOS	SENSIBILIDADE	UNIDADE
<b>Acelerômetro – Base Shaker</b>	Controle do ensaio (deslocamento)	102,9	mV/g
<b>Acelerômetro – Cabo Shaker</b>	Velocidade (MP*)	99,7	mV/g
<b>Célula de Carga – Shaker</b>	Força (MP*)	0,243	mV/N
<b>Acelerômetro – Nó1</b>	Deslocamento (MOE**)	499,5	mV/g
<b>Acelerômetro – Anti-nó</b>	Deslocamento e Velocidade (MOE**)	99,9	mV/g
<b>Acelerômetro – Nó2</b>	Deslocamento (MOE**)	489,6	mV/g

\* MP – Método da Potência

\*\* MOE – Método da Onda Estacionária

### 3.4.3 Procedimentos para os ensaios de auto-amortecimento

Para a verificação da capacidade de realização de ensaios de auto-amortecimento na nova bancada do LABCABOS/UnB, foram feitos testes com a conexão flexível desenvolvida, sendo aplicadas duas cargas de esticamento: 3440 kgf e 3000 kgf. Estas cargas equivalem, respectivamente, a EDS de 34,4 % e 30,0 % da carga de ruptura do cabo condutor (RTS).

Inicialmente, o cabo foi esticado com uma EDS equivalente a 35%, porém após a acomodação da amostra, o valor decaiu para 34,4%. O valor de 30% foi o mínimo que se pôde obter devido a restrições na diferença altura entre os grampos rígidos e a mesa (parte vibrante) *shaker*. Esta diferença é de, aproximadamente, 190 mm, conforme apresentado na Figura 3.16. Devido ao aumento da flecha gerada pelo condutor (Figura 3.16) com a redução da carga de esticamento, não foi possível acoplar o shaker e a amostra para EDS menores.

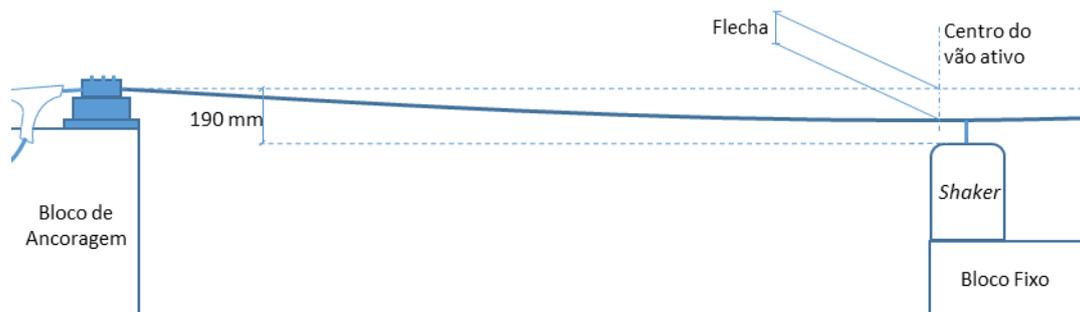


Figura 3.16 – Detalhe da diferença entre as alturas do grampo rígido e a mesa do shaker

Nos testes com EDS igual a 34,4% da RTS foram utilizados os métodos da potência e da onda estacionária. Já na EDS de 30 %, foram feitos apenas testes do método da potência, porém, além da configuração da conexão flexível utilizada nos testes anteriores, foi utilizada uma configuração mais rígida da conexão e um acoplamento rígido, para verificar a influência da rigidez nos dados de amortecimento obtidos. O aumento da rigidez da conexão foi feito através do aumento no número de chapas de aço mola horizontais, conforme montagem apresentada no item 3.3 deste trabalho. Foram utilizadas configurações da conexão flexível com duas e quatro chapas horizontais.

Antes que sejam iniciados os ensaios para a aquisição dos dados de auto-amortecimento dos cabos, deve ser feita uma varredura em frequência para o levantamento das ressonâncias. A faixa de frequências, conforme recomendado pela IEEE (2007), deve corresponder à gerada por ventos de 3 a 30 km/h. A relação entre frequência de vibração ( $f$ ) e velocidade do vento ( $U$ ) é dada pela equação 2.12. Para  $U$  em km/h e  $d$  em mm, podemos aproximar esta equação por:

$$f [Hz] = 50 \frac{U [km/h]}{d [mm]} \quad (3.1)$$

Para o cabo utilizado nos ensaios (Tern), cujo diâmetro nominal é 27,03 mm, as frequências mínimas e máximas calculadas e utilizadas são apresentadas na Tabela 3.3. A varredura foi feita com uma faixa de frequência ligeiramente maior que a calculada, de modo a garantir que todos os picos de ressonância fossem utilizados.

Tabela 3.3 – Faixas de frequência calculada e utilizada na varredura

<b>Frequência</b>	<b>CALCULADA (Hz)</b>	<b>UTILIZADA (Hz)</b>
<b>F_Mínima</b>	5,55	5,00
<b>F_Máxima</b>	55,49	56,00

O controlador foi programado de forma que fosse feita uma variação constante na frequência com uma taxa de 0,1 Hz/s dentro dos limites conforme definidos na Tabela 3.3. Além disso, foi definido um deslocamento constante de 0,5 mm no acelerômetro de controle.

A obtenção das frequências de ressonância foi feita de forma diferente para os ensaios utilizando as conexões flexível e rígida. Para a conexão rígida o valor de deslocamento descrito no controle (mesa do *shaker*) é o mesmo do cabo no ponto de aplicação, assim, uma prescrição de deslocamento constante faz com que o deslocamento no centro da bancada seja mantido aproximadamente constante. Um acelerômetro foi colocado no centro da bancada, como pode ser visto na Figura 3.13 (acelerômetro 1), e outro em um ponto próximo ao grampo rígido, no bloco de ancoragem posterior. O acelerômetro próximo ao bloco de ancoragem foi colocado a uma distância de 89 mm do último ponto de contato entre o cabo e o grampo rígido (boca do grampo). Este ponto foi escolhido por já ser um ponto utilizado para parametrização de ensaios de fadiga em cabos condutores, além de garantir que, na faixa de frequência utilizada, o acelerômetro não estará em nenhum nó ou anti-nó. Foi gerado um gráfico da função de transferência entre os deslocamentos no centro do vão ativo e no ponto 89 mm. O gráfico gerado apresenta picos nos pontos em que a amplitude de vibração no centro do vão ativo é maior em relação à medida do ponto 89, o que indica que o ponto central da bancada está em um anti-nó e a amostra está vibrando em um modo de vibração ímpar.

Nos ensaios utilizando a conexão flexível, a amplitude de vibração do controle não é necessariamente a mesma do cabo no ponto de aplicação, variando em função da frequência. Comparar este valor com a leitura do acelerômetro instalado no ponto 89 mm, que também varia com a frequência, gerou muitas distorções no gráfico, o que dificultou a visualização dos picos de ressonância. Para resolver o problema, foram utilizados apenas os dados da amplitude de vibração no centro do vão, independente da

leitura do acelerômetro do ponto 89. Devido à flexibilidade da conexão, mesmo que a vibração na mesa do shaker fosse mantida constante durante toda a varredura, nos modos ímpares de vibração (quando o centro da amostra está localizado num anti-nó), o cabo vibrava a uma amplitude maior. Sendo possível a visualização do fenômeno, ao mesmo tempo que se observava um pico no gráfico. Esta visualização foi mais evidente nos modos de vibração com frequências mais baixas, pois a amplitude de vibração do anti-nó é maior. A Figura 3.17 traz um gráfico de varredura obtido para a conexão flexível. A figura traz as leituras dos acelerômetros no ponto de conexão do cabo com o shaker (input2(f)) e no centro do vão ativo (input4(f)). É possível observar que, apesar de eles estarem deslocados entre si, as amplitudes de vibração lidas são muito próximas e os picos de ressonância observados nas mesmas frequências.

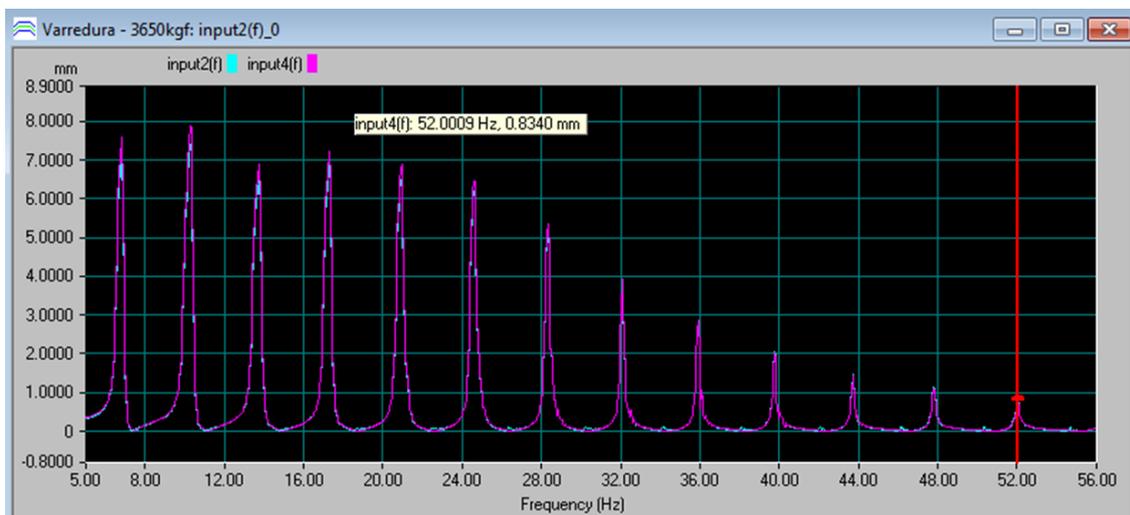


Figura 3.17 – Varredura em frequência para a obtenção dos picos de ressonância

Após a varredura e verificação das ressonâncias, foram definidas as frequências utilizadas no ensaio. As informações contendo parâmetros aplicados na realização de cada ensaio são apresentadas na Tabela 3.4. Para cada uma dessas frequências foram adquiridos dados com três a seis valores de amplitudes de deslocamento diferentes. Estes deslocamentos foram obtidos a partir da definição de uma amplitude no acelerômetro de controle, lidos pelo acelerômetro na ligação entre o acoplamento e o cabo após o teste se tornar estável.

Tabela 3.4 – Parâmetros de ensaio utilizados nos testes de auto-amortecimento

<b>Ensaio</b>	<b>Conexão utilizada*</b>	<b>Carga de Esticamento (N; %RTS)</b>	<b>Frequências (Hz)</b>	<b>Amplitudes (mm)</b>
<b>1</b>	Flex2	33746; 34,4%	52,00	0,75
				2,72
				4,31
				5,21
<b>2</b>	Flex2	33746; 34,4%	39,76	1,44
				3,45
				4,35
				5,99
				6,40
				7,85
<b>3</b>	Flex2	33746; 34,4%	28,33	1,57
				2,35
				5,94
<b>4</b>	Flex2	29430; 30,0%	53,24	0,90
				0,91
				1,42
				1,47
				2,02
<b>5</b>	Flex2	29430; 30,0%	41,23	2,22
				4,18
				4,53
				4,83
				6,41
				8,19
<b>6</b>	Rígida	29430; 30,0%	42,98	1,99
				3,00
				4,00
				5,00
				5,49

Tabela 3.4 (Continuação) – Parâmetros de ensaio utilizados nos testes de auto-amortecimento

<b>Ensaio</b>	<b>Conexão utilizada*</b>	<b>Carga de Esticamento (N; %RTS)</b>	<b>Frequências (Hz)</b>	<b>Amplitudes (mm)</b>
<b>7</b>	Rígida	29430; 30,0%	51,45	0,52
				1,01
				1,48
				2,00
<b>8</b>	Flex4	29430; 30,0%	54,53	0,55
				0,83
				1,41
				2,18
<b>9</b>	Flex4	29430; 30,0%	42,48	1,97
				2,59
				3,86
				4,01

\* Nesta coluna, os termos: Flex2, Rígida e Flex4 fazem referência, respectivamente à conexão flexível com duas barras horizontais, à conexão rígida e à conexão flexível com quatro barras horizontais.

Os resultados dos ensaios são apresentados a seguir.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo traz os resultados dos ensaios de auto-amortecimento realizados no decorrer deste projeto. Estes ensaios são preliminares, para verificar a consistência das metodologias utilizadas e possíveis problemas na bancada, permitindo a proposição possíveis soluções. Foram realizados testes através dos métodos da Potência e da Onda Estacionária.

São apresentados ainda ensaios para verificar a influência da utilização da conexão flexível nos resultados de auto-amortecimento no condutor. Estes ensaios foram feitos utilizando três configurações de conexão: uma completamente rígida e duas utilizando a conexão flexível, porém com variação na rigidez.

### 4.1 ENSAIOS DE AUTO-AMORTECIMENTO DO CONDUTOR

Foram realizados ensaios utilizando o condutor CAA 795 MCM (Tern). Inicialmente foram feitos ensaios utilizando uma carga de tracionamento de 33,75 kN, equivalente a 34,4% da RTS do condutor. Para esta carga, foram utilizados os métodos da Potência (MP) e da Onda Estacionária (MOE). Os resultados são apresentados nas figuras Figura 4.1 e Figura 4.2.

Como era esperado por dados da bibliografia, a potência dissipada aumenta com o aumento da frequência de ensaio amplitude de vibração. As equações apresentadas ao lado de cada curva nos gráficos representam o ajuste dos pontos, realizado por meio de uma função de potência. Conforme descrito no item 2.3 deste trabalho, a curva de ajuste dos pontos se aproxima de uma reta num gráfico em escala logarítmica. Abaixo de cada equação, pode-se observar o valor  $R^2$ , que representa o quão bem os pontos estão ajustados à curva. Nota-se uma boa aproximação para a regressão utilizada.

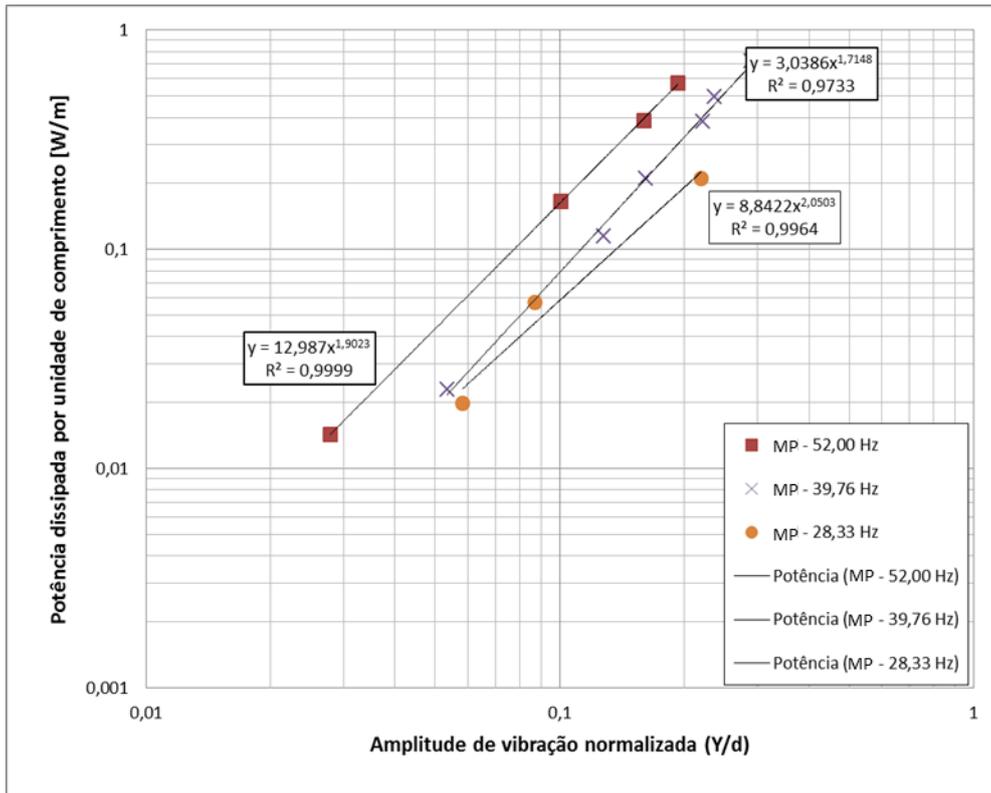


Figura 4.1- Auto-amortecimento - Cabo CAA 795 MCM (Tern) - EDS = 34,4% RTS - Método da Potência - Conexão Flex2

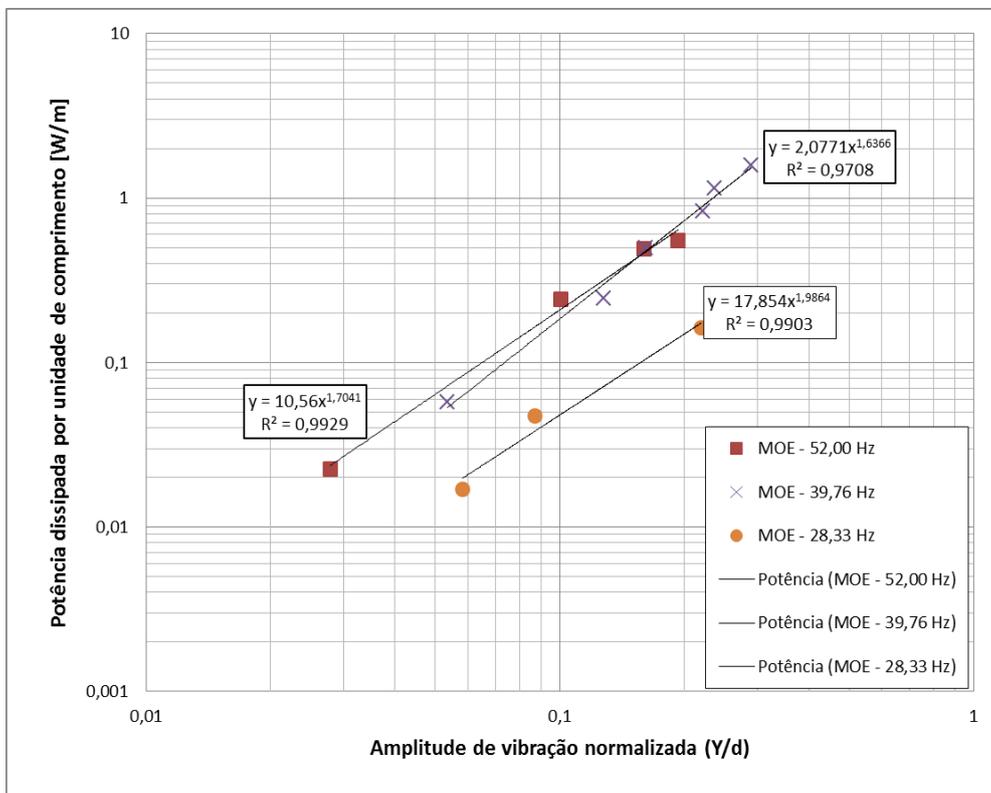


Figura 4.2 – Auto-amortecimento - Cabo CAA 795 MCM (Tern) - EDS = 34,4% RTS - Método da Onda Estacionária - Conexão Flex2

A Figura 4.3 apresenta a curva de ajuste dos ensaios utilizando as duas metodologias. As retas sólidas representam os resultados obtidos pelo MOE, enquanto as tracejadas dizem respeito ao MP. Cada cor de curva representa uma frequência utilizada, conforme legenda apresentada no gráfico da figura.

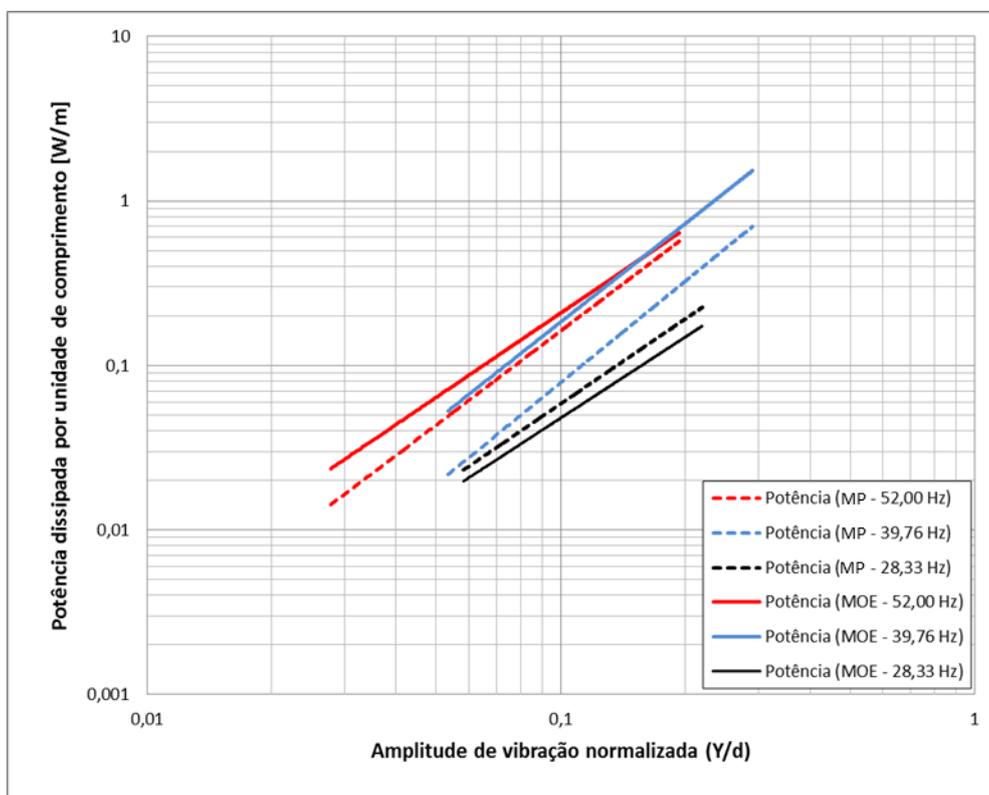


Figura 4.3 – Comparação entre os resultados obtidos utilizando o Método da Potência e o Método da Onda Estacionária – Cabo CAA 795 MCM (Tern) - EDS = 34,4% RTS - Conexão Flex2

É possível perceber na comparação das curvas que, em dois dos três testes, o MOE gerou curvas com uma dissipação de potência maior em relação ao MP. O segundo método despreza as perdas na extremidade e acoplamento, enquanto o primeiro não é influenciado por elas. Considerando isso, devemos esperar que a potência obtida pelo MP fosse maior em comparação com aquela obtida pelo MOE.

A principal fonte de erro do Método da Onda Estacionária, que pode estar gerando a divergência observada nos gráficos é a localização correta dos nós e anti-nó para a instalação dos acelerômetros. Nota-se que, para este método, a curva utilizando a frequência de 39,76 Hz está bem próxima da que ajusta os pontos obtidos na frequência de 52 Hz. Além disso, ambas apresentam um auto-amortecimento do cabo maior quando comparadas com aquelas em que foi utilizado o Método da Potência. Por outro lado, a curva gerada pelos pontos a 28,33 Hz para o MOE está abaixo daquela encontrada pelo MP. Apesar destes aspectos, percebe-se uma consistência entre os

pontos levantados para a mesma frequência, sem grandes dispersões, como pode ser observado na Figura 4.2. Este fato também pode ser explicado por um erro na localização dos sensores, uma vez que eles são reposicionados somente a cada variação na frequência. Dentre os aspectos que geram dificuldade nesta localização dos pontos, está a baixa amplitude de vibração nos nós e mesmo no anti-nó.

Uma oportunidade de melhoria na bancada para ajudar a solucionar o problema de localização dos acelerômetros seria aumentar a altura dos dois apoios em que estão instalados os grampos rígidos, nas extremidades da bancada (Figura 3.16). Até a conclusão deste trabalho, diferença entre as alturas da base do grampo rígido e da mesa do *shaker* é de, aproximadamente, 190 mm. Considerando a flecha gerada pelo peso próprio do condutor instalado e a altura da conexão entre o cabo e o *shaker*, este valor gera uma limitação à utilização de amplitudes de vibração maiores. Amplitudes de vibração maiores, além de gerarem a possibilidade de obtenção de um maior número de dados para melhor ajuste das curvas de amortecimento, melhorariam a visibilidade dos nós do sistema.

A conexão flexível desenvolvida tem um ajuste de rigidez e altura pelas chapas verticais, conforme apresentado no item 3.3. Devido à reduzida diferença de altura entre o grampo rígido e a base do *shaker*, estas barras tiveram que ser mantidas com o comprimento mínimo. Isso impediu também que fossem utilizadas menores valores para a carga de esticamento do condutor, pois estes gerariam flechas ainda maiores, o que reduziu a quantidade de dados obtidos.

A utilização de frequências menores também foi impossibilitada, pois, como o *shaker* se encontra próximo a um anti-nó, a amplitude de vibração se torna maior em baixas frequências. A prescrição de um deslocamento muito baixo na base do *shaker* (controle) gera grandes deslocamentos no cabo, quando a conexão flexível é utilizada. Devido ao ajuste mínimo na altura desta conexão, a parte superior da peça se choca a base durante os ensaios.

Para a definição da localização do bloco fixo, onde é instalado o *shaker*, foram utilizadas as extremidades da bancada. Foi definida a distância entre o grampo rígido, no bloco de ancoragem anterior, ao olhal em que é instalada a talha de alavanca no bloco de ancoragem posterior. Na metade da distância foi projetado o centro do bloco fixo. Porém, segundo o Std. 563 (IEEE, 2007), o *shaker* deve se localizar no centro do vão ativo, garantindo assim que o acoplamento fosse feito em um anti-nó para os modos de ímpares de vibração do condutor.

Ao considerar o centro da bancada na metade da distância entre os dois grampos rígidos, observou-se que o *shaker* deveria ser instalado na extremidade do bloco fixo. Devido às dimensões do próprio equipamento, mesmo com sua instalação na extremidade do bloco, o acoplamento ficou deslocado cerca de 100 mm do centro do vão ativo. Esta distância poderia gerar distorções nos resultados, principalmente utilizando o Método da Onda Estacionária, uma vez que a distância percorrida pela onda até ser refletida na extremidade seria diferente para cada um dos lados.

Uma solução para o problema seria aumentar a superfície do bloco fixo, permitindo o reposicionamento do *shaker* no centro do vão ativo. Entretanto, esta medida gera custos e requer a contratação de pessoal especializado para a construção. Uma alternativa mais simples e barata seria deslocar o grampo rígido de forma que o centro do vão ativo se deslocasse para o ponto em que está localizado o acoplamento. Porém, este deslocamento deve ser feito de forma que não interfira a rigidez da fixação entre o grampo rígido e o bloco de ancoragem, para não afetar a reflexão da onda no MOE.

Das curvas apresentadas na Figura 4.1, foram utilizados um ponto de cada curva, com  $Y/d = 0,22$ , para verificar a relação entre a potência dissipada pelo condutor e a frequência de vibração. O gráfico gerado é apresentado na Figura 4.4. Nota-se uma relação direta e não linear entre o auto-amortecimento e a frequência. Esta relação é consistente com o apresentado na literatura (Figura 2.7).

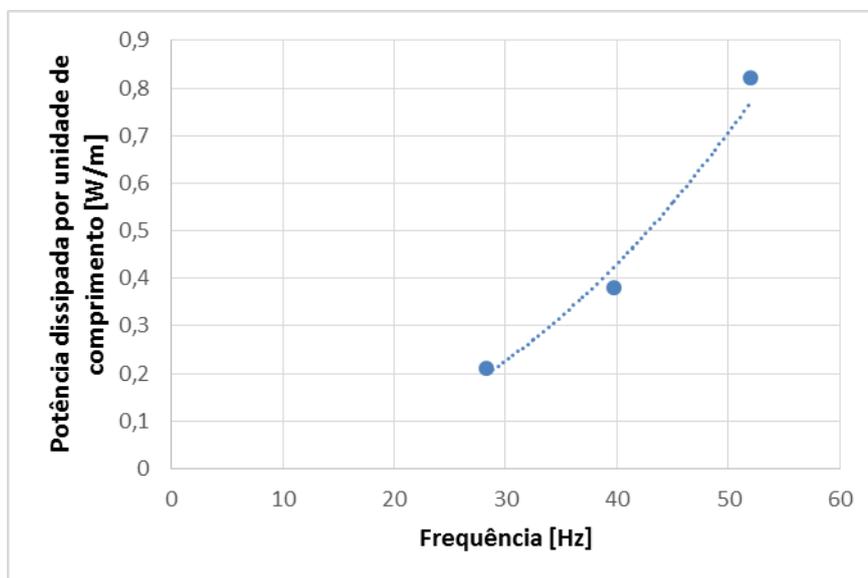


Figura 4.4 – Potência dissipada em função da frequência de vibração para carga de esticamento e  $Y/d$  constantes

Foi realizado mais uma série de testes, utilizando o Método da Potência, para verificar a influência do tracionamento do condutor nos resultados de auto-amortecimento obtidos. Foram feitos ensaios em duas frequências distintas, com uma carga de esticamento de 29.43 kN, equivalente a 30% da RTS do cabo. As curvas geradas são apresentadas na Figura 4.5. Observou-se um aumento na potência dissipada pelo cabo com a diminuição da carga de esticamento. Esta relação era esperada, uma vez que a dissipação de potência nos condutores ocorre principalmente pelo atrito gerado no deslocamento relativo entre as camadas. Com o condutor mais esticado, as camadas ficam mais pressionadas entre si, diminuindo o deslocamento relativo.

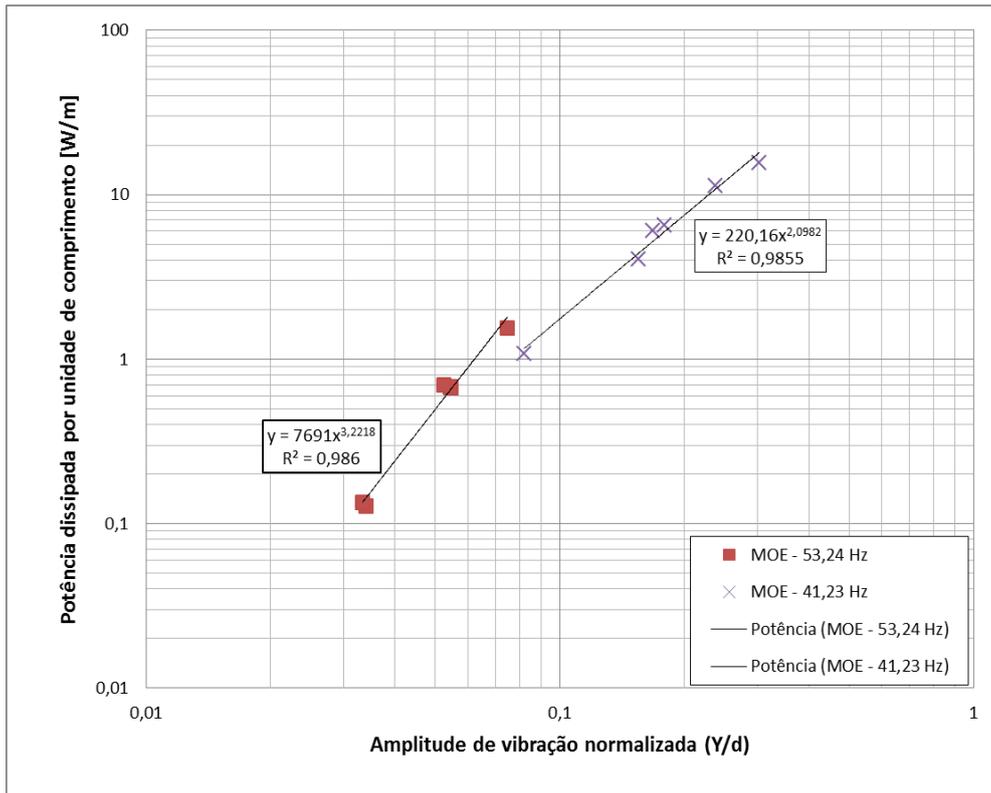


Figura 4.5 – Auto-amortecimento - Cabo CAA 795 MCM (Tern) - EDS = 30,0% RTS - Método da Potência - Conexão Flex2

## 4.2 INFLUÊNCIA DA RIGIDEZ DA CONEXÃO

Para verificar a influência da utilização de um acoplamento flexível entre o cabo e o *shaker*, os ensaios com a EDS de 30% foram refeitos com duas novas configurações. Em todos os ensaios apresentados no item 4.1, a conexão flexível foi montada com duas chapas horizontais, conforme demonstrado no item 3.4.3. A rigidez do equipamento foi aumentada inserindo mais duas chapas horizontais (totalizando quatro). Após isso, foi utilizado um acoplamento completamente rígido para ligação do *shaker* ao condutor. Foram realizadas varreduras para verificar as ressonâncias a cada nova configuração. Os valores utilizados foram tão próximos quanto possíveis para evitar que diferenças na frequência influenciassem significativamente os ensaios. Porém estes valores não são os mesmos devido a diferenças no sistema com a utilização da conexão rígida e flexível. Os resultados dos ensaios são apresentados nas figuras Figura 4.6 e Figura 4.7.

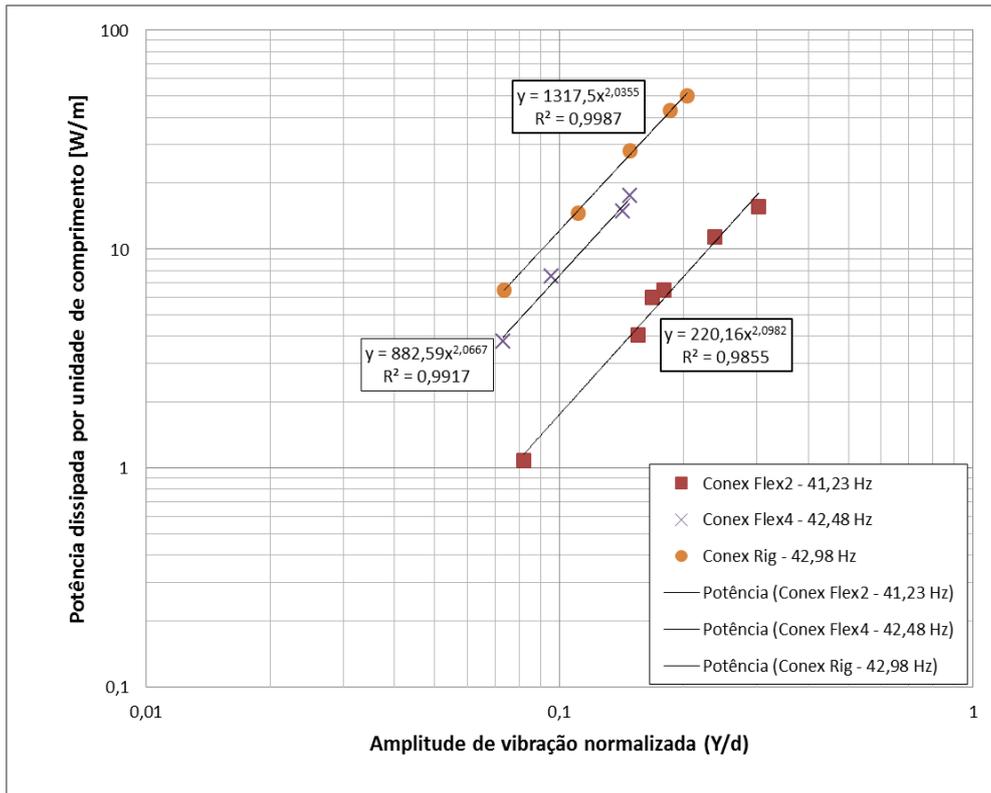


Figura 4.6 – Influência da rigidez do acoplamento nos resultados de auto-amortecimento – frequências próximas a 40 Hz – Cabo CAA 795 MCM (Tern) - EDS = 30,0% RTS - Método da Potência

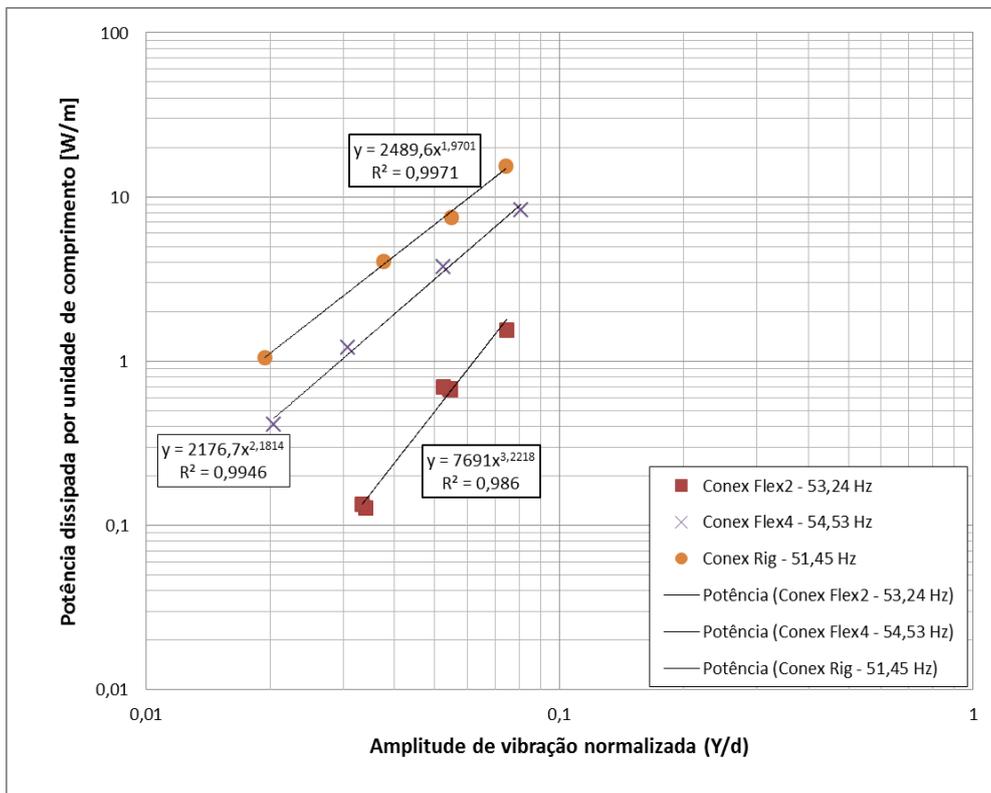


Figura 4.7 – Influência da rigidez do acoplamento nos resultados de auto-amortecimento – frequências próximas a 50 Hz – Cabo CAA 795 MCM (Tern) - EDS = 30,0% RTS - Método da Potência

Na legenda das figuras, os termos Flex2, Flex4 e Rig fazem referência, respectivamente, à conexão flexível com duas chapas horizontais, à conexão flexível com quatro chapas horizontais e à conexão rígida. A partir dos gráficos, verifica-se um aumento na potência obtida no ensaio com o aumento da rigidez do acoplamento. Com base nos dados obtidos, podemos assumir que a influência do peso do shaker, se não reduzida com a utilização de uma conexão flexível, pode gerar erros perigosos, contra a segurança de um projeto. Se fosse utilizada apenas a conexão rígida, poderíamos concluir erroneamente que o amortecimento do condutor é maior do que realmente ocorre e, conseqüentemente, que o cabo dissiparia mais energia quando instalado em campo.

Os dados apresentados neste item mostram a importância da utilização da conexão flexível para ensaios de auto-amortecimento utilizando o Método da Potência.

# 5 CONCLUSÕES E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

## 5.1 CONCLUSÕES

O objetivo principal para a realização deste trabalho foi a preparação da bancada construída no Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia Elétrica da Universidade de Brasília para a realização de testes de auto-amortecimento. Para atingir este objetivo, inicialmente foi realizado um estudo da teoria que envolve ao auto-amortecimento de condutores e o levantamento das recomendações expressas pelos centros de estudo de transmissão de energia elétrica atuantes mundialmente, como a CIGRE, o IEEE e a EPRI. Tendo sido realizadas diversas adequações para solução dos problemas e dificuldades encontrados durante o planejamento e execução dos ensaios.

Foram feitos ensaios de auto-amortecimento utilizando duas metodologias distintas: o Método da Potência e o Método da Onda Estacionária. O cabo utilizado foi o CAA 795 MCM (Tern), com dois valores de carga de esticamento distintos, equivalentes a 30 e 34,4% da carga de ruptura nominal do cabo. Cada ensaio foi feito em duas ou três frequências de ressonância e com vários valores de amplitudes de deslocamento.

A partir dos dados gerados nestes ensaios foi possível verificar alguns resultados esperados após o estudo da teoria. Dentre eles está o aumento da potência dissipada com o aumento da tensão da frequência ou do da amplitude utilizada. Para ambos os casos foi possível verificar que o aumento era não linear. Adicionalmente, foi verificado que a carga de esticamento (diretamente ligada à tensão média no condutor) é inversamente proporcional ao auto-amortecimento do cabo.

Foram realizados ainda testes para verificar a influência da rigidez no acoplamento entre o cabo e o *shaker* no auto-amortecimento obtido. Para isso foram utilizadas duas configurações da conexão flexível e um acoplamento completamente rígido. Estes ensaios demonstraram um crescimento na potência dissipada com o aumento da rigidez da conexão. Considerando os resultados obtidos neste trabalho, pode-se dizer que a influência do peso da parte vibrante do *shaker* no ensaio gera dados muito superiores

àqueles obtidos com o uso de um acoplamento flexível. As variações chegaram a uma ordem de grandeza superior (valores aproximadamente 10 vezes maiores). Este erro pode ser perigoso, se o valor de auto-amortecimento obtido nos testes for utilizado em projeto para prever uma diminuição na amplitude de deslocamento (e tensão) no condutor instalado em campo.

A comparação dos resultados obtidos utilizando os dois métodos e a observação de fenômenos esperados permitiram validar tanto a bancada quanto a metodologia. Dentre os dois métodos, foi observada uma consistência maior nos dados obtidos utilizando o Método da Potência. Uma possível causa levantada para os dados inesperados encontrados no Método da Onda Estacionária, apresentados no gráfico da Figura 4.2, é a dificuldade no correto posicionamento dos acelerômetros utilizados nesta metodologia. Este e outros problemas encontrados durante os testes ainda permaneceram após a conclusão deste projeto. Para estes problemas foram sugeridas possíveis soluções, abordadas a seguir.

## **5.2 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS**

A partir da validação da bancada de ensaios para a realização de testes de auto-amortecimento, muitos novos projetos podem ser criados para a verificação deste valor em diversas configurações de condutores. Novos ensaios permitirão a comparação de geometrias ou materiais que dissipem mais energia, reduzindo o dano provocado pela fadiga eólica e aumentando a vida útil dos cabos instalados nas linhas de transmissão.

Para que a bancada possa estar totalmente adequada para a realização de testes, dois problemas principais devem ser solucionados: a reduzida diferença de altura entre os grampos rígidos e o *shaker*; e o posicionamento do acoplamento deslocado do centro do vão ativo.

Como solução para o aumento da diferença de altura entre as extremidades do vão ativo e o *shaker*, é sugerido aumentar os apoios nos quais os grampos rígidos são fixados. Um aumento nesta diferença de altura possibilitará a realização de ensaios com cargas de esticamento menores, mais próximas àquelas utilizadas em campo. Além disso, poderão ser utilizadas frequências menores e amplitudes de vibração maiores, aumentando a faixa de dados obtidos e a possibilidade de comparação de condutores.

A defasagem na localização do *shaker* em relação ao centro da bancada pode ser solucionada com a ampliação do bloco fixo, no qual o equipamento é instalado, porém isso gerará custos. Uma solução mais simples e que pode ser feita na própria oficina é o deslocamento dos grampos de rígidos, modificando o apoio no qual eles são instalados. Esta medida, porém, tem que ser realizada de forma a não comprometer a rigidez da conexão entre o grampo e o bloco de ancoragem.

Ensaio utilizando o Método do Decaimento podem ser realizados na nova bancada do LAB CABOS/UnB. Para isso é necessária a construção de um dispositivo para realizar o desacoplamento entre o cabo e o *shaker*, conforme apresentado no item 2.3.1.3 do presente trabalho.

Além da realização de testes de auto-amortecimento de condutores, também poderão ser realizados ensaios de equipamentos como amortecedores, utilizados em campo para proteção dos condutores instalados em uma linha de transmissão. O conhecimento da eficiência destes equipamentos é importante pois eles fornecem uma alternativa para aumentar a durabilidade dos cabos e reduzir custos de instalação de linhas de transmissão.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Atlas de energia elétrica ([http://www.aneel.gov.br/visualizar\\_texto.cfm?idtxt=1689](http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1689))  
Atlas de energia elétrica do Brasil / Agência Nacional de Energia Elétrica. 3. ed. –  
Brasília, ANEEL, 2008.

AZEVEDO, C. R. F., CRESCOM, T., Failure Analysis of Aluminum Cable Steel Reinforced (ACSR) Conductor of the Transmission Line Crossing the Paraná River, Engineering Failure Analysis”, 9, 2002, pp. 645-664.

Banco de Informações de Geração (BIG). Disponível em:  
<<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>> Acesso  
em 17 de agosto de 2015.

CEPEL, Centro de Estudos de Produção de Energia Elétrica, Atlas de Potencial Eólico Brasileiro, Disponível em:  
<[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas\\_eolico/mapas\\_1a.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/mapas_1a.pdf)>  
Acesso em 17 de agosto de 2015.

CIGRE B2.11.04, *Overhead conductor safe design tension with respect to aeolian vibrations*, June, 2015.

CIGRE B2.25-482, *State of the art for testing self-damping characteristics of stranded conductors for overhead lines*, December, 2011.

CIGRE, SC22, WG04, *Guide for Endurance Tests of Conductors Inside Clamps*, Electra, Nº 100, pp. 77-86, May, 1985.

CLAREN, R., DIANA, G., *Mathematical Analysis of Transmission Line Vibration*, IEEE Transactions On Power Apparatus And Systems, Vol. Pas-88, No. 12, December 1969.

COSSOLINO, L. C., PEREIRA, A. H. A., *Amortecimento: classificação e métodos de determinação*, 2010.

EPRI, Transmission line reference book: "The orange Book". Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA, 2006.

FADEL, A. A., Avaliação do Efeito de Tracionamento em Elevados Níveis de EDS Sobre a Resistência em Fadiga do Condutor IBIS, UnB, 2010.

FRICKE JR., E. G., RAWLINS, C. B. (1968), *Importance of Fretting in Vibration Fatigue of Stranded Conductors*, IEEE Transactions Paper, Vol. PAS-87, No 6, Jun, pp. 1381 – 1384.

HARD, A. R., HOLBEN, R., D., *Application of the Vibration Decay Test to Transmission Line Conductors*”, Julho, 1967.

HENRIQUES, A. M. D., Bancada de Ensaios Mecânicos à Fadiga de Cabos Condutores de Energia Tese de Doutorado, Universidade de Brasília-UnB, 2006

IEEE, Std 563, *Guide on Self Damping Measurements*, 1978 (Reaffirmed 26 September 2007).

IEEE, Std 664, *Guide for Laboratory Measurement of Power Dissipation Characteristics of Aeolian Vibration Dampers for Single Conductor*, 1993.

POFFENBERGER, J.C., AND SWART, R. L., *Differential Displacement and Dynamic Conductor Strain*, IEEE Transactions Paper, Vol PAS 84, pp. 281-289, 1965.

RAWLINS, C. B., *Fatigue of Overhead Conductors*, Transmission Line Reference Book, Electrical Power Research Institute, pp. 51-81, Palo Alto CA, 1979.

RAWLINS, C. B., *Recent Developments in Conductor Vibration Research*, Alcoa Technical Paper No 13, Aluminium Co. of America, Pittsburgh, Pa., 1958.

Relatório ANEEL 2013 / Agência Nacional de Energia Elétrica. - Brasília: ANEEL, 2014.

TOMKINS, J. S., MERRILL, L. L., JONES, B. L. “*Quantitative Relationships in Conductor Vibration Damping*” AIEE, Transactions, pt III, vol. 75, pg 879-884, Outubro, 1956.

VARNEY, T., Notes on the vibration of transmission line conductors, Trans. AIEE 45, p.791-795, 1926.

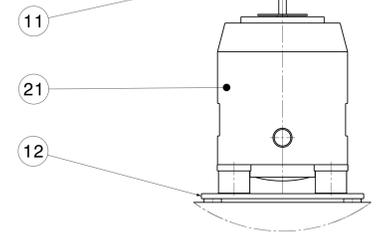
ZETTERHOLM, O. D., *Bare Conductors and Mechanical Calculation of Overhead Conductors*, CIGRÉ Session 1960, Report No. 223.

## **7 ANEXOS**

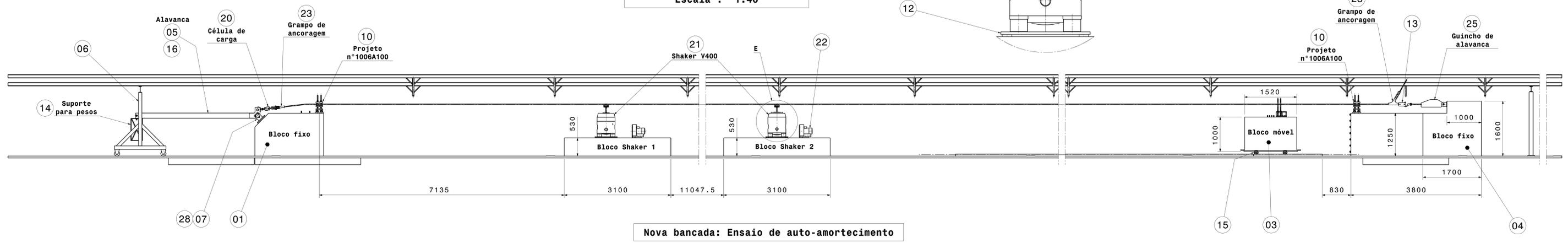
### **7.1 ANEXO A – DESENHOS TÉCNICOS DA BANCADA DE ENSAIOS**

Data	Tipo da revisão	Rev.
04/11/13	Novas posições dos blocos	a

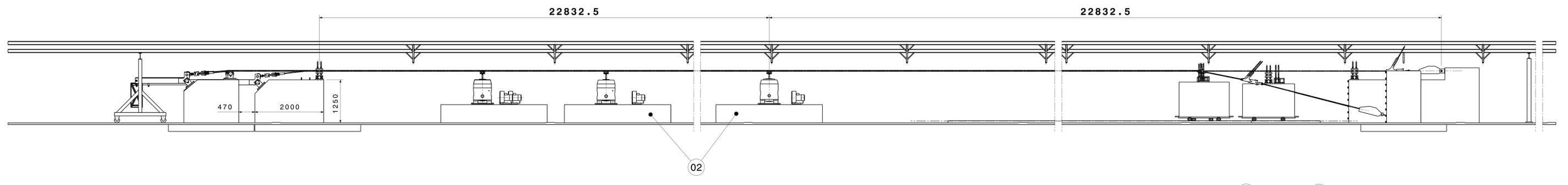
Detalhe E (Shaker)  
Escala : 1:10



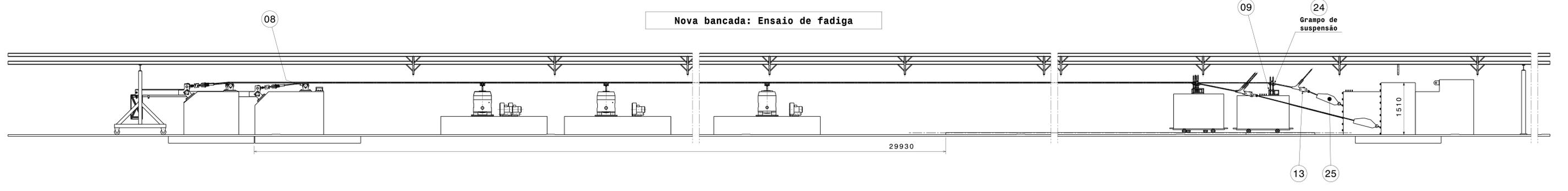
Vista com nova bancada isolada  
Escala : 1:40



Nova bancada: Ensaio de auto-amortecimento



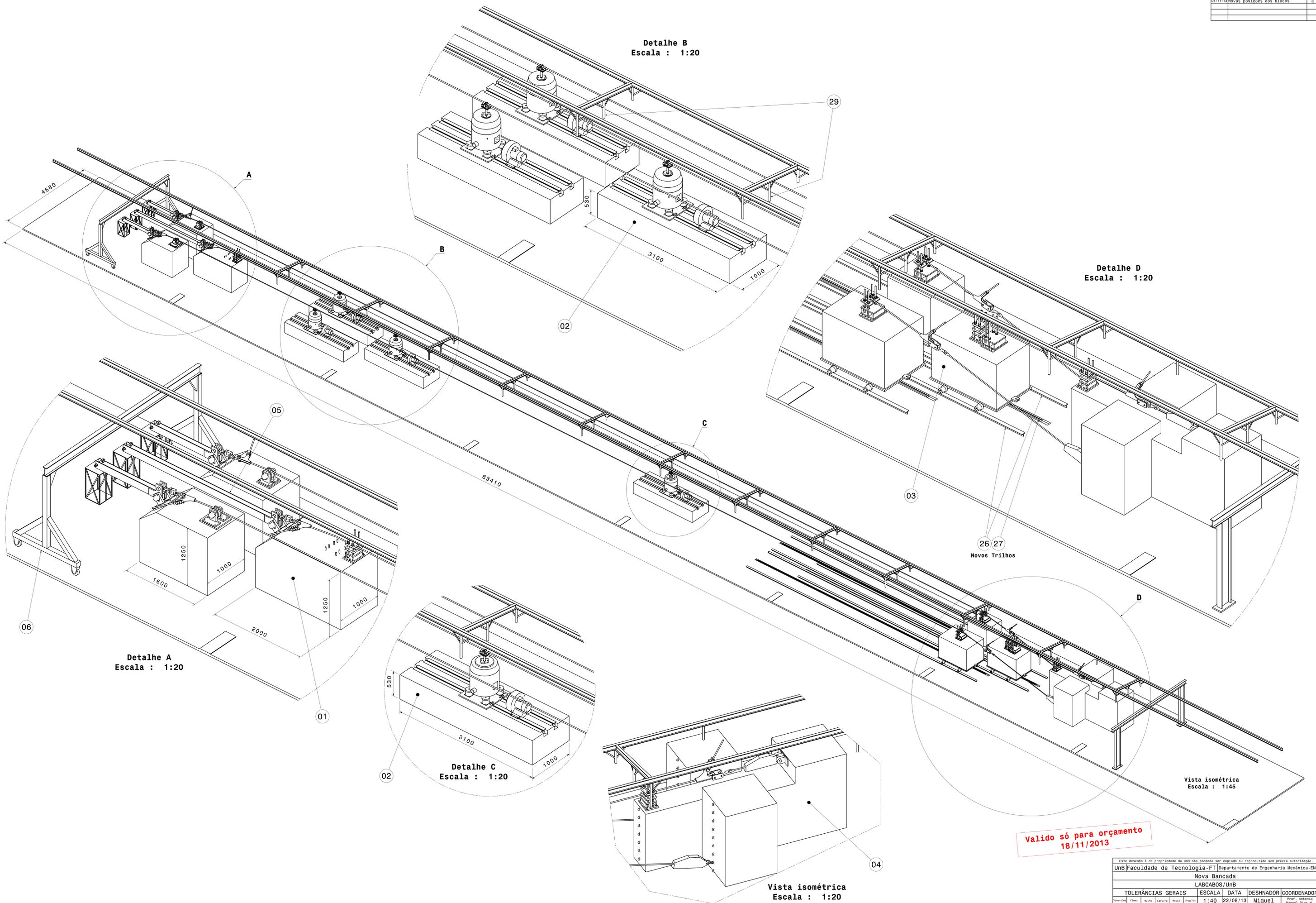
Nova bancada: Ensaio de fadiga



Vista superior do laboratório  
Escala : 1:40

Valido só para orçamento  
18/11/2013

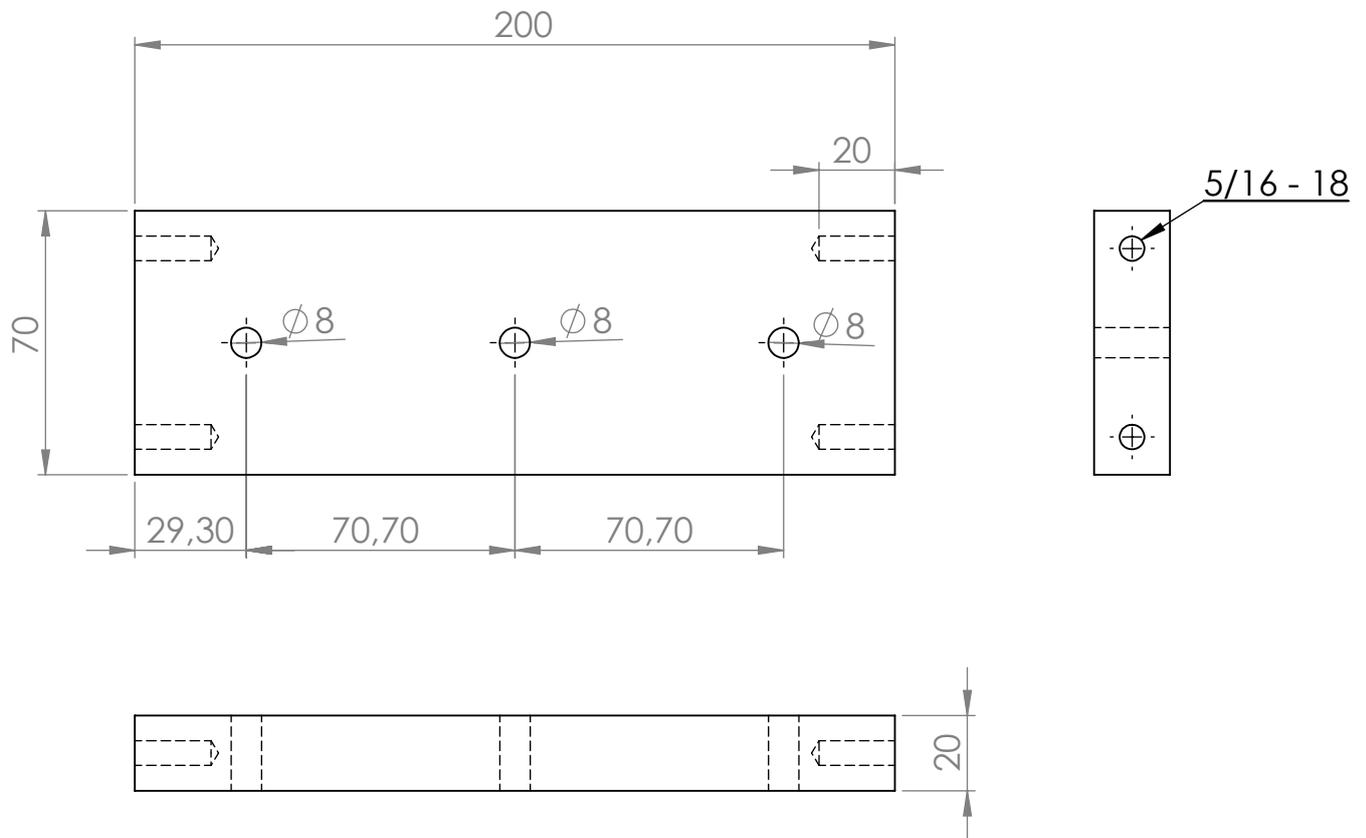
Este desenho é de propriedade da UnB não podendo ser copiado ou reproduzido sem prévia autorização.									
UnB Faculdade de Tecnologia - FT Departamento de Engenharia Mecânica - EM									
Nova Bancada									
LABCABOS/UnB									
TOLERÂNCIAS GERAIS	ESCALA	DATA	DESHNADOR	COORDENADOR					
<30	1:40	22/08/13	Miguel	Prof. Antonio Manoel Silva Jr.					
>30	AO	UNB	1006A00	1/2					



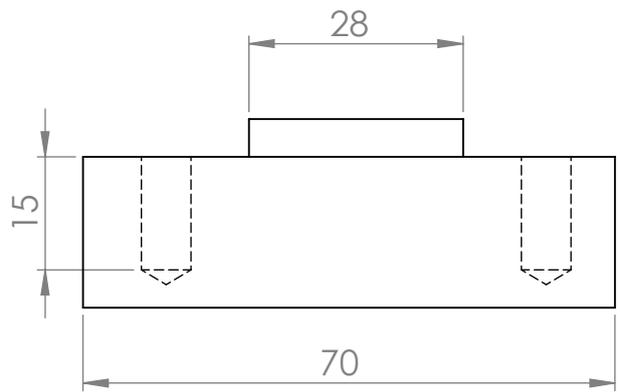
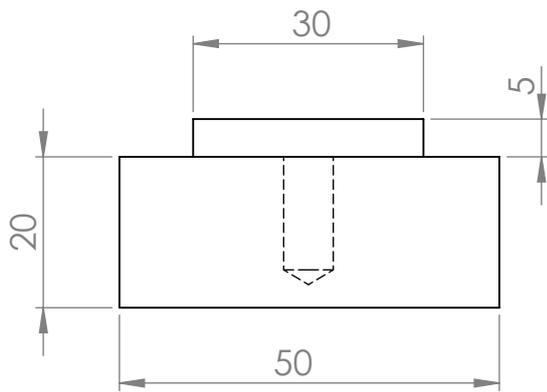
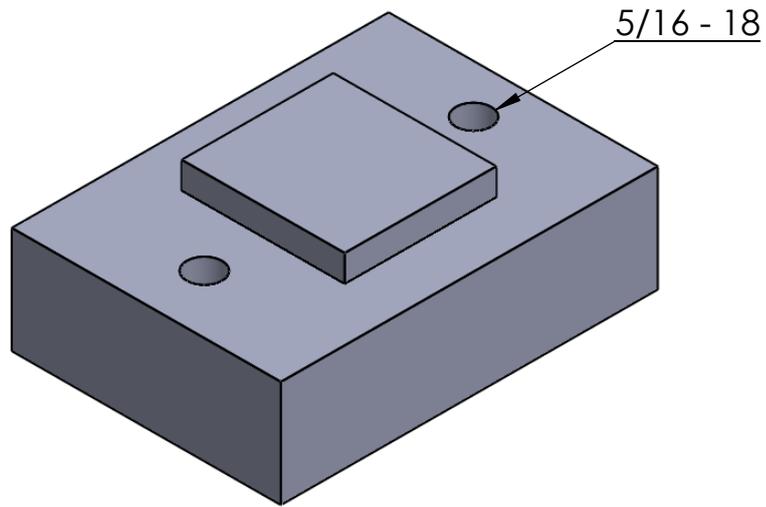
Valido só para orçamento  
18/11/2013

Este desenho é de propriedade da UnB não podendo ser copiado ou reproduzido sem prévia autorização.									
UnB Faculdade de Tecnologia-FT Departamento de Engenharia Mecânica-EM									
Nova Bancada									
LABCABOS/UnB									
TOLERÂNCIAS GERAIS	ESCALA	DATA	DESHNADOR	COORDENADOR					
<30	1:40	22/08/13	Miguel	Prof. Antonio Manoel Silva Jr.					
>30	AO	UnB	1006A00	2/2					

## **7.2 ANEXO B – DESENHOS TÉCNICOS DA CONEXÃO FLEXÍVEL**

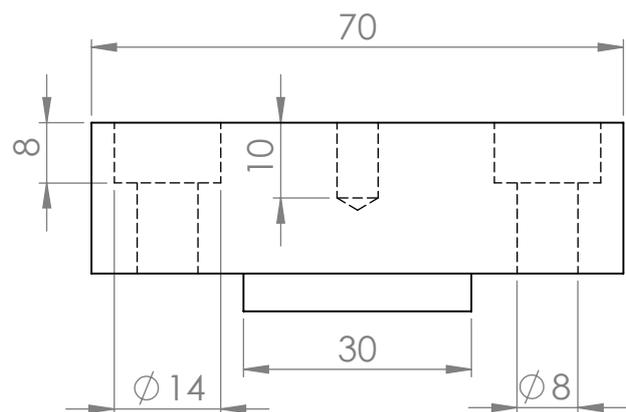
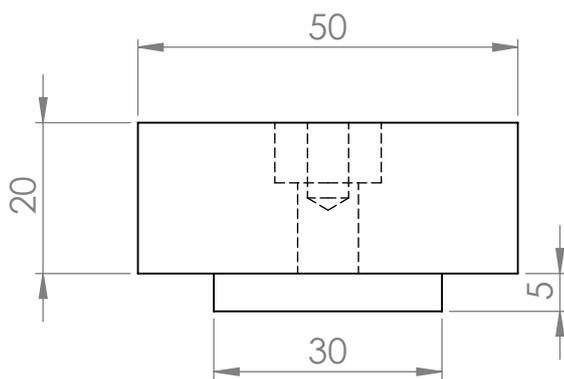
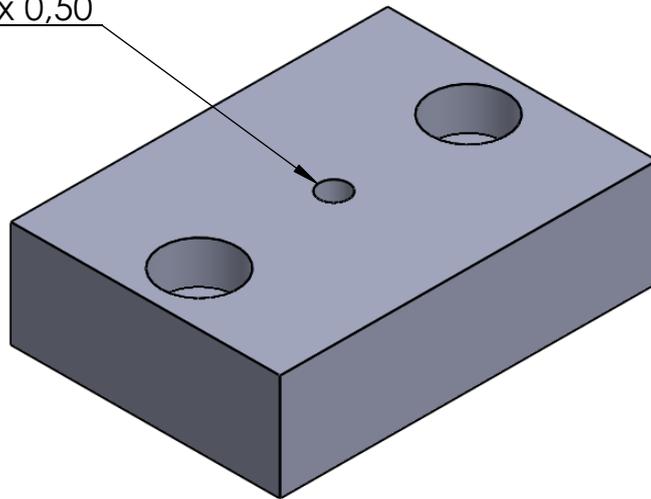


	NOME	ASSINATURA	DATA			TÍTULO:	
DES.						Base	
VERIF.							
APROV.							
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS.			MATERIAL: Alumínio		DES. Nº	01	A4
							FOLHA 1 DE 5

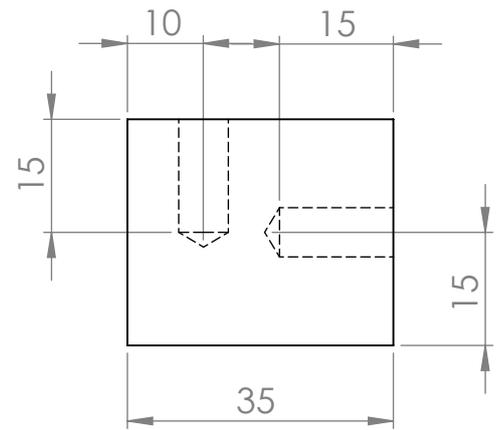
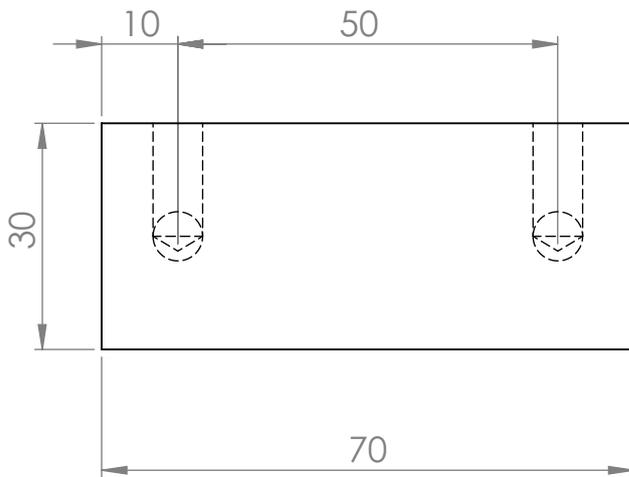
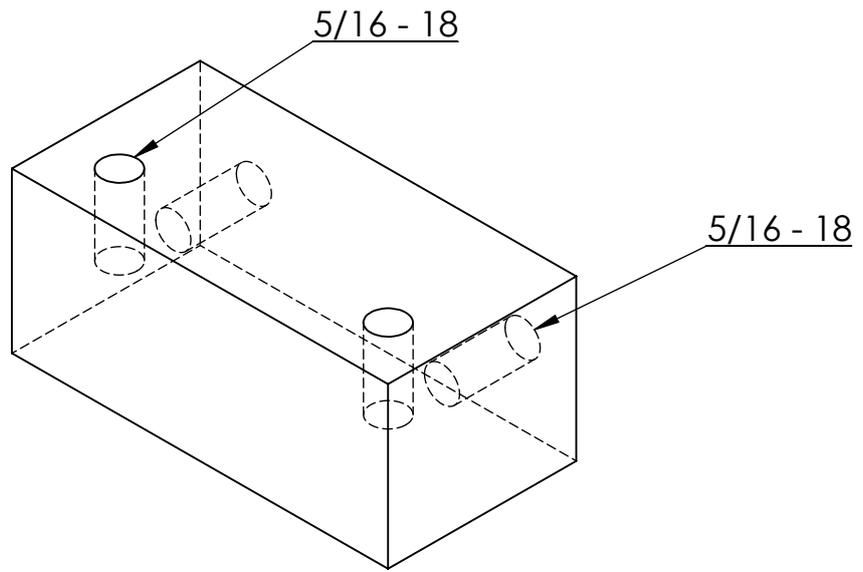


	NOME	ASSINATURA	DATA			TÍTULO:
DES.						Bloco Cabo Inferior
VERIF.						
APROV.						
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS.			MATERIAL: Alumínio		DES. Nº	02
						FOLHA 2 DE 5

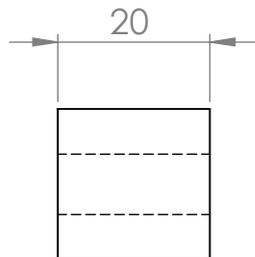
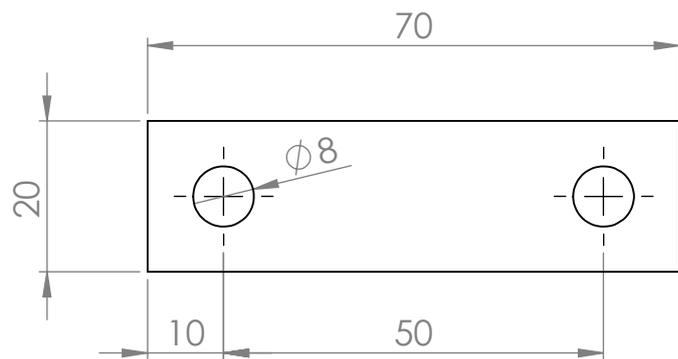
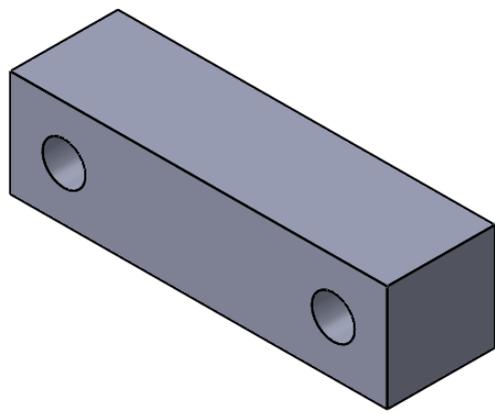
M3 x 0,50



	NOME	ASSINATURA	DATA		TÍTULO:		
DES.					Bloco Cabo Superior		
VERIF.							
APROV.							
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS.				MATERIAL: Alumínio	DES. Nº	03	A4
						FOLHA 3 DE 5	



	NOME	ASSINATURA	DATA			TÍTULO:	<h1>Bloco Junção</h1>	
DES.								
VERIF.								
APROV.								
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS.			MATERIAL: Alumínio			DES. N°	04	A4
						FOLHA 4 DE 5		



	NOME	ASSINATURA	DATA				TÍTULO:	
DES.							Blocos Aperto	
VERIF.								
APROV.								
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS.			MATERIAL: Alumínio			DES. Nº	05	A4
							FOLHA 5 DE 5	