

**PROJETO DE GRADUAÇÃO II**

**PROJETO DE TERMINAL PARA A  
REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE  
AUTOAMORTECIMENTO SEGUNDO O  
MÉTODO DA POTÊNCIA**

Por  
**HENRIQUE TOMÉ BARBOSA**

Brasília, 03 de julho de 2014.

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica

## PROJETO DE GRADUAÇÃO II

# PROJETO DE TERMINAL PARA A REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE AUTOAMORTECIMENTO SEGUNDO O MÉTODO DA POTÊNCIA

POR,

**HENRIQUE TOMÉ BARBOSA**

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro Mecânico.

### **Banca Examinadora:**

**Jorge Luiz Ferreira de Almeida**

Prof<sup>a</sup>. Aida Alves Fadel, UnB/ ENM (Orientador)

---

Prof. Antônio Manoel Dias Henriques, UnB/ ENM

---

Prof. Jorge Luiz de Almeida Ferreira, UnB/ ENM

---

Brasília, 03 de julho de 2014.

## **Dedicatória**

*Dedico este trabalho à minha mãe e minhas irmãs: Lídia, Laura e Lorena. Também à minha querida Renata.*

---

## RESUMO

O presente trabalho trata da adequação da bancada de testes do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia (LFIECCE) da Universidade de Brasília para a condução de ensaios de autoamortecimento segundo o guia IEEE STD 563-1978. Para tal será projetada uma terminação fixa adequada para testes de autoamortecimento em cabos condutores de várias espessuras. Este Projeto de Graduação representa um esforço para o estabelecimento de uma estrutura adequada para a determinação de características fundamentais do comportamento mecânico de cabos condutores de energia elétrica, como o autoamortecimento, visando estabelecer, com confiabilidade, parâmetros de projeto e manutenção de linhas de transmissão de energia elétrica.

---

## ABSTRACT

This paper addresses the adequacy of the test bench of the Laboratory of Fatigue and Structural Integrity of Cables Power Conductors (LFIECCE) at the University of Brasilia for driving autodamping tests according to IEEE STD 563-1978 standard. For this, an appropriate fixed termination will be designed to run autodamping tests in power cables of various thicknesses. This Graduation Project is another effort for the establishment of an appropriate framework for determining the fundamental mechanical characteristics of electricity cable conductor's behavior, as well as the selfdamping, to establish with reliability, design parameters and maintenance of power transmission lines.

# SUMÁRIO

<b>Símbolos Gregos .....</b>	<b>14</b>
<b>Grupos Adimensionais.....</b>	<b>14</b>
<b>Siglas .....</b>	<b>14</b>
<b>1. Introdução .....</b>	<b>16</b>
1.1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA.....	16
1.2. CENÁRIO PARA DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO .....	16
1.3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA MECÂNICO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO .....	17
1.4. JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	18
1.5. O LABORATÓRIO DE FADIGA E INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE CABOS CONDUTORES DE ENERGIA (LFIECCE).....	18
1.6. OBJETIVOS GERAIS.....	19
1.7. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
<b>2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA .....</b>	<b>21</b>
2.1. LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA .....	21
2.1. CABOS CONDUTORES DE ENERGIA ELÉTRICA.....	22
2.2. CABOS CONDUTORES TIPO CAA.....	23
<b>3. VIBRAÇÕES EM CABOS CONDUTORES DE ENERGIA .....</b>	<b>25</b>
3.1. VIBRAÇÕES COM 1 GRAU DE LIBERDADE.....	25
3.2. CORDA VIBRANTE.....	26
3.2.1. RESSONÂNCIA.....	28
3.3. VIBRAÇÕES DOS CONDUTORES .....	29
3.4. OSCILAÇÕES DE SUBVÃO .....	30
3.5. VIBRAÇÕES DE GALOPE.....	31
3.6. VIBRAÇÕES EÓLICAS SIMPLES.....	31

3.7. ANÁLISE FÍSICA.....	33
3.8. A FADIGA POR FRETING NOS CABOS CONDUTORES .....	37
3.8.1. EQUAÇÃO DE POFFENBERGER-SWART .....	38
<b>4. AUTOAMORTECIMENTO.....</b>	<b>42</b>
4.1. CONCEITOS INTRODUTÓRIOS .....	42
4.2. MEDIÇÃO DO AUTOAMORTECIMENTO EM CABOS CONDUTORES .....	43
4.2.1. MÉTODO DAS VIBRAÇÕES LIVRES .....	43
4.2.2. MÉTODO DAS VIBRAÇÕES FORÇADAS .....	43
4.3. TEORIA DOS METODOS DE VIBRAÇÃO FORÇADA .....	44
4.3.1. MÉTODO DA ONDA ESTACIONÁRIA .....	44
4.2. MÉTODO DA POTÊNCIA .....	46
4.3. GUIA IEEE STD 563-1978 .....	47
4.3.1. CONDUTOR .....	47
4.3.2. REQUERIMENTOS PARA O VÃO DE TESTE.....	47
4.3.3. TERMINAIS DE FIXAÇÃO.....	48
4.3.4. VARIÁVEIS E PROCEDIMENTOS PRESCRITOS NO ENSAIO .....	50
4.3.5. APLICAÇÃO DO CARREGAMENTO: O GERADOR DE VIBRAÇÕES ( <i>SHAKER</i> ) .....	50
<b>5. METODOLOGIA PARA ENSAIOS.....</b>	<b>52</b>
5.1. MEDIÇÃO DE POTÊNCIA .....	52
5.1.1. VALORES RECOMENDADOS PARA $T, \ell, f, Y$ .....	53
5.1.2. COLETA E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	53
5.1.3. Método da onda Estacionária .....	54
<b>6. APARATO EXPERIMENTAL EXISTENTE NO LFIECCE .....</b>	<b>56</b>
6.1. A BANCADA.....	56
6.1.1. O MECANISMO DE FIXAÇÃO, APLICAÇÃO E CONTROLE DE TRAÇÃO DE CABOS .....	57
6.1.2. MECANISMO DE APLICAÇÃO DE CARGA PARA VIBRAÇÃO ( <i>SHAKER</i> ).....	60

6.1.3.	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	61
<b>7.</b>	<b>ADAPTAÇÃO PROPOSTA À BANCADA: PROJETO CONCEITUAL.....</b>	<b>63</b>
7.1.	PROPOSTAS INICIAIS .....	63
7.2.	PROPOSTA FINAL .....	65
7.2.1.	BASE .....	65
7.2.2.	Garras.....	66
<b>8.</b>	<b>GEOMETRIAS E FATORES DE SEGURANÇA: MEMORIAL DE CÁLCULO.....</b>	<b>67</b>
8.1.	FORÇA DE TRAÇÃO DO CONDUTOR .....	67
8.2.	PARAFUSOS DO BLOCO FIXO .....	68
8.3.	PARAFUSOS DE FIXAÇÃO DAS GARRAS .....	69
8.4.	GEOMETRIA DAS COLUNAS .....	69
8.5.	SOLDA DAS COLUNAS.....	70
8.6.	GARRAS .....	71
<b>9.</b>	<b>MEMORIAL DE CÁLCULO .....</b>	<b>72</b>
9.1.	PARAFUSOS DO BLOCO FIXO .....	72
9.3.	PARAFUSOS DAS GARRAS.....	75
9.4.	COLUNAS .....	78
9.5.	SOLDA DAS COLUNAS.....	79
9.6.	GARRAS .....	82
<b>10.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>85</b>
<b>11.</b>	<b>DESENHOS DE FABRICAÇÃO .....</b>	<b>88</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais elementos das linhas de transmissão (Fuchs, de Almeida, Labegalini, & Labegalini, 1992). .....	22
Figura 2 - Cabo com camadas de torção alternante.....	23
Figura 3 - Cabo com alma de aço (Chanal, Lévêqe, & Porcheron, 2003).....	23
Figura 4 - Cabo de 61 fios com condutor central (Chanal, Lévêqe, & Porcheron, 2003)..	24
Figura 5 - Cabo CAA: coroa de fios de alumínio e alma de aço (Lavandoski, 2005).....	24
Figura 6 - Modelo idealizado de um sistema massa-mola.....	25
Figura 7 - Tipos de amortecimento para vibrações livres. ....	26
Figura 8 - Forças atuando em condutor sob ação do vento. a) sem acúmulo de gelo b) diferentes posicionamentos de gelo; VW é à força do vento; QA é à força de sustentação; QL é a força de arraste (Kiessling, Nefzger, & Nolasco, 2003).....	31
Figura 9 - Tipos de escoamento ao redor do condutor de acordo com número de Reynolds (Electrical Power Research Institute, 1979).....	33
Figura 10 - Relação entre os números de <i>Strouhal</i> e <i>Reynolds</i> (Fuchs, de Almeida, & Labegalini, 1992). ....	34
Figura 11 - Forma de onda com vibração-batimento com mais de duas frequências (Electrical Power Research Institute, 1979).....	35
Figura 12 - Variações do comprimento de onda ( $\lambda$ ) com o aumento da tração (T) no condutor (Furtado, 2001).....	36
Figura 13 – Grampo de suspensão, ponto mais provável de ruptura do condutor (Murça & Kaje, 2009).....	38
Figura 14 – Esquema da montagem cabo-grampo (Fadel, 2010).....	38
Figura 15 - (a) Foto de um cabo condutor ACSR em corte, (b) Regiões de contato (Fadel, 2010).....	40

Figura 16 – Fadiga por Fretting- a) Intenso desgaste superficial, com fratura de fios de alumínio, na camada externa do cabo ACSR, b) Presença de pó escuro após desmontagem do conjunto cabo/grampo c) Marcas elípticas de fretting e fraturas de fios da camada interna do cabo. ....	41
Figura 17 - Representação Esquemática do Vão com Condutor Vibrando (IEEE, 1978)..	45
Figura 18 - Configuração de vão de testes (IEEE, 1978). ....	48
Figura 19 - Terminal flexível (IEEE, 1978). ....	49
Figura 20 - Terminal fixo convencional (IEEE, 1978).....	49
Figura 21 - <i>Shaker</i> (IEEE, 1978). ....	51
Figura 22- Exemplo da dissipação de potência no condutor (IEEE, 1978).....	54
Figura 23 - Desenho Esquemático da bancada de ensaios (Murça & Kaje, 2009).....	56
Figura 24 - Tifor preso ao Bloco de Ancoragem.....	57
Figura 25 - Grampo de Fixação.....	57
Figura 26 - Sistema de tração do cabo.....	58
Figura 27 – Controlador do atuador linear. ....	59
Figura 28 - Célula de carga montada no bloco fixo. ....	59
Figura 29 - Gefran, indicador da célula de carga. ....	59
Figura 30 - <i>Shakers</i> Data Physics V400 HG .....	60
Figura 31 - Detalhe da haste atuadora no shaker.....	61
Figura 32 - Esquema de instrumentação da bancada.....	62
Figura 33 - Projeto inicial.....	63
Figura 34 - Base reformulada. ....	64
Figura 35 - Modelo de sapata. ....	65

Figura 36 - Modelo do porta-sapatas.....	65
Figura 37 – Projeto final da base de fixação das garras. ....	66
Figura 38 - Projeto final das garras. ....	66
Figura 39 – Forças solicitantes no condutor.....	67
Figura 40 - Bloco fixo. ....	68
Figura 41 - Vista lateral da montagem e esforços solicitantes. ....	68
Figura 42 - Vista à esquerda das bases do terminal.....	70
Figura 43 - Garra com sulco para encaixe do condutor.....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Movimentos introduzidos pelo vento (Furtado, 2001).....	30
Tabela 2 - Lista de símbolos [IEEE STD 563].....	45
Tabela 3 - Modelo para anotação de ensaios de autoamortecimento. ....	53

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

$A$	amplitude de vibração	[m]
$c$	amortecimento	[N.s/m]
$d_a$	diâmetro do fio de aço	[mm]
$d$	diâmetro dos fios de alumínio da camada externa do cabo	[mm]
$D$	diâmetro do fio condutor	[mm]
$E_a$	módulo de Young do alumínio	[MPa]
$E_s$	módulo de Young do aço	[MPa]
$f$	frequência de vibração	[Hz]
$k$	rigidez da mola	[N/m]
$K$	constante da fórmula de Poffenberger-Swart	[N/mm <sup>3</sup> ]
$L$	comprimento do cabo	[m]
$L$	comprimento do vão livre	[m]
$\ell$	comprimento nodal	[m]
$F_{apli}$	força aplicada pelo <i>shaker</i>	[N]
$F(t)$	força periódica	[N]
$f_s$	frequência de desprendimento dos vórtices	[Hz]
$f_n$	frequência natural	[Hz]
$m$	massa por unidade de comprimento	[kg/m]
$m$	massa	[kg]

$p$	carga radial no contato em <i>fretting</i>	[N]
$P$	potência dissipada por unidade de comprimento	[mW/m]
$P_1$	potência do nó 1	[mW/m]
$P_2$	potência do nó 2	[mW/m]
$P_{dis}$	potência dissipada no cabo	[W]
$P_n$	potência dissipada no nó $n$	[mW/m]
$Q_A$	força de sustentação	[N]
$Q_L$	força de arraste	[N]
RTS	resistência à tração do cabo	[N]
$R_{mec}$	resistência mecânica por comprimento	[N.s/m]
$\sqrt{Tm}$	impedância característica ou impedância de onda	[kg/s]
$T$	período	[s]
$t$	tempo	[s]
T	carga de esticamento para a temperatura média durante a medição	[N]
$T$	tração na corda	[N]
$V_{shaker}$	velocidade do cabo no ponto de aplicação da força	[m/s]
V	velocidade do fluido	[m/s]
$V$	velocidade simples do antinó	[m/s]
$V_S$	velocidade de <i>Strouhal</i>	[m/s]
$V_w$	força do vento	[N]
$X$	amplitude da onda	[mm]

$x$	deslocamento	[m]
$x$	distância ao longo do cabo entre o UPC e o ponto de medição	[mm]
$Y_B$	amplitude de deslocamento pico a pico	[mm]
$Y_n$	dupla amplitude	[mm]

### Símbolos Gregos

$\sigma_a$	faixa de tensão dinâmica zero a pico	[N]
$\rho$	densidade linear	[kg/m]
$\omega_{ni}$	frequência natural do modo de vibração $i$	[rad/s]
$\omega$	frequência da força de excitação	[rad/s]
$\lambda$	comprimento de onda	[m]

### Grupos Adimensionais

$i$	modo de vibração
$j$	modo natural de vibração
$n_a$	número de fios de alumínio
$n_s$	número de fios de aço
$n$	número de ciclos
$Re$	Número de Reynolds
$S$	Número de Strouhal

### Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
------	--

ACSR	Aluminium Conductor Steel Reinforced
AIE	Agência Internacional de Energia
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTM	American Society for Testing and Materials
BBC	British Broadcasting Corporation
CA	Condutores de Alumínio
CAA	Condutores de Alumínio com Alma de Aço
CAL	Condutores de Alumínio Liga
CIGRE	Conseil International des Grands Réseaux Électriques
EDS	Every Day Stress
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IEEE	Institute of Aelectrical and Electronics Engineers
LFIECCE	Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de
Eletricidade	
UPC	Último Ponto de Contato
SIN	Sistema Interligado Nacional
STD	Standard
TCU	Tribunal de Contas da União
UNC	Unified National Coarse

## 1. Introdução

*Este capítulo apresenta a contextualização e motivação para o desenvolvimento deste trabalho, bem como estabelece os objetivos nele propostos. Descreve, ainda, a estrutura deste relatório.*

### 1.1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

O presente trabalho trata da adaptação da bancada de testes do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia (LFIECCE) da Universidade de Brasília para a condução de ensaios de autoamortecimento. Assim, este Projeto de Graduação representa mais um esforço do para o estabelecimento de uma estrutura adequada para a determinação de características fundamentais do comportamento mecânico de cabos condutores de energia elétrica visando estabelecer com confiabilidade parâmetros de projeto e manutenção de linhas de transmissão de energia elétrica.

### 1.2. CENARIO PARA DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

O Brasil já é o décimo maior consumidor de energia elétrica do globo, segundo a Agência Internacional de Energia (AIE). O consumo de energia elétrica brasileiro cresceu 38% desde 2001, acima da média global de 30%, e passará do patamar de consumo de 456,5 mil GWh no ano de 2010 para 730.100 GWh até 2020. Esse crescimento significa um aumento de aproximadamente 60% na demanda de energia elétrica do país em 10 anos (BBC, 2012).

Todavia, a energia elétrica é frequentemente produzida longe dos locais onde estão localizados seus consumidores, necessitando ser transportada. Assim, com o aumento da demanda e conseqüente aumento na geração de energia elétrica, torna-se necessária a ampliação da malha de distribuição de eletricidade.

Segundo a ANEEL, o segmento de transmissão no Brasil era composto em 2008 por mais de 90 mil quilômetros de linhas e operado por 64 concessionárias. A grande extensão da rede de transmissão no Brasil é explicada justamente pela configuração do seu segmento de geração, constituído na maior parte por usinas hidrelétricas instaladas em localidades distantes

dos centros consumidores. A principal característica desse segmento é a sua divisão em dois grandes blocos: o Sistema Interligado Nacional (SIN), que abrange a quase totalidade do território brasileiro, e os Sistemas Isolados, instalados principalmente na região (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2008). A EPE (Empresa de Pesquisa Energética) prevê um acréscimo de 11.179,33 km de linhas de transmissão (nas voltagens: 500 KV, 230 KV, 138 KV, 69 KV e 34,5 KV) ao sistema já implantado no Brasil (Empresa de Pesquisa Energética, 2005).

Em 2001 o rompimento de um cabo condutor da linha de transmissão de 460 kV, que atravessava o rio Paraná no estado de São Paulo, resultou numa série de “apagões”, como foram denominados pela população brasileira, deixando aproximadamente 67 milhões de moradores das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil sem energia elétrica por várias horas. Esse “apagão”, segundo o Tribunal de Contas de União (TCU), que divulgou um relatório sobre os efeitos daquela crise (nas empresas, no governo e para os consumidores), custou R\$ 45,2 bilhões ao Brasil (Basile, 2009).

### **1.3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA MECÂNICO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Devido à sua grande extensão, as linhas de transmissão elétrica acarretam alto custo para serem projetadas, construídas e mantidas pelas companhias distribuidoras de energia. Não existe uma estrutura tão grande em termos de massa e de comprimento, com tamanha flexibilidade atribuída ao sistema e tão exposta às intempéries da natureza (em sua maior parte pela ação do vento) como são as linhas de transmissão.

Os ventos incidentes sobre uma linha de transmissão podem induzir sobre ela diferentes formas de oscilações. Como exemplo as vibrações de galope, as de esteira ou eólicas puras, provocando fadiga mecânica à estrutura do condutor.

A falha por fadiga é um dos problemas mais graves relacionados às vibrações eólicas. Normalmente, a falha ocorre em locais onde a movimentação do cabo (principalmente vertical) é restrita por alguma razão. Por esse motivo a falha dos cabos ocorre geralmente nas proximidades ou mesmo dentro do grampo de sustentação dos cabos (Mourão, 2004).

Nesses pontos de restrição ocorre flexão do condutor em relação ao grampo de suspensão, que resulta em esforços dinâmicos dependentes da amplitude do movimento e responsáveis pela fadiga do material.

#### **1.4. JUSTIFICATIVA DO TRABALHO**

Numa linha de transmissão de alta tensão, quando o vento incide sobre um condutor, este lhe transmite energia mecânica, que o faz vibrar. Essa vibração é conhecida como vibração induzida por escoamento de fluido (Rao, 2008) e pode ocasionar a quebra e consequente falha do condutor. Para analisar esse tipo de influência, uma das importantes características do comportamento mecânico de um condutor elétrico é sua capacidade de autoamortecimento ou amortecimento próprio. Isto é, a sua capacidade de absorver energia do movimento.

Quando um condutor oscila, existem frequências de vibração de especial interesse, as quais são as frequências naturais, que resultam nos modos naturais de vibração. Quando o condutor é excitado numa frequência muito próxima à frequência natural ocorre o fenômeno da ressonância, que é quando a amplitude de vibração da estrutura cresce exponencialmente, levando-a falha quando o limite de ruptura do material constituinte é atingido.

O bom conhecimento das propriedades mecânicas das linhas de transmissão elétrica é de fundamental importância para que condutores mais eficientes para cada instalação específica possam ser projetados. Isso acarreta aumento na vida útil do condutor, proporcionando ao setor de manutenção parâmetros mais confiáveis, diminuindo custos e garantindo a entrega da energia elétrica aos consumidores. Como resultado o custo da produção brasileira de energia elétrica se torna menor, sua confiabilidade aumenta e essa estabilidade no fornecimento fomenta investimentos nos diversos setores da economia.

#### **1.5. O LABORATÓRIO DE FADIGA E INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE CABOS CONDUTORES DE ENERGIA (LFIECCE).**

Visando o estudo do comportamento mecânico dos condutores elétricos, em especial as falhas resultantes do mecanismo de fadiga por *fretting*, o Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília inaugurou em 2006 o Laboratório de Fadiga e

Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia (LFIECCE). A primeira bancada de testes do referido laboratório foi construída no ano de 2006 com recursos oriundos da Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos (FINATEC) e pela companhia de Transmissão de Energia Elétrica (Henriques, 2006). A segunda bancada foi construída no ano de 2010 em obra que trouxe melhorias ao LFIECCE como isolamento térmico, instalação de aparelhos de ar condicionado, projeto de execução de alinhadores de cabos condutores, etc (Fadel, 2010).

O LFIECCE permite ensaios a fim de estabelecer curvas para a determinação da vida em fadiga por *fretting* para cada diferente tipo de condutor, permitindo assim não somente a determinação de critérios confiáveis e realísticos, tanto para o projeto quanto para a manutenção das linhas de transmissão, bem como a avaliação do comportamento dos novos condutores (novas geometrias, materiais e processos de fabricação) que vem sendo desenvolvidos pelos fabricantes.

As bancadas do LFIECCE, que foram desenvolvidas originalmente para o estudo de vida em fadiga, permitem também testes e desenvolvimento de ferragens, amortecedores, e outros acessórios utilizados nas linhas de transmissão. Dada a grande demanda das empresas do setor elétrico por testes de autoamortecimento, pesquisas e trabalhos de graduação vêm sendo realizados de modo a determinar os ajustes necessários para atender à variedade de critérios estabelecidos para diferentes tipos de ensaios segundo a norma técnica IEEE Std 563-1978.

## **1.6. OBJETIVOS GERAIS**

Implementações às bancadas de ensaio de fadiga por *fretting* do LFIECCE, a fim de possibilitar a execução de ensaios de autoamortecimento em cabos condutores utilizando o Método da Potência, entre outros, de acordo com a norma IEEE 563.

## **1.7. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estudo das normas de autoamortecimento, em especial a do Método da Potência;
- Concepção de um dispositivo adequado à bancada já existente, que atenda à norma IEEE 563 para a realização de ensaios de autoamortecimento segundo o Método da

Potência, permitindo uma troca rápida do dispositivo e que não desconfigure drasticamente a função atual da bancada;

- Obtenção do desenho de fabricação do protótipo conceitual;
- Dimensionamento do dispositivo a partir de critérios de resistência mecânica;
- Ajustes no desenho técnico do protótipo de acordo com o dimensionamento;

## 2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

*As linhas de transmissão de energia exercem papel fundamental no desenvolvimento de um país. Ela é responsável pela entrega de energia aos consumidores, possibilitando a boa manutenção do mundo moderno.*

### 2.1. LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA

O desempenho elétrico das linhas de transmissão de energia elétrica está diretamente relacionado com as características de seus componentes, como também de sua configuração geométrica. Temos de um lado a suportabilidade elétrica de sua estrutura isolante e seu desempenho técnico, e do outro lado sua capacidade de suportar as solicitações mecânicas a que são submetidas, e devem ser consideradas concomitantemente (Henriques, 2006).

O transporte de energia elétrica pelas linhas de transmissão tem, dentro de um sistema elétrico, o caráter de “prestação de serviço”. Deverá, pois, ser eficiente, confiável e econômico. Para se transportar uma determinada quantidade de energia elétrica a uma distância preestabelecida, há um número muito grande de soluções possíveis, em função do grande número de variáveis associadas a uma linha (Fuchs, de Almeida, Labegalini, & Labegalini, 1992).

Uma linha de alta tensão é composta pelas seguintes partes principais:

- Cabos condutores de energia;
- Acessórios e estruturas isolantes;
- Estruturas de suportes e suas fundações;
- Cabos de guarda ou para-raios;
- Aterramentos;
- Acessórios diversos.

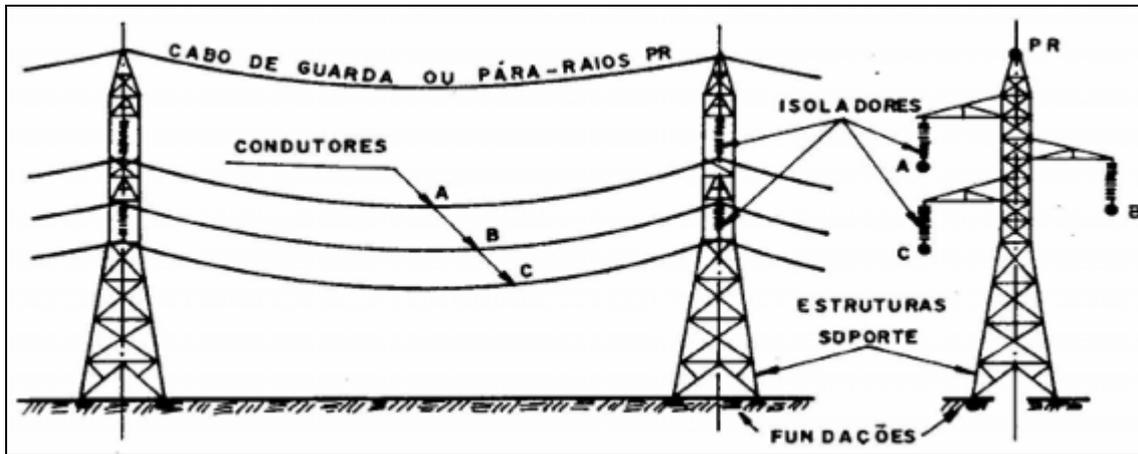


Figura 1 - Principais elementos das linhas de transmissão (Fuchs, de Almeida, Labegalini, & Labegalini, 1992).

## 2.1. CABOS CONDUTORES DE ENERGIA ELÉTRICA

O cabo condutor é, naturalmente, o elemento mais importante no transporte de energia elétrica, exigindo assim uma cuidadosa manutenção preventiva a fim de evitar-se comprometer o fornecimento de energia elétrica à população, prejuízos e danos às empresas fornecedoras e geradoras de energia.

Os cabos condutores aéreos apresentam-se em camadas de fios metálicos enrolados helicoidalmente, alternando-se o sentido de torção entre as camadas, como pode ser visto na Figura 2. Existe uma enorme variedade de cabos condutores, onde são variados suas espessuras, materiais e geometrias construtivas. Existem cabos homogêneos encordoados concentricamente que utilizam apenas alumínio 6201 em sua estrutura como material condutor e de sustentação, os condutores de alumínio liga denominados CAL. Cabos homogêneos constituídos exclusivamente por alumínio 1350 H-19, denominados CA, para os casos que não exigem alta resistência mecânica e cabos de alumínio com alma de aço galvanizado (CAA) (Nexans, 2013).

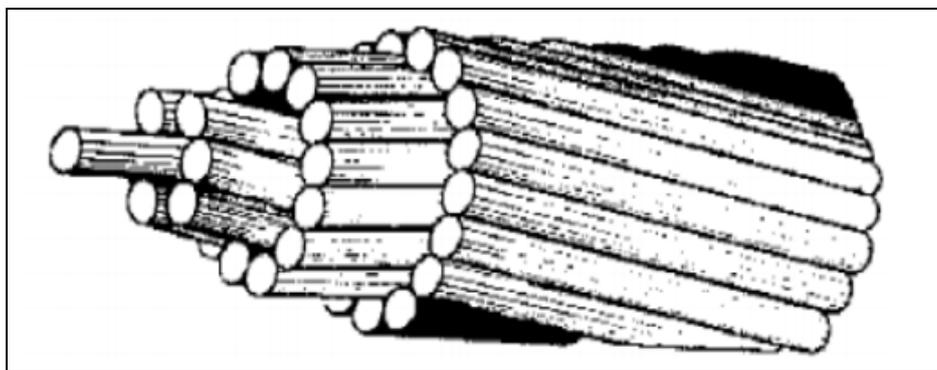


Figura 2 - Cabo com camadas de torção alternante.

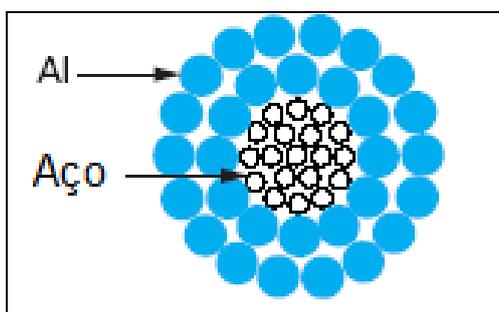


Figura 3 - Cabo com alma de aço (Chanal, Lévêqe, & Porcheron, 2003).

A norma ABNT NBR 7270 descreve o condutor elétrico tipo CAA, condutor de alumínio com alma de aço ou *Aluminium Conductor Steel Reinforced (ACSR)*, como composto por fios de alumínio 1350-H19, apresentando elevada condutividade térmica e elétrica. Ele possui 7 fios de aço galvanizado, dispostos no interior do cabo, denominado “alma”, proporcionando a elevação da resistência mecânica do condutor e é o mais utilizado nos ensaios do LFIECCE.

## 2.2. CABOS CONDUTORES TIPO CAA

Os cabos condutores apresentam-se em camadas de fios metálicos enrolados segundo uma trajetória helicoidal, alternando-se o sentido de torção entre as camadas, como mostra a Figura 4. Normalmente tais cabos possuem diâmetros variando entre 5 mm e 40 mm. Os cabos condutores não são revestidos de isolantes elétricos, uma vez que se almeja a redução do peso da estrutura e economia. Tal fato diferencia tais linhas suspensas das subterrâneas, visto que nas subterrâneas são utilizados condutores isolados.

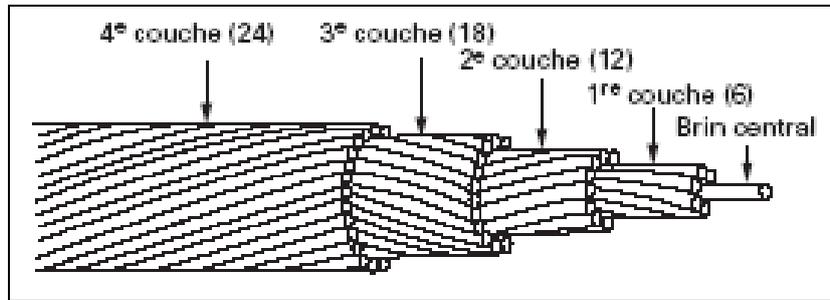


Figura 4 - Cabo de 61 fios com condutor central (Chanal, Lévêqe, & Porcheron, 2003).

Segundo a norma ABNT NBR 7270, o condutor elétrico do tipo CAA (Condutor de Alumínio com Alma de Aço) ou ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced) da Figura 5, é composto por fios de alumínio com têmpera H19, segundo a NBR 5118, e de aço zincado, conforme NBR 6756. A têmpera H19 adiciona dureza ao alumínio através de trabalho mecânico e o revestimento de zinco protege o aço contra corrosão.

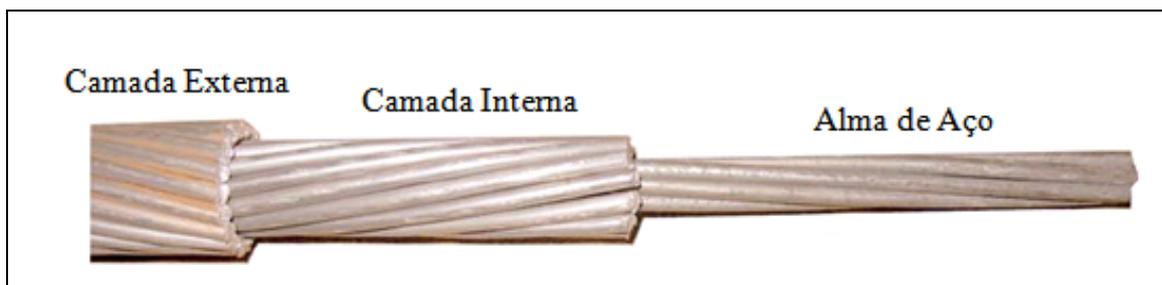


Figura 5 - Cabo CAA: coroa de fios de alumínio e alma de aço (Lavandoski, 2005).

Os fios de aço carbono galvanizado utilizados na fabricação da alma do condutor apresentam propriedades mecânicas, como resistência e dureza, maiores que as do alumínio, aumentando a vida útil do cabo. Entretanto, seu custo de produção é moderado, o que diminui o custo de produção final do condutor. Dessa forma a existência de uma camada de fios de alumínio envolvendo uma alma de aço busca garantir uma complementação das propriedades dos dois metais aliada à diminuição do custo de produção do condutor.

### 3. VIBRAÇÕES EM CABOS CONDUTORES DE ENERGIA

*Um breve estudo teórico de vibrações faz-se necessário para o entendimento dos mecanismos de fadiga dos condutores de eletricidade.*

#### 3.1. VIBRAÇÕES COM 1 GRAU DE LIBERDADE

Vibração é o movimento oscilatório de um corpo em torno de uma posição de referência. Cada ciclo de vibração leva um tempo “ $T$ ”, chamado período da onda, e o número de ciclos concluídos por um elemento no tempo de um segundo é chamado frequência “ $f$ ”.

Um sistema dinâmico é caracterizado por um corpo que possui massa e do qual as partes desse corpo são capazes de executar um movimento relativo. Todos os corpos que possuem massa e elasticidade são capazes de vibrar. A massa é inerente ao corpo enquanto a elasticidade é devida ao movimento relativo das partes desse corpo.

O grau de liberdade de um sistema vibratório é definido como o número de coordenadas espaciais independentes necessárias para definir sua configuração.

Um modelo idealizado de um sistema vibratório de 1 grau de liberdade é mostrado na figura a seguir:

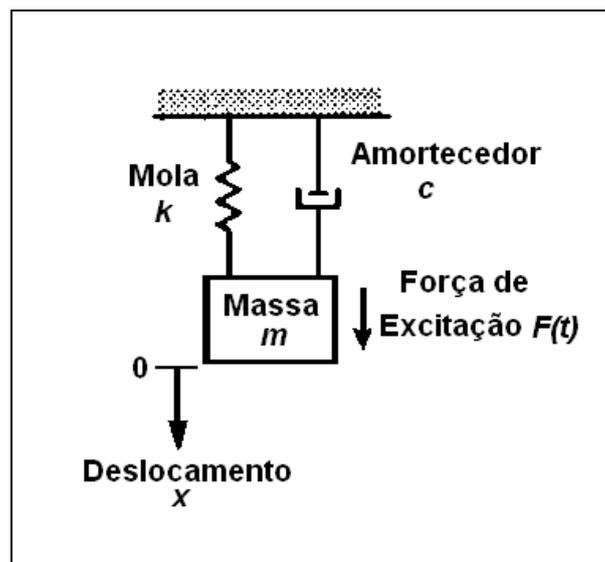


Figura 6 - Modelo idealizado de um sistema massa-mola.

Os elementos massa, mola e amortecedor na Figura 6 são usados para descrever o sistema físico, enquanto que a força de excitação é a representação da maneira pela qual a energia entra no sistema.

Movimentos periódicos são movimentos que se repetem no tempo e podem adquirir diferentes configurações, sendo o caso mais simples conhecido como “movimento harmônico”. Nesse caso a relação entre o deslocamento “ $x$ ” e o tempo “ $t$ ” pode ser expressa por  $x = Xsen(\omega t)$ , onde “ $X$ ” é constante e representa a amplitude do movimento.

Em um movimento onde a vibração é dita livre apenas uma energia inicial é introduzida no sistema. Os deslocamentos resultantes desse sistema dependem da magnitude do amortecimento presente. Se o amortecimento é leve, o sistema é dito subamortecido. O movimento subamortecido é marcado por uma diminuição da amplitude ao longo do tempo. Se o amortecimento é grande e o sistema não possui movimento transiente oscilatório diz-se que o sistema é superamortecido. Enquanto que no sistema dito criticamente amortecido o movimento do mesmo se situa entre os dois casos anteriores citados (Murça & Kaje, 2009). A Figura 7 exemplifica bem os tipos de movimentos vibratórios amortecidos.

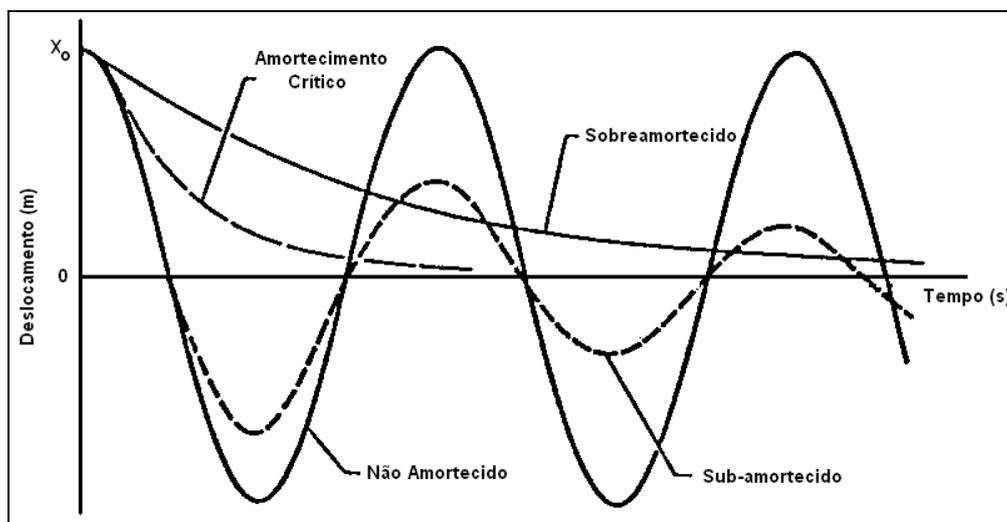


Figura 7 - Tipos de amortecimento para vibrações livres.

### 3.2. CORDA VIBRANTE

As vibrações em cordas são ondas que se propagam por todo o seu comprimento. Uma corda tem infinitos modos naturais de vibração. As frequências naturais de uma corda ou cabo são dadas pela Equação (1).

$$\omega_{ni} = \frac{i \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{T}{\rho}}}{L} \text{ [rad/s]} \quad (1)$$

$\omega_{ni}$  [rad/s] é a frequência natural do modo de vibração  $i$ ;

$T$  [N] é a tensão na corda;

$\rho$  [kg/m] é a densidade linear do cabo;

$L$  [m] é o comprimento do cabo;

$i$  é o número do modo de vibração, igual a 1, 2, 3,...

Para saber o valor da frequência natural em Hertz, utiliza-se a Equação (2):

$$f_n = \frac{\omega_{ni}}{2\pi} \text{ [Hz]} \quad (2)$$

O sistema da corda é composto por um número infinito de partículas mássicas infinitesimais que vibram livremente, porém apenas uma possui uma vibração forçada, e a frequência que é gerada nessa última é transferida para as demais. A expressão geral para a vibração livre no cabo é dada pela Equação (3):

$$y(x,t) = \sum_{j=1,2,3,\dots}^{\infty} (C_j \cdot \text{sen} \omega_{nj} t + D_j \cdot \text{cos} \omega_{nj} t) \left( \text{sen} \frac{i\pi x}{L} \right) \quad (3)$$

Esta equação mostra o deslocamento transversal ao longo do cabo, ela utiliza o principio de superposição, que é usado para representar a soma de todos os modos de vibração do cabo, porém as condições iniciais de velocidade e deslocamento influenciam as constantes  $C_j$  e  $D_j$ , quando estas condições iniciais favorecem o aparecimento da  $i$ ésima frequência natural as

constantes do iésimo termo serão tão maiores que os dos demais, que estes poderão ser desprezados.

### 3.2.1. RESSONÂNCIA

A ressonância é o fenômeno físico que ocorre quando o sistema é excitado por uma força harmônica cuja frequência da força  $\omega$  tende a ser igual a uma das frequências naturais do sistema  $\omega_n$ , resultando em vibrações com amplitudes maiores que as de costume. A Equação (4) abaixo caracteriza a amplitude de vibração como:

$$X = \frac{F_0}{m\omega_n} \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad [\text{m}] \quad (4)$$

$X$  [m] é a amplitude da onda;

$F_0$  [N] é a força de excitação;

$m$ [kg] é a massa do cabo;

$\omega$  [rad/s] é a frequência da força de excitação;

$\omega_n$  [rad/s] é a frequência natural de vibração.

Por essa equação pode-se notar que quando a frequência de excitação for muito próxima da frequência natural teremos o valor de  $X$  tendendo a valores muito altos, o que explica o movimento característico da corda. Podemos esclarecer ainda:

$$\lambda = \frac{2L}{n} \quad [\text{m}] \quad (5)$$

$\lambda$  [m] é o comprimento de onda;

$n$  é o número do modo de vibração.

No ponto onde a força é aplicada, num ponto fixo, teremos a solução de um sistema forçado:

$$x(t) = \sum_{j=1}^{\infty} \left( \frac{1}{1 - \left( \frac{\omega}{\omega_{n,j}} \right)^2} \right) \frac{F_0}{m} \text{sen}(\omega t) \quad [\text{m}] \quad (6)$$

$j$  é o modo natural de vibração, igual a 1, 2, 3,...

$x$  [m] é a amplitude da onda;

$F_0$  [N] é a força de excitação;

$m$  [kg] é a massa do cabo;

$\omega$  [rad/s] é a frequência da força de excitação;

$\omega_{nj}$  [rad/s] é a frequência natural de vibração referente ao modo de vibração.

Quando um modo de excitação é próximo do natural, este prevalecerá, sendo apenas ele observado em detrimento dos demais.

### 3.3. VIBRAÇÕES DOS CONDUTORES

As vibrações causadas pelos ventos são as responsáveis pelos principais problemas mecânicos existentes nas linhas de condução de energia. Os níveis de amplitude de vibração causados estão diretamente ligados à vida útil do condutor. A falta de informações para se prever com precisão o comportamento vibratório dos cabos resulta na limitação de parâmetros de projeto, tais como a sua carga de tração e a distância entre as torres.

As excitações causadas pelo vento podem ser de três tipos: as vibrações eólicas simples, as oscilações de subvão e as oscilações de galope. Elas distinguem-se entre si pelos diferentes efeitos causados aos componentes das linhas de transmissão.

As excitações eólicas dependerão também das características do terreno, velocidade do vento e superfície do condutor, bem como das condições de projeto adotadas.

Para cada tipo de vibração a linha de transmissão estará exposta à danos com diferentes severidades.

A Tabela 1 apresenta a tipologia das vibrações de acordo com os fatores causais bem como as condições climáticas e de projeto, e o dano recorrente para cada tipo de vibração.

Tabela 1 - Movimentos introduzidos pelo vento (Furtado, 2001).

Tipos de Vibração			
	<u>Vibração Eólica</u>	<u>Galope</u>	<u>Oscilação de Esteira</u>
Tipos de Linhas de Transmissão afetadas	Todas	Todas	Limitada a linhas com cabos conectados entre si
Faixa aproximada de frequência (Hz)	3 a 150	0.08 a 3	0.15 a 10
Faixa aproximada das amplitudes de vibração (pico-a-pico) (Unidades expressas em diâmetros do condutor)	0.01 a 1	5 a 300	Modo de corpo rígido: 0.5 a 80 Modo de sub-vão: 0.5 a 20
Condições do Tempo que Favorecem o Movimento do Condutor			
Característica de vento	Regular	Regular	Regular
Velocidade do Vento	1 a 7 m/s	7 a 18 m/s	4 a 18 m/s
Superfície do Condutor	Exposto ou uniformemente coberto de gelo	Depósito assimétrico de gelo ao redor do condutor	Exposto e seco
Condições de Projeto que Afetam o Movimento do Condutor	Tensão de tração no cabo, autoamortecimento do condutor, uso de amortecedores	Taxa da frequência natural vertical pela torcional, taxa de decaimento e condições de fixação	Distancia de separação dos condutores, inclinação da amarra, configuração das amarras do sub-vão
Danos			
Tempo Aproximado Requerido para um Dano Severo se Desenvolver	3 a 20+ anos	1 a 48 horas	1 mês a 8 anos
Causas Diretas do Dano	Fadiga devido ao carregamento cíclico	Altas cargas dinâmicas	Choque dos condutores, desgaste acelerado
Componentes da Linha mais Afetados Pelo Dano	Condutores	Condutores, toda a configuração, isoladores, estruturas	Mecanismo suspenso, espaçadores, amortecedores, fios do condutor

### 3.4. OSCILAÇÕES DE SUBVÃO

As oscilações de subvão, também chamadas de oscilações induzidas por esteira, acontecem geralmente a feixes de condutores expostos a ventos laterais de intensidade moderada a forte (4 a 18 m/s). Ocorrem quando há um cabo a barlavento de outro, ficando

aquele na região de esteira de turbulência deste, quando o escoamento de ar do vento passa por ambos. Essas oscilações ocorrem em baixa frequência (0,2 a 10 Hz) e podem ficar restritas a um único subvão ou a um pequeno número de subvãos adjacentes. Devido à natureza das forças aerodinâmicas geradas pela esteira, o condutor descreve órbitas elípticas, podendo atingir amplitudes da ordem de até 20 vezes o diâmetro do condutor (Henriques, 2006).

### 3.5. VIBRAÇÕES DE GALOPE

A vibração de galope ou *galloping* é caracterizada por baixas frequências (0,1 a 3 Hz) e grandes amplitudes (5 a 300 vezes o diâmetros do condutor), com movimento primariamente vertical. É causado por ventos laterais fortes (7 a 18 m/s) atuando sobre condutores com depósito de gelo, que acabam por apresentar uma seção transversal não circular e podem desenvolver movimentos com elevadas cargas dinâmicas, introduzindo perigosos esforços nos condutores e nas estruturas (Figura 8). Não existe registro da ocorrência deste tipo de vibração no Brasil.

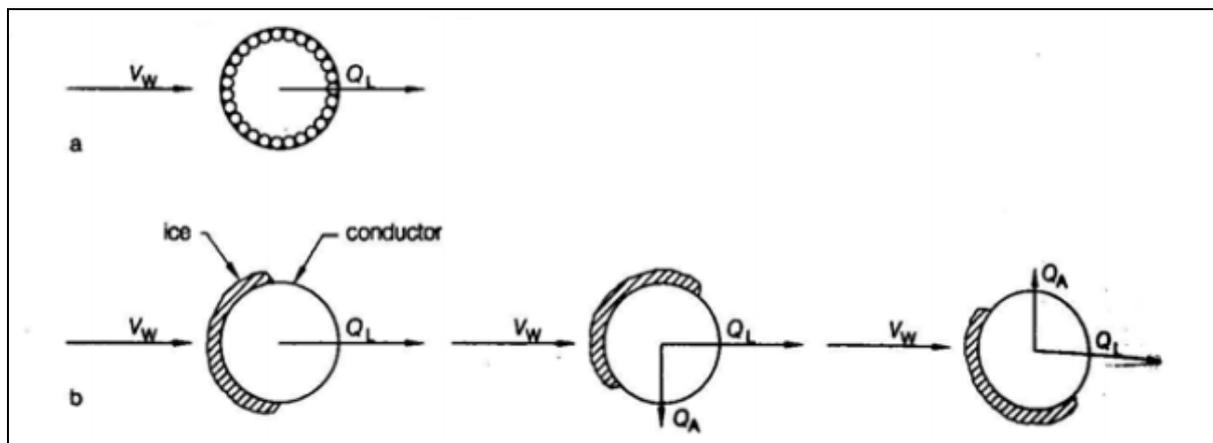


Figura 8 - Forças atuando em condutor sob ação do vento. a) sem acúmulo de gelo b) diferentes posicionamentos de gelo; VW é à força do vento; QA é à força de sustentação; QL é a força de arraste (Kießling, Nefzger, & Nolasco, 2003).

### 3.6. VIBRAÇÕES EÓLICAS SIMPLES

Este tipo de vibração é característico do território brasileiro, dado o regime de ventos no país, e tende a ser mais danoso aos condutores em regimes regulares de ventos de baixa

velocidade como nas travessias de rios. A vibração eólica não é facilmente detectável numa inspeção visual, pois se caracteriza pelas pequenas amplitudes que raramente excedem um diâmetro do condutor. Essas vibrações são causadas por ventos moderados e de baixa velocidade (0,8 até 8 m/s), que se verificam em terrenos planos ou levemente ondulados, principalmente ao amanhecer e ao entardecer. As frequências das vibrações podem ser elevadas, situando-se na faixa de 3 a 150 Hz. Essas vibrações produzem flexões alternadas de pequenas amplitudes, mas que resultam em deformações específicas elevadas em pontos de transição de rigidez flexional do condutor, principalmente nos pontos de suspensão e ancoragem, podendo leva-lo à ruptura por fadiga (Henriques, 2006).

Com a passagem do ar ao redor do condutor pode ocorrer descolamento da camada limite do fluido. A intensidade com que o ar passa pelo condutor pode ser expressa através do Número de Reynolds, que relaciona a velocidade do escoamento do fluido (V), sua viscosidade cinemática ( $\nu$ ) e o diâmetro do cabo (D). Considera-se o condutor como um cilindro de seção circular.

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad [m] \quad (7)$$

Quando o número de *Reynolds* é baixo, ( $Re < 5$ ) não há a formação de vórtices ou turbulência. À medida que o número de *Reynolds* aumenta ( $1 < Re$ ), começa a ocorrer recirculação de fluido, com a formação de vórtices a sotavento (lado oposto donde sopra o vento), que se desprendem assim que se formam. Isso cria uma esteira de vórtices chamada “Esteira de *Von Karman*”. A formação e desprendimento dos vórtices formam zonas de alta e baixa pressão que solicitam o cabo para cima e baixo, que passa a vibrar.

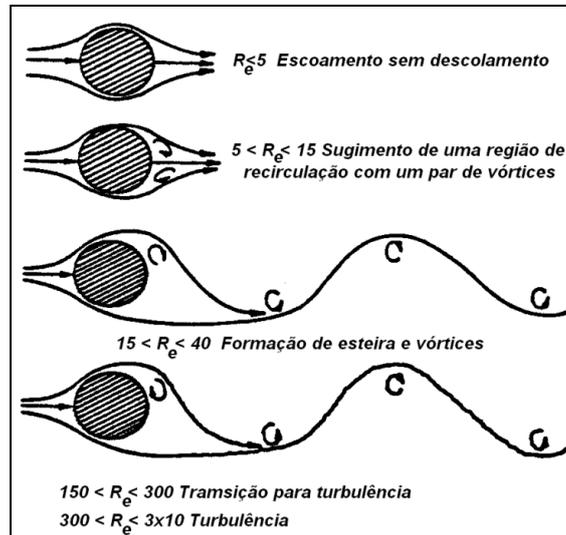


Figura 9 - Tipos de escoamento ao redor do condutor de acordo com número de Reynolds (Electrical Power Research Institute, 1979).

### 3.7. ANÁLISE FÍSICA

O problema que se apresenta no caso de vibrações eólicas é o de determinar o movimento correspondente a essas vibrações, o de conhecer os fatores que contribuem para o seu aparecimento e como agir para que sua ação cause quanto menos dano possível.

A faixa de frequência das vibrações eólicas é de 3 a 120 Hz. Pesquisas no campo do escoamento de fluidos foram desenvolvidas por *Theodore Von Karman* e *Vincent Strouhal*, que encontraram a seguinte relação empírica da frequência dos vórtices para um cilindro em fluxo de fluido (CIGRE, 1979):

$$fs = S \frac{Vs}{D} \quad [\text{m}] \quad (7)$$

$fs$  – [Hz] frequência dos vórtices;

$Vs$  - [m/s] velocidade de *Strouhal* para o vento;

$D$  - [mm] diâmetro do condutor;

$S$  - número de *Strouhal*, que varia de 0,15 a 0,25 dependendo da superfície externa do cabo.

Um condutor de 25 mm de diâmetro sujeito a um vento transversal de 0,8 a 8 m/s apresenta frequências de *Strouhal* na faixa de 6 a 60 Hz. A Figura 10 mostra a relação entre o número de *Strouhal* e o número de *Reynolds*:

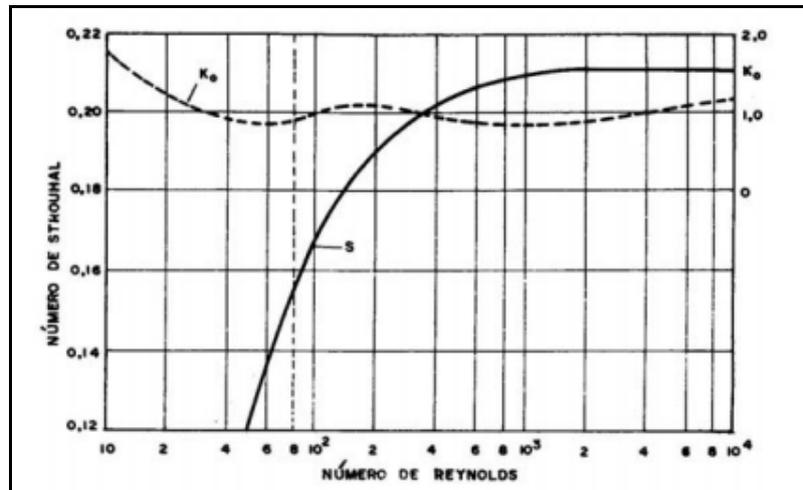


Figura 10 - Relação entre os números de *Strouhal* e *Reynolds* (Fuchs, de Almeida, & Labegalini, 1992).

A distância entre frequências naturais de vibração de um cabo condutor instalado num vão típico de linha de transmissão é sempre muito pequena, da ordem de 0,2 Hz. Assim, em qualquer velocidade de vento na faixa de 0,5 a 10 m/s existirá coincidência entre as frequências dos vórtices e uma das frequências naturais do cabo (de Souza Júnior, 2012).

Quando a frequência de vibração calculada de acordo com a Equação 8 não coincide com nenhuma frequência ressonante, foi observado que a frequência de formação dos vórtices se ajusta de forma a que o condutor vibre na frequência harmônica mais próxima. Esse fenômeno é conhecido como sincronização (*locking in*). A vibração ressonante tende a se estabilizar na frequência natural excitada à priori e o movimento transversal do cabo passa a governar o desprendimento dos vórtices de ar, mesmo que haja pequena variação na velocidade do vento. (Henriques, 2006)

A vibração eólica é do tipo auto-excitada, na qual a ação contínua do vento, após iniciada a vibração, introduzirá energia ao sistema até que este atinja uma amplitude de saturação, na qual a taxa de energia dissipada pelo autoamortecimento do condutor resulta no acoplamento

de modos de frequência próximos, e a vibração acaba por apresentar pequenas variações de amplitude devido a batimentos<sup>1</sup>.

A seguir é apresentado um oscilograma típico de vibração eólica numa linha de transmissão.

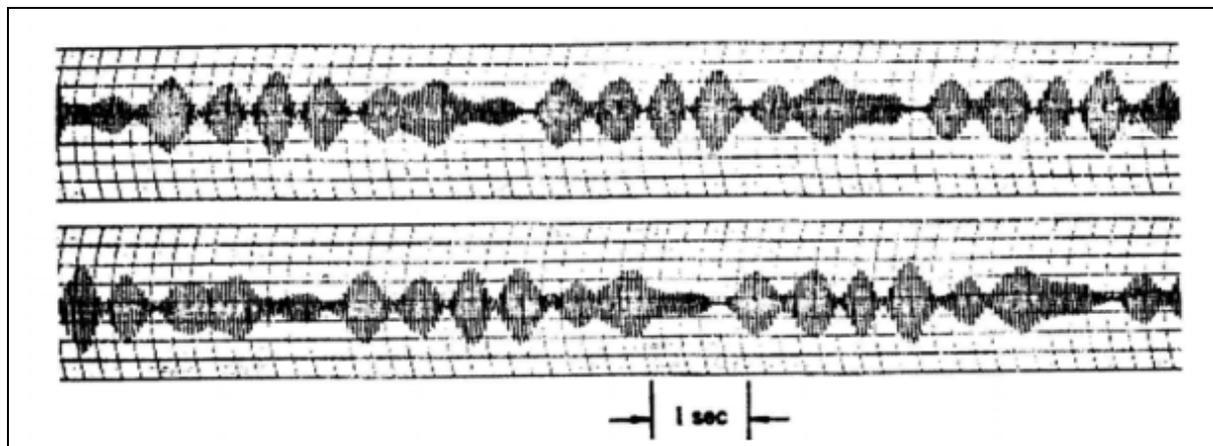


Figura 11 - Forma de onda com vibração-batimento com mais de duas frequências (Electrical Power Research Institute, 1979).

O fenômeno de batimento é muito comum na vibração de condutores e raramente são observados registros com amplitude uniforme, pois é gerado pela vibração de duas ou mais fontes com diferentes velocidades de vento (Hard, 1958).

O parâmetro preponderante para controle da vibração eólica, de forma a suprimir a sua ocorrência, é a tração mecânica do condutor na linha. O amortecimento próprio do condutor varia inversamente com a carga de tração, por esse motivo a tração mecânica deve ser tão baixa quanto economicamente viável (Henriques, 2006).

Sabendo da tendência do condutor a vibrar mais com o aumento da carga de esticamento e que esse aumento interfere no autoamortecimento do cabo, para uma dada frequência ou velocidade do vento, um aumento de tração corresponderá a um aumento no comprimento de ondas de acordo com a equação simplificada para a ressonância:

---

<sup>1</sup> Batimento: quando dois ou mais movimentos harmônicos cujas frequências estão próximas uma da outra são somados (Rao, 2008).

$$\lambda = \frac{n}{f} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad [\text{m}] \quad (8)$$

$\lambda$  - [m] comprimento de onda;

T - [N] tração no cabo;

$m$  - [kg/m] massa por unidade de comprimento;

$f$  - [Hz] frequência;

$n$  - modo de vibração.

Conseqüentemente haverá uma menor flexão do cabo para uma mesma amplitude de vibração e um decréscimo correspondente no movimento relativo dos fios e na potência autodissipada, como mostra a Figura 12.

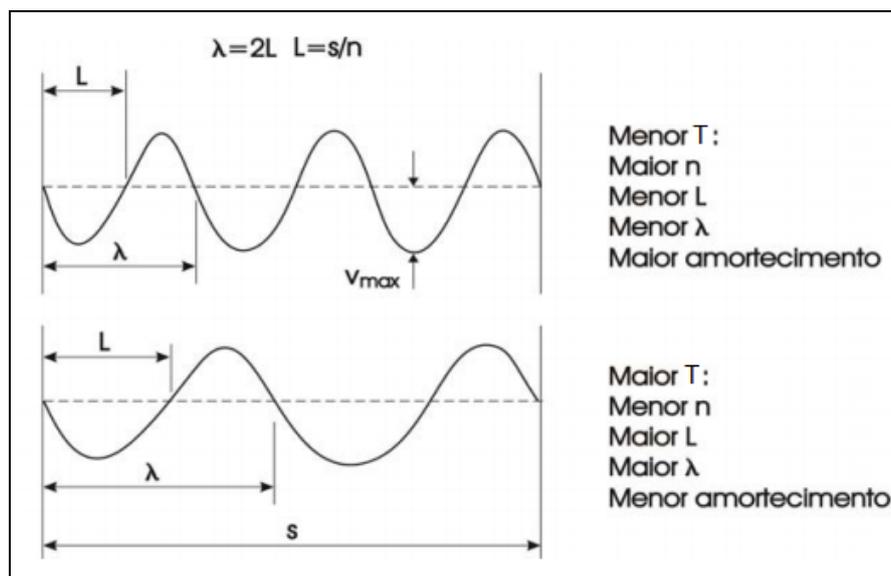


Figura 12 - Variações do comprimento de onda ( $\lambda$ ) com o aumento da tração (T) no condutor (Furtado, 2001).

Quando a carga de tração é reduzida a dissipação de energia própria do cabo condutor é suficientemente grande para que as vibrações não atinjam níveis perigosos. Entretanto, cargas de tração reduzidas necessitam da utilização de um maior número de torres e de que essas torres sejam mais elevadas, além de necessitar de maiores comprimento de condutor. Esses

fatores acabam por aumentar o custo de construção da linha. A ocorrência de vibrações eólicas em linhas de transmissão precisa ser, portanto, prevista durante o projeto ou nos estágios subsequentes e anteriores à operação.

Maiores valores de tração são desejáveis para a diminuição de custos nas linhas de transmissão. Os cálculos que permitirão trabalhar com valores elevados de tração, dentro de uma faixa de segurança razoável, demandam levantamentos minuciosos, complexos e precisos dos parâmetros envolvidos, entre eles o amortecimento próprio dos condutores (Henriques, 2006).

### **3.8. A FADIGA POR FRETING NOS CABOS CONDUTORES**

Sob o aspecto da integridade mecânica da linha de transmissão, o movimento vibratório causado pelas vibrações eólicas é um dos problemas mais sérios por induzir o processo de fadiga nos fios condutores e nos dispositivos instalados na linha, sendo assim, a principal causa de falha mecânica em uma linha de transmissão.

O processo de falha começa pelo surgimento de trincas nos fios de alumínio que constituem o cabo, aumentando sua resistência elétrica. Tal fato acarreta o aumento de temperatura no local da trinca. Ambos, trinca e aumento de temperatura, são fatores que diminuem a resistência mecânica do condutor. Em casos mais graves, quando há trinca nos fios de aço da alma do condutor, eventualmente ocorre ruptura total da linha.

Caso a trinca se forme no interior do grampo de suspensão, não poderá ser identificada através de inspeções aéreas ou terrestres. Além disso, os ventos que causam as vibrações eólicas resfriam de forma acentuada o condutor, mascarando o efeito térmico do ponto de fadiga (Mourão, 2004).

Tipicamente, o fenômeno de fadiga do condutor ocorre primariamente nos grampos de suspensão (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), onde graças às restrições de movimento ocorrem as tensões mecânicas mais elevadas. De forma secundária, tal fato também ocorre em dispositivos tais como: espaçadores, amortecedores e espaçadores-amortecedores (Ferreira, Araújo, de Oliveira, de Olivera, & de Araújo, 2012).

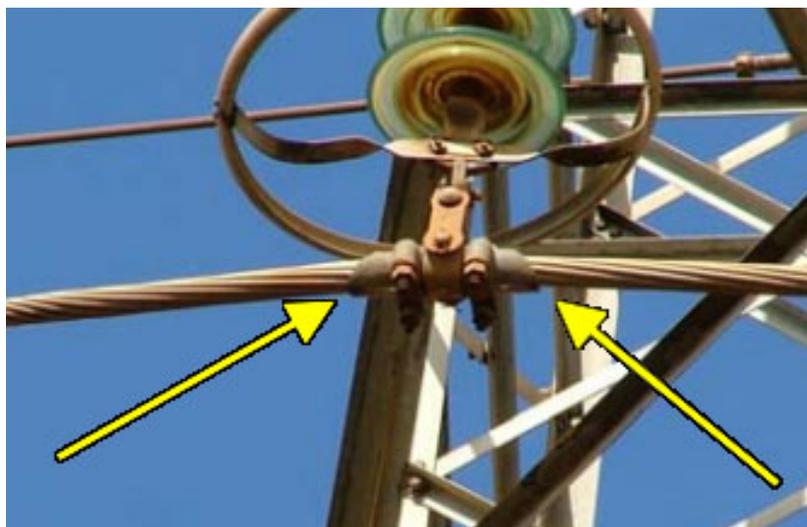


Figura 13 – Grampo de suspensão, ponto mais provável de ruptura do condutor (Murça & Kaje, 2009).

A razão de ser nos grampos de sustentação o local onde ocorrem a maioria das falhas é o fato de que o movimento do condutor ser ali restringido. Por isso lá ocorrem as tensões mais elevadas. De maneira geral, o condutor sofre esforços estáticos e dinâmicos e sua vida é inversamente proporcional ao nível de esforços aos quais está submetido (Fuchs, de Almeida, & Labegalini, 1992). Quanto maior forem os esforços estáticos (carga de esticamento, aperto, peso), menor serão os esforços dinâmicos (vibrações) permitidos.

Para se encontrar tais esforços dinâmicos, baseia-se na Equação de Poffenberger-Swart (Poffenberger, 1965).

### 3.8.1. EQUAÇÃO DE POFFENBERGER-SWART

O condutor preso ao grampo de suspensão pode ser representado por uma viga engastada, conforme representado pela Figura 14.

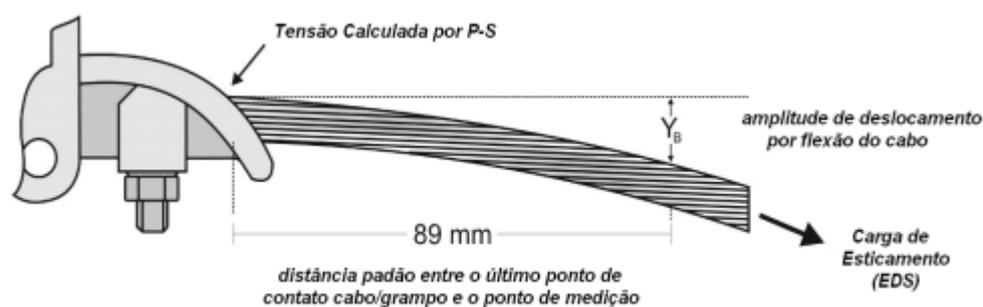


Figura 14 – Esquema da montagem cabo-grampo (Fadel, 2010).

O nível de tensão nominal em um fio da camada mais externa do cabo é obtido pela correlação com uma amplitude de deslocamento vertical pico a pico ( $Y_B$ ) e do condutor com relação ao grampo de suspensão. O valor  $Y_B$  é medido a 89 mm do último ponto de contato (UPC), localizado na “boca” do grampo, ponto no qual se calcula a tensão.

O valor da tensão de flexão pode ser obtido pela Equação (9).

$$\sigma_a = K \cdot Y_B \quad [\text{N}] \quad (9)$$

onde  $\sigma_a$  é a faixa de tensão dinâmica zero a pico,  $Y_B$  é a amplitude de deslocamento (pico a pico), medida a partir de um ponto sobre o cabo distante 89 mm do UPC entre o cabo e o grampo. O valor de  $K$  é obtido pela equação

$$K = \frac{E_a \cdot d \cdot p^2}{4(e^{-px} - 1 + px)} \quad [\text{N/mm}^3] \quad (10)$$

sendo  $E_a$  [Mpa] o módulo de elasticidade (Módulo de Young) e  $d$  [mm] e o diâmetro dos fios de alumínio da camada externa do cabo,  $x$  é a distância ao longo do cabo entre o UPC e o ponto de medição, padronizado como 89 mm (Figura 14). O valor de  $p$  é igual a:

$$p = \sqrt{\frac{T}{EI}} \quad [\text{mm}] \quad (11)$$

Onde  $T$  [N] é a carga de esticamento para a temperatura média durante a medição,  $EI$  [N/mm<sup>2</sup>] é a rigidez a flexão do cabo, cujo valor mínimo é dado pela equação

$$EI_{\min} = n_a E_a \frac{\pi d_a^4}{64} + n_s E_s \frac{\pi d_s^4}{64} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (12)$$

no qual  $n_a$ ,  $E_a$ ,  $d_a$  são respectivamente o número, diâmetro individual e módulo de elasticidade dos fios de alumínio, e  $n_s$ ,  $E_s$ ,  $d_s$  são respectivamente o número, o diâmetro individual e o módulo de elasticidade dos fios de aço (Fadel, 2010).

Obviamente, o processo de falha é muito mais complexo, uma vez que envolve o contato mecânico que decorre da fixação do cabo ao grampo. Esse contato envolve a superfície interna do grampo de suspensão e os contatos entre os fios do condutor (Figura 15a, b). O desgaste do condutor acontece invariavelmente nas regiões de contato mecânico (Figura 16a, c). Esse atrito entre as superfícies pode levar ao desgaste por *fretting*, que é quando os microescorregamentos relativos provocam desgaste superficial. Estudos mostram que a maior causa de falha dos condutores é ocasionada pela formação de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) na superfície dos fios de alumínio (Figura 16b). O óxido de alumínio é um material cerâmico de elevada dureza e sua presença nas interfaces atritantes, entre o condutor e as ferragens e entre os próprios fios do condutor, provê grande abrasividade. Assim, a força tangencial entre os arames é aumentada, diminuindo sua vida útil (Azevedo & Tibério, 2004).

Outros parâmetros de projeto podem acelerar o desgaste do condutor, como por exemplo, a tensão de esticamento do cabo. Assim, a fadiga por *fretting* ocorre quando os microescorregamentos associados à concentração de tensão causada pelo contato mecânico aceleram os processos de nucleação e de crescimento de trincas nos componentes da montagem sujeitos a uma tensão remota cíclica, levando o sistema prematuramente ao colapso (Henriques, 2006).

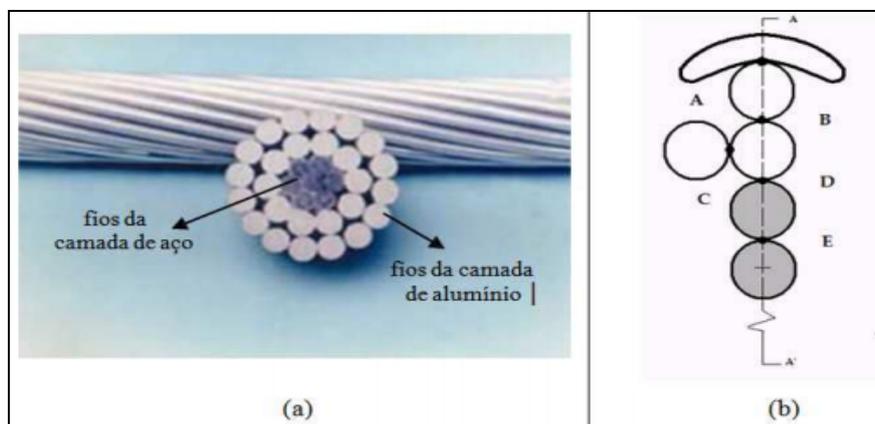


Figura 15 - (a) Foto de um cabo condutor ACSR em corte, (b) Regiões de contato (Fadel, 2010).

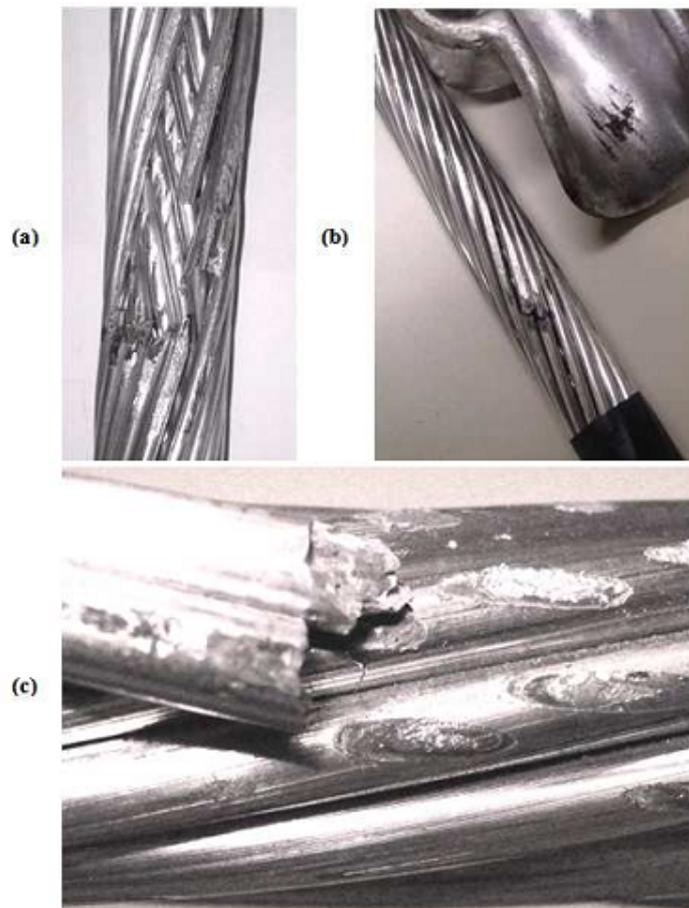


Figura 16 – Fadiga por Fretting- a) Intenso desgaste superficial, com fratura de fios de alumínio, na camada externa do cabo ACSR, b) Presença de pó escuro após desmontagem do conjunto cabo/grampo c) Marcas elípticas de fretting e fraturas de fios da camada interna do cabo.

## 4. AUTOAMORTECIMENTO

*O autoamortecimento é uma característica intrínseca dos cabos condutores. Ela representa a inércia do cabo se opondo ao movimento, ocasionando dissipação de energia.*

### 4.1. CONCEITOS INTRODUTÓRIOS

O autoamortecimento em um cabo condutor que está sujeito a um carregamento é definido como a potência dissipada por unidade de comprimento ao longo do condutor que vibra em um de seus modos naturais. Essa dissipação de energia ocorre devido a dois fatores: ao amortecimento material, que é a dissipação de energia na massa de metal do cabo; e ao atrito de *Coulomb* entre as superfícies deslizantes em contato (Fuchs, de Almeida, Labegalini, & Labegalini, 1992). A potência por unidade de comprimento do condutor pode ser expressa pela função:

$$P = f_n(T, \ell, f, y) \quad [\text{m}] \tag{13}$$

Onde:

$P$  [mW/m] é potência dissipada por unidade de comprimento;

$T$  [N] é a tração no condutor;

$\ell$  [m] é o comprimento de onda;

$y$  [mm] é a amplitude;

$f$  [Hz] é a frequência de vibração.

Várias investigações têm indicado que o amortecimento material é irrisório em comparação ao atrito de deslizamento. Experimentos têm mostrado que o aumento do deslizamento entre os fios que constituem o condutor sempre acarreta um aumento na

dissipação de energia, em proporção tal que a influencia do amortecimento material vem se comprovando como muito pequena.

Apesar do verdadeiro mecanismo de amortecimento por deslizamento não ser claramente conhecido, é possível afirmar que ele está certamente relacionado às deformações dinâmicas que ocorrem entre os fios individualmente. Essas deformações dependem da deformação do cabo, do atrito nas interfaces, da pressão entre os fios, de sua geometria e da tensão de esticamento (de Souza Júnior, 2010).

O autoamortecimento de um condutor elétrico pode ser obtido através de ensaios em vãos internos de laboratórios, cujos resultados são apresentados na forma de potência dissipada pelo condutor por unidade de comprimento em função da amplitude e da frequência de vibração para uma determinada força de tração aplicada ao condutor (Torres, 1994).

## **4.2. MEDIÇÃO DO AUTOAMORTECIMENTO EM CABOS CONDUTORES**

Existem vários métodos para se encontrar a energia dissipada por um condutor vibrando em um modo principal. Esses métodos podem ser divididos em dois grupos principais: o método das vibrações livres e o método das vibrações forçadas (CIGRE, 1979).

### **4.2.1. MÉTODO DAS VIBRAÇÕES LIVRES**

No Método das Vibrações Livres, a vibração do cabo em seu modo principal pode ser observada apenas com a ausência de excitação forçada: o condutor é excitado até seu modo fundamental e em determinado instante retira-se a força externa e observa-se o condutor até que sua vibração seja atenuada a valores insignificantes. A energia dissipada é então medida através do decremento da vibração no modo fundamental. O modo que se retira a força de excitação pode facilmente ocasionar algum distúrbio adicional na vibração do condutor causando outros modos de vibração. Pelos detalhes construtivos decorrentes desse motivo esse método foi evitado.

### **4.2.2. MÉTODO DAS VIBRAÇÕES FORÇADAS**

O Método de Vibrações Forçadas pode ser subdividido em dois: o Método da Onda Estacionária e o Método da Potência Dissipada. Para a realização deste trabalho o segundo método foi escolhido, entretanto os dois métodos serão descritos.

### 4.3. TEORIA DOS METODOS DE VIBRAÇÃO FORÇADA

#### 4.3.1. MÉTODO DA ONDA ESTACIONÁRIA

Esse método baseia-se em medir a dissipação da energia fornecida ao longo do cabo. Pode-se efetuar essa medição calculando a diferença de potência entre dois nós consecutivos,  $P_1$  e  $P_2$ . O cálculo da potência é feito em função da razão das amplitudes entre um nó e um antinó subsequente, também chamado de razão da onda estacionária, como mostrado a seguir:

$$P_1 = \sqrt{Tm} \cdot \frac{V^2}{2} \left( \frac{a_1}{Y} \right) \quad [\text{m}] \quad (14)$$

Onde:

$\sqrt{Tm}$  [kg/s] é a impedância característica ou impedância de onda;

$V$  [m/s] é a velocidade simples do antinó;

$\left( \frac{Y}{a_1} \right)$  [ ] é a razão da onda estacionária;

$T$  [N] é a tensão no condutor;

$m$  [kg/m] é a quantidade de massa por comprimento do condutor.

$P$  [mW/m]

Logo, a potência dissipada entre os nós 1 e 2 é:

$$P = P_1 - P_2 \quad [\text{m}] \quad (15)$$

Tabela 2 - Lista de símbolos [IEEE STD 563].

Símbolo		Unidade
P	Potência dissipada por unidade de comprimento	mW/m
T	Tensão de tração	N
$L$	Comprimento nodal	m
Y	Amplitude simples do antinó	mm
Y	Amplitude dupla do antinó (pico-a-pico)	mm
V	Velocidade transversal do antinó (amplitude simples)	m/s
A	Amplitude dupla no enésimo modo de vibração	m
F	Frequência	Hz
M	Massa por unidade de comprimento	Kg/m
D	Diâmetro do condutor	m
F	Força de excitação - amplitude simples	N
RTS	Valor de resistência à tração do cabo	N
L	Comprimento de vão livre	m

A Figura 17 ilustra um cabo condutor vibrando num vão de ensaios, onde  $y$  é a amplitude de vibração simples do antinó.

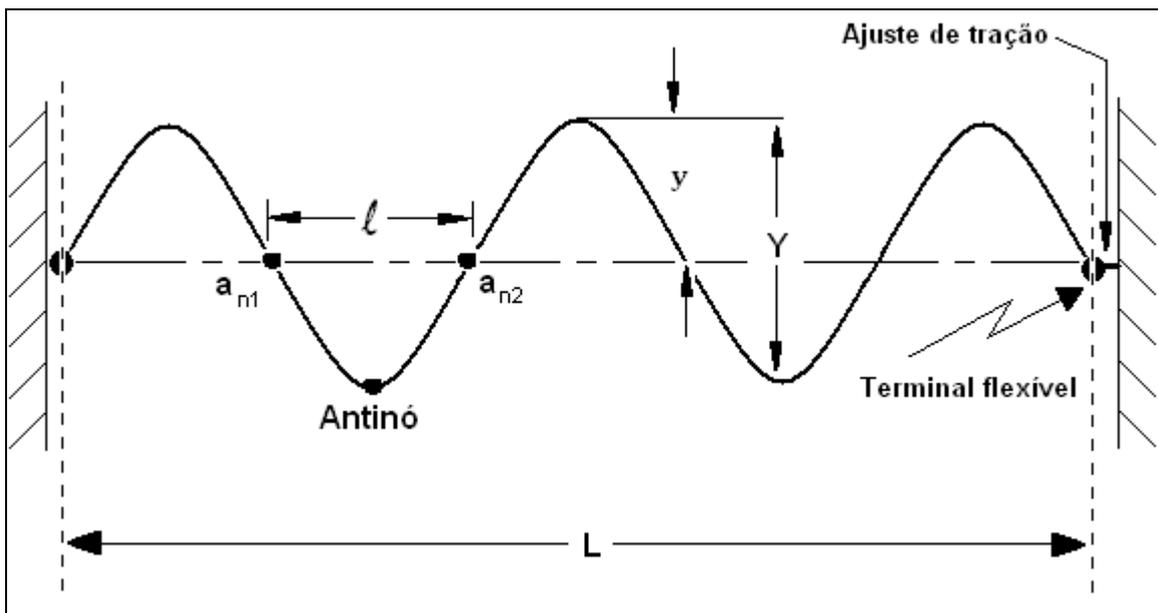


Figura 17 - Representação Esquemática do Vão com Condutor Vibrando (IEEE, 1978).

Com o intuito de criar uma padronização para a execução de ensaios para a medição do autoamortecimento de um condutor elétrico, o guia IEEE STD 563 foi publicado no ano de 1978. Preparado por uma força-tarefa da área de vibrações em condutores da IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) e o comitê de estudos da CIGRE (*Conseil International des Grands Réseaux Électriques*) da área de linhas suspensas e oscilações

mecânicas, o guia é o primeiro de uma série de trabalhos cujo plano é a padronização das medições da dissipação de energia que ocorre nas linhas de cabos condutores suspensos. Seu objetivo principal é estabelecer os parâmetros e procedimentos que já são aceitos mundialmente para desenvolver métodos para controlar a vibração induzida pelo vento (IEEE, 1978).

## 4.2. MÉTODO DA POTÊNCIA

Esse método consiste em excitar o cabo condutor, utilizando um *shaker* eletrodinâmico, fazendo-o atingir uma de suas frequências de ressonância. Quando a frequência de excitação é próxima da frequência de ressonância os sinais da força e da aceleração são perfeitamente senoidais. A condição ideal de ressonância é atingida quando a diferença de fase entre a força fornecida e a aceleração do cabo no ponto de excitação é de 90°.

A potência fornecida pelo *shaker* ao cabo pode ser diretamente calculada a partir do produto da força de excitação no condutor pela velocidade resultante no ponto de aplicação do carregamento. Por um balanço de energia, pode-se afirmar que a potência fornecida pelo *shaker* é igual à potência dissipada no cabo. Além disso, a razão entre a força e a velocidade nos permite determinar diretamente a resistência mecânica por unidade de comprimento do condutor. As equações necessárias são:

$$P_{dis} = F_{apli} \cdot V_{shaker} \quad [W] \quad (16)$$

Onde:

$P_{dis}$  [W] é a potência dissipada no cabo;

$F_{apli}$  [N] é a força aplicada pelo shaker no cabo durante a ressonância;

$V_{shaker}$  [m/s] é a velocidade do cabo no ponto de aplicação da força.

$$R_{mec} = \frac{F_{apli}}{V_{shaker}} \quad [N.s/m] \quad (17)$$

Onde:

$R_{mec}$  [N.s/m] é a resistência mecânica por comprimento;

$F_{apli}$  [N] é força aplicada no contato entre o shaker e o cabo;

$V_{shaker}$  [m/s] é a velocidade do cabo no ponto de aplicação da força.

Esse método é mais simples, mais rápido e exige instrumentação menos sofisticada para a maioria dos casos, desde que se assuma que a perda de energia nos terminais de fixação tem uma ordem de grandeza muito inferior à da energia dissipada no cabo condutor.

### **4.3. GUIA IEEE STD 563-1978**

Com o aumento do interesse em estudar a vibração em condutores elétricos aéreos, há grande preocupação em melhorar os métodos existentes e desenvolver novas técnicas para controlar o problema fazendo crescer a exigência por informações que sejam confiáveis sobre as características de autoamortecimento dos condutores. O guia foi preparado com o propósito de encorajar pesquisadores a fazer medições das características de amortecimento inerente de condutores adotando os métodos nele descritos. Para tal ele padroniza métodos de ensaio, inclusive o Método da Potência, que já foi apresentado anteriormente, discorrendo sobre vários aspectos do procedimento. Cada tópico será mencionado a seguir.

#### **4.3.1. CONDUTOR**

O condutor utilizado para realização dos ensaios de autoamortecimento deve ser descrito com clareza, sendo listada a forma de encordoamento, o peso por unidade de comprimento, a carga de ruptura, o tipo de lubrificação aplicada ou a não utilização de lubrificante e a origem da amostra utilizada nos ensaios.

#### **4.3.2. REQUERIMENTOS PARA O VÃO DE TESTE**

O vão onde serão realizados os ensaios deve ser brevemente descrito e ilustrado esquematicamente de forma similar à ilustrada na Figura 18.

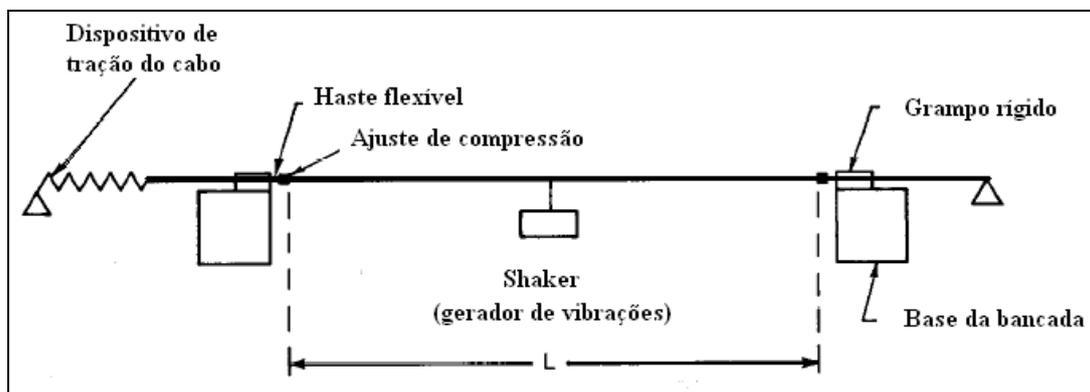


Figura 18 - Configuração de vão de testes (IEEE, 1978).

O comprimento do vão livre ( $L$ ) deve ser especificado e no caso de serem tomadas medições de amortecimento para testes sobre problemas relacionados à vibração eólica, este comprimento deve ser preferencialmente dez vezes maior que o mais longo comprimento nodal, ou seja, no mínimo cinco vezes o comprimento de onda. Visando-se obter resultados mais consistentes é recomendado que  $L$  seja maior que 50 m, todavia, bons resultados podem ser obtidos com vãos que possuem comprimento na faixa dos 30 m. Essa demanda é justificada quando há a preocupação de minimizar as perdas nas terminações, que podem ser críticas no caso de vãos de comprimentos menores. Em casos em que não se pode evitar o tamanho reduzido do vão livre recomenda-se o uso do Método da Onda Estacionária.

#### 4.3.3. TERMINAIS DE FIXAÇÃO

Visando minimizar a dissipação de energia nos terminais de fixação do cabo condutor à bancada, o guia IEEE 563 faz sugestão de que as terminações fixas sejam engastadas em um bloco maciço de concreto, com peso total da ordem de 10% da força que ocasiona a tensão de ruptura no condutor mais resistente a ser testado. O bloco deve ser formado por uma única peça sólida e de preferência fazer parte da fundação, caso contrário, deve estar firmemente unido a ela buscando minimizar o movimento relativo entre os vários componentes do sistema.

As perdas nos terminais podem ser minimizadas com a instalação de terminais flexíveis no fim do condutor, como o ilustrado na Figura 19, para evitar curvar o cabo condutor onde este normalmente entraria preso no grampo de fixação.

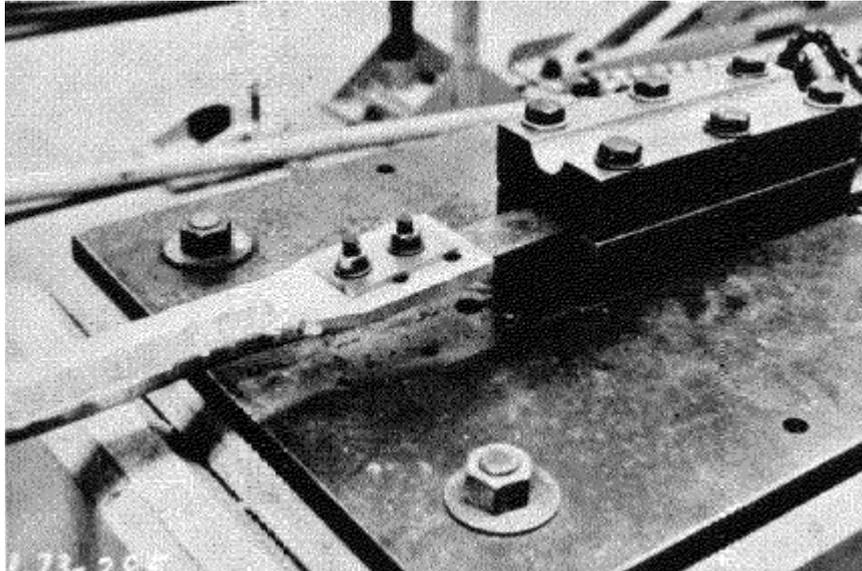


Figura 19 - Terminal flexível (IEEE, 1978).

Como alternativa aos terminais flexíveis, o guia IEEE 563 afirma que bons resultados foram obtidos quando foram utilizados grampos convencionais com comprimento igual ou maior a seis vezes o valor do diâmetro do condutor e diâmetro do entalhe não ultrapassando 0.25 mm do diâmetro do condutor. As partes do grampo devem ser fixadas por um mínimo de seis parafusos. A Figura 20 ilustra um terminal convencional com as dimensões recomendadas, além da utilização do número mínimo de parafusos para fixação entre as partes do grampo e da base.

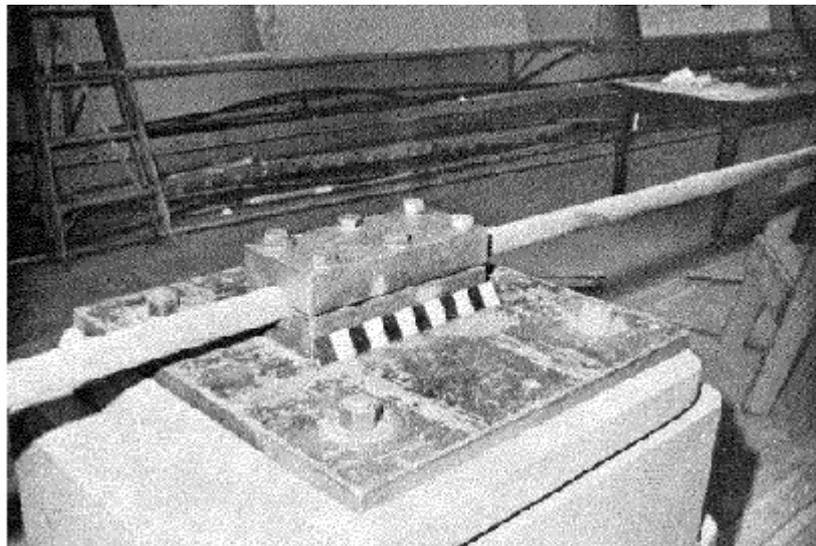


Figura 20 - Terminal fixo convencional (IEEE, 1978).

#### **4.3.4. VARIÁVEIS E PROCEDIMENTOS PRESCRITOS NO ENSAIO**

Qualquer folga excessiva nas camadas de alumínio deve ser trabalhada para fora do condutor e os terminais devem ser instalados no condutor do meio para o fim, ao invés de à partir da extremidade do condutor, para evitar que as folgas voltem para o comprimento de teste. O cabo condutor deve ser esticado de modo que seja aplicada a maior tensão na qual os testes serão realizados, por um período de duas horas preferencialmente à noite.

Os métodos utilizados para garantir que as folgas no cabo e as perdas de energia para os vãos pós-terminais de fixação sejam mínimas devem ser descritos claramente. Bem como os métodos utilizados para medir as perdas, a acurácia dos métodos de medição da tensão de carregamento do cabo, tendo o cuidado em garantir que a variação do carregamento não deve exceder 2%.

O ensaio deve ser realizado em um ambiente fechado, com ar parado, e a temperatura ambiente durante o posicionamento do cabo no vão de testes e durante o ensaio deve ser registrada. A recomendação é de que a temperatura seja constante ao longo do vão e durante todo o ensaio, caso haja variações estas devem ser mínimas e propriamente registradas.

#### **4.3.5. APLICAÇÃO DO CARREGAMENTO: O GERADOR DE VIBRAÇÕES (SHAKER)**

A união do gerador de vibrações como cabo condutor deve ser localizada diretamente sobre ou próximo ao ponto do antinó (Figura 18). Por questão de praticidade, frequentemente prefere-se um ponto próximo ao centro do vão de testes, mas se isso não for possível, a velocidade medida do condutor deve ser corrigida para que esta seja equivalente à velocidade no antinó.

Um gerador de vibrações ou *shaker*, Figura 21, que possua uma massa muito grande pode influenciar diretamente no comprimento de onda do condutor e esta influi diretamente nas medidas dos valores de amortecimento. Esse efeito ocasionado pela massa do *shaker* deve ser tal que não provoque uma distorção maior que 10% no comprimento de onda. Para isso recomenda-se o uso de um equipamento cuja massa não exceda 10% da massa do condutor por unidade de comprimento (IEEE, 1978).

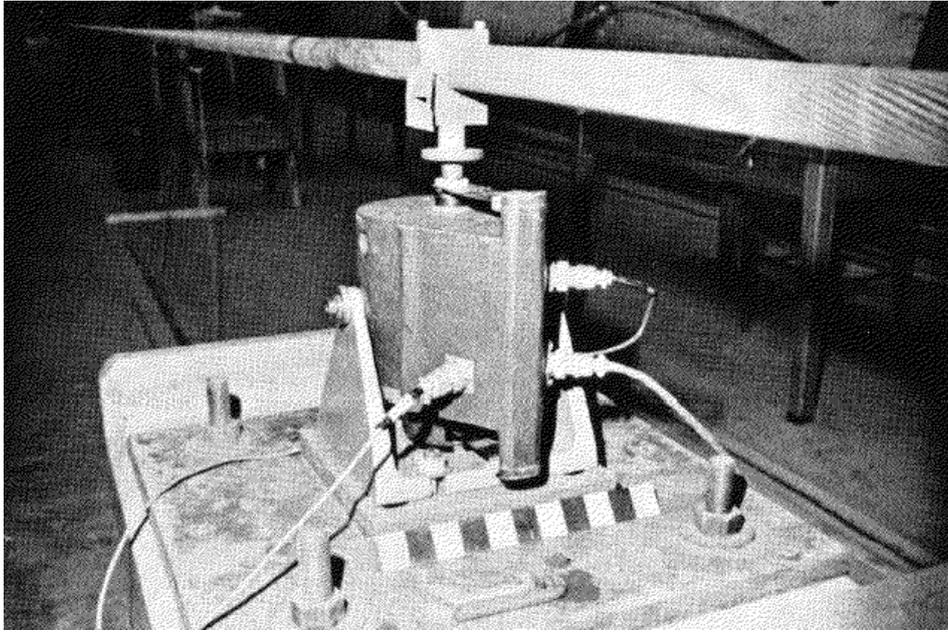


Figura 21 - *Shaker* (IEEE, 1978).

## 5. METODOLOGIA PARA ENSAIOS

*O autoamortecimento é uma característica intrínseca dos cabos condutores. Ela representa a inércia do cabo se opondo ao movimento, ocasionando dissipação de energia.*

A primeira coisa a ser feita é garantir que o condutor vibrará em ressonância em um de seus modos principais. Para que isso ocorra, o *shaker* deve excitar o condutor até que o movimento seja mantido com a menor potência fornecida possível. Deve ser fornecido o detalhamento do tipo de equipamento utilizado e quais tipos de conexões foram feitas entre ele e o cabo condutor.

O movimento do condutor deve ser harmônico. Distorções no sinal podem ser diretamente determinadas através do sinal de deslocamento ou pelo de velocidade. Define-se como distorção a diferença entre a máxima e a mínima amplitude registradas em um antinó. Essa diferença quando comparada com uma média ao longo do vão não deve ultrapassar 5%.

Na tomada de resultados é necessário certificar que os resultados são consistentes e podem ser reproduzidos em um novo teste. Além disso, deve-se assegurar que o sinal está estabilizado. Pode-se garantir essa condição quando após sucessivas leituras (quatro ou cinco) da energia dissipada por ciclo, estas não apresentam significativas mudanças – 10% no máximo. Isso pode ser garantido se a variação da frequência em um mesmo período de tempo permanece abaixo de 0.1% e as variações de amplitudes são praticamente nulas.

### 5.1. MEDIÇÃO DE POTÊNCIA

Se as medidas forem tomadas com base na força e no deslocamento no ponto de contato do *shaker* com o cabo, a energia dissipada por ciclo deve ser obtida a partir do movimento de histerese do ciclo.

Se os parâmetros de medida forem força e velocidade, então a potência medida pode ser obtida através de equipamentos como *wattímetro* ou instrumentação similar.

### 5.1.1. VALORES RECOMENDADOS PARA T, $\ell$ , f, Y.

O valor para a carga T aplicada no cabo durante o teste é expresso em termos da porcentagem da resistência à tração do cabo. Os valores recomendados são: 15 (17.5), 20 (22.5), 25 (27.5), 30 (35), 40 (50), sendo os valores em parênteses opcionais.

Pelo menos três diferentes valores de carregamentos T devem ser utilizados. Esses valores escolhidos, de preferência, devem ser tais que a média dos carregamentos corresponda ao carregamento médio a que o cabo é submetido na linha da tensão.

O ensaio deve ser executado considerando pelo menos três diferentes valores de distância nodal " $\ell$ ". Os valores máximo e mínimo do comprimento nodal devem corresponder à mínima e à máxima frequência geradas na variação do vento de 3 a 30 km por hora para o diâmetro do cabo condutor de interesse. A relação entre frequência, velocidade do vento e diâmetro do condutor é dada na Equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (IEEE, 1978).

$$f(\text{Hz}) = \frac{50 \times \text{velocidade do vento}(\text{km/h})}{\text{diâmetro do condutor}(\text{mm})} \quad [\text{Hz}] \quad (18)$$

### 5.1.2. COLETA E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Um mínimo de três diferentes valores de amplitude dupla no antinó (Y) para cada valor de comprimento nodal ( $\ell$ ) deve ser testado e seus valores devem estar entre 25/f e 150/f.

É recomendado que os resultados dos testes de cada tensão sejam tabelados conforme mostrado na Tabela 3 e apresentados de acordo com o gráfico da Figura 22, que se refere à potência de dissipação por unidade de comprimento do condutor em função da razão  $Y/D$  para cada distancia nodal  $\ell$ , que corresponde à frequência  $f$  e à tensão T.

Tabela 3 - Modelo para anotação de ensaios de autoamortecimento.

<b>Frequência</b> [Hz]	$\ell$ [m]	<b>Y</b> [mm]	<b>V</b> [m/s] [ft/s]	<b>F</b> [N] [lb]	<b>P</b> [mW/m]	<b>Y/D</b>

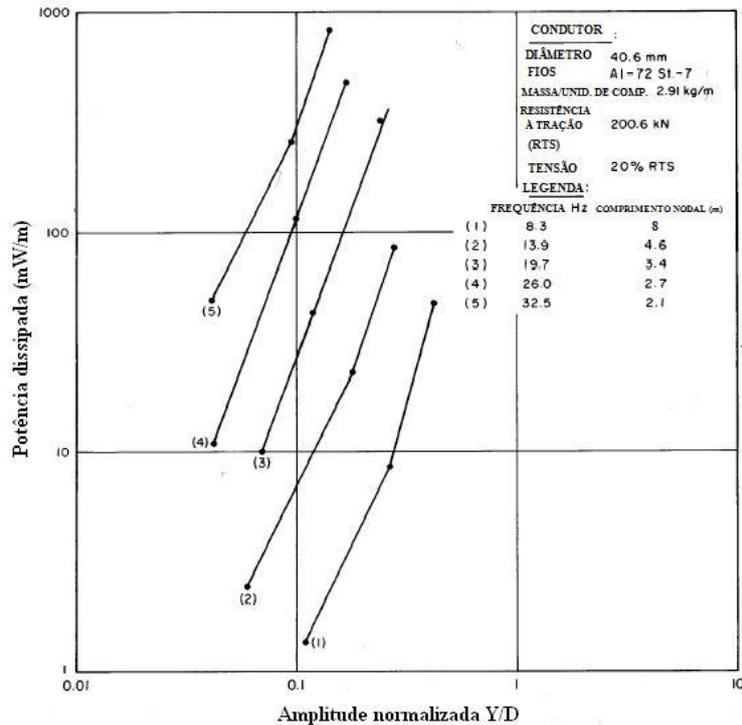


Figura 22- Exemplo da dissipação de potência no condutor (IEEE, 1978).

### 5.1.3. Método da onda Estacionária

Para o Método da Onda Estacionária será necessário monitorar as medidas de amplitude nos primeiros nós e no antinó após o *shaker* e nos últimos antes do final de vão. A etapa inicial do ensaio é executar a varredura em seno no cabo, com a finalidade de obterem-se frequências próximas às de ressonância do condutor. Para tal, o cabo é acoplado ao *shaker*, sendo fixado em suas extremidades, determinando seu vão livre. A varredura é executada submetendo-se o cabo às diversas frequências, sendo obtidas as respostas de frequência em relação a outras variáveis, como força, deslocamento e aceleração. Após obtenção do espectro de frequências por meio da varredura em seno, escolhendo-se cinco dessas frequências para a então execução do método (Murça & Kaje, 2009).

Devem ser escolhidas frequências obedecendo-se a faixa recomendada de frequência ( $50/D_c < F < 1500/D_c$ ). Para um dado valor de EDS, tem-se que para cada frequência em estudo, devem ser estabelecidas medidas para cinco diferentes valores de amplitude (2mm, 3mm, 5mm, 7mm e 10mm). Com os dados do programa computacional *SignalStar Vector Vibration Controller*, obtêm-se valores de velocidade e de força de vibração, para cada amplitude de cada frequência. Com os valores

do produto entre velocidade no ponto de carregamento e força de excitação, pode-se então obter valores da potência dissipada no cabo por unidade de comprimento, devendo-se considerar o tamanho do vão livre do LFIECCE.

Por meio do programa computacional *SignalStar Vector Vibration Controller*, pode-se obter os valores de amplitude dupla no primeiro nó ( $Y_1$ ) e antinó do cabo ( $a_1$ ), a partir do ponto onde é posicionado o *shaker* e os valores de amplitude dupla no nó ( $Y_n$ ) e antinó ( $a_n$ ) no final cabo, antes do bloco móvel de ancoragem do cabo. Assim, calcula-se o valor de velocidade tangencial em tais nós e antinós, aplicando-se a equação:

$$V = f \cdot Y_n \cdot 2\pi \quad [\text{m/s}] \quad (19)$$

Sendo  $f$  a frequência utilizada (Hz),  $Y_n$  o valor da dupla amplitude obtida (mm) e  $2\pi$  o fator de correção utilizado.

Dessa forma, com os valores da velocidade em cada um dos quatro pontos (nós e antinós), define-se os valores da potência dissipada entre dois nós consecutivos, através da equação que se segue. Com os valores de  $P_1$  e  $P_n$ , pode-se, então, calcular a potência dissipada por unidade de comprimento, sendo ela:

$$P = \frac{P_1 - P_n}{n \cdot \lambda / 2} \quad [\text{mW/m}] \quad (20)$$

Onde:

$P$  – potência dissipada [mW/m]

$P_1$  – potência do nó 1 [mW/m]

$P_n$  – potência do “enésimo” nó [mW/m]

$\lambda$  - comprimento de onda [m]

## 6. APARATO EXPERIMENTAL EXISTENTE NO LFIECCE

*Este capítulo falará sobre a bancada existente no LFIECCE e das modificações necessárias para a execução de ensaios de autoamortecimento segundo a norma IEEE 563.*

### 6.1. A BANCADA

A bancada para ensaios do Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia da UnB é uma das mais modernas e bem equipadas do Brasil. Nela são executados ensaios em cabos de diferentes diâmetros para projetos importantes ao país, como o da construção do Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira, que está construindo a Usina Hidroelétrica de Jirau e a Usina Hidroelétrica de Santo Antônio, em Rondônia.

A Figura 23 a seguir apresenta um esquema da configuração da bancada.

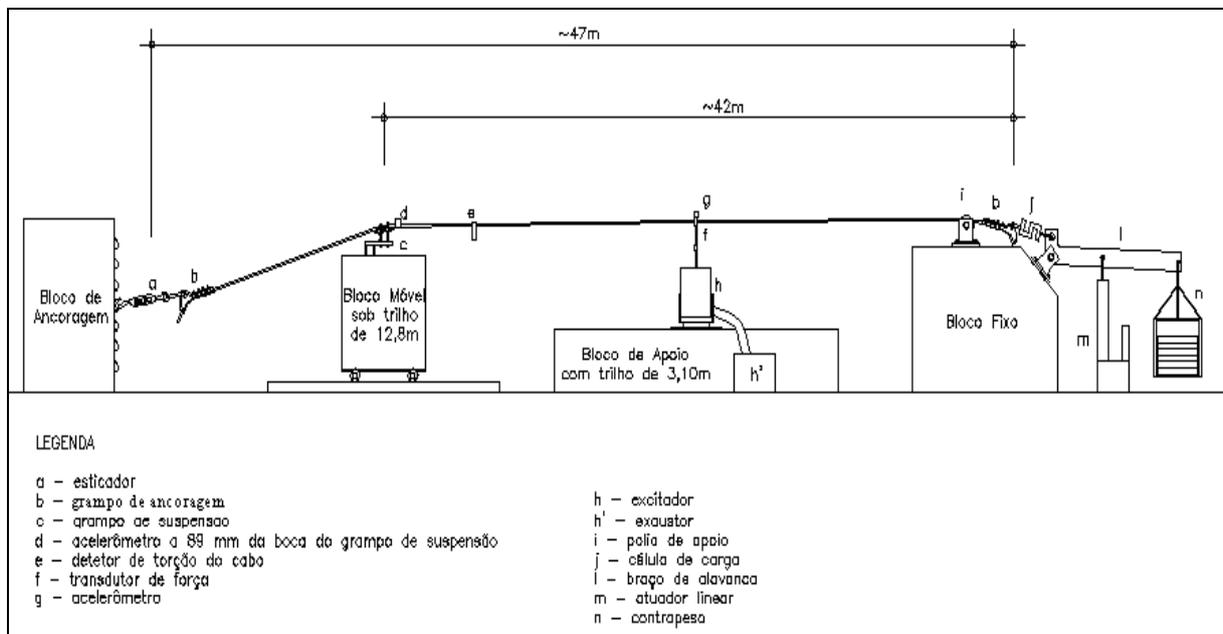


Figura 23 - Desenho Esquemático da bancada de ensaios (Murça & Kaje, 2009).

Na extremidade esquerda está localizado o Bloco de Ancoragem, na extremidade direita o Bloco Fixo. Eles são responsáveis pela fixação e sustentação do mecanismo de tração do cabo. Nas posições intermediárias estão o Bloco Móvel, responsável pela determinação do tamanho do vão livre do cabo, o qual varia de 32 a 44 metros, e o bloco de apoio, responsável pela sustentação do dispositivo eletrodinâmico, o *shaker*. O vão livre, ou vão ativo do cabo, representa o vão entre o bloco móvel e o bloco fixo, enquanto o vão passivo representa o espaço compreendido entre o bloco de ancoragem e o bloco móvel.

### 6.1.1. O MECANISMO DE FIXAÇÃO, APLICAÇÃO E CONTROLE DE TRAÇÃO DE CABOS

O mecanismo de estiramento de cabos do LFIECCE, o tifor, é preso ao bloco de ancoragem pelo grampo de ancoragem (Figura 24). O grampo de fixação (Figura 25) é responsável por prender o cabo de modo que não permita deslocamento relativo entre o cabo e grampo e fica conectado ao tifor.



Figura 24 - Tifor preso ao Bloco de Ancoragem.



Figura 25 - Grampo de Fixação

Na extremidade direita da bancada, apoiado sobre o bloco fixo está um sistema de contrapesos responsável pelo controle da tensão no cabo. Esse sistema é composto por um braço que gera uma alavanca, tracionando o cabo (Figura 26).



Figura 26 - Sistema de tração do cabo.

O sistema de alavanca é suportado por um atuador linear hidráulico – Electrack 205 Series/THOMSON, cuja temperatura máxima de trabalho é de  $65,65^{\circ}\text{C}$  (sendo a temperatura ideal  $25^{\circ}\text{C}$ ). O atuador e seu mecanismo de controle (Figura 27) são responsáveis por manter a força de tração do condutor sempre constante. As informações sobre a tensão no cabo são obtidas através de uma célula de carga colocada entre o grampo de ancoragem e o braço de alavanca (Figura 28). A célula de carga envia as informações para o controlador do atuador que por sua vez aciona o dispositivo atuador, levantando ou abaixando o braço de alavanca. Assim, o eixo do atuador pode ser estendido ou retraído, por, no máximo, 45 segundos. O atuador é controlado pelo sistema de controle MCS-2052, sendo que a extensão ou retração possível pode ser de 4, 8, 12, 18 e 24 pol. Assim, para obter-se uma carga estática de 4000 lbs (1809,95 kg), extensões ou retrações de até 18 pol. são utilizadas, enquanto que para 24 pol., o valor da carga estática é de 2500 lbs (1131,22 kg).



Figura 27 – Controlador do atuador linear.



Figura 28 - Célula de carga montada no bloco fixo.

O dispositivo Gefran 40B 96 (Figura 29) é o indicador da célula de carga. Ele é o dispositivo responsável por captar o sinal da célula de carga e enviar para o controlador do atuador linear. Fazendo com que a tensão no cabo se mantenha constante.



Figura 29 - Gefran, indicador da célula de carga.

Nos ensaios de autoamortecimento é interessante que a tensão no cabo se mantenha constante já que a potência dissipada no cabo é função tensão à qual ele está submetido. Ou seja, se a tensão for constante ter-se-á uma variável a menos no sistema.

O Gefran é capaz de perceber a variação da força aplicada no cabo podendo emitir um sinal de resposta dentro de 15 a 120ms(de acordo com programação imposta) e com precisão de 0,2% f.s.(full scale)  $\pm 1$  dígito.

### **6.1.2. MECANISMO DE APLICAÇÃO DE CARGA PARA VIBRAÇÃO (SHAKER)**

Os dispositivos de vibração de cabos do LFIECCE, os *shakers*, foram fabricados pela empresa britânica Data Physics. Seus modelos são do tipo V400 HG (Figura 30).



Figura 30 - *Shakers* Data Physics V400 HG

Segundo o guia IEEE 563, a massa do shaker não deve exceder 10% da unidade de massa por comprimento do conductor a ser testado. Para atender a essa exigência foi construída uma haste regulável para ser adaptada ao shaker (Figura 31), que fica presa ao cabo sem exercer tração ou compressão. Portanto, neste caso, apenas o peso da haste presa ao cabo deve ser

observada. Essa haste pesa em torno de 400g e é adequada para a execução de ensaios em condutores com até 4kg/m.



Figura 31 - Detalhe da haste atuadora no shaker.

### 6.1.3. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A bancada dispõe de um aquisitor de dados modelo ADS 2000 - IP. Com ele é possível conectar diversos tipos de transdutores à bancada. Basicamente para os experimentos serão utilizados:

- Células de carga para medição da tensão no cabo e da força exercida pelo *shaker*.
- Acelerômetro, para o controle de frequência.
- Sensores de deslocamento para medição das amplitudes de vibração e da torção do cabo.

A Figura 32 mostra um esquema genérico de instrumentação da bancada. Para a realização dos métodos de ensaio indicados será necessário realizar mudanças na disposição dos sensores e transdutores ao longo da bancada.

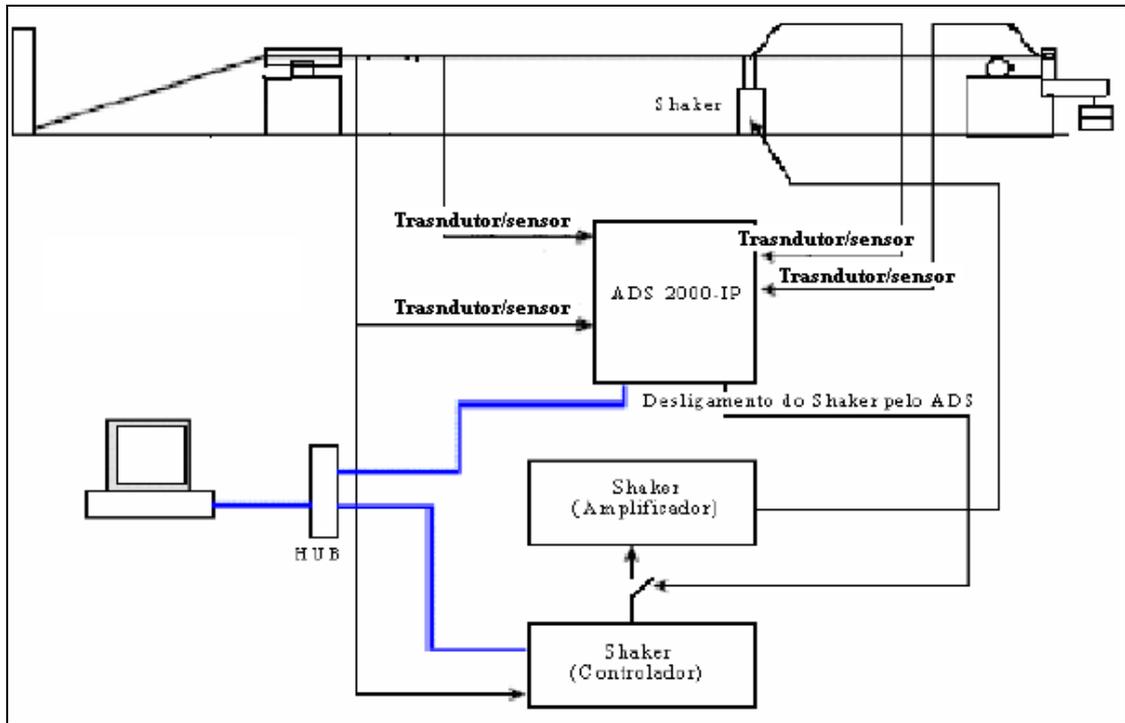


Figura 32 - Esquema de instrumentação da bancada.

## 7. ADAPTAÇÃO PROPOSTA À BANCADA: PROJETO CONCEITUAL

*Este capítulo falará sobre as propostas iniciais para a geometria do terminal e sua evolução ao longo do trabalho.*

### 7.1. PROPOSTAS INICIAIS

A bancada de ensaios de tração de cabos do LFIECCE mostra-se adequada para a execução de testes de autoamortecimento segundo o Método da Potência, necessitando apenas que uma adaptação seja feita para que o mínimo de energia seja perdida nos vãos pós-terminal. O Guia IEEE-STD 563 sugere que sejam usados terminais flexíveis ou, como alternativa, terminais fixos tradicionais com comprimento mínimo de seis vezes o diâmetro do condutor, fixado por no mínimo seis parafusos (Figura 20).

No bloco fixo da bancada do LFIECCE existem oito barras roscadas verticais chumbadas à alvenaria, especialmente posicionadas para a instalação de terminais específicos para a execução dos testes de fadiga de cabos condutores. O novo terminal projetado deverá ser instalado nesse bloco fixo, substituindo os terminais para teste de fadiga.

Pensando em versatilidade, foi concebido um terminal removível que suporta variados diâmetros de cabos, necessitando apenas de pequenas modificações. Um suporte fixo foi projetado para receber garras diferentes para diferentes diâmetros de condutores. Seguindo as recomendações do guia, o primeiro projeto do terminal possuía uma coluna retangular com base de 138 mm de comprimento, Figura 33, e o porta-sapata era fixado ao suporte por seis parafusos, possibilitando ensaios com condutores de até 23 mm de diâmetro.

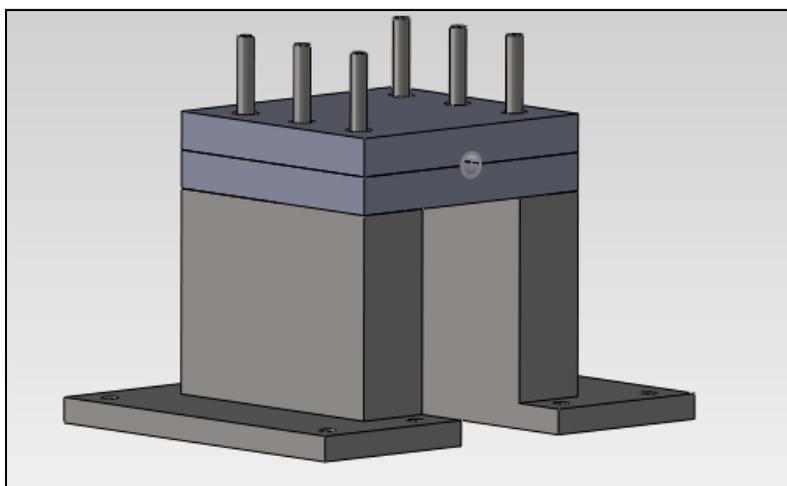


Figura 33 - Projeto inicial.

Entretanto, o LFIECCE será responsável pelos testes de condutores CAL (condutor de alumínio liga) da fabricante Nexans, projetados para o Linhão do Madeira, que tem 44,4 mm de diâmetro. A fim de atender essa necessidade, o projeto do terminal foi modificado e sua geometria foi alterada. A coluna de suporte para as garras foi aumentada, com base 65 mm de largura, 150 mm de comprimento e face superior com 270 mm, atendendo à norma e possibilitando ensaios com cabos condutores de até 45 mm de diâmetro (Figura 34).

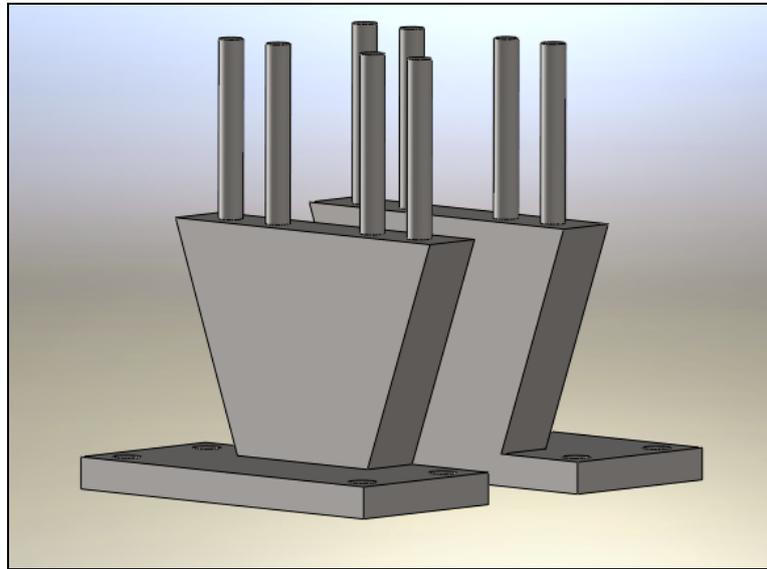


Figura 34 - Base reformulada.

As sapatas foram projetadas para cada diâmetro de condutor e poderão ser fixadas à base sem dificuldades. A Figura 35 ilustra o projeto da sapata para o condutor Nexans com 44,4 mm de diâmetro. As sapatas seriam projetadas para serem encaixadas nas placas chamadas de porta-sapatas (Figura 36). Entretanto essa concepção inicial foi modificada por requerer grande precisão de fabricação em demasiadas etapas dos componentes para que não houvesse movimentação relativa entre as peças da montagem. Essa modificação foi necessária, pois o mínimo possível de energia do condutor deve ser absorvida pelo terminal durante os ensaios. O objetivo é que o máximo possível de energia seja refletido pelo terminal ao cabo, mantendo-a no vão de ensaio.

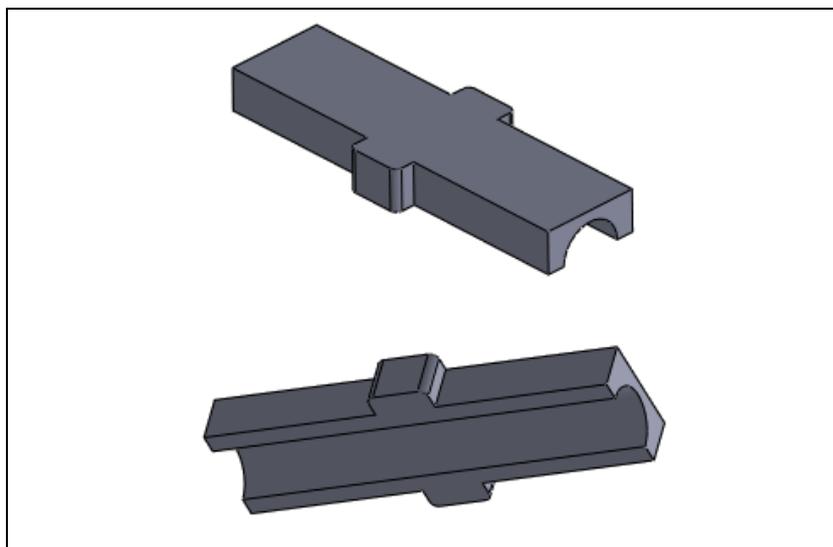


Figura 35 - Modelo de sapata.

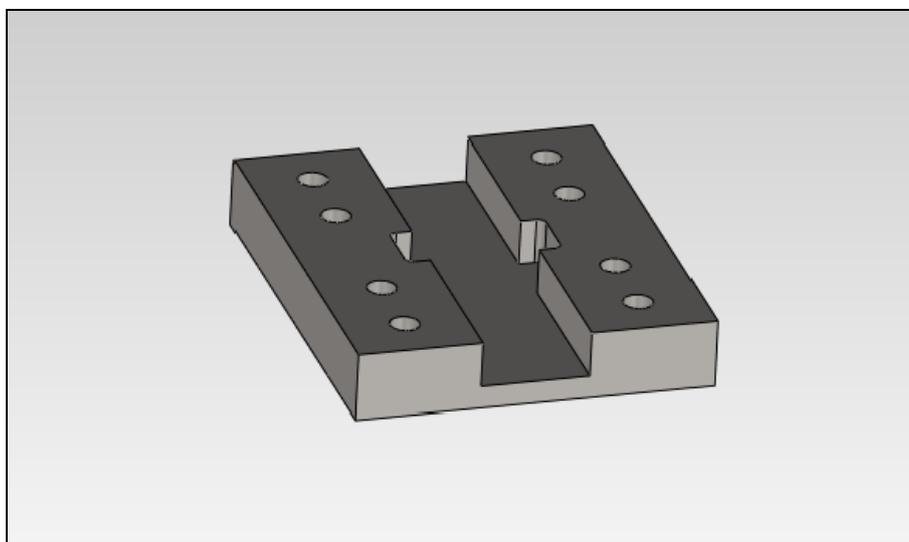


Figura 36 - Modelo do porta-sapatas.

## **7.2. PROPOSTA FINAL**

Todo projeto é passível de sofrer grandes mudanças da sua idealização até sua execução. As geometrias e soluções iniciais sofreram várias alterações para simplificar e aumentar a eficiência do terminal.

### **7.2.1. BASE**

O projeto da base de fixação das garras foi modificado e uma geometria assimétrica foi implementada para aumentar a rigidez da montagem. As barras roscadas, inicialmente fixas às

colunas, foram substituídas por 8 parafusos de 3/8" de diâmetro para facilitar suas substituições em caso de avaria dos mesmos (Figura 37).

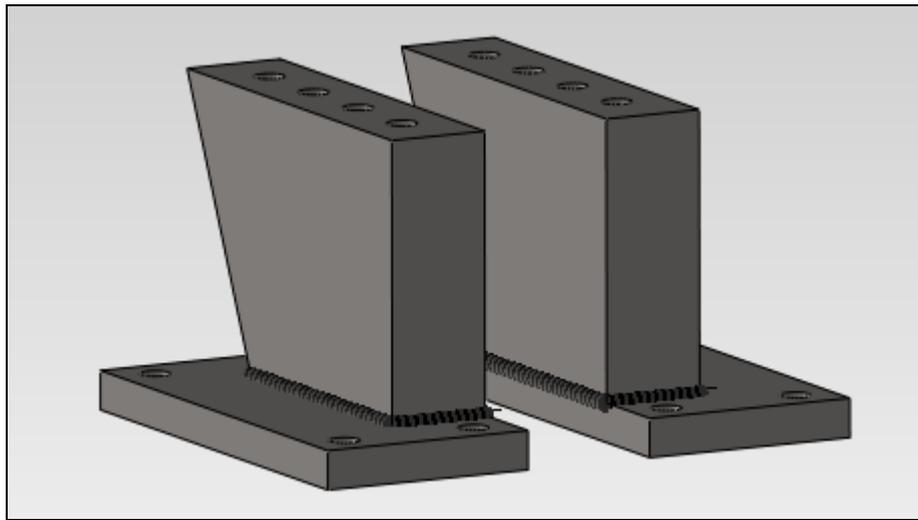


Figura 37 – Projeto final da base de fixação das garras.

### 7.2.2. Garras

Os porta-sapatas e as sapatas foram substituídas por garras que já possuem a geometria necessária para compressão do condutor durante os ensaios (Figura 38). Cada garra será projetada para um condutor diferente, variando o diâmetro do seu rasgo central para os condutores específicos.

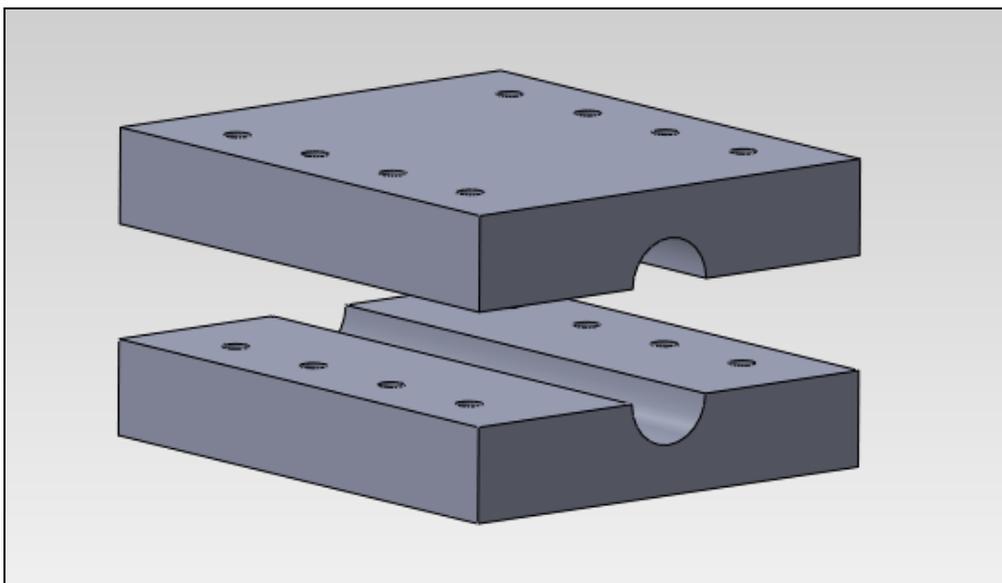


Figura 38 - Projeto final das garras.

## 8. GEOMETRIAS E FATORES DE SEGURANÇA: MEMORIAL DE CÁLCULO

*Este capítulo apresentará as condições de operação, os valores encontrados para as geometrias e os fatores de segurança das partes que compõem o terminal.*

Este capítulo mostrará as geometrias escolhidas para as peças do terminal e os fatores de segurança para as construções. As peças foram superdimensionadas para que suas vidas úteis fossem maximizadas e para que a grande massa do terminal acarretasse grande inércia. Todos os cálculos podem ser apreciados nos anexos do trabalho.

### 8.1. FORÇA DE TRAÇÃO DO CONDUTOR

A força de tração do condutor é uma função de sua tensão de ruptura. Existem alguns valores recomendados para o ensaio de autoamortecimento (Seção 5.1.1). O projeto do terminal será calculado considerando a máxima tração, 50% da tensão de ruptura do condutor.

O condutor de maior diâmetro suportado pelo projeto será o de 44,4 mm do fabricante Nexans. O site do fabricante foi consultado e a tensão de ruptura do condutor é 22.63 kgf (221,94 kN). Como a tração máxima é 50 % da tensão de ruptura, 110,97 kN será a maior força estática a solicitar o terminal, apenas ocorrendo caso o condutor se rompa e o terminal tenha de suportar toda a tração.

Associada a essa força axial do condutor há a força exercida pelo *shaker*, que vibra o cabo, e aplica uma força vertical totalmente inversível de 15.000 N por ciclo. Essas serão as forças consideradas para projeto (Figura 39).

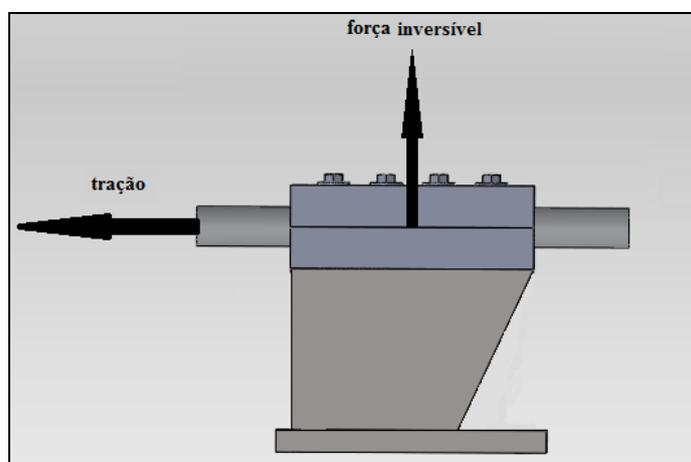


Figura 39 – Forças solicitantes no condutor.

## 8.2. PARAFUSOS DO BLOCO FIXO

No bloco fixo do LFIECCE existem 8 barras roscadas que compõem sua alvenaria. São 8 barras de  $\frac{3}{4}$ " (19.05mm) de diâmetro com rosca UNC-10, dispostas como mostra a Figura 40.

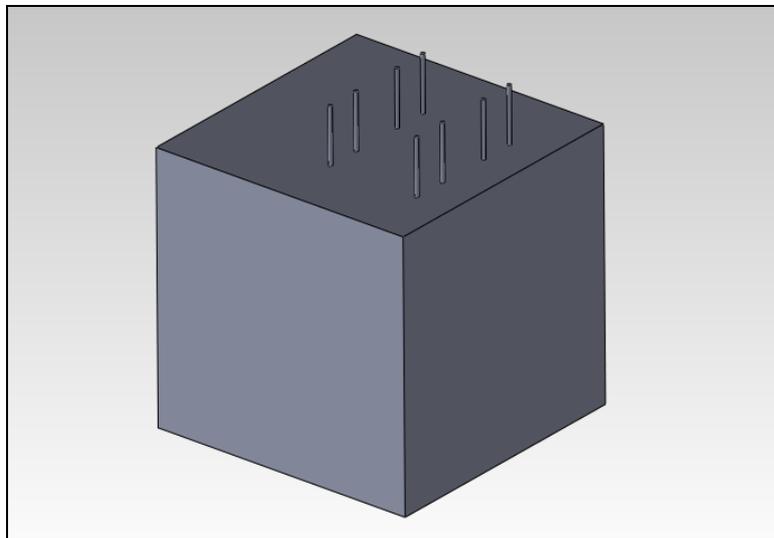


Figura 40 - Bloco fixo.

Os parafusos do bloco são solicitados pela força de tração do cabo, que é transmitida pela fixação e atua como esforço cisalhante nos parafusos, além de causar um momento torçor. A força vertical aplicada pelo *shaker* no condutor é transmitida à peça e à união entre esta e o bloco, solicitando os parafusos axialmente. Tal força de 15.000 N é completamente inversível e atua ora como tracionadora ora como compressora nos parafusos (Figura 41).

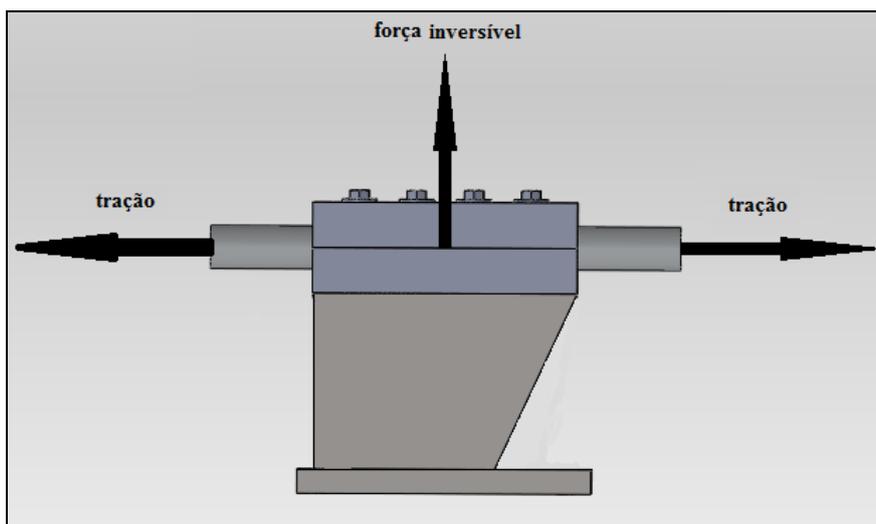


Figura 41 - Vista lateral da montagem e esforços solicitantes.

Considerou-se que as barras roscadas são de aço SAE nº5, cujas características são: resistência mínima à prova (Sp) 586,05 MPa; tensão de escoamento (Se) é 128,24 Mpa; resistência última à tração (Sut) 827,37 Mpa (Joseph E. Shigley, 2005).

O fator de segurança estático dos parafusos é igual a 60,13. Os cálculos de fadiga foram feitos para vida infinita dos parafusos e foi considerada uma força totalmente inversível de 15000 N. O fator de segurança contra a separação da junta é 40,70 e o fator de Goodman Modificado foi é igual a 28,92 (página 72).

### **8.3. PARAFUSOS DE FIXAÇÃO DAS GARRAS**

O guia IEEE 563 indica que sejam utilizados no mínimo 6 parafusos para a fixação das garras que apertam os cabos. Como as garras foram projetadas para testes de condutores de até 45 mm de diâmetro atendendo à norma IEEE-563, para que as forças dos parafusos sejam melhor distribuídas, 8 parafusos serão utilizados para fixar as garras que apertam o cabo ao terminal. Foram selecionados parafusos com diâmetro de 3/4" (19,05 mm) e 4,75" (120,65 mm) de comprimento, sextavado ASTM A 325 T1 temperado e revenido, do fabricante Ciser (Ciser Parafusos e Porcas), com rosca UNC-10, cujas características são: resistência mínima à prova (Sp) 586,05 MPa; tensão de escoamento (Se) é 128,24 Mpa; resistência última à tração (Sut) 827,37 Mpa (Joseph E. Shigley, 2005).

O fator de segurança estático dos parafusos é igual a 246,53. O fator de segurança contra fadiga ficou extremamente alto, pois um parafuso suficientemente longo teve de ser selecionado e o parafuso mais fino disponível encontrado no mercado foi o de 3/4". Os cálculos de fadiga foram feitos para vida infinita dos parafusos e foi considerada uma força flutuante 15000 N. Os fatores de segurança de Goodman Modificado e Gerber foram encontrados e o de Goodman foi preferido por ser maior. O valor encontrado é igual a 81,83 (página 76).

### **8.4. GEOMETRIA DAS COLUNAS**

As colunas são necessárias para que as garras possam ser montadas nos blocos fixos já existentes no LFIECCE e receber os cabos sem que a altura de ancoragem utilizada no laboratório seja alterada.

A geometria das colunas foi selecionada para permitir a montagem de garras variadas, específicas para cada diâmetro de cabo a ser testado. A largura da coluna foi fixada em 65 mm, sua altura 180 mm e comprimento de base igual a 186,5 mm para que haja espaço para o

posicionamento das arruelas e porcas. O material é o aço 1020 repuxado a frio, cuja resistência mínima ao escoamento ( $S_y$ ) é 390 MPa, o fator de segurança estático calculado foi 13,37 (página 78).

As colunas foram projetadas para que as tensões dinâmicas provenientes do condutor no lado do vão livre exercessem menor momento na solda da base.

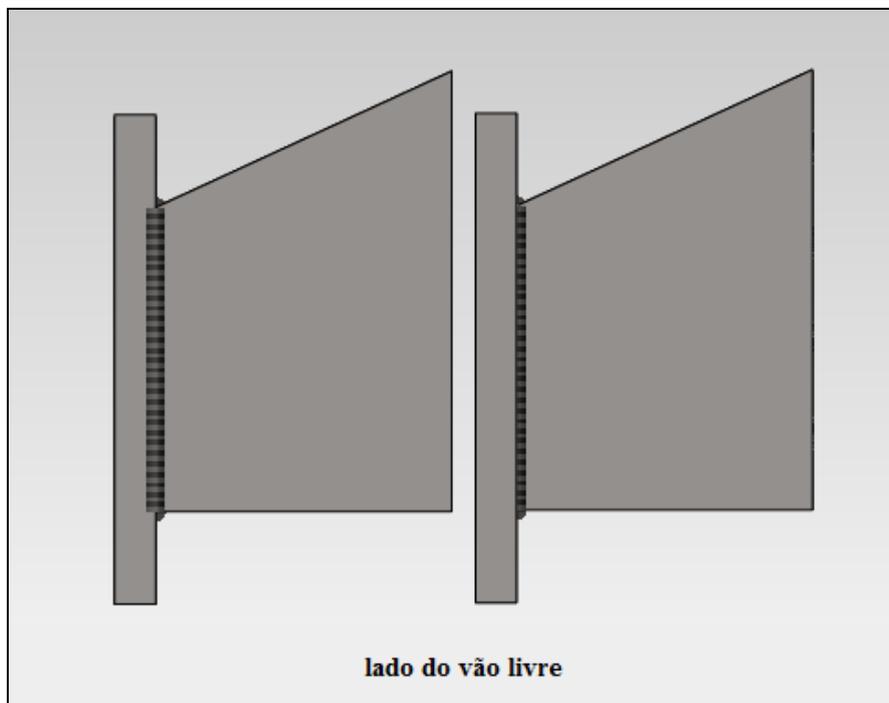


Figura 42 - Vista à esquerda das bases do terminal.

### 8.5. SOLDA DAS COLUNAS

As colunas que apoiam as garras são soldadas à placa base, fixa aos parafusos do bloco fixo. Para geometria selecionada, a solda utilizando um eletrodo E80XX, cujas características são: resistência mínima ao escoamento ( $S_y$ ) 462 MPa; resistência última à tração ( $S_{ut}$ ) 551MPa (Joseph E. Shigley, 2005).

O fator de segurança estático da solda, baseado em uma resistência mínima e no critério da energia de distorção é igual a 13,25. O fator de segurança estático para o metal de solda é 19,19. Os cálculos de fadiga foram feitos para vida infinita da junção e foi considerada uma força flutuante 15000 N. O fator de segurança estático pelo critério de Gerber foi encontrado e é igual a 20,32 (página 79).

## 8.6. GARRAS

As garras (Figura 43) foram projetadas com espessura de 46,5mm de largura cada, dessa maneira elas podem ser fabricadas para testes de condutores de até 45 mm de diâmetro. Foi calculado o fator de segurança contra fadiga pelo critério de falha de Goodman modificado e Langer para a força completamente alternante de 15000 N. O valor encontrado foi de 180,69 (página 8279).

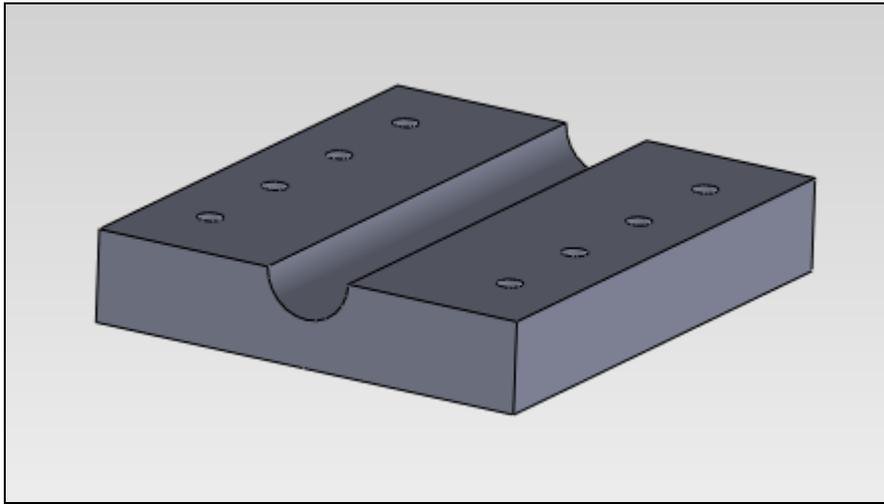


Figura 43 - Garra com sulco para encaixe do condutor.

## 9. MEMORIAL DE CÁLCULO

Todas as equações foram programadas no programa MATLAB para aumentar a agilidade e confiabilidade dos resultados. Os valores de entrada são inseridos para a obtenção dos resultados. Todos os valores têm suas unidades indicadas nas linhas de cálculo.

### 9.1. PARAFUSOS DO BLOCO FIXO

%Cálculo do fator de segurança contra fadiga para os 8 parafusos da base.

Primeiro serão encontradas as rigidezes dos três troncos de cone de pressão de membro para o parafuso de calota.

```
clc;
clear all;
```

```
%Tronco superior
```

```
E=210000;           %(Modulo de elasticidade, MPa)
```

```
d=19.05;           %(diâmetro do parafuso, mm)
```

```
D=28.575;          %(diâmetro menor do tronco, Dw, mm)
```

```
t=41.56;           %(altura do tronco, mm)
```

```
%rigidez dos membros:
```

```
k=(0.5774*pi*E*d)/(log(((1.155*t+D-d)*(D+d))/((1.55*t+D+d)*(D-d))));
```

```
clc;
clear all;
```

```
clc;
clear all;
```

```
%Tronco do meio
```

```
l=51.085;          %agarramento efetivo, mm
```

```
h=41.56;           %altura do tronco, mm
```

```
E=210000;          %Modulo de elasticidade, MPa
```

```

d=19.05;           %diâmetro do parafuso, mm

D1=28.575;        %diâmetro menor do tronco, Dw, mm

D=(D1+2*(1-h)*0.57735);           %diâmetro maior do tronco, mm

t=16.0175;       %altura do tronco, mm

k=(0.5774*pi*E*d)/(log(((1.155*t+D-d)*(D+d))/((1.55*t+D+d)*(D-d))));

clc;
clear all;

%Tronco inferior

E=25000;         %(Modulo de elasticidade, MPa)

d=19.05;         %(diâmetro do parafuso, mm)

D=28.575;        %(diâmetro maior do tronco, mm)

t=9.525;         %(altura do tronco, mm)

k=(0.5774*pi*E*d)/(log(((1.155*t+D-d)*(D+d))/((1.55*t+D+d)*(D-d))));

Encontradas as rigidezes, encontramos o valor de k, rigidez média.
Consequentemente, encontraremos os valores da constante da junção (C), da
pré-carga (Fi) e do fator de carga (n), que previne que a tensão do
parafuso se iguale à resistência à prova.

clc;

clear all;

k1=7.6969*10^6;  %rigidez do tronco superior, N/m
k2=2.5068*10^7;  %rigidez do tronco do meio, N/m
k3=1.7356*10^6;  %rigidez do tronco inferior, N/m

k4=(1/k1)+(1/k2)+(1/k3);

km=1/k4;         %rigidez média do tronco

At=194.84;       %área de tração, mm²

E=210000;        %Módulo de Young, Mpa

l=51.085;        %Comprimento efetivo, mm

kb=(At*E)/l;     %Rigidez do parafuso de porca, N/m

C=kb/(kb+km);    %Constante da junção

```

```

Sp=586.055;           %Resistência mínima de prova, Mpa
Fi=0.75*At*Sp;       %pré-carga, N
P=15000/8;           %Força por parafuso; N
n=(Sp*At-Fi)/(C*P);   %Fator de carga
Se=128.24;
Sut=827.371;

```

Agora, encontraremos os critérios de Goodman modificado para o cálculo do fator de segurança contra fadiga para  $10^6$  ciclos.

```
%%CRITERIOS DE GOODMAN MODIFICADO
```

```

sigmai=Fi/At;         %Tensão mínima, MPa
sigmaa=(C*P)/(2*At);   %Tensão alternante, MPa
sigmam=sigmaa+sigmai;  %Tensão média, Mpa
SaGood=Se*(Sut-sigmai)/(Sut+Se);  %Tensão de Goodman
ngood=SaGood/sigmaa;   %fator de segurança de Goodman

```

**Resultados:**

At	194.8400
C	0.3740
E	210000
Fi	8.5640e+04
P	1875
SaGood	52.0455
Se	128.2400
Sp	586.0550
Sut	827.3710
k1	7696900
k2	25068000
k3	1735600
k4	7.4598e-07
kb	8.0095e+05
km	1.3405e+06
l	51.0850
n	40.7062
ngood	28.9199
sigmaa	1.7996
sigmai	439.5413
sigmam	441.3409

```
%Análise dos 8 parafusos da base para cisalhamento
```

Nessa análise encontraremos o fator de segurança contra cisalhamento dos parafusos do bloco fixo, que fazem a junção da base do terminal com o bloco.

```
clc;  
clear all;
```

```
%Área dos parafusos
```

```
A=8*(pi*(19.05)^2)/4;
```

```
%Tabela 8-9:
```

```
Sy=634,32;          %Resistencia mínima de escoamento, Mpa
```

```
%Pela teoria da energia de distorção:
```

```
Ssy=0.577*Sy;
```

```
Fs=110972/8;       %força axial no cabo, por parafuso
```

```
n=A*Ssy/Fs;
```

**Resultados:**

A	2.2802e+03
Fs	1.3872e+04
Ssy	365.8180
Sy	634
ans	32
n	60.1328

### 9.3. PARAFUSOS DAS GARRAS

```
%Fator de Segurança contra Fadiga  
%exemplo 8.4
```

```
%parafuso 3/4" (19.05 mm)  
%comprimento 120,65 mm(tabelado)  
%grau 5
```

```
%Primeiro encontraremos a rigidez do parafuso de porca (kb), em seguida a  
%rigidez do tronco dos membros (km) e finalmente a constante de rigidez da  
%junção(C).
```

```
clc;
```

```
clear all;
```

```
At=194.84;          %área de tração, mm2
```

```
E=210000;          %Módulo de Young, Mpa
```

```

l=120,65;           %Comprimento efetivo, mm

d=19.05;           %diâmetro do parafuso, mm

km=(0.5774*pi*E*d)/(2*log(5*((0.5774*l)+(0.5*d))/((0.5774*l)+(2.5*d))));
%rigidez do tronco

Ad=(pi*d^2)/4;     %área do diâmetro maior, mm²

ld=120-25.05;     %porção não rosqueada no agarramento

lt=l-ld;          %comprimento rosqueado no agarramento

kb=(Ad*At*E)/((Ad*lt)+(At*ld));      %Rigidez do parafuso de porca, N/m

C=kb/(kb+km);     %Constante da junção

Sp=586.05;        %Resistência mínima de prova, Mpa

Fi=0.75*At*Sp;   %pré-carga, N

P=15000/8;        %Força por parafuso; N

n=Fi/(P*(1-C));  %Fator de Segurança contra a separação da junta

Se=128.24;        %Resistência do parafuso, Mpa

Sut=827.37;       %Resistência mínima à tração, Mpa

%%CRITERIOS DE GOODMAN MODIFICADO

sigmai=Fi/At;     %Tensão mínima, MPa

sigmaa=(C*P)/(2*At); %Tensão alternante, MPa

sigmam=sigmaa+sigmai; %Tensão média, Mpa

SaGood=Se*(Sut-sigmai)/(Sut+Se); %Tensão de Goodman

ngood=SaGood/sigmaa; %fator de segurança de Goodman

```

**Resultados:**

Ad	285.0230
At	194.8400
C	0.1322
E	210000
Fi	8.5639e+04
P	1875
SaGood	52.0460
Se	128.2400
Sp	586.0500
Sut	827.3700
ans	65
d	19.0500
kb	4.5484e+05
km	2.9861e+06
l	120
ld	94.9500
lt	25.0500
n	52.6315
ngood	81.8295
sigmaa	0.6360
sigmai	439.5375
sigmam	440.1735

%Análise dos 8 parafusos das garras para cisalhamento

```
clc;
clear all;
```

```
A=(8*(pi*19.05)^2)/4;      %Área dos parafusos
```

```
%Tabela 8-9, Shigley:
```

```
Sy=827.371;      %Resistencia mínima de escoamento, Mpa
```

```
%Pela teoria da energia de distorção:
```

```
Ssy=0.577*Sy;      %MPa
```

```
Fs=110972/8;      %força axial no cabo, por parafuso
```

```
n=A*Ssy/Fs;
```

**Resultados:**

A	7.1634e+03
Fs	1.3872e+04
Ssy	477.3931
Sy	827.3710
n	246.5315

## 9.4. COLUNAS

```
%Fator de segurança estático das colunas

%Para o cálculo do fator de segurança estático, consideraremos a tração do
%cabo como sendo o maior esforço estático a solicitar a montagem.

clc;
clear all;

F=110972/2;           %força axial do cabo por coluna, N
M=((F/2)*225)/1000;   %momento da força, N.m
b=65;                %largura da coluna, mm
h=186.5;             %comprimento mínimo da coluna, mm
I=(b*(h^3))/12;      %momento de inércia, kg.m²
r=115;               %raio de aplicação da força, mm
T=F*r;               %torque da força

sigma=((6*M)/(b*(h^2)))*10^3;      %tensão, Mpa

b1=150;      %lado mais longo, mm
c1=65;       %lado mais curto, mm

Tau=(T/(b1*(c1^2)))+(3+(1.8/(b1/c1)));      %tensão de tração máxima, Mpa

%Energia de distorção

%Com os valores das tenções encontrados, será calculado o valor do fator de
%segurança para o critério da energia de distorção:

signal=sqrt((sigma^2)+3*(Tau^2));

Sy=390;      %resistência ao escoamento, Mpa

n=Sy/signal;      %fator de segurança
```

**Resultados:**

F	55486
I	3.5137e+07
M	6.2422e+03
Sy	390
T	6380890
Tau	13.8485
b	65
b1	150
c1	65
h	186.5000
n	13.3787
r	115
sigma	16.5659
sigmal	29.1508

## 9.5. SOLDA DAS COLUNAS

```

clear all
clc

% Análise estática para a solda

% Uso do método convencional para o metal de solda.

% Selecionando o eletrodo E80xx

%Solda em filete de 3/8"

Sy=462;           %resistência ao escoamento, MPa

Ssy=0.577*Sy;

Sut=551;         %resistência à tração, MPa

%Propriedade da solda em filete:

h=9.525;         % espessura do cordão de solda, mm

b=65;           % largura da coluna, mm

d=186.5;        % comprimento da coluna, mm

A=1.414*h*(b+d); % área da garganta, mm2

Iu=((d^2)/6)*(3*b+d); % Segundo momento de inércia unitário, mm3

I=0.707*h*Iu;   %Momento de inércia baseado na garganta de solda, mm4

F=110972/2;     %valor da força axial por solda, N

Taul=F/A;       %Cisalhamento primário, Mpa

r=205;         %Raio de aplicação da força, mm

```

```

Tau2=(F*r)/I;           %Cisalhamento secundário, Mpa

Taufinal=sqrt(Tau1^2+Tau2^2);           %Cisalhamento final, Mpa

n=Ssy/Taufinal;           % Fator de segurança baseado em uma resistência mínima
e no critério da energia de distorção

% Para o metal de fixação

%da tabela A-20:

Sut2=470;           %Resistência a tração, Mpa

Sy2=390;           %Resistência ao escoamento, Mpa

sigma=(F*138*6)/(b*(d^2));           %Resistência ao cisalhamento, Mpa

n2=Sy2/sigma;           %Fator de segurança para o metal de fixação

```

### Resultados:

```

A           3.3873e+03
F           55486
I           1.4893e+07
Iu          2.2116e+06
Ssy         266.5740
Sut         551
Sut2        470
Sy          462
Sy2         390
Tau1        16.3806
Tau2        0.7638
Taufinal    16.3984
b           65
d           186.5000
h           9.5250
n           16.2561
n2          19.1921
r           205
sigma       20.3209

```

```
clear all
```

```
clc
```

```
%Solda das colunas
```

```
%Cálculo do fator de segurança contra fadiga.
```

```
%Segundo a tabela 7-4 (Shigley), para aço repuxado a frio:
```

```

a=4.51      %fator a, Mpa
b=-0.265    %expoente b
Sut=470;    %Resistência à tração
ka=a*Sut^b; %Fator de condição de modificação de superfície

%Para base retangular:
d=210;      %comprimento do retângulo da base
b=60;       %largura do retângulo da base
de=0.808*(d*b);
%Equação 7.19
kb=1.51*de^(-0.157); %fator de modificação de tamanho
%Equação 7.25 para torção
kc=0.59;    %fator de modificação de carga
kd=1;       %fator de modificação de temperatura
ke=0.753    %fator de confiabilidade de 99.9%
kf=1        %fator de efeitos diversos

%para o metal base aço 1045 repuxado a frio, tabela A-20
Sut1=630;   %resistência a tração, Mpa
Selinha=0.504*Sut1; %limite de resistência
Se=ka*kb*kc*kd*ke*kf*Selinha; %limite de resistência completamente
corrigido

%%Número de ciclos
sigmaa=15000/2; %tensão inversível por solda
N=10^6;
sigmalinhaF=Sut+345 %tensão verdadeira contra deformação
b1=-log10(sigmalinhaF/Se)/log10(2*N);
f=(sigmalinhaF/Sut)*(2*10^3)^b1
a1=((f*Sut)^2)/Se;
N1=(sigmaa/a1)^(1/b1); %número de ciclos

%Tabela 9-5

```

```

Kfs=2;

%Somente cisalhamento primário está presente:

h=9.525;    %largura do cordão de solda

A=0.707*h*(2*b+d);

Taulinhaa=Kfs*sigmaa/A;    %tensão cisalhante, Mpa

%Na ausência de uma componente média da força, o fator de segurança a
fadiga por Gerber é dado por:

nf=Se/Taulinhaa;    %fator de segurança contra fadiga

A          2.2223e+03
Kfs        2
N          1000000
N1         7.9649e-06
Se         44.1818
Selinha   317.5200
Sut        470
Sut1       630
Taulinhaa  6.7498
a          4.5100
a1         709.0534
b          60
b1         -0.2009
d          210
de         1.0181e+04
f          0.3766
h          9.5250
ka         0.8832
kb         0.3546
kc         0.5900
kd         1
ke         0.7530
kf         1
nf         6.5456
sigmaa     7500
sigmalinhaF 815

```

## 9.6. GARRAS

```
%Fator de segurança da garra contra fadiga
```

```
clc;
clear all;
```

```
w=230;    %largura da garra, mm
```

```
t=93;    %espessura da garra, mm
```

```

d=45;           %diâmetro do furo, mm
A=(w-d)*t;     %área líquida, mm2
Sut=470;       %resistência à tração, MPa
b=-0.265;      %tabela 8-8, Shigley
a=4.51;        %tabela 8-8, Shigley
ka=a*(Sut)^(b); %fator de superfície
kb=1;          %fator de tamanho
kc=1;          %fator de carregamento para flexão
kd=1;          %fator de temperatura
ke=0.753;      %fator de confiabilidade de 99.9%
a=(174/Sut)^2;
r=22.5;        %raio de entalhe, mm
q=1/(1+(sqrt(a)/sqrt(r))); %sensibilidade ao entalhe
kt=4.687;      %fator de concentração de tensão
kf=q*(kt-1)+1; %valor reduzido de kt
Fa=15000;      %força, N
sigmaa=(kf*Fa)/A; %tensão alternada, Mpa
Selinha=0.504*Sut;
Se=ka*kb*kc*kd*ke*kf*Selinha;

n=1/(sigmaa/Se); %fator de segurança por Goodman

```

### Resultados:

A	17205
Fa	15000
Se	696.3431
Selinha	236.8800
Sut	470
a	0.1371
b	-0.2650
d	45
ka	0.8832
kb	1
kc	1
kd	1
ke	0.7530
kf	4.4201
kt	4.6870
n	180.6997
q	0.9276
r	22.5000
sigmaa	3.8536
t	93
w	230

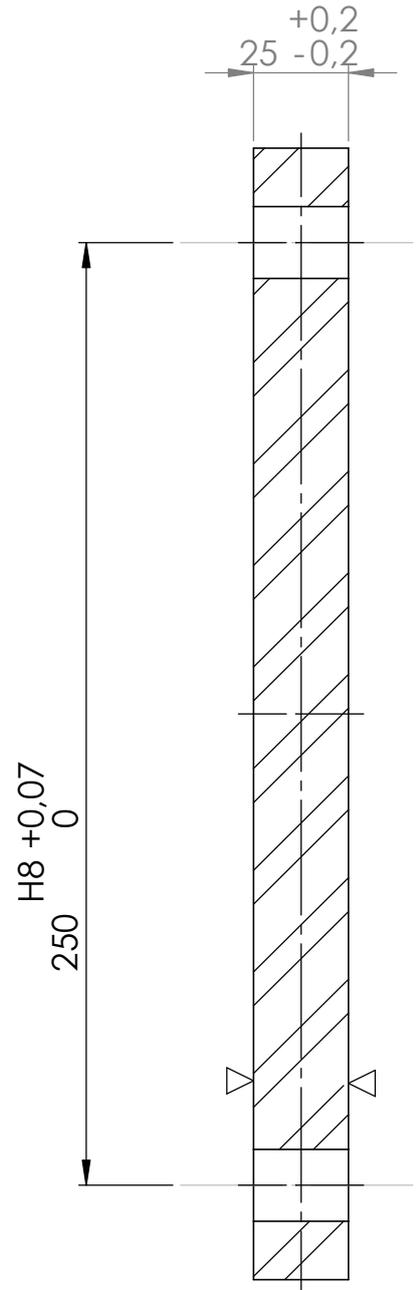
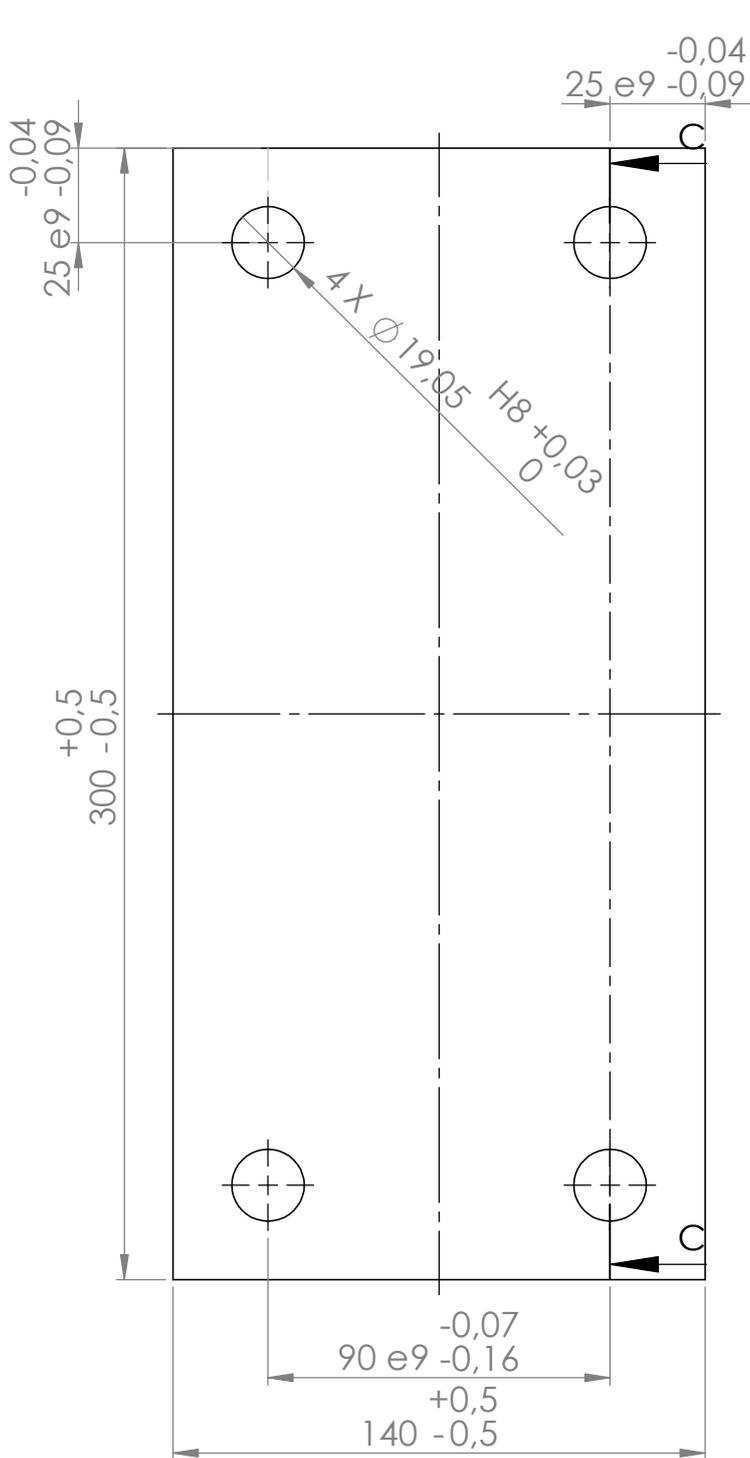
## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. (Fevereiro de 2001). NBR ISO 2768-1. *Tolerâncias para dimensões lineares e angulares sem indicação de tolerância individual*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: ABNT.
- Agência Nacional de Energia Elétrica. (2008). *Atlas de energia elétrica do Brasil*. Brasília: TDA Comunicação.
- Azevedo, C. R., & Tibério, C. (2004). *Metalografia e análise de falhas: casos selecionados (1993-2003)*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas.
- Basile, J. (16 de Julho de 2009). *Valor Online*. Acesso em 20 de 09 de 2012, disponível em <http://economia.uol.com.br/ultnot/valor/2009/07/16/ult1913u109995.jhtm>
- Chanal, A., Lévêqe, J.-P., & Porcheron, Y. (2003). *Lignes aériennes : matériels. - Conducteurs et câbles de garde*.
- CIGRE. (1979). *Recommendations for the Evaluation of the Lifetime of Transmission Line Conductors*. Electra.
- Ciser Parafusos e Porcas. (s.d.). Acesso em 14 de 01 de 2014, disponível em [ciser.com.br](http://ciser.com.br)
- de Souza Júnior, O. H. (2010). *Vibrações em Cabos Aéreos de Linhas de Transmissão - Estudo Teórico e Experimental por Meio de Modelos Lineares e Não Lineares*. Curitiba.
- Electrical Power Research Institute. (1979). *Transmission line reference book: wind-induced conductor motion*. Palo Alto.
- Electrical Power Research Institute. (1979). Wind Induced Conductor. In: *Transmission Line Reference Book*. Palo Alto, CA.
- Empresa de Pesquisa Energética. (2005). *Estudos do Plano Decenal de Expansão do Setor Elétrico*. Brasília.
- Fadel, A. A. (2010). Avaliação do Efeito de Tracionamento em Elevados Níveis de EDS no Condutor IBIS (CAA 397,5 MCM). Brasília, DF, Brasil.

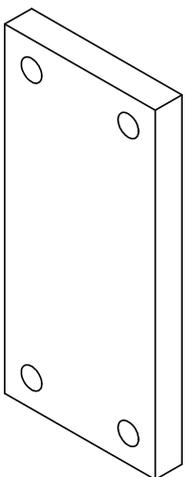
- Ferreira, J. d., Araújo, J., de Oliveira, A. G., de Olivera, M. C., & de Araújo, M. (2012). *Identificação das Formas de Medição das Variáveis Aquisitadas pelo Vibrógrafo e Identificação das Formas de armazenamento dessas variáveis*. Brasília.
- FORJASUL CANOAS S.A. (s.d.). Acesso em 05 de 12 de 2013, disponível em <http://www.forjasul.com.br/produtos.php>
- Fuchs, R. D., de Almeida, M. T., & Labegalini, P. R. (1992). *Projetos Mecânicos de Linhas Aéreas de Transmissão*. Editora Edgard Blucher.
- Furtado. (2001). *Vibração Eólica em Linhas de Transmissão e Subtransmissão, Treinamento Técnico*. CEMIG.
- Hard. (1958). *Studies of Conductor Vibration in Laboratory Span-Outdoor Test Span and Actual Transmission Lines*. CIGRE.
- Henriques, A. M. (Março de 2006). *Bancada de Ensaios Mecânicos à Fadiga de Cabos Condutores de Energia*. Brasília, DF, Brasil.
- Herek, O. (1997). *Bancada de Ensaios Mecânicos de Cabos Condutores a Altas Temperaturas*. Florianópolis: Dissertação de Doutorado em Engenharia Mecânica - UFSC.
- Herek, O. (1997). *Dissertação de Doutorado em Engenharia Mecânica. Bancada de Ensaios Mecânicos de Cabos Condutores a Altas*. Florianópolis: UFSC.
- IEEE. (1978). Std 564. In: *Guide for Laboratory Measurement of the Power Dissipation Characteristics of Aeolian Vibration Dampers for Single Conductor*.
- Joseph E. Shigley, C. R. (2005). *Projeto de Engenharia Mecânica*. Porto Alegre: Bookman.
- Kiessling, F., Nefzger, P., & Nolasco, J. F. (2003). *Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction*. Springer.
- Lavandoski, R. (24 de outubro de 2005). *Estudo das propriedades mecânicas de cabos condutores elétricos de tipo CAA usados e sua adequação ao retracionamento*. São Carlos, SP, Brasil.

- Mourão, M. (2004). Cabos e Emendas de Transmissão de Energia. *CEMIG - Informe Tecnológico n° 24*.
- Murça, L. B., & Kaje, C. T. (2009). *Estudo Experimental de Auto-Amortecimento em Cabos Condutores*. Brasília.
- Nexans. (2013). *Nexans*. Acesso em 20 de 12 de 2013, disponível em Nexans Brasil: [http://www.nexans.com.br/eservice/Brazil-pt\\_BR/navigate\\_210539/Cabos\\_aereos\\_nus.html](http://www.nexans.com.br/eservice/Brazil-pt_BR/navigate_210539/Cabos_aereos_nus.html)
- Poffenberger, J. a. (1965). Differential Displacement and Dynamic . *IEEE Transactions Paper, Vol PAS 84*, pp. 281-289.
- Porcas, C. P. (s.d.). *ciser.com.br*. Acesso em 10 de 01 de 2014, disponível em [www.ciser.com.br](http://www.ciser.com.br)
- Rao, S. (2008). *Vibrações Mecânicas*. São Paulo: Pearson Prentice Hall.
- Torres, M. (1994). *Medição do Amortecimento Próprio em Cabos utilizando Ondas* . Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ.

# 11. DESENHOS DE FABRICAÇÃO



SEÇÃO C-C  
ESCALA 1:2



vista tridimensional  
escala 1:5



TÍTULO:

Base

FOLHA: 1 de 5

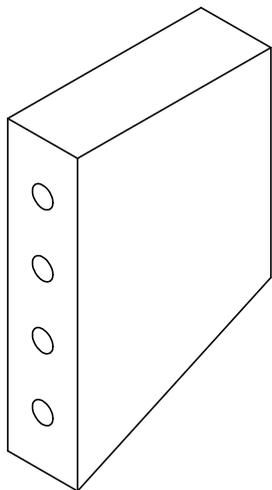
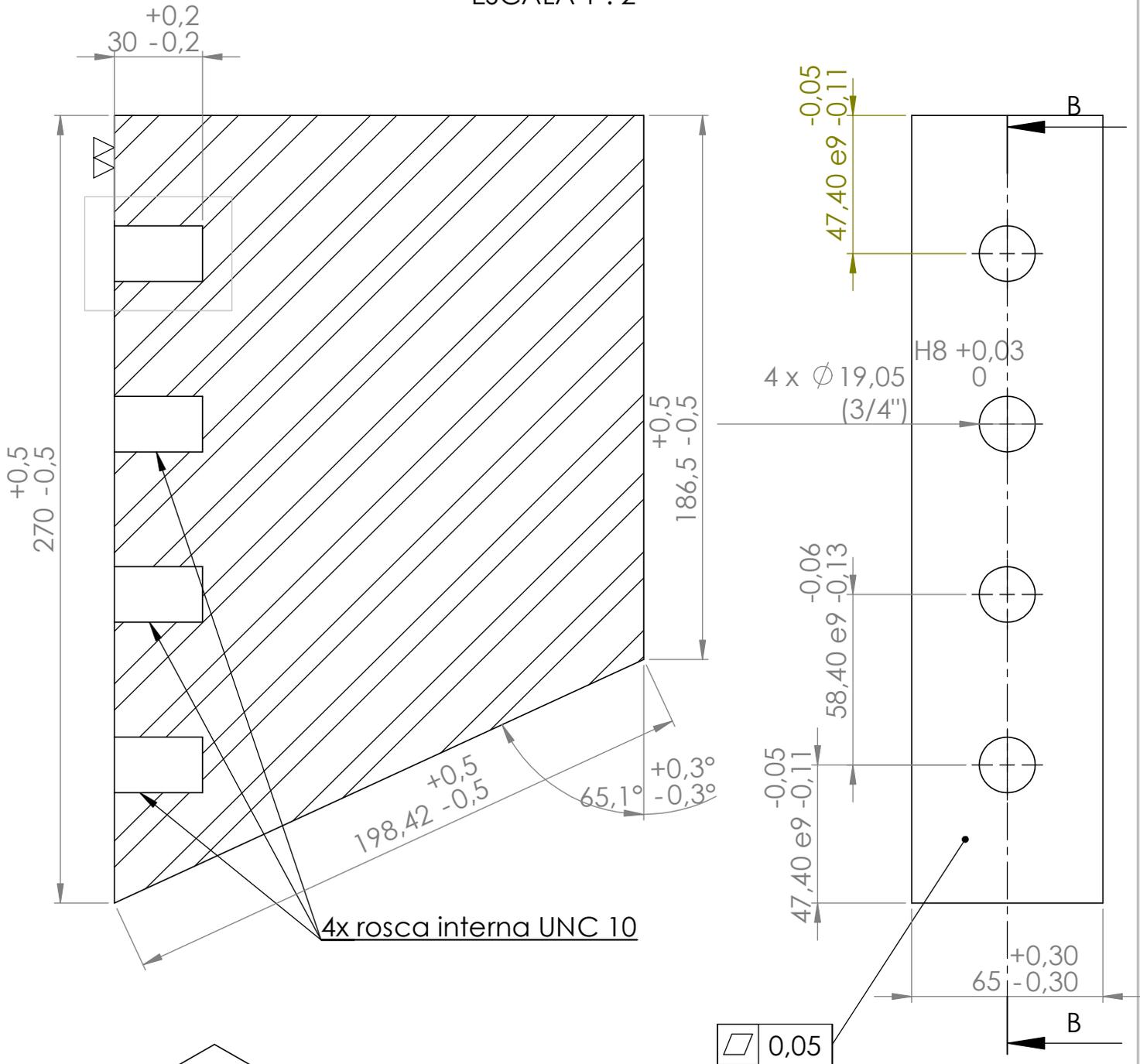
MASSA: 8,1 kg

OBSERVAÇÕES:

Fabricar 2 peças

MATERIAL: Aço 1020

SEÇÃO B-B  
 ESCALA 1 : 2



vista tridimensional  
 escala 1:5



TÍTULO:

Coluna

FOLHA:

2 de 5

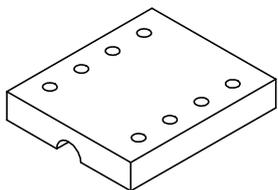
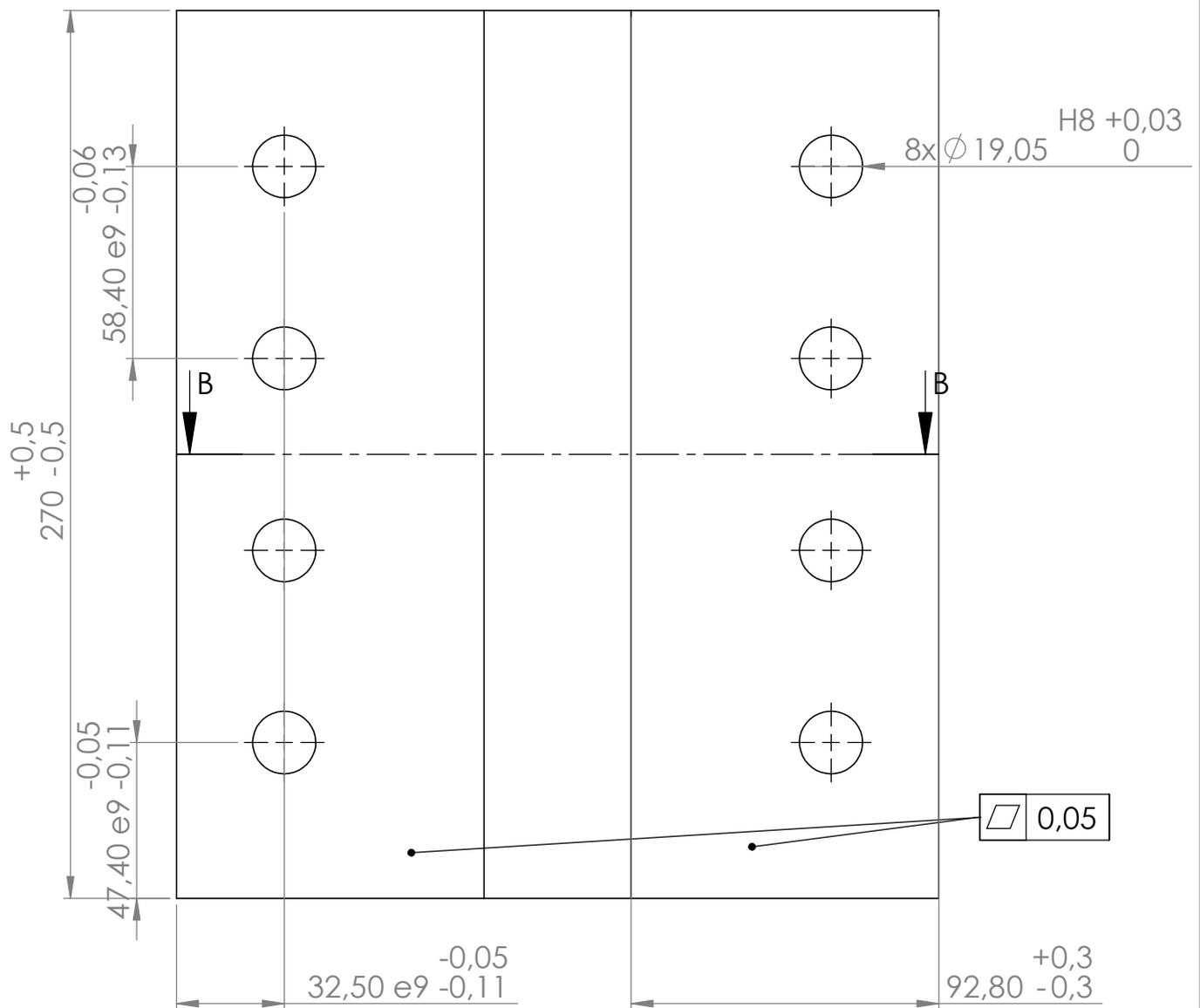
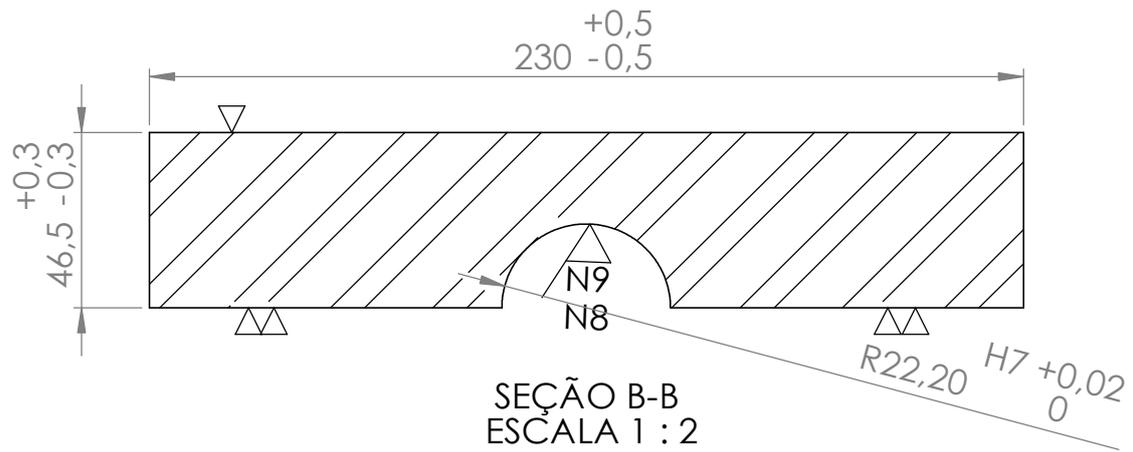
MASSA:

19,1 kg

OBSERVAÇÕES:

Fabricar 2 peças

MATERIAL: Aço 1020



vista tridimensional  
escala 1:10



TÍTULO:  
Garra para condutor  
de 44,4 mm de diâmetro

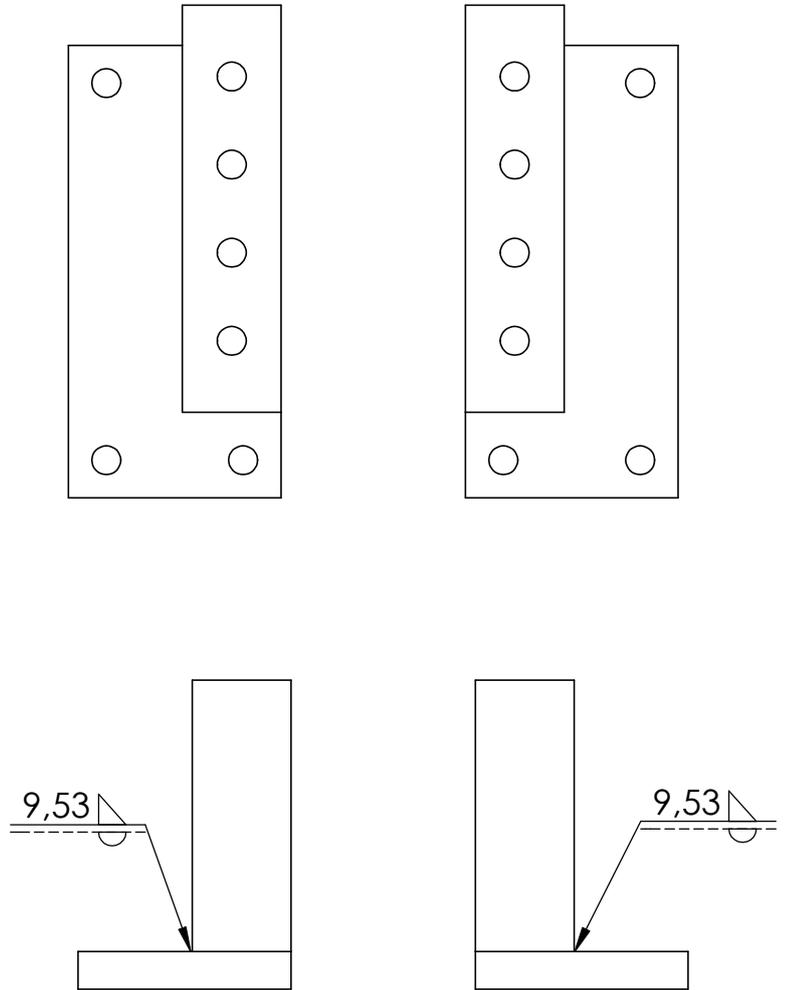
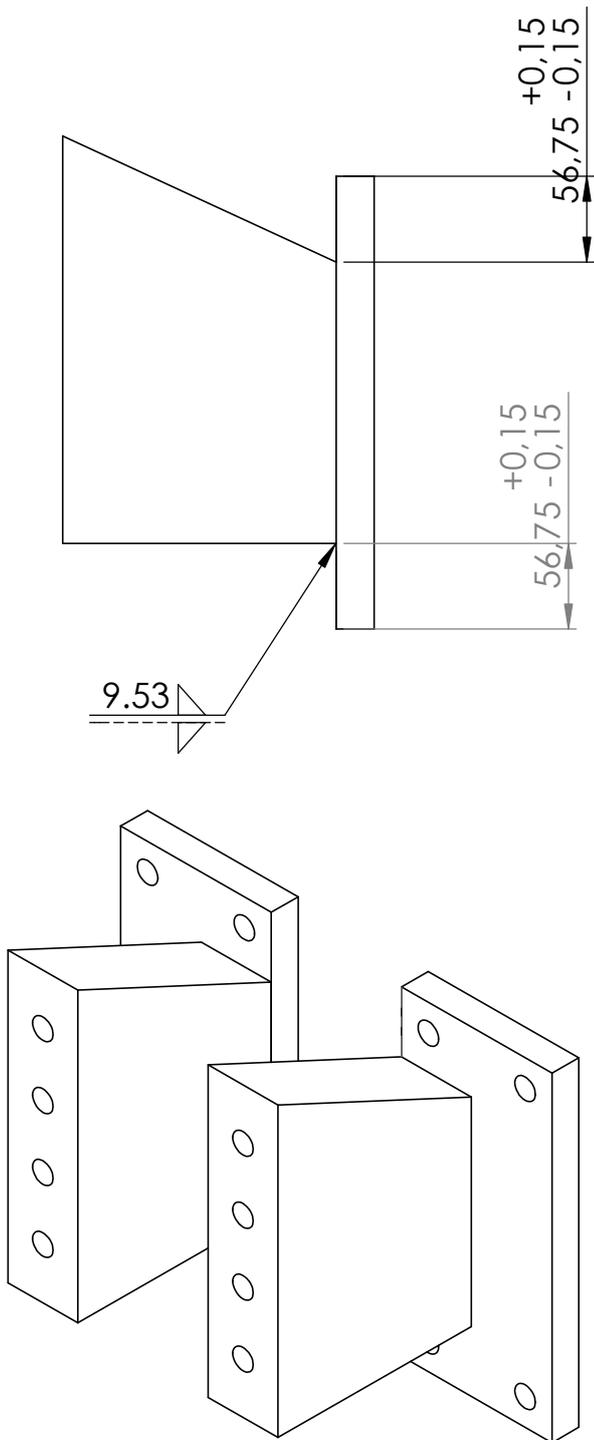
FOLHA: 3 de 5

MASSA: 20,4 kg

OBSERVAÇÕES:

Fabricar 2 peças

MATERIAL: Aço 1020



Escala 1: 5

A solda deve ser executada com eletrodo revestido tipo E80XX.



TÍTULO:

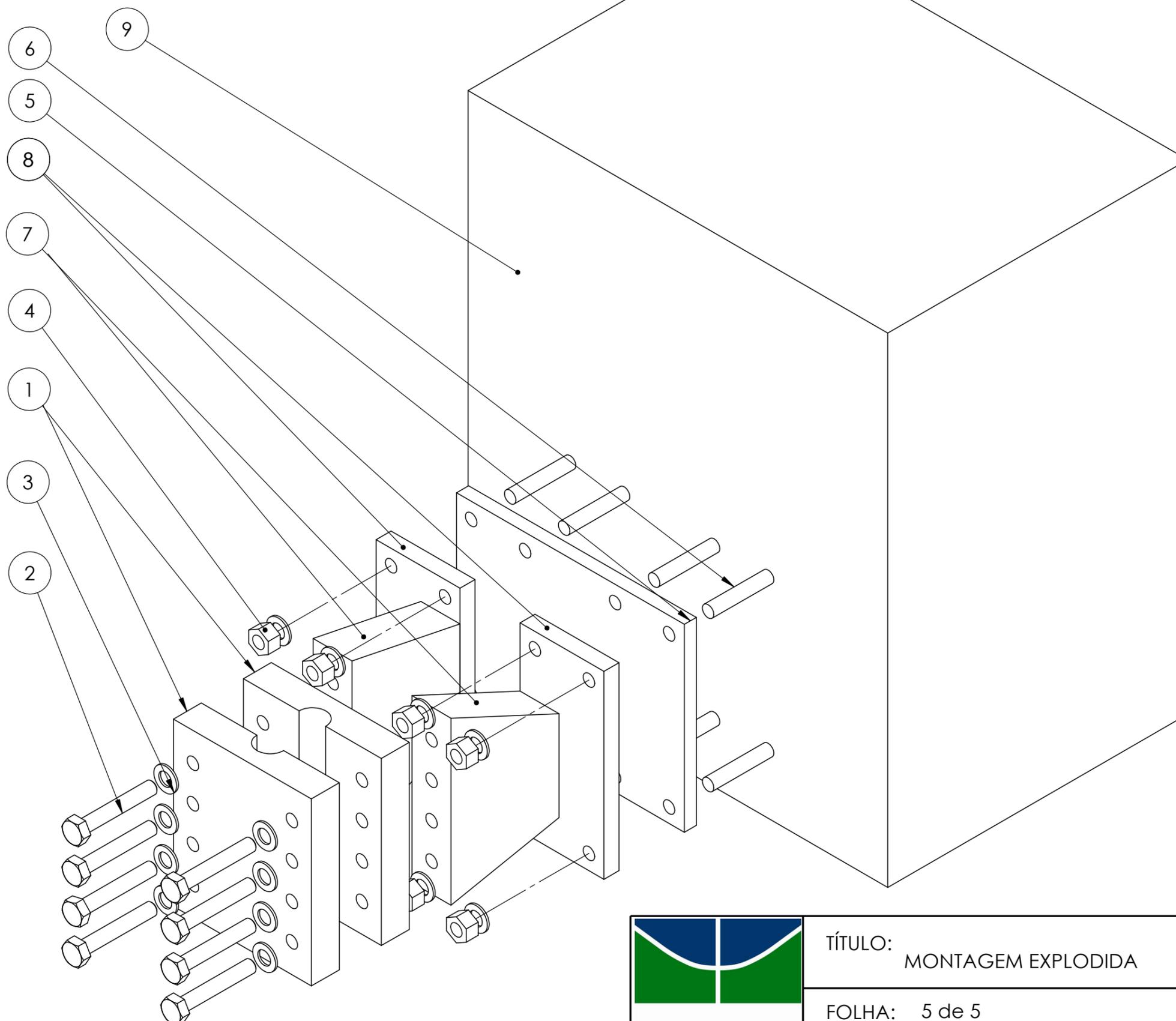
Montagem

FOLHA: 4 de 5

MASSA: 28,9 kg

OBSERVAÇÕES:

MATERIAL: Aço 1020



LEGENDA:

- 1 - garras (2 unidades)
- 2 - parafusos ASTM A 325 T1 3/4" (8 unidades)
- 3 - arruelas ASTM F436 3/4" (8 unidades)
- 4 - porcas sextavadas (4 unidades já existentes)
- 5 - placa base (já existente)
- 6 - parafusos de fixação (já existentes)
- 7 - colunas + base (2 unidades)
- 8 - placas base (2 unidades)
- 9 - bloco fixo



<b>UnB</b>	<b>TÍTULO:</b> MONTAGEM EXPLODIDA	<b>OBSERVAÇÕES:</b> As peças 5, 6, 7 e 9 já se encontram nos locais de montagem.
	<b>FOLHA:</b> 5 de 5	
	<b>Escala:</b> 1: 5	<b>MATERIAL:</b> AÇO E CONCRETO