



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ALEXANDRE SÁ DOS SANTOS

**ESTUDO DE VIBRAÇÕES EÓLICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA DE ALTA TENSÃO**

Belém

2008

ALEXANDRE SÁ DOS SANTOS

**ESTUDO DE VIBRAÇÕES EÓLICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA DE ALTA TENSÃO**

Dissertação apresentada para obtenção do Grau
de Mestre em Engenharia Mecânica, Instituto de
Tecnologia, Universidade Federal do Pará.

Área de concentração em Vibrações e Acústica.

Orientador: Prof. Dr. Newton Sure Soeiro.

Belém

2008

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP) – Biblioteca do Mestrado em Engenharia Mecânica/ UFPA, Belém-PA.

Santos, Alexandre Sá dos

Estudo de vibrações eólicas em linhas de transmissão de energia elétrica de alta tensão / Alexandre Sá dos Santos; orientador Newton Sure Soeiro. – Belém, 2008. 197p.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2008.

1. Vibração eólica. 2. Vibrações - condutores de linhas de transmissão. 3. Oscilações. 4. Proteção – vibrações eólicas – linhas de transmissão. 5. Espaçador – amortecedor. I. Soeiro, Newton Sure. II. Título.

CDD 19ª 620.3

ALEXANDRE SÁ DOS SANTOS

**ESTUDO DE VIBRAÇÕES EÓLICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA DE ALTA TENSÃO**

Dissertação apresentada para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará.
Área de concentração em Vibrações e Acústica.
Orientador: Prof. Dr. Newton Sure Soeiro.

Belém-Pará, 30 de outubro de 2008.

BANCA EXAMINADORA:

— Orientador

Prof. Dr. Newton Sure Soeiro
Universidade Federal do Pará.

Prof. Dr. Alexandre Luiz A. Mesquita.
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Gustavo da Silva Vieira de Melo.
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Roberto Jordan.
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedicatória

A minha amada esposa Fabiana,
Que me compreendeu em todos os momentos, para
que eu pudesse alcançar meus objetivos.

Aos meus Pais João e Lúcia,
Que me deram amor, carinho e educação, para
lutar e realizar meus sonhos.

A minha querida irmã Maria,
Por todo apoio e força que me deu ao longo de
minha vida.

AGRADECIMENTOS

- Acima de tudo agradeço a Deus pela misericórdia derramada sobre nós, para que pudéssemos chegar com êxito ao final de mais uma etapa da busca do conhecimento.
- À Universidade Federal do Pará - UFPA e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, por proporcionarem esta oportunidade de aperfeiçoamento.
- Ao Grupo de Vibrações e Acústica que me concedeu a chance de ampliar meus conhecimentos e desfrutar de momentos de muita alegria.
- Aos meus amigos de classe com os quais compartilhei dois anos de estudos, pesquisas e amizade no mestrado, em especial aos meus amigos Walter Sousa, Paulo Nascimento, Marlisson Azevedo, Wagner França, Rodrigo Vieira, Keliene de Jesus, Diana Moraes e Juliana Vera pelo apoio técnico e intelectual no decorrer da elaboração desta dissertação.
- Aos Professores Gustavo Melo e Alexandre Mesquita que contribuíram de forma decisiva em minha formação.
- Ao Prof. Dr. Newton Sure Soeiro, por toda paciência, apoio, tempo dedicado e as experiências fornecidas durante a orientação deste trabalho, que foram de suma importância em sua conclusão.
- Às Centrais Elétricas do Norte do Brasil, em especial, ao Engenheiro Luis Otávio Sinimbu, e a todos os funcionários que, de uma forma ou de outra, colaboraram para a finalização deste estudo.

RESUMO

SANTOS, Alexandre Sá, *Estudo de Vibrações Eólicas em Linhas de Transmissão de Energia Elétrica de Alta Tensão*, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

O crescente aumento da demanda de energia elétrica tem forçado o avanço tecnológico dos equipamentos responsáveis pelo transporte desta energia fazendo com que estes trabalhem sob tensões cada vez maiores, principalmente por razões econômicas. Mas este fato implica diretamente no incremento do diâmetro do condutor, o que acarreta elevação de seus custos, bem como das estruturas que devem suportá-lo. Para atender a esta necessidade sem aumentar o custo de projeto da linha de transmissão, surgiu a idéia de utilizar mais de um condutor por fase, montados paralelamente entre si a pequenas distâncias, o que é conseguido através da inserção de espaçadores montados a intervalos regulares ao longo dos vãos das linhas. Por outro lado, problemas mecânicos de ordem operacional das linhas podem ocorrer, como, por exemplo, a ruptura total ou parcial dos cabos e/ou espaçadores, proveniente de excitações dinâmicas devidas ao vento. Assim, este trabalho consiste no estudo do comportamento dinâmico de feixe de cabos de linhas aéreas de transmissão, através de um modelo de elementos finitos. O modelo reproduz o acoplamento dos cabos aos espaçadores-amortecedores da linha de transmissão e às estruturas de ancoragem, considerando o efeito de não-linearidade geométrica, decorrente dos grandes deslocamentos dos cabos, bem como a continuidade da linha, ou seja, os vãos adjacentes, que são representados por rigidez equivalente no modelo. O carregamento de vento é modelado através de um processo não-determinístico a partir de suas propriedades estatísticas, tal que fica subdividido em duas partes: uma parte média, analisada de forma estática; e uma parte variável, analisada de forma dinâmica. Os resultados obtidos ao longo desse estudo mostram que a parcela variável do carregamento leva a uma resposta dinâmica do modelo que pode ser determinante no seu comportamento. Assim, o procedimento tradicional de assumir o carregamento do vento como uma excitação estática pode levar, em alguns casos a conseqüências desastrosas.

Palavras-chaves: Linhas de transmissão de energia elétrica, Rigidez à flexão, Modelagem de feixe de cabos, Espaçador-amortecedor, Carregamento de vento.

ABSTRACT

SANTOS, Alexandre Sá, *Study of Eolian Vibrations in High-Voltage Overhead Transmission Lines*, Dissertation (Master Engineering), Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

The increasing demand for electrical energy has stimulated the technological advance of the equipment associated to its transport, generating a situation in which one has to operate under ever increasing nominal voltages, mainly due to economical reasons. This fact has a direct implication on the diameter of the conductors, elevating their cost, as well as that of the supporting structures. In order to overcome this problem, without cost elevation of the electrical transmission line project, the idea is to use more than one conductor per phase, in a parallel assembly with small distances between cables, which can be achieved through the insertion of spacers at regular intervals between the supporting towers. However, operational mechanical problems may arise such as, for example, total or partial rupture of cables and/or spacers due to dynamical wind excitations. Thus, this work investigates the dynamical behavior of a bundle of cables of electrical transmission lines, using a finite element model, which reproduces the coupling between cables and the transmission lines' spacers-dampers and the fixing structures, considering non-linear geometrical effects due to huge cable displacements, and line continuity, i.e., the adjacent vain, which is taken into account by the model as an equivalent stiffness. Wind load is modeled through a non-deterministic process, from its statistical properties, such that two parts are considered: an average load, statistically analyzed, and a variable load, analyzed as a transient. Results show that the variable load part conduces to a dynamic response of the model, which could represent a dominant behavior. Therefore, the traditional methodology of assuming wind load as a static excitation could lead, in some cases, to disastrous consequences.

Keywords: High-voltage overhead transmission lines, Flexural rigidity, Spacer damper, Bundle of cables modeling, Wind loading.

SUMÁRIO

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO | 22 |
| 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 22 |
| 1.2 JUSTIFICATIVA..... | 25 |
| 1.3 OBJETIVO..... | 25 |
| 1.4 METODOLOGIA..... | 26 |
| 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO..... | 26 |
| | |
| CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 28 |
| 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS..... | 28 |
| 2.2 TEORIAS PARA BARRAS E VIGAS..... | 28 |
| 2.3 ESTUDO SOBRE FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DE CABOS..... | 29 |
| 2.4 ESTUDO DO ESCOAMENTO DE UM FLUIDO EM TORNO DE UM CORPO..... | 33 |
| 2.5 ESTUDO DE VIBRAÇÕES EM ESTRUTURAS E CABOS DE LINHA DE TRANSMISSÃO..... | 36 |
| 2.6 CONSIDERAÇÕES..... | 50 |
| | |
| CAPÍTULO 3 - VIBRAÇÕES EM CONDUTORES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO | 51 |
| 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS..... | 51 |
| 3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS EM CONDUTORES..... | 51 |
| 3.2.1 Vibrações Eólicas..... | 52 |
| 3.2.2 Galope do Condutor..... | 55 |
| 3.2.3 Oscilações devido à Esteira..... | 57 |
| 3.3 CONSIDERAÇÕES..... | 61 |
| | |
| CAPÍTULO 4 - A INFLUÊNCIA DA RIGIDEZ FLEXURAL EM CABOS | 62 |
| 4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS..... | 62 |
| 4.2 A EQUAÇÃO DAS CORDAS VIBRANTES..... | 62 |
| 4.3 DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO DA CORDA VIBRANTE CONSIDERANDO O EFEITO DA RIGIDEZ FLEXURAL..... | 67 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.4 CÁLCULO DA RIGIDEZ APROXIMADA DO CONDUTOR EM ESTUDO..... | 75 |
| 4.5 COMPORTAMENTO ANALÍTICO DE CABOS E CORDAS VIBRANTES..... | 76 |
| 4.6 CONSIDERAÇÕES..... | 78 |
| CAPÍTULO 5 - FORÇAS AERODINÂMICAS..... | 79 |
| 5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS..... | 79 |
| 5.2 CORPO SÓLIDO IMERSO EM UM FLUÍDO..... | 79 |
| 5.2.1 Coeficiente de Arrasto..... | 80 |
| 5.2.2 Separação da Camada Limite..... | 82 |
| 5.2.3 Força de Sustentação..... | 88 |
| 5.3 DETERMINAÇÃO DAS AÇÕES ESTÁTICAS DO VENTO SEGUNDO A NORMA BRASILEIRA REGULAMENTADORA - NBR - 6123..... | 90 |
| 5.3.1 Velocidade Básica..... | 90 |
| 5.3.2 Velocidade Característica e Velocidade de Projeto..... | 91 |
| 5.3.3 Fator Topográfico (S_1)..... | 92 |
| 5.3.4 Fator de Rugosidade (S_2)..... | 92 |
| 5.3.5 Fator Estatístico (S_3)..... | 95 |
| 5.3.6 Cálculo da Força de Arrasto para Fios e Cabos..... | 96 |
| 5.3.7 Cálculo da Força de Arrasto no Condutor Utilizado no Trecho em Estudo.. | 97 |
| 5.4 DETERMINAÇÃO DA AÇÃO DINÂMICA DO VENTO..... | 98 |
| 5.4.1 Procedimento Para Encontrar a Parcela Flutuante de Força Devida à Ação do Vento..... | 99 |
| 5.5 CONSIDERAÇÕES..... | 105 |
| CAPÍTULO 6 - ANÁLISE MODAL NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE CONDUTORES DE LINHA DE TRANSMISSÃO..... | 107 |
| 6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS..... | 107 |
| 6.2 MODELO NUMÉRICO GERADO PARA O CABO ESTICADO (RETO)..... | 107 |
| 6.3 MODELO EXPERIMENTAL..... | 112 |
| 6.3.1 Procedimentos do Ensaio..... | 117 |
| 6.3.2 Tratamento dos Dados Experimentais..... | 120 |
| 6.3.3 Dados Analíticos Obtidos em MATLAB..... | 123 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.4 MODELO NUMÉRICO PARA UM CABO DESENHADO ATRAVÉS DA EQUAÇÃO DA PARÁBOLA..... | 124 |
| 6.5 MODELO NUMÉRICO PARA UM FEIXE DE QUATRO CONDUTORES DESENHADO ATRAVÉS DA EQUAÇÃO DA PARÁBOLA..... | 129 |
| 6.5.1 Análise Modal do Sistema..... | 130 |
| 6.6 CONSIDERAÇÕES..... | 132 |
| | |
| CAPÍTULO 7 - ANÁLISE NUMÉRICA DINÂMICA DE UM FEIXE DE CONDUTORES SUBMETIDO AO CARREGAMENTO DE VENTO..... | 133 |
| 7.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS..... | 133 |
| 7.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO E CARREGAMENTOS APLICADOS..... | 133 |
| 7.3 MODELO ESTRUTURAL..... | 136 |
| 7.4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS..... | 138 |
| 7.4.1 Análise Estática Não-linear do Sistema..... | 138 |
| 7.4.2 Análise Dinâmica Não-linear no Domínio do Tempo..... | 139 |
| 7.4.3 Comparação entre as Análises Não-lineares Estática e Dinâmica..... | 141 |
| 7.5 CONSIDERAÇÕES..... | 143 |
| | |
| CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... | 144 |
| 8.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS..... | 144 |
| 8.2 CONCLUSÕES FINAIS..... | 144 |
| 8.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 145 |
| | |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 147 |
| | |
| APÊNDICE..... | 160 |
| APÊNDICE A - ROTINA PARA COMPARAR O COMPORTAMENTO DA RIGIDEZ FLEXURAL ENTRE UM CABO E UMA CORDA VIBRANTE EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA E DO COMPRIMENTO..... | 160 |
| APÊNDICE B - ROTINA PARA A MODELAGEM DE UM CABO RETO TENSIONADO..... | 161 |
| APÊNDICE C - ROTINA PARA A EQUAÇÃO DO CÁLCULO DA FREQUÊNCIA DE UMA CORDA VIBRANTE..... | 162 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| APÊNDICE D - ROTINA DO MODELO NUMÉRICO PARA UM CABO DESENHADO ATRAVÉS DA EQUAÇÃO DA PARÁBOLA..... | 163 |
| APÊNDICE E - ROTINA DA ANÁLISE DINÂMICA PARA O MODELO NUMÉRICO DE UM FEIXE DE CONDUTORES DESENHADO ATRAVÉS DA EQUAÇÃO DA PARÁBOLA..... | 168 |
| APÊNDICE F - ROTINA COMPLEMENTAR DA ANÁLISE DINÂMICA..... | 192 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.1 - Amplitude de oscilação do condutor (modificado, Snegovski, 2004)..... | 52 |
| Figura 3.2 - Desprendimento de vórtices no condutor (modificado, Snegovski, 2004)..... | 52 |
| Figura 3.3 - Número de Strouhal x Número de Reynolds para dois cilindros, um liso e outro rugoso (modificado, Silva, 2006)..... | 55 |
| Figura 3.4 - Amplitude de oscilação do condutor em galope (modificado, Irvine, 2006)..... | 56 |
| Figura 3.5 - Possíveis Modos de galope (exagerados) para um sub-vão (modificado, Irvine, 2006)..... | 57 |
| Figura 3.6 - Oscilações devidas à esteira num feixe duplo de condutores (modificado, Lilien e Snegvsk, 2004)..... | 58 |
| Figura 3.7 - Modo de vibrações induzidas por esteira em condutores paralelos (modificado, Irvine, 2006)..... | 60 |
| Figura 4.1 - (a) Corda vibrante engastada; (b) componentes verticais das tensões que agem sobre um elemento dx da corda esticada (modificado, Den Hartog, 1972)..... | 62 |
| Figura 4.2: Os três primeiros modos naturais de movimento de vibração lateral de uma corda uniforme (modificado, Den Hartog, 1972)..... | 66 |
| Figura 4.3 - (a) Cabo sujeito à esforços de tensão, cisalhamento e momento fletor; (b) um elemento infinitesimal do cabo (modificado, Steidel, 1989)..... | 68 |
| Figura 4.4 - Corda engastada..... | 69 |
| Figura 4.5 - Seção do condutor GROSBEAK 636 (modificado, CIGRÉ, 1989)..... | 75 |
| Figura 4.6 - Gráfico do comportamento das curvas de uma corda e um cabo (modificado, Steidel, 1989)..... | 77 |
| Figura 4.7 - (a) Formas da deflexão e do momento fletor para as extremidades pinadas, (b) e para extremidades em gastadas (modificado, Steidel, 1989)..... | 77 |
| Figura 4.8 - Gráfico do comportamento das curvas do modelo real de um cabo e uma corda vibrante..... | 78 |
| Figura 5.1 - Forças e momentos atuantes em um corpo genérico imerso em um escoamento (modificado, França, 2003)..... | 79 |
| Figura 5.2 - Linhas de fluxo de uma esfera com atrito linear (modificado, Aguiar, 2005)..... | 82 |
| Figura 5.3 - Comportamento do coeficiente de arrasto de uma esfera e um cilindro ambos lisos como uma função do número de Reynolds. (modificado, Munson <i>et al.</i> , 2004)..... | 82 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 5.4 - Comportamento da camada limite em um cilindro (modificado, Aguiar, 2005)..... | 83 |
| Figura 5.5 - Distribuições de pressão num cilindro, causadas por um escoamento: potencial (teórico), camada limite laminar e turbulenta (modificado, França, 2003)..... | 84 |
| Figura 5.6 - Coeficientes de arrasto para corpos de formas geométricas diferentes em escoamentos com $Re_L > 10000$ (modificado, França, 2003)..... | 84 |
| Figura 5.7 - Influência do arrasto de atrito e de forma no arrasto total para um corpo delgado (carenado) em função da razão de aspecto (h/j) (modificado, Fox e McDonald, 2001)..... | 85 |
| Figura 5.8 - Coeficientes de arrasto para corpos bi-dimensionais em função do Reynolds (modificado, França, 2003)..... | 86 |
| Figura 5.9 - Representação esquemática do ponto de separação escoamento em um cilindro em regime (a) laminar e (b) turbulento (modificado, França, 2002)..... | 87 |
| Figura 5.10 - Nomenclatura utilizada em perfis de asas (modificado, Pinho, 2002)..... | 88 |
| Figura 5.11 - Escamento sobre perfis de (a) asa simétrica e (b) assimétrica (modificado, Pinho, 2002)..... | 88 |
| Figura 5.12 - Coeficientes de sustentação e arrasto de um perfil NACA 64412 de envergadura infinita em função do ângulo de ataque (modificado, Munson <i>et al.</i> , 1998)..... | 89 |
| Figura 5.13 - Características aerodinâmicas de um perfil de asa com e sem flaps (modificado, White, 1999)..... | 90 |
| Figura 5.14 - Isopletas da velocidade básica V_o em m/s (modificado, Celebrace, 2007)..... | 91 |
| Figura 5.15 - Histórico de velocidade do vento (modificado, Oliveira, 2006)..... | 98 |
| Figura 5.16 - Esquema de distribuição das funções temporais (modificado, Oliveira, 2006) | 100 |
| Figura 5.17 - Função de covariância cruzada (τ nulo) para diferentes faixas de atuação (modificado, Oliveira, 2006)..... | 102 |
| Figura 5.18 - Função de autocovariância do processo (modificado, Oliveira, 2006)..... | 103 |
| Figura 5.19 - Perfis de flutuação de velocidade do vento no tempo (modificado, Oliveira, 2006)..... | 104 |
| Figura 6.1 - Geometria do elemento Link8..... | 108 |
| Figura 6.2 - Modelo do cabo reto tracionado..... | 108 |
| Figura 6.3 - Análise de convergência da frequência natural..... | 110 |
| Figura 6.4 - Curva de convergência do erro versus número de elementos para o décimo modo de vibração..... | 111 |
| Figura 6.5 - Arranjo experimental..... | 112 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 6.6 - Pontos de fixação da bancada (modificado, Aguilera, 2005)..... | 113 |
| Figura 6.7 - Cabo GROSBEAK 636 (modificado, Aguilera, 2005)..... | 113 |
| Figura 6.8 - Dinamômetro circular..... | 114 |
| Figura 6.9 - Acelerômetro..... | 114 |
| Figura 6.10 - Cabeça de impedância..... | 115 |
| Figura 6.11 - Pré-amplificadores..... | 115 |
| Figura 6.12 - <i>Shaker</i> | 116 |
| Figura 6.13 - Amplificador..... | 116 |
| Figura 6.14 - Analisador dinâmico de sinais com dois canais..... | 117 |
| Figura 6.15 - Coluna central da bancada..... | 117 |
| Figura 6.16 - Fixação do acelerômetro..... | 118 |
| Figura 6.17 - Fixação do conjunto excitador..... | 118 |
| Figura 6.18 - Coerência Pontual..... | 119 |
| Figura 6.19 - Função de resposta em frequência pontual..... | 119 |
| Figura 6.20 - Função de resposta em frequência de transferência..... | 120 |
| Figura 6.21 - Modelo geométrico..... | 121 |
| Figura 6.22 - Diagrama de estabilização do método <i>polimax</i> , FRF pontual..... | 121 |
| Figura 6.23 - Forma da parábola..... | 125 |
| Figura 6.24 - Geometria do elemento BEAM189..... | 126 |
| Figura 6.25 - Geometria do elemento COMBIN14..... | 127 |
| Figura 6.26 - Modelo esquemático do cabo desenhado..... | 127 |
| Figura 6.27 - Desenho do trecho da linha de transmissão em estudo..... | 129 |
| Figura 6.28 - Modelo esquemático do feixe de condutores construído..... | 130 |
| Figura 6.29 - Primeira forma modal do sistema no plano yz..... | 131 |
| Figura 6.30 - Segunda forma modal do sistema no plano xz..... | 131 |
| Figura 6.31 - Terceira forma modal do sistema no plano xy..... | 132 |
| Figura 7.1 - Condições de contorno e carregamento da 1ª etapa de análise..... | 134 |
| Figura 7.2 - Condições de contorno e carregamento da 2ª etapa de análise..... | 134 |
| Figura 7.3 - Condições de contorno e carregamento da 3ª etapa de análise..... | 135 |
| Figura 7.4 - Elementos de molas das extremidades..... | 135 |
| Figura 7.5 - Espaçador-amortecedor da BURNDY..... | 136 |
| Figura 7.6 - Coluna de sustentação..... | 137 |
| Figura 7.7 - Equilíbrio estático do sistema..... | 138 |
| Figura 7.8 - Deslocamento dos condutores no centro do vão..... | 139 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 7.9 - Localização do nó 10062 na primeira coluna de sustentação..... | 140 |
| Figura 7.10 - Localização do nó 10072 na segunda coluna de sustentação..... | 140 |
| Figura 7.11 - Deslocamento do nó 10062 na direção y..... | 140 |
| Figura 7.12 - Deslocamento do nó 10072 na direção y..... | 140 |
| Figura 7.13 - Variação angular da primeira coluna de sustentação na direção y..... | 141 |
| Figura 7.14 - Variação angular da segunda coluna de sustentação na direção y..... | 141 |
| Figura 7.15 - Gráfico da força em função do tempo no elemento 191 do condutor..... | 141 |
| Figura 7.16 - Localização do elemento 191 no sistema..... | 142 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 3.1 - Regime do fluxo de um fluido em volta de um cilindro liso circular (modificado, Blevins, 1990)..... | 53 |
| Tabela 3.2 - Número de Strouhal x Número de Reynolds para uma seção circular (modificado, Irvine, 2006)..... | 54 |
| Tabela 3.3 - Comparação entre os tipos de vibração (modificado, Verma, 2002)..... | 60 |
| Tabela 5.1 - Separação da camada limite de uma esfera (modificado, Aguiar, 2005)..... | 83 |
| Tabela 5.2 - Categorias em função da rugosidade do terreno (NBR-6123, 1988)..... | 93 |
| Tabela 5.3 - Classes de terreno em função das dimensões da edificação (NBR-6123, 1988)..... | 93 |
| Tabela 5.4 - Parâmetros meteorológicos (NBR-6123, 1988)..... | 94 |
| Tabela 5.5 - Valores mínimos do fator estatístico S_3 (NBR-6123, 1988)..... | 95 |
| Tabela 5.6 - Coeficiente de arrasto (C_A) para fios e cabos com $L/d > 60$ (NBR-6123, 1988)..... | 96 |
| Tabela 5.7 - Parâmetros de entrada para o cálculo do carregamento estático..... | 98 |
| Tabela 6.1 - Frequências naturais obtidas através do ANSYS em função do número de elementos..... | 109 |
| Tabela 6.2 - Erros calculados entre as frequências naturais consecutivas..... | 110 |
| Tabela 6.3 - Frequências naturais e formas modais em ANSYS..... | 111 |
| Tabela 6.4 - Frequências naturais e formas modais em Test.Lab..... | 122 |
| Tabela 6.5 - Frequências naturais analíticas, calculadas em ambiente MATLAB..... | 123 |
| Tabela 6.6 - Frequências naturais analítica e experimental..... | 123 |
| Tabela 6.7 - Frequências naturais numérica e experimental..... | 124 |
| Tabela 6.8 - Frequências naturais numérica e analítica..... | 124 |
| Tabela 6.9 - Frequências naturais e formas modais do condutor desenhado em parábola..... | 128 |
| Tabela 7.1 - Deslocamento dos nós 10062 e 10072..... | 140 |
| Tabela 7.2 - Comparação dos valores de força e tensão no elemento 191 do condutor..... | 142 |

NOMENCLATURAS

Letras Latinas

| | |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| A | área do corpo |
| A_i | área frontal efetiva do trecho “ i ” da estrutura |
| A_S | área da seção transversal do cabo |
| a_p, b_p, c_p | Coefficientes da parábola |
| b | parâmetro meteorológico |
| c | coeficiente de arrasto superficial relativo à velocidade média a 10 m de altura. |
| c_1, c_2 | coeficientes de amortecimento |
| C_A | coeficiente de arrasto |
| C_{Atrito} | coeficiente de arrasto de atrito |
| C_{Aforma} | coeficiente de arrasto de forma |
| C_{Ai} | coeficiente de arrasto associado ao trecho “ i ” |
| C_S | coeficiente de sustentação |
| C_1 | valor da covariância cruzada para $C^{V_1, V_2}(0)$ |
| C_1, C_2, C_3, C_4 | constantes de integração |
| C_{1x}, C_{1z} | coeficientes de decaimento na direção lateral e vertical, respectivamente |
| $C^{V_1, V_2}(\tau)$ | função covariância cruzada |
| d | diâmetro do círculo circunscrito da seção do fio ou cabo |
| d_{Al} | diâmetro do fio de alumínio |
| $d_{Aç}$ | diâmetro do fio de aço |
| d_c | diâmetro do fio da camada analisada |
| dS | elemento de área na superfície de um corpo |
| D | diâmetro do condutor |
| E | módulo de elasticidade |
| E_{Al} | módulo de elasticidade do alumínio |
| $E_{Aç}$ | módulo de elasticidade do aço |
| EI_{\min} | rigidez mínima |

| | |
|----------------------------|------------------------------------------------------------|
| EI_{\max} | Rigidez máxima |
| $E(\%)$ | erro relativo |
| f | freqüência do vento |
| f_s | freqüência excitação do vento |
| f_m | flecha máxima do condutor |
| $f_n \text{ discr. ant.}$ | freqüência natural da discretização anterior |
| $f_n \text{ discr. post.}$ | freqüência natural da discretização posterior |
| F_A | força de arrasto |
| F_S | força de sustentação |
| F_r | fator de rajada |
| $F(t)$ | carregamento dinâmico |
| g | aceleração da gravidade |
| H | componente horizontal da tração estática |
| I | momento de inércia |
| I_{\max} | momento de inércia máximo |
| I_{\min} | momento de inércia mínimo |
| k | raízes reais |
| k | constante elástica |
| K | constante de Karmán que é igual a 0,4 |
| K_L | coeficiente de rigidez longitudinal |
| l | comprimento da corda vibrante |
| l_v | comprimento do vão |
| L | comprimento do fio ou cabo |
| L_T | comprimento total do cabo |
| L_x | dimensão da projeção horizontal do cabo |
| m | período de retorno ou tempo de recorrência |
| m_c | massa do corpo |
| n | número do modo de vibração |
| \bar{n} | projeção de um corpo na direção do escoamento de um fluido |
| N | números de divisões consideradas no espectro |

| | |
|------------------|--------------------------------------------------------------|
| N_{Al} | número de fios de alumínio |
| $N_{Aç}$ | número de fios de aço |
| N_c | número de fios por camada |
| p | expoente da lei potencial de variação de S_2 |
| P | pressão |
| P_m | probabilidade de ocorrência |
| P_1, P_2, P_3 | pontos da parábola |
| q | pressão dinâmica do vento |
| $q(t)$ | parcela variável da pressão aerodinâmica |
| \bar{Q} | parcela média variável da pressão aerodinâmica |
| $Q(t)$ | pressão aerodinâmica |
| r' | raio dos fios ou cabos secundários da camada externa do cabo |
| R | raio da camada do condutor |
| Re | número de Reynolds |
| S | número de Strouhal |
| $S^v(f)$ | função espectro de Kaimal |
| S_1 | fator topográfico |
| S_2 | fator de rugosidade |
| S_3 | fator estatístico |
| t | tempo |
| T | tensão de trabalho do condutor |
| T_x | tração horizontal |
| ν | viscosidade cinemática do fluido |
| $v(t)$ | flutuação da velocidade longitudinal do vento no tempo |
| $v_1(t), v_2(t)$ | funções temporais |
| V | velocidade de fluxo do fluido (vento) |
| \bar{V} | valor médio da componente longitudinal do vento |
| $V(t)$ | velocidade longitudinal do vento em função do tempo |
| V_k | velocidade característica |
| V_p | velocidade de projeto |

| | |
|----------------|-------------------------------------------------------------|
| \bar{V}_z | velocidade média na altura z representada por |
| V_0 | velocidade básica do vento |
| \bar{V}_{10} | velocidade igual à de projeto |
| x | deslocamento na direção do eixo x |
| x_k | função que compõem o espectro de Kaimal |
| y | deslocamento na direção do eixo y |
| w | peso por unidade de comprimento |
| w_z | peso específico linear do cabo |
| z | deslocamento na direção do eixo z |
| z | altura acima do nível geral do terreno |
| z_g | altura que define o contorno superior da camada atmosférica |
| z_0 | comprimento de rugosidade |

Letras Gregas

| | |
|-------------------------|------------------------------------------------|
| α | ângulo de incidência do vento |
| θ | ângulo de rotação |
| θ_i | ângulo de fase aleatório entre 0 e 2π |
| λ | raízes imaginárias |
| ρ | densidade |
| μ | viscosidade do fluido |
| μ_1 | densidade linear |
| μ_* | velocidade de fricção ou tangencial |
| ε | Deformação inicial |
| τ_1 | incremento de tempo |
| τ_n | um múltiplo do intervalo de tempo τ_1 |
| τ_w | tensor das tensões viscosas |
| Δf | incremento da frequência |
| ΔL | faixa de atuação para a função de vento gerada |
| ω, ω_n, f_n | frequência natural |

Abreviaturas

| | |
|------|---------|
| Eq. | equação |
| Fig. | figura |
| Tab. | tabela |

Siglas

| | |
|-------|---------------------------------------------|
| AAAC | “All Aluminium Alloy Conductors” |
| ACSR | “Aluminium conductor steel-reinforced” |
| ADS | Atenuadores Dinâmicos Sincronizados |
| AER | Amortecedores Eletro-Reológicos |
| BLWTL | “Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory” |
| BNC | “Bayonet Neill Concelman” |
| FRF | função resposta em frequência |
| FRI | função resposta ao impulso |
| HP | “Hewlett-Packard” |
| IEC | “International Electrotechnical Commission” |
| LPNE | Linhas de Potência Natural Elevada |
| LSCE | “Least Squares Complex Exponential” |
| LSCF | “Least Squares Complex Frequency-Domain” |
| MEF | Método dos Elementos Finitos |
| NBR | Norma Brasileira Regulamentadora |
| NExT | “Natural Excitation Technique” |
| TEE | Transmissão de Energia Elétrica |
| UWO | “University of Western Ontario” |

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma linha de transmissão de energia elétrica está corretamente projetada quando não apresenta sobrecargas mecânicas ou elétricas em seus diversos elementos, muito menos tensões anormais ou aquecimento exagerado dos condutores. Se estas condições forem satisfeitas a linha de transmissão terá uma longa durabilidade (Labegalini *et al.*, 1992).

Na operação e na manutenção das linhas de transmissão em alta voltagem, encontra-se uma quantidade significativa de estruturas acessórias, como resultado da ação do vento devido, em grande parte, ao fato destas linhas estarem permanentemente sujeitas a efeitos meteorológicos, como: vento, chuva, descargas atmosféricas, etc. A maior demanda de energia elétrica exige constante ampliação das instalações e, posteriormente, a encomenda pelas concessionárias e pelos usuários de novos e mais potentes equipamentos e, que por razões econômicas, devem operar com altas tensões, criando sérios problemas aos fabricantes desses produtos. Para a mesma potência, transmitindo-se em altas tensões, resultam correntes menores e, posteriormente, em perdas menores por efeito Joule e, igualmente, em um melhor controle das tensões. Este aumento nos valores das tensões a partir de certo nível exige, por outro lado, o aumento no diâmetro dos condutores que reduz as descargas parciais que ocorrem quando o campo elétrico superficial em um condutor energizado, excede seu limiar de ruptura, fenômeno este que é conhecido como "Efeito Corona". Contudo, o aumento dos diâmetros dos condutores provoca a elevação em seus custos, como também daqueles das estruturas das linhas que devem suportá-los. O aumento do diâmetro dos cabos deveria ocorrer sem que houvesse um acréscimo da área da seção transversal útil dos cabos.

Para suprir esta necessidade, surgiu a idéia de usar-se mais de um condutor por fase, montados paralelamente entre si e unidos a pequenas distâncias. Os condutores usados nesta configuração são os mesmos existentes no mercado e de uso comum, entretanto, mantidos separados entre si, no meio de vãos, por espaçadores adequados. O feixe comporta-se como se estivesse sendo usado um cabo de diâmetro muito alto, pois os campos magnéticos individuais dos subcondutores se compõem para formar um único campo, semelhante àquele, devido a um cabo único de grande diâmetro, suspenso no centro e em lugar do feixe. O mesmo acontece com os campos elétricos, resultando num grande aumento da capacitância das linhas. Devido à necessidade de padronização das ferragens associadas, o espaçamento

entre si é igualmente padronizado, sendo preferido para as linhas de transmissão aérea a distância de 0,4 a 0,457 m. Os seguintes benefícios adicionais, a partir do uso de condutores múltiplos, podem ser mencionados:

1 - Menores gradientes de potencial nas superfícies dos subcondutores, reduzindo as atividades do EFEITO CORONA;

2 - Redução da impedância característica da linha, aumentando a sua potência característica que representa o ponto ideal de operação de uma linha;

3 - A redução da reatância indutiva aumenta o limite de transmissão com estabilidade dinâmica e transitória;

4 - Os valores das sobre-tensões provocadas por descargas atmosféricas nos condutores das linhas são iguais ao produto da corrente que propaga-se em cada uma das direções da linha a partir do ponto de impacto, pelo valor de sua impedância natural. Este valor é fortemente reduzido pelos condutores múltiplos, assim como o valor das ondas de sobre-tensão;

5 - Os condutores múltiplos não dependem de cabos de fabricação especial, podendo-se empregar qualquer tipo de fabricação normal, inclusive os cabos expandidos, o que os torna mais baratos. O seu custo de montagem é levemente maior.

O uso do espaçador-amortecedor é o modo mais eficiente de se melhorar a proteção dos vãos de uma linha de transmissão, pois é característica deste equipamento a dissipação das vibrações causadoras de danos provenientes da ação do vento. Os espaçadores são necessários quando deseja-se construir feixes paralelos de condutores para evitar danos devidos aos fenômenos de vibração eólica, galope do condutor e oscilação induzida por esteira, fenômenos que passam a ser descritos abaixo (Labegalini *et al.*, 1992):

1 - Vibração eólica - pode ocorrer tanto em condutores singelos como em feixes de condutores e, é causada por desprendimento de vórtices nas partes superior e inferior dos condutores, na faixa de frequência de 3 a 150 Hz, com velocidades do vento de 1 a 7 m/s. As amplitudes de vibração dificilmente atingem cerca de um 1 diâmetro do condutor;

2 - Oscilação devido á esteira - só ocorre em feixes de condutores e surge quando um condutor do feixe penetra na esteira gerada por outro condutor adjacente. A faixa de frequência das oscilações é de 0,15 a 10 Hz, com velocidades do vento de 4 a 18 m/s. As amplitudes podem atingir valores de até 20 vezes o diâmetro do condutor;

3 - Galope do condutor - é causado por um depósito assimétrico de gelo sobre os condutores. A faixa de frequência é de 0,1 a 3 Hz, com velocidades do vento de 7 a 18 m/s. As amplitudes podem atingir valores de até 300 vezes o diâmetro do condutor.

Devido às características geográficas e meteorológicas da região amazônica, muitas das linhas de transmissão na região estão sujeitas a problemas de vibração eólica e de oscilação induzida por esteira. O fenômeno de galope do condutor é restrito a locais sob baixa temperatura, mas ocorre, até mesmo, na região Amazônica, na Linha de Transmissão Guri - Boa Vista (fronteira entre Brasil e Venezuela). Destacam-se as características importantes dos vãos das linhas de transmissão nas travessias de grandes rios na Amazônia, onde devido à falta de proteção proporcionada pela vegetação, ocorrem elevados níveis de vibração nos condutores.

Estudos de vibrações em espaçadores-amortecedores direcionados às condições climáticas, de relevo e vegetação típicos da Região Amazônica são quase inexistentes, sendo esta proposta um passo importante na busca de um maior conhecimento científico sobre o assunto. O fator regional (tipo de relevo, condições climáticas, características dos rios, etc) é um dos aspectos importantes deste projeto. A partir de um determinado período de instalação, os espaçadores apresentam alguns sinais de deterioração; isto pode ocorrer devido às severas condições de excitação a que estão submetidos os cabos.

Os cabos condutores estão localizados entre as torres de transmissão, enquanto que os espaçadores são montados nos vãos das linhas, e servem para separar os cabos condutores, os quais recebem, constantemente, excitações eólicas, e que, depois as repassam sob forma de carregamento estrutural ao espaçador-amortecedor. Após a retirada de alguns espaçadores-amortecedores danificados, verificou-se nestes, que alguns pontos sofreram maior desgaste por causa das excitações estruturais proveniente dos cabos. É comum, ocorrer cisalhamentos em um batente do espaçador-amortecedor, que fica próximo ao elastômero. Com a fratura deste batente, o parafuso que fixa o cabo no espaçador-amortecedor afrouxa-se, e então, o cabo condutor é liberado, e choca-se constantemente com o espaçador, provocando a deterioração do conjunto.

Deve-se destacar que a interrupção do fornecimento de energia elétrica por falha no sistema de transmissão, e em especial, por ruptura dos cabos condutores e ou dispositivos (ferragens, espaçadores-amortecedores, etc) de suspensão, geram perdas econômicas consideráveis no setor elétrico. Contudo, o fenômeno de vibração em espaçadores-

amortecedores devido à sua complexidade, é considerado um problema em aberto, sendo tema atual de inúmeras pesquisas recentes.

1.2 JUSTIFICATIVA

Este trabalho está ligado a um projeto de pesquisa e desenvolvimento financiado pelas Centrais Elétricas do Norte do Brasil. Esta dissertação justifica-se pela necessidade de se conhecer mais detalhadamente o comportamento dinâmico de linhas de transmissão de energia elétrica de alta tensão, visto que atualmente por razões econômicas e de segurança torna-se mais viável o transporte de energia a longas distâncias por meio de tensões cada vez mais elevadas. Para atender a esta necessidade é imprescindível a utilização de condutores múltiplos que atuam na linha de transmissão como um único condutor garantindo menores perdas de energia por efeito Joule e um melhor controle das correntes e tensões da linha, além de manter sob controle as conseqüências do efeito corona que ocorre quando um forte campo elétrico associado a um condutor de alta tensão ioniza o ar próximo ao condutor. As linhas de transmissão de energia elétrica constituídas por feixe de condutores estão sujeitas ainda, às severas condições climáticas que tem influenciado diretamente no funcionamento não apenas dos condutores, mas de todos os componentes que fazem parte da linha de transmissão. Sendo assim, torna-se fundamental realizar estudos para melhor compreender o comportamento vibratório em linhas de transmissão de energia elétrica, quando submetidas a excitações provocadas pelo vento. Estudo este que contribuirá não apenas para um melhor funcionamento e maior segurança das mesmas, como também para uma economia substancial na aquisição para substituição de equipamentos utilizados nos vãos da linha.

1.3 OBJETIVO

Sistematizar uma metodologia confiável para a avaliação do comportamento dinâmico não-linear de um feixe de condutores de linha de transmissão de energia elétrica, os quais estão separados por meio de espaçadores-amortecedores e sujeitos a excitação eólica variável no tempo.

A partir das respostas obtidas será possível um conhecimento mais específico sobre o real comportamento do sistema analisado, o que possibilitará o aperfeiçoamento dos elementos da linha de transmissão. Desta forma, será possível atender à necessidade das

empresas de transmissão de energia da região, que encontram dificuldades para o controle e manutenção preventivos dos condutores das linhas de transmissão sujeitos aos esforços do vento.

1.4 METODOLOGIA

Para se obter a rotina final que se destina à análise dinâmica de um feixe de condutores, inicialmente optou-se por desenvolver um algoritmo baseado no Método dos Elementos Finitos, para um único condutor reto e tracionado, considerando a análise do sistema linear, a qual assume uma proporcionalidade entre causa e efeitos. Este modelo inicial foi validado experimentalmente no Laboratório de Engenharia Civil da UFPA em uma bancada de ensaios de condutores de linha de transmissão. Posteriormente, o modelo evoluiu para um cabo desenhado através da equação da parábola, e a análise passou a levar em consideração a não-linearidade geométrica do sistema. Segundo Aranha Junior (2003), a não-linearidade geométrica está relacionada com a ausência de proporcionalidade entre deformações e deslocamentos (relação cinemática). Este efeito é importantíssimo em corpos sujeitos a grandes deformações como é o caso dos condutores de linha de transmissão de energia elétrica. Para chegar à etapa final da modelagem, foi utilizada a técnica apresentada em Oliveira (2006), que incorpora ao modelo o carregamento de vento responsável pela parte dinâmica do sistema. A referida técnica divide este carregamento em uma parcela média e uma variável, utilizando o espectro de potência de Kaimal e a função covariância cruzada para a simulação das rajadas de vento. Para a análise não-linear dos modelos computacionais foi utilizado o programa de elementos finitos ANSYS.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido da seguinte maneira:

O Capítulo 2 mostra uma visão geral de vários trabalhos desenvolvidos utilizando as teorias de barras e vigas, o estudo de cabos, o escoamento de um fluido em torno de um corpo e vibrações em estruturas e condutores de linhas de transmissão de energia elétrica.

O Capítulo 3 é desenvolvido, principalmente, para dar idéia dos diferentes tipos de vibrações em condutores de linhas de transmissão de energia com suas respectivas características.

O Capítulo 4 apresenta um estudo da influência da rigidez flexural em cabos utilizando para isto, a equação da corda vibrante. Além de fazer uma comparação entre o comportamento de uma corda vibrante e um condutor de linha de transmissão em função da frequência e do comprimento, por meio de uma simulação numérica em linguagem Matlab.

O Capítulo 5 mostra como se comportam as forças aerodinâmicas sobre um corpo sólido imerso em um fluido, a determinação das ações estáticas do vento sobre os condutores de linhas de transmissão segundo a norma brasileira NBR-6123, bem como o procedimento para encontrar a parcela flutuante de força devida à ação do vento.

O Capítulo 6 mostra a modelagem numérica para um único condutor e a validação desta análise através de análise experimental. Apresenta ainda, a análise modal para um feixe de condutores.

O Capítulo 7 descreve as etapas da análise numérica transiente de um feixe de condutores submetido ao carregamento de vento e os resultados obtidos através da mesma.

O Capítulo 8 apresenta as conclusões do estudo desenvolvido, bem como apresenta sugestões para desenvolvimento de ações para futuros trabalhos relacionados ao tema desta dissertação.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Inicialmente, o desenvolvimento de modelos para o estudo de vibrações em cabos de linhas de transmissão foi fundamentado na teoria de barras e vigas, porém para uma melhor adequação ao modelo real, utilizou-se o elemento de catenária que considera em sua formulação a deformação no cabo provocada pelo seu próprio peso.

Com o aparecimento do Método de Elementos Finitos seguido do avanço computacional, outros modelos e elementos foram criados para o estudo de vibrações em cabos. É o caso do elemento BEAM que é um dos elementos utilizados pelo programa ANSYS, o qual utiliza o Método de Elementos Finitos como base. Este elemento é fundamentado na teoria de barras e vigas. Outros elementos computacionais foram desenvolvidos, mas utilizam as teorias mencionadas anteriormente como base para suas formulações.

Neste capítulo, apresentam-se comentários sintéticos sobre uma vasta literatura consultada para a realização deste trabalho e que versa sobre assuntos de interesse ao seu desenvolvimento.

2.2 TEORIAS PARA BARRAS E VIGAS

Segundo Yojo (1993) as teorias de barras começaram a ser estudadas no século XVII, em meados do século XVIII, Euler e Bernoulli apresentaram os primeiros estudos referentes à teoria de vigas e desenvolveram um modelo que seria chamado de viga de Euler-Bernoulli.

Em Leckar e Sampaio (2000) foram relacionados como os três modelos básicos para o estudo de vibrações em vigas, os de Euler-Bernoulli, Vlasov e Timoshenko. No modelo de Euler-Bernoulli, o cisalhamento e a inércia de rotação foram desprezados, sendo feita a suposição de que as seções planas permanecem planas e perpendiculares ao eixo longitudinal da peça, após a deformação. No modelo de Vlasov, o cisalhamento continua sendo desprezado, porém foi levada em conta a inércia de rotação. Finalmente, no modelo de Timoshenko, supõe-se também que as seções planas permaneçam planas, porém não necessariamente perpendiculares ao eixo longitudinal da viga, pois há um giro da seção em relação a este eixo, devido ao cisalhamento.

Em Aranha Junior (2003) desenvolveu-se uma formulação de um elemento finito de barra para análise estática e dinâmica geometricamente não-linear de pórticos planos e estruturas formadas por cabos. Deu-se ênfase ao estudo de cabos condutores de linhas aéreas de transmissão de alta tensão. O tratamento de grandes rotações das barras foi realizado utilizando-se a formulação co-rotacional, a qual foi baseada na utilização de um sistema auxiliar de coordenadas que se move com o elemento à medida que este se deforma. Uma contribuição original deste trabalho consistiu no desenvolvimento de uma nova técnica para o tratamento consistente de cargas distribuídas através da formulação co-rotacional. Neste contexto, apresentou-se a dedução de uma nova matriz de rigidez geométrica dependente do carregamento distribuído. Para validação da metodologia proposta foi desenvolvido um programa na plataforma MATLAB. O programa desenvolvido permitiu a realização de análise geometricamente não linear, estática ou dinâmica, de estruturas planas aperticadas e/ou formadas por cabos, possibilitando também a determinação das frequências naturais e modos de vibração, para diferentes níveis de solicitação, de estruturas com comportamento altamente não-linear. O programa foi baseado no Método dos Elementos Finitos e emprega os Métodos de Newmark e Newton-Raphson para integração da equação do movimento no tempo, para tratar os efeitos não lineares. Vários testes numéricos foram apresentados, comparando-se os resultados da metodologia proposta com soluções analíticas simplificadas e com resultados de outros modelos apresentados na literatura. Os resultados obtidos demonstraram a eficiência e precisão da presente formulação na análise de estruturas submetidas a grandes deformações.

2.3 ESTUDO SOBRE FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DE CABOS

Acredita-se que Galileu tenha sido o pioneiro no estudo da forma curva de um cabo suspenso sob seu próprio peso em meados do século XVII. Este estudo contribuiu para identificar a similaridade entre esta curva e uma parábola. Em seguida, em 1691, a solução desta curva, que hoje é conhecida como sendo a catenária, foi primeiramente publicada pelo eminente grupo de geógrafos e matemáticos composto por Leibnitz, Huigens e os irmãos James e John Bernoulli. Esta formulação matemática feita para o cabo parabólico atraiu rapidamente a atenção dos profissionais que atuavam neste ramo, pois além de ser uma formulação mais simples, poderia ser aplicada em diversos casos em que a estrutura possui parte considerável do carregamento distribuído ao longo do vão, como em pontes suspensas (Irvine, 1975).

No século XX, muitos trabalhos foram realizados apenas com a finalidade de criar equações analíticas que pudessem descrever o comportamento da flexibilidade e da deformação que ocorria em cabos sujeitos a carregamentos distribuídos e concentrados. Mas não obtiveram grande êxito nas soluções encontradas devido ao comportamento não-linear dos cabos, que não permitia a superposição de soluções. Surge, então, o advento do computador que permite a realização de métodos interativos que consistiam inicialmente na divisão do cabo em diversos segmentos finitos. A partir de valores iniciais arbitrados para a tensão em um extremo do cabo, calculava-se o resíduo para a outra extremidade usando as condições de equilíbrio em um método iterativo em cada segmento discretizado. Os valores iniciais eram ajustados até que o resíduo fosse reduzido abaixo de limites aceitáveis.

Na década de 60 foi proposto por Michalos e Birnstiel (1962) um método numérico de tentativa e erro, baseado no que eles chamaram *string polygon approach*. O método consistia em aproximar a geometria curva do cabo através de vários segmentos retos e substituir o carregamento distribuído por cargas concentradas equivalentes, localizadas nas extremidades dos segmentos.

O método apresentado por Michalos e Birnstiel (1962) foi contestado por O'Brien e Francis (1964), que apontaram deficiências no tratamento teórico do mesmo e apresentaram uma formulação numérica baseada nas expressões analíticas da catenária elástica. As equações de equilíbrio estático para segmentos de cabo foram resolvidas através de um processo de sucessivas aproximações, nas quais a flecha do cabo tem um tratamento exato. Jennings (1965) propôs a reformulação de algumas expressões usadas por O'Brien e Francis (1964) que acelerariam a convergência dos resultados.

Em Church (1963) e Den Hartog (1972) foram estudados os seguintes tópicos: as vibrações lineares em sistemas contínuos; vibrações de sistemas com um grau de liberdade (livre e forçada); o princípio de Rayleigh; sistemas não lineares e solução numérica; vibrações de sistemas com n graus de liberdade (livre e forçada); métodos de Rayleigh-Ritz; métodos para modelagem da matriz de massa e da matriz de rigidez; problemas de autovalores; amortecimento; superposição modal; discussão dos métodos numéricos para solução do problema de autovalores e autovetores.

Em Leonard (1973) foi proposta a utilização de elementos curvilíneos em substituição ao uso de elementos retos nas soluções aproximadas para o Método dos Elementos Finitos. Ele destacou a necessidade de se modelar a geometria curva do cabo com elementos curvilíneos, tornando dispensável o uso de um grande número de pequenos elementos retilíneos.

Em Henghold e Russell (1975) foi desenvolvida uma formulação variacional em que se podia prever a configuração de equilíbrio para cabos suspensos considerando não linearidades geométricas. Desta formulação resultou um elemento finito isoparamétrico de cabo com três nós.

O modelo de Henghold e Russell (1975) apresentou deficiências que foram comprovadas por Ozdemir (1978), que induziam deformações no comprimento do elemento de cabo. A solução apresentada por Ozdemir (1978) foi fazer uma interpolação independente para avaliar o comprimento do elemento deformado e deste modo não permitir deformação do elemento. Ele apresenta ainda, a formulação de um elemento de cabo com dois nós, que facilita a avaliação das respostas obtidas através das formulações Lagrangiana Total e Atualizada.

No mesmo ano, Peyrot e Goulouis (1978) propuseram um método bastante similar ao descrito por Campbell, em 1970, baseado no trabalho desenvolvido por O'Brien e Francis em 1964 e 1968, respectivamente, para o cálculo da resposta estática de sistemas flexíveis. Segundo Peyrot e Goulouis (1978), através desta técnica, poderia se prever o efeito do peso próprio, de ventos longitudinais ou diagonais, cargas de gelo e mudanças de temperatura em cabos suspensos usados em linhas de transmissão de energia.

Em Judd e Wheen (1978) foi publicado um processo alternativo de tentativa e erro no qual o valor inicial da tração horizontal T_x do cabo foi calculado e então para valores incrementais de T_x , a correspondente intensidade de cargas aplicadas foi deduzida para uma configuração conhecida. Neste trabalho, foram apresentados alguns exemplos onde foi aplicado o método.

Em Jayaraman e Knudson (1981) foi reapresentado o elemento de catenária já proposto por O'Brien e Francis (1964) e demonstrada a sua aplicabilidade em problemas estáticos e dinâmicos.

Em Schrefler e Odorizzi (1983) foi apresentada a formulação unificada de um elemento bidimensional de viga ou de cabo, para análise não linear, empregando a aproximação Lagrangiana total. A formulação permite qualquer intensidade de deformação em elementos retos ou curvos.

Em Steidel (1989) foram estudados os diversos tipos de vibrações mecânicas, os sistemas de vibração discreto e contínuo com vários graus de liberdade. Muitos exemplos de casos reais de vibração que ocorrem na engenharia foram discutidos, inclusive o exemplo de um cabo, no qual foi aplicada uma força de tração e o sistema contínuo foi analisado levando em consideração a rigidez de flexão do cabo.

Em Abdel-Ghaffar (1995) foi desenvolvido um elemento finito não linear para a análise de pontes estaiadas sob carregamentos estáticos e dinâmicos usando a formulação Lagrangiana total. Foi introduzido e proposto um elemento finito de cabo isoparamétrico com 4 nós para a idealização dos cabos na ponte.

Sarkar e Manohar (1996) descreveram uma rotina computacional para determinar os coeficientes de rigidez dinâmica de um elemento de cabo linear, inclinado, com amortecimento viscoso e ou histerético. Também foram levadas em consideração as formas de vibração do cabo entre os planos transversal e longitudinal. A rotina foi baseada na conversão de um conjunto de regras que regem problemas de valores de contorno semi-estáticos dentro de um amplo conjunto equivalente de problemas de valores iniciais, os quais foram posteriormente integrados numericamente no domínio do espaço, utilizando algoritmos *Marching*. Os resultados numéricos apresentados realçam a natureza dos coeficientes de rigidez dinâmica. Um exemplo específico discutido também foi a análise de vibrações aleatórias de um longo vão de cabo submetido a terremotos, o qual foi modelado como um vetor gaussiano. A abordagem apresentada é versátil e capaz de lidar com muitos efeitos complicados em cabos dinâmicos de uma forma especial.

Em Teixeira (1997) foi apresentado um modelo numérico para estudo e controle da vibração em cabos condutores de linhas aéreas de transmissão e realizadas diversas medidas para avaliação dos neutralizadores viscoelásticos sugeridos no trabalho.

Lu *et al.* (1997) propuseram uma aproximação analítica no cálculo da resposta não linear de cabos elásticos sob carregamentos externos complexos. O efeito da temperatura no cabo também foi considerado. Através de métodos analíticos, foram apresentadas soluções exatas para a resposta estática de um cabo suspenso sujeito a carregamentos complexos.

Em Karoumi (1999) foi apresentada a formulação do elemento de catenária com dois nós apresentado inicialmente por O'Brien e Francis (1964). Ele sugeriu o emprego do elemento na análise estática e dinâmica de pontes suspensas ou estaiadas.

Em Cella (1999) foi apresentado um método computacional para facilitar a determinação matemática exata da geometria da catenária, incluindo o caso em que os apoios se encontram em diferentes alturas. A metodologia proposta foi ilustrada para condutores de energia elétrica.

Deng *et al.* (2005) abordaram o problema de uma estrutura formada pela união de cabos, olhais e barras tensionados, com o objetivo de realizar análises e simulações da geometria obtida após a montagem da mesma. Um novo método de forma encontrado para a solução

deste problema especial foi desenvolvido com base no princípio do método de densidade de força.

Ricciardi e Saitta (2007) relataram uma investigação sobre um modelo contínuo para cabos dinâmicos curvados de grandes diâmetros, levando em consideração a rigidez de flexão e a extensão de curvatura. Um modelo dinâmico foi criado neste trabalho, seguindo as orientações clássicas da dinâmica de cabos e adotando algumas hipóteses simplificadoras; as equações de frequência e forma modal foram obtidas de forma não-dimensional. Foram realizadas comparações com o Método de Elementos Finitos e Diferenças Finitas para validar o método proposto. Além disso, o método permitiu representar corretamente efeitos locais nas zonas extremas do cabo, se assumidas as condições de contorno de engaste. Para obter resultados parecidos, o modelo de elementos finitos exige um grande número de subdivisões, o que resultará em um grande número de elementos. Neste artigo foram propostas autofunções que permitem solucionar o problema dinâmico sem um grande esforço computacional, em comparação com o Método de Elementos Finitos ou Diferenças Finitas. Finalmente, a fim de demonstrar a utilidade do modelo contínuo desenvolvido, foi feita uma aplicação nos cabos principais da ponte projetada no Estreito de Messina.

Lepidi *et al.* (2007) verificaram em seu trabalho que em estruturas apoiadas por cabos, como pontes estaiadas, os cabos estão sujeitos a falhas potenciais, principalmente, devido à fadiga e corrosão galvânica. Este estudo apresentou uma análise dos efeitos sobre os danos estáticos e dinâmicos de cabos suspensos e propôs um modelo unidimensional contínuo elástico para os danos em cabos, incluindo não-linearidades geométricas.

2.4 ESTUDO DO ESCOAMENTO DE UM FLUIDO EM TORNO DE UM CORPO

White (1986) fez em seu livro o estudo do comportamento do fluxo de fluidos viscoelásticos: escoamentos laminares no interior de dutos, escoamentos laminares exteriores, turbulência, escoamentos turbulentos exteriores.

Cigada *et al.* (1997) apresentaram o estado da arte da pesquisa sobre vibrações induzidas pelo vento em cilindros com seção circular, em arranjos simples ou múltiplos. Os problemas típicos de linhas de transmissão de energia foram discutidos e metodologias utilizadas para simulações foram resumidas em vista de suas aplicações, também no campo de pontes estaiadas. Uma atenção especial foi dada ao problema de vibrações induzidas por esteira em cilindros espaçados uns próximos dos outros, para uma melhor compreensão deste fenômeno foram realizados testes em túnel de vento, simulações e um modelo matemático.

Fox e Mcdonald (2001) em seu livro preocuparam-se em introduzir a mecânica dos fluidos, enfocando os conceitos físicos da mecânica dos fluidos e os métodos de análise que se iniciam a partir dos princípios básicos.

Segundo França (2003) um corpo de qualquer forma, quando imerso em um fluido em escoamento, fica sujeito a forças e momentos (White, 1986). Estas forças são três: o arrasto, que age numa direção paralela à direção da corrente livre a força de sustentação e a força lateral, que agem em direções ortogonais. A atuação destas forças no corpo causa momentos. Neste documento, o experimento apresentado enfocou apenas a força de arrasto. Na sua forma adimensional, a força de arrasto é expressa pelo coeficiente de arrasto, que é a razão entre a força de arrasto e uma força característica associada à pressão dinâmica da corrente livre.

Pinho (2002) apresentou breves noções sobre escoamentos de camada limite e escoamentos exteriores. Afirmou que no estudo de escoamentos, como em tantas outras situações, é útil classificar os fenômenos e os comportamentos e nisso a Mecânica dos Fluidos não é exceção. Em inúmeras situações reais é freqüente a existência de um escoamento em torno de uma superfície ou de um objeto, constituindo estes casos exemplos de escoamentos exteriores. Bons exemplos são o escoamento em torno de um automóvel ou de um avião em movimento, a interação entre o ar e uma bola de futebol ou de golfe em movimento ou ainda o escoamento em torno do casco de um navio que se desloca. Nestes escoamentos, ditos exteriores, o fluido rodeia o objeto total ou parcialmente. Os escoamentos exteriores quando envolvem ar são freqüentemente designados por escoamentos aerodinâmicos, sobretudo quando estes são corpos fuselados. Por outro lado, quando o fluido é água é freqüente a designação de escoamento hidrodinâmico.

Surmas *et al.* (2003) estudaram as forças induzidas por um escoamento sobre dois cilindros expostos a uma corrente livre. Dois conjuntos de simulações foram realizados: no primeiro os cilindros foram colocados um após o outro, paralelamente ao escoamento. No segundo, os dois corpos foram colocados transversalmente ao escoamento, em todas as simulações os diâmetros dos dois cilindros foram iguais. Bons resultados foram encontrados quando comparados a estudos recentes. As distâncias entre os cilindros variaram entre 1,5 a 4 vezes o diâmetro do cilindro. Procurou-se com isso identificar os diversos regimes de escoamento e as características principais das forças de arrasto e sustentação e do número de Strouhal (relacionado à freqüência de formação dos vórtices de Von Karman). O número de Reynolds adotado foi igual a 200. O modelo utilizado (Lattice Boltzmann) parte da discretização da equação de Boltzmann, recuperando a equação de conservação da massa e a equação de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis. Este modelo apresenta como

principais vantagens a sua estabilidade, facilidade de paralelização do algoritmo e facilidade de obtenção das forças atuantes em qualquer corpo, independentemente da complexidade de sua forma.

Munson *et al.* (2004) discutiram em seu livro as propriedades dos fluidos e definições; estática dos fluidos; fundamentos da análise do escoamento; leis básicas para o volume de controle; análise dimensional e semelhança dinâmica; efeitos da viscosidade-resistência nos fluidos e o escoamento de fluidos compressíveis.

Aguiar e Rubini (2004) estudaram as forças aerodinâmicas que atuam sobre uma bola de futebol. Através da análise do vídeo de uma jogada famosa de Pelé, foi mostrado um fenômeno curioso, a crise do arrasto, o qual influenciou significativamente no movimento da bola. O efeito Magnus, associado à rotação da bola, também se revelou importante para o desfecho da jogada. Usando um programa de computador que simulou o movimento de bolas chutadas em diferentes condições, discutiram vários aspectos do lance de Pelé e da Física do futebol, em particular as bolas de efeito e a “folha seca” de Didi.

Em Coelho e Gueiral (2004) encontra-se uma introdução teórica sobre aerodinâmica e seus princípios básicos que estão na maior parte ligados a duas forças: sustentação e arrasto. O objetivo desta experiência foi determinar a força de arrasto de um fluido, neste caso o ar, sobre objetos de várias formas e dimensões.

Braun e Awruch (2005) apresentaram em seu trabalho um modelo numérico para a análise aerodinâmica e aeroelástica de feixe de cabos, comumente utilizado em linhas transmissão da energia. Os feixes foram idealizados por um modelo seccionado representando a seção no meio de um vão entre duas torres suporte. Um fluido viscoso levemente compressível foi considerado e o fluxo bi-dimensional foi analisado usando o método explícito de dois passos com uma descrição arbitrária Euleriana - Lagrangeana. Uma série de expansão de Taylor foi utilizada no tempo e a clássica técnica de Galerkin com o Método de Elementos Finitos foi utilizada para a discretização do espaço. A turbulência foi modelada usando simulação de grandes redemoinhos com o clássico modelo de sub-malha de Smagorinsky. O conjunto de cabos forma um único corpo com restrições elásticas, trabalhando mecanicamente acoplado, sendo que cada cabo foi ligado aos outros por espaçadores. A interação fluido-estrutura levou em consideração as condições de equilíbrio e compatibilidade com as interfaces fluido-sólido e a equação de equilíbrio dinâmico resultante foi resolvida usando o método de Newmark.

Mariani *et al.* (2005) realizaram uma experiência em laboratório que apresentou o estudo da interação fluido-corpo, na qual um fluido em movimento percorre o contorno pela

superfície externa de um corpo. Nestes casos é usual atribuir-se a denominação escoamento externo para situações em que o corpo está todo envolvido por fluido em movimento. Exemplos diversos onde este fenômeno ocorre podem ser citados, como dos automóveis, aviões, planadores, edifícios, pássaros, envolvidos pelo ar, ou dos submarinos, pilares de pontes, e peixes imersos em água. O corpo escolhido para os ensaios foi um cilindro fabricado em acrílico e o fluido que escoou através dele foi o ar atmosférico, movimentado em um túnel de vento.

2.5 ESTUDO DE VIBRAÇÕES EM ESTRUTURAS E CABOS DE LINHA DE TRANSMISSÃO

Claren *et al.* (1971) pesquisaram a resposta de vários feixes de cabos submetidos a forças de excitação harmônica. O estudo demonstra como as características do espaçador, expressas pela matriz elástica do mesmo, impõem tipos de modos naturais particulares e como a rigidez excessiva do espaçador causa tensões severas de flexão que ocorrem no cabo, próximo às garras de espaçador. Este trabalho analisa o comportamento dos espaçadores-amortecedores e explica como suas características podem ser otimizadas.

Hearnshaw (1974) estudou os conjuntos de cabos quadruplos e triplos e estabeleceu uma característica não-dimensional através da relação entre os subvãos adjacentes e as posições nodais para um modo fundamental de oscilação do subcondutor. Uma boa correlação também foi mostrada entre posições nodais relativas ao espaçador-amortecedor e seu desempenho de amortecimento medido através do decremento logarítmico.

Segundo Rawlins (1976), os condutores movimentam-se assumindo a forma de ondas vibrantes que se deslocam no feixe. A análise deste fenômeno foi realizada através dos modos de propagação de onda normal, sendo cada modo uma combinação de movimentos de onda no feixe de condutores que se propagam independentemente uns dos outros. O método da matriz de transferência foi usado para determinar a existência de um conjunto de modos de propagação para as condições de vento fornecidas, o que pode satisfazer às condições de contorno nos apoios do vão e assim indicar a possibilidade de uma oscilação estável.

As duas normas mais utilizadas no estudo de linhas de transmissão são a NBR-5422 (1985) que fixa as condições básicas para o projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica com tensão máxima, valor eficaz fase-fase, acima de 38 kV e não superior a 800 kV, de modo a garantir níveis mínimos de segurança e limitar perturbações em instalações

próximas; a outra é a NBR-6123 (1988) que fixa as condições exigidas na consideração das forças devidas à ação estática e dinâmica do vento, para efeito de cálculo de edificações.

Simpson *et al.* (1990) afirmam que as vibrações eólicas que ocorrem em linhas de transmissão de alta tensão de cabos múltiplos podem ser controladas por duas técnicas: pela combinação do espaçamento de elementos rígidos e amortecedores *stockbridges* nas extremidades da linha, ou pelo posicionamento adequado de espaçadores-amortecedores. Neste trabalho, foi realizada uma comparação entre a teoria e a análise computacional. Se conclui, com base em observações realizadas ao longo de muitos anos, que ambas as filosofias estão corretas quando condutores do tipo *ACSR* (condutores de alumínio com alma de aço) são moderadamente tensionados. Quando condutores do tipo *AAAC* (condutores feitos apenas com liga de alumínio) forem moderadamente ou extremamente tensionados, nenhuma das duas filosofias será totalmente adequada. Mas, se as duas filosofias forem combinadas, o resultado será um bom controle de vibrações em muitas circunstâncias.

Foata e Noiseux (1991) apresentaram uma investigação analítica dos efeitos de assimetria em feixe de condutores duplos. Os resultados sugerem que considerações práticas, em particular diferentes tensões em subcondutores, podem significar uma contribuição para o controle de vibrações eólicas. O modelo computacional usado para esta análise também foi apresentado resumidamente. Neste estudo, foi caracterizado um método de cálculo que leva em consideração o comportamento aleatório de vibrações eólicas na avaliação do deslocamento e amplitudes de tensão. Também oferece a possibilidade de tratar qualquer número de subcondutores e subvãos, espaçadores diferentes, amortecedores e subcondutores no mesmo vão e inclui algumas regras paramétricas para estimar o amortecimento característico interno dos condutores.

Labegalini *et al.* (1992) iniciam seu livro com uma introdução à transmissão de energia elétrica por linhas aéreas de transmissão e aborda com bastante clareza a maneira de se estimarem as forças atuantes sobre as linhas, além de aplicar um tratamento mais atual e objetivo ao cálculo das deformações elásticas e plásticas dos condutores. O trabalho apresenta o estudo do comportamento mecânico dos condutores, o roteiro para a realização de um projeto de cabos de uma linha de transmissão, o estudo das estruturas de sustentação, vibrações e tensões dinâmicas dos cabos. Além de um estudo detalhado das fundações de estruturas.

Segundo Anderson e Hagedorn (1995), em linhas de transmissão de alta tensão são freqüentemente utilizados conjuntos de condutores por motivos mecânicos e elétricos. Estes feixes de condutores são particularmente suscetíveis a vibrações excitadas pelo vento, em uma

faixa de frequência de aproximadamente 10 a 60 Hz, devido ao desprendimento de vórtices. Os amortecedores usuais como *Stockbridges* ou similares localizados próximos aos pontos de fixação de suspensão não conseguem amortecer as vibrações do conjunto de cabos. Recentemente, espaçadores-amortecedores têm sido utilizados para controlar o risco de fadiga em condutores devido às vibrações eólicas. O tratamento numérico do problema de valor limite para feixes equipados com espaçadores auto-amortecedores leva a equações complicadas e com condições de contorno inadequadas. O estudo assumiu um espaçador auto-amortecedor posicionado num conjunto de quatro condutores. A dissipação de energia associada com o modelo matemático para este espaçador pode ser expressa na forma de uma matriz simétrica de dimensão 16 x 16. Depois de resolvido o problema de autovalor correspondente à matriz 16 x 16, o espaçador-amortecedor pode ser otimizado com relação à dissipação de energia mecânica, através da maximização da menor parte real de seus autovalores.

Oliveira e Freire (1993) propuseram dois modelos matemáticos para representar as vibrações eólicas de um feixe duplo de condutores de linhas aéreas, nas configurações horizontal e vertical. A variável principal do estudo foi o deslocamento relativo entre os condutores. O método das múltiplas escalas de tempo foi aplicado e as amplitudes dos ciclos-limites foram calculados para ambos os modelos.

Em Blessmann (1995) foram estudados os seguintes tópicos: ação do vento nas estruturas; conceitos fundamentais: noções de meteorologia e de aerodinâmica; ação estática do vento em estruturas civis; pressão interna em edificações; ação dinâmica do vento: desprendimento de vórtices, galope, martelamento e energia cinética das rajadas; acidentes causados pelo vento e sua prevenção; análise plástica de estruturas lineares; generalidades; hipóteses fundamentais; momento plástico resistente; zonas de plastificação; tensões iniciais e residuais; teoremas fundamentais; métodos de análise e projeto; problemas secundários de projeto: deformações, influência do esforço axial e cortante no momento de ruptura, flambagem, ruptura frágil e fadiga.

Desai *et al.* (1995) idealizaram elementos finitos computacionais eficientes para a análise de galope que foi caracterizado por grandes amplitudes de oscilações de condutores congelados em linhas de transmissão de energia. Para modelar o condutor foi desenvolvido um elemento de cabo isoparamétrico constituído de três nós com translação nas três direções e um grau de liberdade em cada nó. O suporte isolante dos cabos e os condutores dos vãos adjacentes aos analisados foram representados por molas lineares estáticas. As interações da linha de transmissão com o suporte da torre foram modeladas através da rigidez equivalente

da torre em pontos de suspensão dos condutores. Uma rotina *Marching* foi desenvolvida para determinar o envelope do movimento de galope. A rotina pode ser utilizada para integrar as equações do equilíbrio dinâmico que envolve não apenas a geometria e não-linearidades do material, mas também a não-linearidade do amortecimento. A integração no tempo foi realizada por meio de subespaço para minimizar o esforço computacional. O modelo de elementos finitos foi empregado com sucesso para simular registro de galope em campo. Mostrou-se que é necessário considerar várias particularidades, mesmo que para um único vão, para se obter uma estimativa conservadora de amplitudes de galope que permitam uma folga considerável para o projeto entre condutores adjacentes.

Em Oliveira (1996), foi apresentado um estudo sobre os aspectos de projeto e manutenção das linhas de transmissão de energia com relação ao problema de vibração. Nesta pesquisa foram relacionados os diversos tipos de vibrações causadas pelo vento, os tipos de condutores empregados nas linhas de transmissão e os mecanismos empregados para o controle do fenômeno, tais como amortecedores, espaçadores e grampos de suspensão.

Silva (1996) analisou alguns aspectos do efeito do vento em edifícios de alvenaria estrutural. Inicialmente, foram apresentados resumos dos tópicos relevantes para o estudo do assunto, como por exemplo, as ações a se considerar, os principais sistemas estruturais para o contraventamento, prescrições de algumas normas, esquemas para modelagem da estrutura e detalhes a serem observados para a análise de painéis com aberturas. Depois, através de comparações de resultados obtidos em simulações para três edifícios, verificou-se a influência dos lintéis e das abas no comportamento do conjunto, com a finalidade de se estabelecer parâmetros para a modelagem dessas estruturas de contraventamento. Para todas as análises utilizou-se um programa computacional para pórticos espaciais, que permite considerar-se uma associação tridimensional dos painéis, inclusive com os recursos adicionais de nós mestres e trechos rígidos.

Dyke *et al.* (1997) fizeram uma avaliação experimental do desempenho dos diferentes sistemas de amortecimento para o controle de movimentos em condutores induzidos pelo vento. Os sistemas de amortecimento abrangem diferentes tipos de amortecedores *Stockbridge* e *bretelles*, utilizados em condutores simples dos tipos *ACRS* e *AAAC*. Assim como espaçadores-amortecedores e espaçadores semi-rígidos, combinados ou não com amortecedores *bretelles*, são utilizados de forma similar em feixe de condutores triplos ou quádruplos. Todos os testes foram realizados sob condições naturais de vento na linha de transmissão localizada na cidade de Varennes em Quebec.

O trabalho de Diana *et al.* (1998) preocuparam-se com o projeto dinâmico de uma importante linha de transmissão de alta tensão que atravessava o lago de Maracaibo, localizado na Venezuela. Este estudo apresentou os diferentes problemas que devem ser levados em consideração para avaliar o projeto correto e seguro de torres, dispositivos de amortecimento, suspensão de isoladores e conjunto de tensão. Mostram-se ainda, instrumentos analíticos utilizados para simular estes problemas (excitação eólica e ocorrências excepcionais, como falha de fase), juntamente com alguns resultados que foram relevantes para esta aplicação.

Dart *et al.* (1999) tiveram em seu trabalho o objetivo de aperfeiçoar o projeto de transmissão de energia, visando o aumento da sua eficiência e confiabilidade, o que afirmou que poderia ser alcançado de duas formas distintas: utilizando linhas compactas (torre raquete) ou a tecnologia de linhas de potência natural elevada (LPNE). Sua pesquisa deu prioridade à exploração da aplicabilidade das linhas LPNE na expansão de sistemas de transmissão.

Lilien e Papailiou (2000) realizaram pesquisas que demonstraram que o método de cálculo analítico simplificado utilizado para o projeto de espaçadores, conhecido como fórmula de Manuzio, conduz a um grave erro de subestimação de compressão do espaçador e, portanto, a um projeto defeituoso do mesmo. Neste trabalho, foram apresentados os resultados de ensaios adicionais que abrangem um conjunto de configurações, comprimentos de subvãos, tensão de curvatura e níveis de curto-circuito da linha de transmissão. Com base nestes resultados, os autores apresentam um novo método de cálculo para compressão de espaçador, que edifica os padrões aceitos pela *International Electrotechnical Commission (IEC)*.

Carril Junior (2000) desenvolveu seu trabalho com o objetivo de determinar a força do vento e seus efeitos em torres metálicas treliçadas através de investigações numéricas e experimentais. Uma torre de 100 m foi dimensionada com base nos padrões existentes no Brasil. Examinou-se a resposta dinâmica da estrutura ao longo do vento. Investigou-se a resposta ressonante, não-ressonante e o fator resposta de rajada, concluindo-se que a resposta ressonante não foi significativa para este tipo de estrutura. Compararam-se os modelos de Davenport (1993), da norma brasileira NBR-6123 (1988) e o processo do vento sintético de Franco (1993). Uma investigação experimental foi realizada para analisar os coeficientes de força em uma seção da torre estudada. Os experimentos foram realizados no *Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory (BLWTL)* da *University of Western Ontario (UWO)*, Canadá. Foram analisados o ângulo de incidência do vento, o índice de área exposta, o efeito de proteção e o fator de interferência no coeficiente de arrasto de antenas de microondas, devido à

proximidade da torre e a influência da turbulência do vento. Os resultados mostraram boa concordância com os valores obtidos em diferentes normas existentes.

Verma (2002) procurou em seu trabalho minimizar as vibrações excitadas pelo vento geradas pelo desprendimento de vórtices em linhas de transmissão de alta tensão, uma vez que elas podem levar os condutores à fadiga. Para reduzir essas vibrações induzidas pelo vento, usam-se amortecedores *stockbridge* que dissipam a energia eólica através do cabo mensageiro. Este trabalho foi dirigido, principalmente, para o modelo de histerese estática, o qual foi feito por meio do modelo de Masing usando um número de elementos paralelos-espaçados de Jenkin. O sistema foi inicialmente modelado usando elementos de Jenkin, o qual foi incorporado ao amortecedor *stockbridge* para obter as equações de movimento. Isto leva a um sistema de equações diferenciais ordinárias não-lineares devido à existência de descontinuidades, para o qual a solução numérica revelou-se bastante difícil. Também foram discutidos métodos para resolver este problema e aplicá-lo ao amortecedor *stockbridge*. O passo seguinte foi a utilização deste modelo de amortecedor em uma linha de transmissão real de um único condutor para registrar suas vibrações, a fim de estudar a eficácia do amortecedor. Para obter as vibrações da linha de transmissão, todo o vão da linha de transmissão com amortecedores *stockbridge* foi considerado. Além disso, também foram levados em consideração vários outros acessórios de linha como bolas de sinalização, cabos de junção, etc. Este procedimento forneceu uma estimativa dos níveis máximos de tensão no condutor, dado este que pode ser muito útil em projetos de linhas de transmissão e otimização do posicionamento e tipo de amortecedor correspondente.

Oliveira *et al.* (2002) fazem uma análise comparativa entre dois elementos de cabo presentes na literatura. Foi apresentado um elemento finito isoparamétrico de cabo com dois nós, desenvolvido a partir de uma formulação variacional empregada comumente no Método dos Elementos Finitos e o elemento de catenária desenvolvido a partir de expressões exatas oriundas da equação da catenária.

Em Pauletti (2002) foram apresentadas algumas considerações sobre o comportamento estático e dinâmico de cabos e cordas. Embora possam ser considerados os casos mais simples de estruturas tensionadas e justamente por isso, o estudo desses sistemas permite introduzir alguns dos conceitos fundamentais do comportamento geral das estruturas tensionadas, sejam elas de geometria simples ou complexa, sejam cabos ou membranas.

Loredo-Souza e Davenport (2002) estudaram o comportamento de dois cabos paralelos de linha de transmissão sob a ação de ventos fortes, examinando-os através de modelos de cabos testados em túnel de vento aerodinâmico. Cabos com características e espaçamentos

diferentes foram simulados e testados com incidência de vento transversal. Os resultados obtidos mostraram uma boa concordância entre os valores medidos e os valores previstos teoricamente. Os coeficientes de correlação das forças de arrasto para os dois condutores foram obtidos e variam pouco com a velocidade do vento, os quais foram maiores para as menores separações entre cabos.

Em Lavandoscki *et al.* (2002) foram apresentados resultados de estudos sobre o comportamento estrutural de cabos de linhas de transmissão, sujeitos a carregamentos eólicos. Foram ainda determinados os deslocamentos, tensões, modos, frequências naturais de vibração e respostas dinâmicas com a finalidade de se estimar parâmetros relacionados à vida útil desses cabos. Foram realizadas análises não-lineares, análises modais, análises dinâmicas de resposta e análises estáticas lineares. As tensões calculadas para os cabos foram utilizadas para se estimar o parâmetro de vida útil dos mesmos.

Zhou *et al.* (2003) afirmam em seu trabalho o carregamento de vento sobre estruturas submetidas a pancadas de rajadas de vento através do "fator de rajada", método adotado pela maioria dos principais padrões e normas do mundo. O carregamento de vento estático equivalente utilizado para projetar é igual à força média do vento multiplicada pelo fator de rajada. Embora o método tradicional do fator de rajada possa garantir uma estimativa exata do deslocamento da resposta, ele não fornece uma estimativa confiável de algumas outras componentes de resposta. Para superar esta falha, um procedimento mais realista para carregamentos de projeto foi proposto neste artigo e exemplos numéricos mostram a conveniência de sua utilização, além da precisão do método proposto em relação ao tradicional.

Em Smith e Mailey (2003), a corporação Manitoba Hydro financiou a pesquisa de falhas em espaçadores amortecedores em duas linhas de transmissão de 500 kV, para as quais foi incumbida de realizar a substituição dos amortecedores existentes e instalar amortecedores adicionais. O trabalho foi realizado em um clima variável, sobre um terreno com uma extensão de mais de 400 quilômetros de floresta e mangue, acessível apenas por via aérea, enquanto as linhas de transmissão permaneciam energizadas para satisfazer aos requisitos de sistema. O projeto incluiu o reposicionamento dos amortecedores para melhorar a capacidade de amortecimento, completando a manutenção da linha adicional, bem como o desenvolvimento de um modelo matemático para verificar a veracidade dos registros de localização do amortecedor.

Fonseca e Cimini Junior (2003) afirmaram que as oscilações eólicas são provocadas por ventos de baixa velocidade, normalmente entre 1 a 7 m/s que, quando passam através do cabo,

provocam vibrações de alta frequência e baixa amplitude, geralmente na ordem de 0,01 a 1 vez o diâmetro do condutor, devido à formação de vórtices.

Kukureka e Wei (2003) investigaram o comportamento por um longo prazo de compósitos reforçados com fibra de vidro, que foram utilizados como componentes de suporte de carga em cabos ópticos de telecomunicações.

No artigo feito por Munaro *et al.* (2003) foi descrita a implementação e os principais resultados de laboratório para realização de ensaio de compatibilidade em instalações de distribuição elétrica segundo a Norma CODI 3.2.18.24.0. O sistema montado permite a utilização da instrumentação como ferramenta de investigação e avaliação de desempenho de equipamentos e acessórios, sob condições ambientais simuladas e demais solicitações inerentes a sistemas elétricos.

Rodrigues (2004) analisou o comportamento dinâmico e o mecanismo de colapso de torres de linhas de transmissão de energia elétrica – torres TEE – sob ação do vento. Investigou o cenário de um grande número de acidentes onde o colapso estrutural de uma ou mais torres ocorre sem que a velocidade de vento de projeto tenha sido alcançada e, ainda, sem que as linhas de transmissão sofram ruptura. Com auxílio de um modelo tridimensional em elementos finitos, que contemplou a interação entre o escoamento de ar – cabos elétricos – estrutura, e dos procedimentos da análise dinâmica não-linear, foi possível reproduzir os grandes deslocamentos angulares das cadeias de isoladores e cabos elétricos, despertados pela ação do vento numa linha real. Os resultados numéricos foram utilizados nas avaliações da estabilidade de uma torre típica, identificando falhas em seus componentes estruturais e a mecânica do colapso global. Um modelo analítico simplificado foi sugerido como ferramenta auxiliar para a análise preliminar do comportamento não-linear e para estimativa da frequência fundamental do sistema estrutural. Finalmente, foi apresentada uma proposta de instalação de atenuadores dinâmicos sincronizados – ADS – para reduzir as amplitudes das oscilações das linhas de transmissão já energizadas ou de novas linhas de transmissão a serem construídas.

O estudo de Lilien e Snegovski (2004) discute alguns aspectos da modelagem de vibrações induzida por esteira em feixe de condutores de linhas transmissão. O acoplamento da esteira de subcondutores foi modelado através de aproximações de Simpson. Este modelo pode ser aplicado para a análise de linha de transmissão de energia, se for utilizada uma representação modal de um vão. Neste trabalho foi estudado como a aplicação da técnica de redução dinâmica pode melhorar a análise no âmbito da abordagem de elementos finitos.

Em Kim e Nguyen (2004) o principal objetivo foi calcular o comportamento dos espaçadores de interfase para reduzir a amplitude do galope nos condutores. Como casos padrões de simulação foram adotados três fases, condutores simples e duplos congelados com e sem espaçadores. Este trabalho utilizou os programas ANSYS, LS-DINA e os Métodos de Elementos Finitos implícito e explícito para calcular a resposta transiente do comportamento não-linear geométrico. Os resultados obtidos podem ser utilizados para definir as posições para inserir os espaçadores de interfase entre os condutores.

Snegovski (2004) apresentou em seu trabalho, de forma sucinta, como realizar o monitoramento de linhas de transmissão de energia. Monitoramento este que inclui métodos de monitoramento da curvatura do condutor (catenária), falhas que ocorrem nos componentes da linha devido a vibrações provocadas pelo vento (condutor, espaçadores, amortecedores, etc.) e na própria torre de transmissão. Apresentou ainda métodos de medições, monitoramento e diagnóstico de vibração em linha de transmissão.

Aguilera (2005) elaborou um trabalho para análise do comportamento dos condutores de Linhas Aéreas de Transmissão e realizou estudos sobre os equipamentos necessários para realizar a análise e avaliação do nível de vibração de linhas de transmissão através de uma bancada de teste. Realizou-se uma análise modal experimental nos cabos condutores e extraíram-se seus respectivos parâmetros modais, tais como as frequências naturais, formas modais e os fatores de amortecimento. Observou-se que os resultados obtidos experimentalmente foram bastante satisfatórios e coerentes, quando comparados com os resultados obtidos por simulações numéricas e analíticas, para o mesmo problema.

Em Blessmann (2005) foi apresentado como determinar o efeito de uma ou mais rajadas de vento sobre uma estrutura oscilante. Foi apresentada, ainda, a NBR-6123 (1988), a qual serviu como base para a determinação da ação estática do vento sobre estruturas, que destaca em sua formulação que a vibração de uma estrutura em seus modos naturais dá-se em torno da posição deformada definida pelas pressões causadas pela componente estática do vento, isto é, pela velocidade média.

Souza *et al.* (2005) tiveram como objetivo analisar a influência da rigidez à flexão, ao cisalhamento e a inércia à rotação no comportamento mecânico de cabos condutores de linhas aéreas de transmissão, comparando-se os resultados com uma corda vibrante, onde se considerou apenas a rigidez geométrica. Foram desenvolvidos cinco tipos de formulação, baseadas nas teorias de viga de Bernoulli e de Timoshenko e fazendo diferentes combinações de consideração de efeitos, tais como rigidez geométrica, rigidez à flexão, rigidez ao cisalhamento e inércia à rotação. Em todas as cinco formulações considerou-se o cabo

inextensível axialmente. As equações de movimento da corda vibrante foram desenvolvidas analiticamente, sendo consideradas apenas pequenas deformações, com as frequências naturais referentes à teoria de Bernoulli e Timoshenko sendo determinadas pelo método numérico de Newton-Raphson para solução de equações não-lineares. Os resultados foram comparados com uma formulação publicada na literatura, que considera somente a rigidez à flexão.

Em Diana *et al.* (2005) analisaram um conjunto de condutores quádruplos submetidos a grandes oscilações eólicas que provocaram falhas no conjunto de suspensão tipo I da linha de transmissão. Na pesquisa foram apresentados os estudos e análises realizados sobre este problema com o objetivo de compreender a natureza das oscilações observadas, o mecanismo pela qual eles foram excitados e a magnitude das tensões de flexão induzidas nas cordas do isolador foram apresentadas. Para esclarecer totalmente o problema e apresentar uma solução prática, um vão experimental foi submetido a teste experimentais e computacionais. A modelagem numérica do comportamento do sistema foi apresentada junto com os testes realizados sobre o vão experimental, com a finalidade de validar a excitação proposta e o mecanismo de falha. O teste da configuração de projeto, obtida através de um procedimento numérico-experimental, também foi descrito em detalhes. Finalmente, a solução adaptada para limitar as oscilações do feixe de condutores dentro de valores seguros foi apresentada e discutida.

O trabalho de Pereira *et al.* (2005) consistiu no estudo do comportamento estático e dinâmico de cabos de linhas aéreas de transmissão, fazendo parte de uma pesquisa que tinha como objetivo desenvolver um programa para prognóstico, monitoração e controle de vibração dos condutores de linhas aéreas de transmissão localizadas na Região Amazônica.

Com o objetivo de estimar a vida útil dos cabos condutores, Sampaio *et al.* (2006) instalaram um vibrógrafo *PAVICA* na linha Guamá-Vila do Conde sobre o Rio Guamá. Após a coleta de frequências e amplitudes do cabo, pôde-se, por meio da equação de Poffenberger-Swart, calcular as tensões atuantes no mesmo e construir a curva de tensão acumulada.

Silva (2005) apresentou toda a fundamentação teórica envolvida na análise do comportamento estático de linhas de transmissão. As características principais e as equações matemáticas envolvidas que descrevem o comportamento estático do cabo foram demonstradas detalhadamente. Considerou-se que o cabo pode assumir a forma de catenária ou parábola. Foram apresentados conhecimentos da abordagem orientada a objetos no desenvolvimento de um sistema computacional, e os principais conceitos e os principais elementos em que se divide um Programa de Orientação a Objeto (OO). Também foi feito um

breve estudo da linguagem de representação gráfica de sistemas conhecida como Linguagem de modelagem Unificada (*UML*). Descreveram-se as fases e etapas que envolveram o desenvolvimento do sistema computacional orientado a objeto, desde a descrição do problema até a implementação do código em Java, além de uma breve introdução a esta linguagem de programação muito utilizada atualmente. Discutiram-se alguns exemplos que validam e comprovam a aplicabilidade dos algoritmos utilizados e a funcionalidade do programa *applet*. Os resultados obtidos através destes algoritmos foram comparados com os de outros trabalhos semelhantes.

Cunha (2005) analisou criticamente um conjunto de resultados sobre a fundamentação, simulação e aplicabilidade de alguns modelos fenomenológicos para a vibração induzida por vórtices. Foram estudados os modelos de Hartlen e Currie (1970), de Iwan e Blevins (1975) e de Facchinetti e de Langre e Biolley (2004). O estudo foi desenvolvido com os propósitos: fundamentar a partir de resultados teóricos e experimentais existentes na literatura, a representatividade do fenômeno de vibração induzida por vórtices através desta classe de modelos; obter resultados da simulação numérica destes modelos para posterior confrontação com dados experimentais disponíveis na literatura; discutir a possibilidades de aplicação destes modelos na prática da engenharia.

Peres (2005) determinou as velocidades críticas de vento e as amplitudes de vibração numa estrutura composta por uma viga engastada suspensa por um estai (cabo), submetida aos efeitos de vento e chuva. Foi considerada a deformação no cabo devido ao carregamento do peso próprio e o acoplamento não linear das vibrações de cabo e da viga. Três modos de vibração foram de especial interesse, chamados de primeiro modo global (flexão da viga e vibração no cabo), primeiro modo local (vibração no cabo, com flexão na viga desprezível) e primeiro modo à torção. O modelo foi reduzido a três graus de liberdade. A modelagem dos carregamentos aerodinâmicos aplicados foi feita segundo procedimentos tradicionais. O carregamento aerodinâmico aplicado ao cabo sob efeito de chuva e vento também foi levado em consideração. Para a redução do modelo matemático, os coeficientes de rigidez e de amortecimento equivalente foram definidos dependendo parametricamente da velocidade do vento. Os termos não-lineares são devidos ao acoplamento das vibrações do cabo e da viga à flexão (no plano do cabo) e também aos efeitos aeroelásticos do cabo. Os seguintes regimes instáveis foram avaliados: o efeito de galope no cabo, o drapejamento unimodal na torção e o drapejamento do modo de flexão da viga em conjunto com vibrações transversais do cabo.

Wu e Cai (2006) demonstram neste trabalho experimental que os amortecedores eletro-reológicos (AER) também são indicados para o controle de vibrações em cabos. Inicialmente,

um AER foi testado para obter as curvas de desempenho do mesmo, sob diferentes condições de carregamento, incluindo diferentes correntes elétricas, frequências de carregamento tipos de ondas de carregamento e temperaturas de trabalho. O AER foi então instalado em um cabo para reduzir suas vibrações e posicionado a 7,16 m do ponto inicial do cabo, com um modelo de protótipo em escala para este estudo. As frequências que o cabo apresentou, sob diferentes forças de tensão, foram medidas e comparadas com as obtidas através de cálculos teóricos. Em seguida, um teste de controle de vibração livre foi realizado com o AER sendo instalado em um quarto do comprimento do cabo. Os dados medidos mostram que este tipo de amortecedor é eficiente para o controle de vibração em cabos dentro de sua faixa de trabalho, embora haja um efeito de saturação. Também foi observado que o amortecedor poderia reduzir as vibrações de cabos sob uma variedade de frequências de excitação, em especial para as vibrações em ressonâncias.

Segundo Irvine (2006), o vento provoca oscilações mecânicas em linhas de energia de alta tensão. Este trabalho detalha os três tipos de mecanismos de excitação mais comuns que são: vibrações eólicas, galope e vibrações induzidas por esteiras. Cada um dos tipos pode causar fadiga, desgaste, e outros tipos de falhas.

Na apresentação de Belloli *et al.* (2006) o principal tema foi vibrações em cabos de linhas de transmissão de energia elétrica devido à ação do vento, mas os conceitos gerais apresentados podem ser aplicados a qualquer problema de cabos ou cordas expostos à ação do vento. Esta breve apresentação ilustrou alguns dos conceitos mais importantes neste campo e contou com o auxílio também das experiências, ensaios, desenvolvimento de ferramentas de simulação adquiridas pelo grupo de pesquisa Politécnico de Milano.

Oliveira (2006) afirmou que, na prática corrente do projeto de torres de aço treliçadas utilizadas para suportar linhas de transmissão de energia elétrica, a avaliação do comportamento dinâmico das estruturas, de maneira geral, não é considerada. Contudo, o principal carregamento a ser considerado na análise estrutural das torres de transmissão de energia elétrica é produzido pelo vento, que atua de forma dinâmica sobre o sistema estrutural formado pelos cabos e pelas torres. Tendo em vista que muitos acidentes envolvendo torres treliçadas ocorrem, ainda que a velocidade de vento utilizada no projeto não tenha sido atingida, é possível que em muitos casos o colapso tenha sido governado pelas ações dinâmicas. Por este motivo, seu trabalho de pesquisa utilizou um modelo de elementos finitos capaz de reproduzir com fidelidade o comportamento acoplado entre os cabos da linha de transmissão e estrutura, quando submetidos aos carregamentos dinâmicos e não determinísticos produzidos pelo vento. O modelo tridimensional estudado foi constituído por

elementos finitos de pórtico e treliça espacial e considerou o efeito de não-linearidade geométrica decorrente, principalmente, dos grandes deslocamentos sofridos pelos cabos e isoladores. O carregamento do vento foi modelado como um processo aleatório a partir das suas propriedades estatísticas. Os resultados obtidos ao longo desse estudo mostraram que a parcela dinâmica da resposta das estruturas pode ser determinante no seu comportamento. Nesse caso, a utilização de uma análise estrutural estática pode resultar no mau dimensionamento das torres e, conseqüentemente, em possíveis acidentes.

Manfrim (2006) teve por objetivo obter numericamente os valores das distribuições de pressões devidas à ação do vento nas paredes e nos telhados de edifícios industriais. As distribuições de pressões nas paredes e nos telhados foram determinadas através da simulação numérica, utilizando-se o programa ANSYS 9.0, considerando-se a interação fluido-estrutura. Posteriormente, comparam-se os resultados numéricos obtidos na simulação através do ANSYS com os valores apresentados na norma NBR-6123 (1988), a fim de verificar a viabilidade da utilização da simulação numérica para obtenção das distribuições de pressão em outras estruturas, determinando, assim, o seu comportamento estrutural.

Silva (2006) analisou o amortecedor de linha de transmissão de energia do tipo *stockbridge* compreendendo, principalmente o aperfeiçoamento de suas características de amortecimento através de suas características dinâmicas e o seu posicionamento na linha de transmissão, para obter o máximo de aproveitamento de dissipação de energia de vibração. Com respeito às características dinâmicas, foi mostrado o modelo do amortecedor deduzido da análise de equilíbrio dinâmico do elemento do cabo mensageiro, através da utilização do princípio de Hamilton, assim como para as massas suspensas. Com respeito à posição do dispositivo na linha, foi apresentado um estudo experimental em um vão de laboratório em que as medidas efetuadas nas medições foram confrontadas com dois critérios de posição ótima, obtidos da literatura. Para concluir o estudo através do modelo do *stockbridge* deduzido no trabalho, foi realizado o ajuste de parâmetros dinâmicos, por meio do confronto dos resultados obtidos experimentalmente em bancada de ensaio. Os resultados das simulações com o Método de Elementos Finitos foram apresentados.

Henriques (2006) descreveu uma bancada para a realização de ensaios de fadiga em cabos condutores de energia. A bancada foi projetada e construída de forma a permitir a condução de uma ampla gama de ensaios, em especial, além dos ensaios de fadiga, poder conduzir ensaios de vibração e de amortecimento, entre outros. A concepção adotada possibilita a realização de testes em cabos condutores, com até 50 mm de diâmetro e com vão ativo variando na faixa de 38 a 50 m de comprimento, com total controle e monitoramento em

tempo real das condições pré-estabelecidas para o ensaio. O sistema desenvolvido permite controlar ou monitorar, entre outros parâmetros, a pré-tensão no cabo, a força de aperto nos parafusos de fixação do grampo de suspensão, o deslocamento em qualquer ponto da amostra em teste, a frequência e a força de excitação, a temperatura e a deformação nos fios da camada externa do cabo. Nos ensaios de fadiga o sistema mantém, durante todo o teste, uma variação de no máximo 5 % da amplitude de deslocamento prescrita a 89 mm do último ponto de contato entre o cabo (vão ativo) e o grampo de suspensão. Permite também, por meio de sensores a *laser*, detectar o momento exato e a camada em que ocorre a quebra dos fios. A bancada permite ainda variar o ângulo de saída do cabo no grampo de suspensão.

Rosário e Oliveira (2006), em seu trabalho, tiveram como objetivo a verificação dos atuais procedimentos para o projeto de torres de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. O trabalho analisou a norma NBR-5422 (1985) referente à projetos de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica que apresenta hipóteses para todos os tipos de carregamento e a norma NBR-6123 (1988) referente à forças devidas ao vento em edificações, a qual trata mais especificamente de carregamentos. Foi realizada uma análise estática e uma comparação entre análises modais feitas através do programa SAP2000 e IN LOCO, por meio de extensometria.

Oliveira *et al.* (2007) apresentaram uma metodologia de análise para o estudo do comportamento dinâmico de torres de transmissão de energia. O modelo de elementos finitos reproduziu o acoplamento entre os cabos da linha de transmissão e a estrutura. Este modelo considera o efeito da não-linearidade geométrica decorrente dos grandes deslocamentos sofridos pelos cabos e isoladores, sendo constituído por elementos finitos de pórtico e treliça espacial. A ação do vento foi modelada como um processo não-determinístico, a partir das suas propriedades estatísticas. Os resultados do trabalho demonstraram que a parcela dinâmica da resposta das torres pode vir a ser determinante no seu comportamento.

Poovarodom e Yamaguchi (2007) examinaram sistemas de múltiplos condutores com a finalidade de investigar as características do fenômeno de localização modal no sistema. As frequências naturais e as formas modais foram calculadas computacionalmente baseando-se na modelagem de elementos finitos. Os movimentos de cabos nos subsistemas em diferentes vãos são levemente acoplados e, portanto, possibilita a coerência do fenômeno de localização modal quando uma leve perturbação é introduzida no comprimento do vão. Os graus de localização dos modos normais são diferentes para os diferentes modos de vibração. As oscilações modais, bem como os modos no plano vertical com vãos assimétricos são facilmente localizadas, enquanto que a localização dos modos no plano vertical com vãos

simétricos é difícil de identificar na região de transição modal do parâmetro do cabo. Os efeitos de fenômeno de localização modal também foram discutidos baseando-se em parâmetros tais como tensão dinâmica e resposta forçada harmônica.

2.6 CONSIDERAÇÕES

Tendo por base a revisão bibliográfica apresentada neste capítulo, pode-se dizer que a vibração em linhas de transmissão tem sido objeto de vários estudos, entretanto, para os objetivos deste trabalho, os quais fazem parte de um Projeto P&D financiado pela ELETRONORTE, na carteira ANEEL, optou-se em elaborar um modelo numérico da linha de transmissão, tal que as seguintes condições sejam levadas em consideração: amortecimento viscoso proporcional; os vãos de cabos adjacentes ao trecho modelado são representados por um elemento de rigidez; os espaçadores-amortecedores são representados de forma simplificada como elementos de viga equivalentes; e os isoladores são incluídos como elementos de barra equivalentes. A excitação promovida pelo vento sobre a linha de transmissão é dividida em duas parcelas, sendo uma estática e outra dinâmica. A parcela dinâmica tem caráter não determinístico e é representada em função de parâmetros estatísticos obtidos a partir do espectro de potência do vento.

CAPÍTULO 3 - VIBRAÇÕES EM CONDUTORES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Segundo Verma (2002), de todas as forças que causam ações estáticas e dinâmicas sobre estruturas flexíveis, tais como cabos de linhas de transmissão, o vento desempenha um papel significativo, juntamente com chuvas e terremotos. O efeito do vento sobre os cabos deve ser considerado primeiro, desde que resultem em grades deflexões. Uma estrutura imersa em um determinado fluxo de vento está sujeita às forças aerodinâmicas, que inclui arrasto, a qual atua na direção do fluxo médio, e sustentação, que age perpendicular à direção do fluxo de vento. Para diferentes velocidades de vento, estas forças variam resultando em diferentes tipos de movimentos dos condutores. Este capítulo é desenvolvido principalmente para dar idéia dos diferentes tipos de vibrações em condutores.

3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS EM CONDUTORES

A energia absorvida pelo condutor pode ser dissipada pela fricção interna do material a nível molecular, pela fricção das camadas do cabo, pela transferência de braçadeiras, amortecedores, montagem de espaçadores-amortecedores, pela transferência para condutores adjacentes (conjunto de condutores) ou retornando energia para o vento. As magnitudes relativas destas dissipações e suas posições de fases dentro de cada ciclo de movimento determinam se o movimento do condutor será mantido ou acelerado.

Os movimentos de condutores são caracterizados de acordo com:

- o mecanismo de transferência de energia,
- diferentes padrões de movimento,
- faixa de frequência de ocorrência de vibrações,
- amplitudes de vibração,
- diferentes efeitos sob o condutor, braçadeiras e outras ferramentas.

Estes movimentos estão divididos em três principais categorias: Vibrações Eólicas, Galope do Condutor e Oscilações devido à Esteira (rotações). Estas são comentadas em maiores detalhes a seguir.

3.2.1 Vibrações Eólicas

Verma (2002) afirma que observações realizadas em 1920 mostraram que as rupturas em cabos foram atribuídas à fadiga de metal, resultando do fato que as linhas de transmissão, sob certas condições de vento vibravam. Essas observações também indicaram que as vibrações ocorreram dentro de uma faixa de velocidades de vento (1 a 7 m/s) e foi conhecido o fato de que a turbulência do ar diminuiu a severidade das vibrações. Este tipo de vibração de baixa amplitude de aproximadamente uma vez o diâmetro do condutor (Fig. 3.1) e frequência mais elevada resultante de ventos de baixas velocidades é denominado vibração eólica.

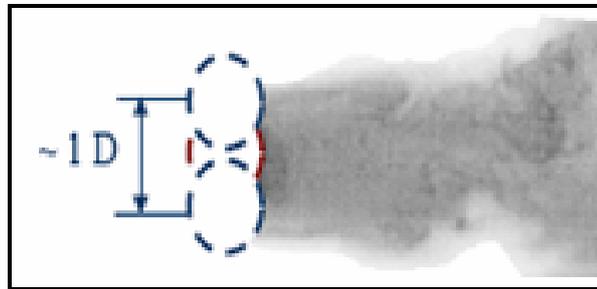


Figura 3.1 - Amplitude de oscilação do condutor (modificado, Snegovski, 2004).

Segundo Oliveira (1996), a causa básica deste tipo de vibração é o desprendimento alternado de vórtices induzidos pelo vento, na parte superior e inferior do condutor (Fig. 3.2). Esta ação cria um desbalanceamento das pressões, forçando o condutor a se mover para cima e para baixo em ângulo reto com a direção do vento.

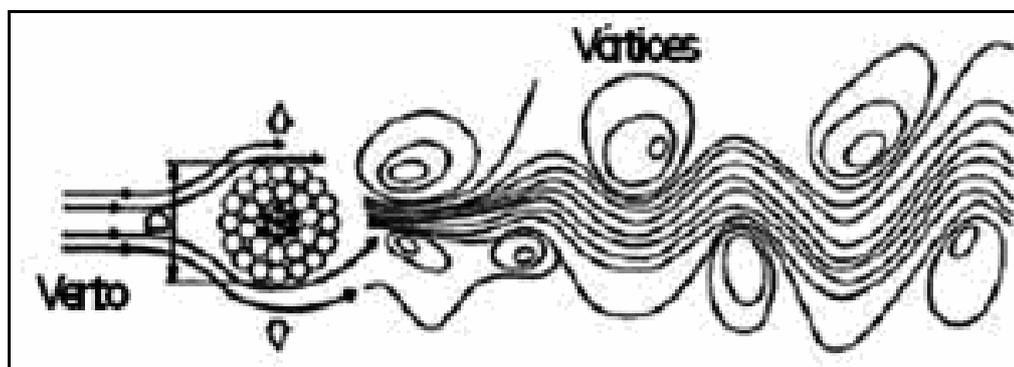


Figura 3.2 – Desprendimento de vórtices no condutor (modificado, Snegovski, 2004).

O aumento do número de Reynolds (Eq. 3.1) proporciona o desprendimento de vórtices que formam uma esteira que ficou conhecida como esteira de Von Karman, pelo fato do

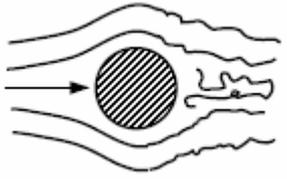
mesmo ter observado que esta esteira formada através da passagem de um fluido por um corpo cilíndrico, não regular.

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} \quad (3.1)$$

sendo V a velocidade de fluxo do fluido; D o diâmetro do condutor e ν a viscosidade cinemática do fluido.

A Tabela 3.1 apresenta o comportamento da esteira de vórtice em função do número de Reynolds sobre um cilindro.

Tabela 3.1 - Regime do fluxo de um fluido em volta de um cilindro liso circular (modificado, Blevins, 1990).

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p style="text-align: center;">$\text{Re} < 5$ Regime de fluxo não separado.</p> |
|  | <p style="text-align: center;">$5 \leq \text{Re} < 40$ Um par fixo de vórtices em turbulência.</p> |
|  | <p style="text-align: center;">$40 \leq \text{Re} < 150$ Esteira de vórtices é laminar.</p> |
|  | <p style="text-align: center;">$150 \leq \text{Re} < 300$ Transição para vórtice turbulento. $300 \leq \text{Re} < 3 \cdot 10^5$ A esteira de vórtices é totalmente turbulenta.</p> |
|  | <p style="text-align: center;">$3 \cdot 10^5 \leq \text{Re} < 3,5 \cdot 10^6$ A camada limite laminar sofreu transição turbulenta e a esteira é estreita e desorganizada.</p> |
|  | <p style="text-align: center;">$3,5 \cdot 10^6 \leq \text{Re}$ Re-estabelecimento da esteira de vórtices turbulento.</p> |

Verma (2002) afirma que Strouhal foi o primeiro a relatar uma considerável regularidade do efeito de esteira e salientou que o fenômeno do desprendimento de vórtices pode ser descrito em termo de um número não-dimensional chamado número de Strouhal, como mostra a Eq. (3.2):

$$S = \frac{f_s D}{V} \quad (3.2)$$

sendo f_s a frequência de excitação do vento; D o diâmetro do condutor (corpo) e V a velocidade do vento (regime laminar).

O número de Strouhal está compreendido entre 0,185 e 0,2 para vibrações em condutores. Se a frequência da força alternada resultar de um vento transversal uniforme e constante, tal que corresponda, aproximadamente, à frequência de um modo de vibração do condutor do vão, o condutor tenderá a vibrar no plano vertical. Negligenciando o valor de amortecimento nas extremidades do vão, a vibração pode obter a forma de ondas, com nós fixos.

Os dois parâmetros necessários para a análise do desprendimento dos vórtices são os números de Reynolds e Strouhal, os quais são relacionados empiricamente na Tabela 3.2 (Irvine, 2006).

Tabela 3.2 - Número de Strouhal x Número de Reynolds para uma seção circular (modificado, Irvine, 2006).

| Número de Reynolds | Número de Strouhal |
|---------------------------|---------------------------|
| < 30 | 0 |
| 50 | 0,13 |
| 500 | 0,20 |
| 1000 | 0,21 |
| 10^4 | 0,20 |
| 10^5 | 0,19 |
| 10^6 | 0,21 |
| 10^7 | 0,23 |

No gráfico da Fig. 3.3 é apresentado o número de Strouhal em função do número de Reynolds para dois cilindros circulares estacionários imersos em um fluxo subsônico, sendo um liso e outro rugoso.

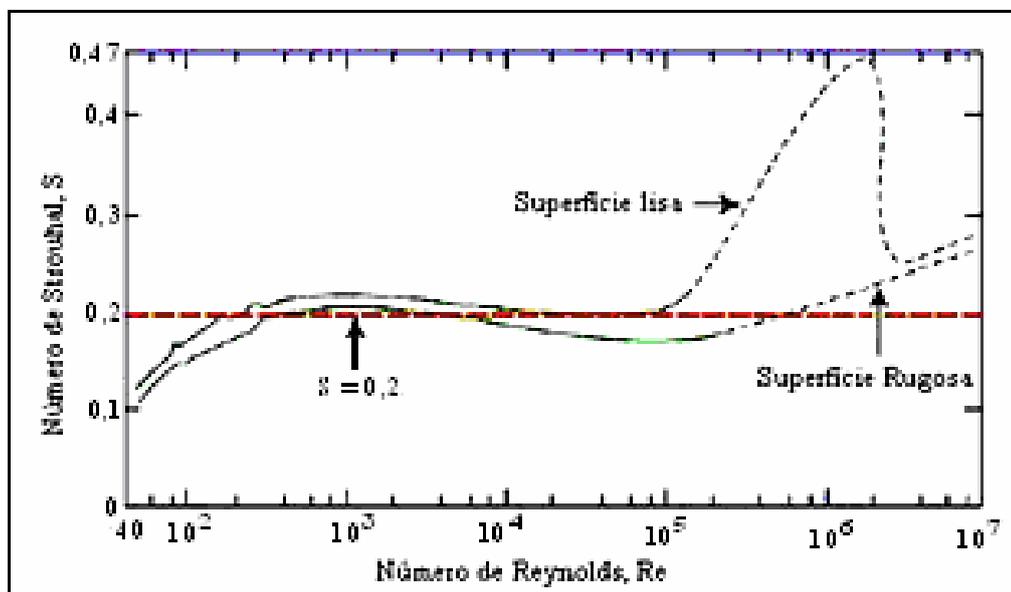


Figura 3.3 - Número de Strouhal x Número de Reynolds para dois cilindros, um liso e outro rugoso (modificado, Silva, 2006).

No caso de vibrações eólicas em uma linha de transmissão, com um conjunto de condutores, um parâmetro importante é o número de espaçadores, enquanto que sua posição não é levada em conta, pois os valores de comprimento de onda envolvidos neste fenômeno são de apenas alguns metros, as tolerâncias no posicionamento dos espaçadores torna os comprimentos dos sub-vãos diferentes entre si. Deste modo, qualquer que seja o espaçamento é praticamente impossível que para qualquer modo de vibração do condutor, todos os espaçadores estejam localizados em nós de deflexão e assim não contribuam para dissipar a energia do condutor. Na relação entre espaçador e vibração eólica é muito mais importante aperfeiçoar o espaçador, ou seja, suas características como rigidez e amortecimentos dos elementos elásticos, geometria e a inércia das peças (CIGRÉ, 2005a).

3.2.2 Galope do Condutor

O galope em condutor é uma vibração de baixa frequência (0,1 a 3 Hz) e alta amplitude, principalmente na direção vertical do condutor. Ventos cruzados moderadamente fortes e estáveis atuando sobre uma superfície assimétrica do condutor congelado, normalmente, é

uma das causas deste tipo de vibração. Mesmo uma camada muito fina de gelo (1 a 2 mm) pode causar o galope.

O gelo geralmente é depositado na superfície de barlavento do condutor. Se um depósito de gelo tem a forma propícia ao galope, a rotação do condutor com relação ao vento pode levar a uma variação na sustentação do condutor e isto pode levar à oscilação do condutor na direção vertical. O Galope é o tipo de vibração mais perigoso para os condutores, pois pode não só quebrar o condutor, mas também danificar amortecedores, fios, grampos dos isoladores e outros dispositivos (Verma, 2002).

O galope ocorre geralmente em regiões em que as temperaturas oscilam em torno de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, seguidas de ventos moderados ou fortes. O gelo formado sobre a linha de transmissão modifica a seção da mesma, normalmente, para uma forma semelhante à de um aerofólio. Este tipo de vibração deve-se, principalmente, à instabilidade aerodinâmica e, é um exemplo de vibração auto-excitada (Fig. 3.4). Este fenômeno não é um caso de ressonância, pois pode ocorrer durante um vento estável ocasionando uma frequência forçada que não coincida com a frequência natural da linha de transmissão.

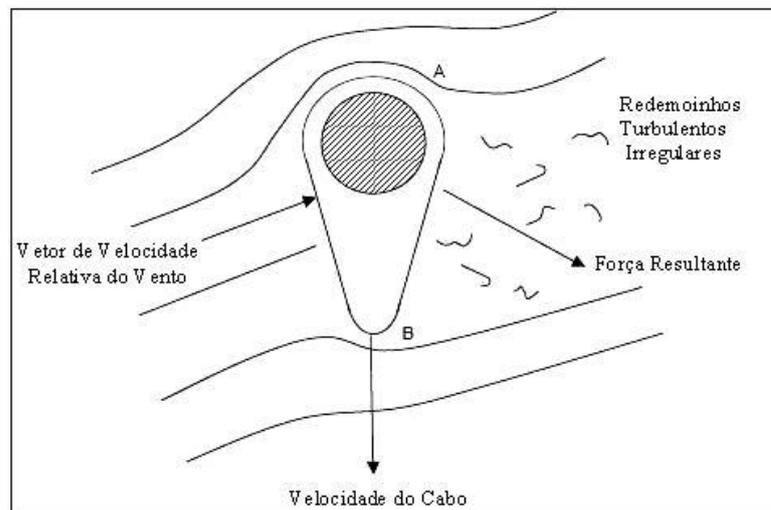


Figura 3.4 - Amplitude de oscilação do condutor em galope (modificado, Irvine, 2006).

Este tipo de movimento é um exemplo de “instabilidade aerodinâmica ou amortecimento negativo”. A ponte de Tacoma no estado de Washington no extremo norte da costa oeste dos Estados Unidos entrou em colapso em 1940, devido a um mecanismo semelhante. O atual movimento das linhas de transmissão pode ser uma combinação dos modos apresentados na Fig. 3.5. Estas são as formas modais vistas de uma vista perpendicular aos condutores. A seta dupla representa a amplitude do movimento. A linha tracejada

representa a forma em catenária do condutor suspenso, quando apoiado em suas extremidades e sofrendo a influência de seu próprio peso.

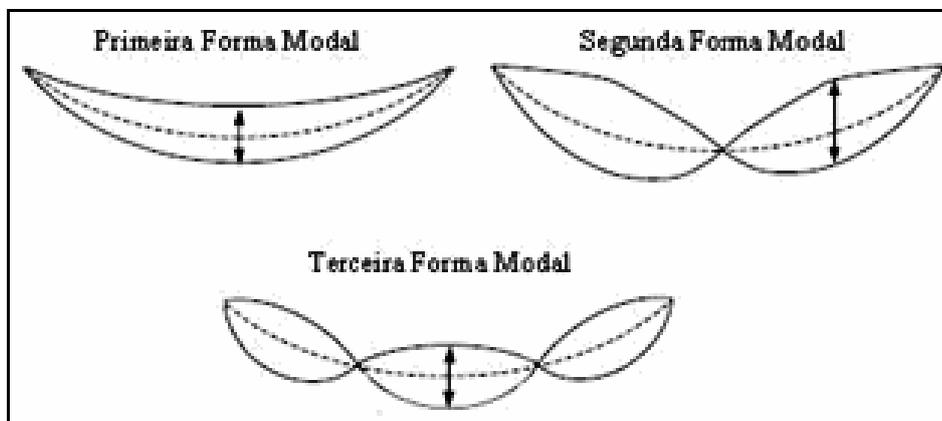


Figura 3.5 - Possíveis modos de galope (exagerados) para um sub-vão (modificado, Irvine, 2006).

Assim como para um único condutor, um feixe de condutores pode também ser submetido a galope devido à formação de gelo sobre sua superfície e esse problema pode ser analisado através de um *software* em três dimensões, que utilize o modelo de elementos finitos, com a finalidade de reproduzir exatamente os efeitos dos vãos adjacentes, tipo e geometria dos isoladores, a não linearidade geométrica e a distribuição real de tensão ao longo dos condutores. O conjunto de cabos pode ser modelado utilizando elemento de viga para reproduzir o comportamento inercial e elástico dos mesmos, levando em consideração a influência dos espaçadores através de coeficientes aerodinâmicos adequados, obtidos por meio de um túnel de vento com diferentes perfis de gelo. Neste caso, também é importante introduzir ao modelo os ajustes realizados nas extremidades do vão. Este fenômeno pode ocorrer juntamente com oscilações do sub-vão (CIGRÉ, 2005b).

3.2.3 Oscilações devido à Esteira

Em linhas de transmissão, este tipo de movimento induzido pelo vento é conhecido como a terceira principal causa de problemas nos condutores. As oscilações devido à esteira são comuns em um feixe de cabos, submetidos aos ventos cruzados fortes e moderados. Este fenômeno surge do efeito de camada do barlavento no sentido do sotavento do sub-conductor e acontece quando um sub-condutor penetra na esteira gerada pelo condutor adjacente (Fig. 3.6). Dependendo da relativa magnitude e fase das forças envolvidas, o movimento de sotavento no sub-condutor pode ser reprimido ou evoluir para uma órbita elíptica ou irregular.

E este movimento de sotavento é transferido para o barlavento através de espaçadores ou de outros equipamentos e, dependendo da fase e amplitude do barlavento do sub-condutor, o movimento torna-se mais complexo.

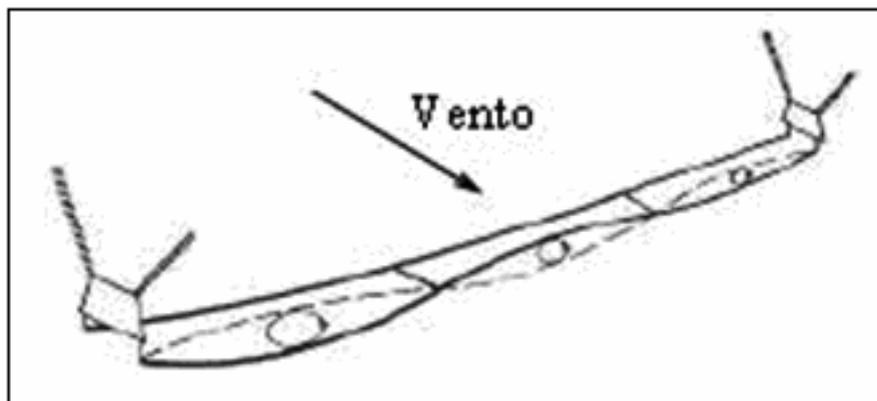


Figura 3.6 - Oscilações devido à esteira num feixe duplo de condutores (modificado, Lilien e Snegvsk, 2004).

Vibrações de esteira proporcionam vários tipos de movimento no feixe de condutores. O movimento é observado na maioria das vezes, quando os condutores estão desencapados e secos. No entanto, pode ocorrer com um condutor congelado ou na ocorrência de chuvas. Na maioria dos casos, os danos se limitam ao desgaste rápido dos equipamentos de suspensão, a fadiga dos espaçadores ou de outros acessórios. Mas a pior situação é quando ocorre falha nos equipamentos de suspensão ou esmagamento dos fios do condutor devido à colisão.

Uma baixa rigidez favorece a interação entre os sub-vãos adjacentes e a redução das tensões do condutor nas garras do espaçador. No entanto, uma rigidez muito baixa pode fazer com que dois sub-vãos se comportem como um único sub-vão mais longo, aumentando a sensibilidade do sub-vão às oscilações. Além do mais, sob oscilações severas espaçadores-amortecedores com baixa rigidez podem apresentar grandes deslocamentos dos braços, o que conduz a um desgaste e fadiga do mecanismo de amortecimento.

A contribuição do amortecimento referente às articulações do espaçador não tem atenuado as oscilações no sub-vão. Para que se torne realmente efetiva é necessário que o amortecimento seja significativamente mais alto que o normal. O ângulo do braço é importante, uma vez que afeta a rigidez aparente no plano horizontal. Um arranjo horizontal do braço torna o espaçador-amortecedor muito rígido neste plano (CIGRÉ, 2006).

Sobre a superfície do condutor que fica contra o fluxo de vento (barlavento) existe apenas a força de arrasto, enquanto que as forças que atuam na superfície do condutor posterior ao barlavento (sotavento) dependem do movimento e da posição relativa ao

barlavento do condutor e da distribuição do vento. Adotando-se um par genérico de um conjunto de condutores em um tempo qualquer, a velocidade relativa ao sotavento do condutor determina a direção da esteira que se propaga rapidamente no sentido a favor do vento.

As reduções de velocidades são altas e permitem a aplicação da teoria da estabilidade. Os coeficientes de arrasto (C_A) e de sustentação (C_S) para o fluxo no sentido do vento depende da posição relativa entre a montante e a jusante do condutor. Estes coeficientes são obtidos experimentalmente em túnel de vento utilizando dois cilindros, sendo que um deve encontrar-se na esteira do outro.

A faixa de frequência que abrange este fenômeno em conjunto de condutores é de 1 a 2 Hz e o primeiro modo em sub-vãos é excitado. A oscilação em sub-vãos ocorre com velocidades de vento relativamente altas (10 a 30 m/s). Os movimentos do sub-vão são caracterizados por um fenômeno de instabilidade do tipo agitação, que pode ser representado através de um exemplo clássico de um conjunto de condutores com a velocidade do vento constante (CIGRÉ, 2006).

Uma simulação de oscilação induzida por esteira e a computação da amplitude de vibração, tanto no regime turbulento e não turbulento do vento, podem ser executadas por um *software* de elementos finitos que incorpore a equação do movimento no domínio tempo ou por uma abordagem modal em que as frequências naturais e modos de vibração são computados por um método de elementos finitos.

Este tipo de simulação pode ser executada no domínio da frequência usando um balanço de energia: neste caso, a energia de vento de entrada é calculada como uma função da amplitude elíptica de órbita do movimento relativo. A energia de balanço obviamente considera condições estáveis e permite somente a avaliação de amplitudes de ciclo limite de oscilação em um regime de vento não turbulento.

O movimento resultante deste fenômeno pode ser na vertical ou no plano horizontal. Alternadamente, o movimento pode ser de torção. Quatro possíveis modos de vibração de um sistema com dois cabos são mostrados na Fig. 3.7.

A seguir, é realizada na Tabela 3.3 a comparação entre as características apresentadas por cada um dos três tipos de vibrações induzidas pelo vento.

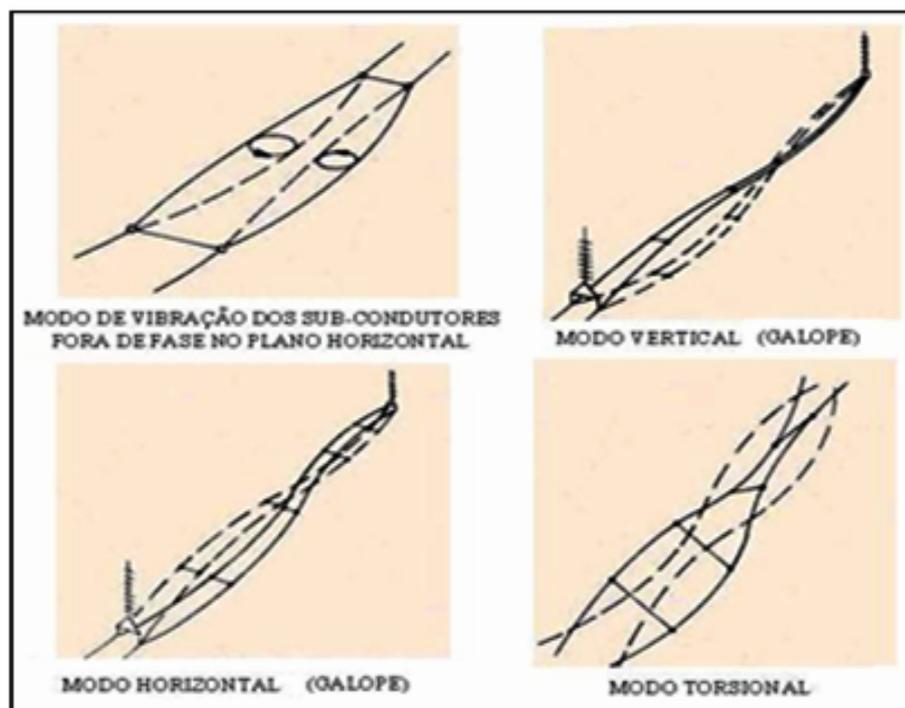


Figura 3.7 - Modo de vibrações induzidas por esteira em condutores paralelos (modificado, Irvine, 2006).

Tabela 3.3 - Comparação entre os tipos de vibração (modificado, Verma, 2002).

| | Vibração Eólica | Galope do Condutor | Oscilações devido à Esteira |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo de linha de transmissão afetada | Todas | Todas | Todas |
| Faixa de freqüência (Hz) | 3 a 150 | 0,08 a 3 | 0,15 a 10 |
| Faixa de amplitude (tomando o diâmetro do condutor (D) como medida) | 0,01 a 1 | 5 a 300 | Modo de corpo rígido 0,5 a 80 Modo de sub-vão 0,5 a 20 |
| Condições de Tempo Favoráveis aos Movimentos do Condutor | | | |
| Característica do vento | Laminar | Laminar | Laminar |
| Velocidade do vento (m/s) | 1 a 7 | 7 a 18 | 4 a 18 |
| Superfície do condutor | Desencapada/congelada uniformemente | Congelada assimetricamente | Desencapada/seca |
| Danos | | | |
| Tempo estimado para o desenvolvimento de falhas. | 3 meses a 20 anos | 1 a 48 horas | 4 a 18 horas |
| Causa direta do dano | Fadiga do metal devido a carregamento cíclico | Cargas dinâmicas Altas | Colisão dos condutores e desgaste físico acelerado |
| Componentes de linha mais afetados pelos danos | Condutor e para-raios | Condutor, ferragens, isoladores e estruturas | Acessórios de suspensão, espaçadores, amortecedores e fios do condutor |
| Condições de projeto que afetam o movimento do condutor | Tensão da linha, auto-amortecimento do condutor, uso de amortecedores e protetores (barras) | A relação entre as freqüências naturais verticais e as freqüências naturais torsionais, razão de decaimento e as condições de contorno | Separação e arranjo do sub-condutor, inclinação do feixe e distância entre os espaçadores |

3.3 CONSIDERAÇÕES

Este capítulo apresentou os principais tipos de vibrações em cabos condutores de linhas de transmissão, mostrando a influência de parâmetros como, o número de Reynolds e de Strouhal sobre os movimentos dos cabos condutores.

A partir das características apresentadas para cada tipo de vibração, pode-se estimar qual o tipo de movimento de condutor que determinada linha de transmissão estará sujeita, o que contribui para a tomada de medidas adequadas visando garantir não só a vida útil dos condutores, como também o bom funcionamento de todos os componentes da linha de transmissão.

CAPÍTULO 4 - A INFLUÊNCIA DA RIGIDEZ FLEXURAL EM CABOS

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Cabos flexíveis são frequentemente usados em projetos estruturais de engenharia para sustentar e transmitir cargas de um elemento a outro. Quando utilizados em pontes suspensas e carretilhas, os cabos se constituem no principal elemento de transmissão de carregamento de esforços. O cabo é utilizado ainda em linhas de transmissão e em muitos outros casos. No cálculo que envolve cabos é necessário que se conheçam as relações existentes entre as tensões, o vão, a flecha e o comprimento do cabo. Deve-se considerá-lo, então, como um corpo em equilíbrio, assumindo que a resistência à flexão do cabo é desprezível. Tal suposição implica que a força que atua neste elemento encontra-se sempre na direção longitudinal. O estudo de cabos flexíveis é baseado na teoria de cordas vibrantes e vigas uniformes (Meriam, 1979).

Este capítulo tem como objetivo mostrar a influência da rigidez flexural no comportamento de cabos condutores de linhas de transmissão.

4.2 A EQUAÇÃO DAS CORDAS VIBRANTES

Segundo Den Hartog (1972), considera-se uma corda (Fig. 4.1a), na qual, ao longo de seu comprimento, um número infinito de massas seja posicionado. Tal hipótese leva ao conceito de uma corda uniforme de massa distribuída.

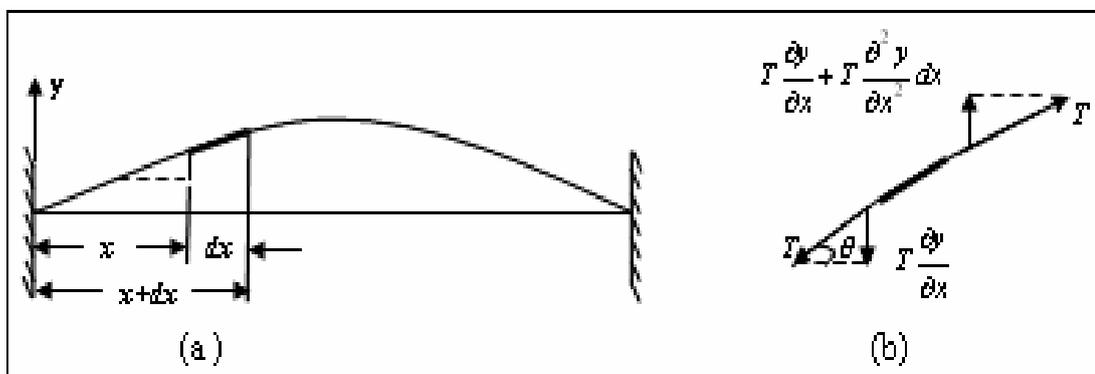


Figura 4.1 - (a) Corda vibrante engastada; (b) componentes verticais das tensões que agem sobre um elemento dx da corda esticada (modificado, Den Hartog, 1972).

A equação do movimento é deduzida através da 2ª lei de Newton para um elemento infinitesimal dx (Fig. 4.1b) da corda, da qual a tensão T é considerada constante ao longo da corda. Adotando-se $y(x,t)$ como a curva de deflexão durante a vibração, sendo que as ordenadas variam com a posição ao longo da corda e com o tempo. A partir da Fig. 4.1b pode-se observar na Eq. (4.1) a componente vertical da tensão T , que atua para a esquerda em determinado ponto x da corda.

$$T_{1y} = -T \operatorname{sen} \theta \quad (4.1)$$

Considerando que o ângulo θ é muito pequeno tem-se que:

$$T_{1y} = -T \operatorname{sen} \theta \approx -T \operatorname{tg} \theta \quad (4.2)$$

Através da definição geométrica de derivada, a Eq. (4.2) pode ser reescrita como:

$$T_{1y} = -T \frac{\partial y}{\partial x} \quad (4.3)$$

Esta componente da tração é negativa, pois seu sentido no eixo y é para baixo. O coeficiente diferencial é *parcial*, devido y também ser uma função de t , isto é, a curva de deflexão não é obtida variando-se apenas a posição ao longo da corda, pois sua posição depende do tempo. Na extremidade direita do elemento dx , pode-se obter através da Eq. (4.4) o valor da componente vertical.

$$T_{2y} = T \frac{\partial y}{\partial x} + \partial \left(T \frac{\partial y}{\partial x} \right) = T \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial y}{\partial x} \right) dx = T \frac{\partial y}{\partial x} + T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx \quad (4.4)$$

O fator $\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx$ representa o aumento na inclinação ao longo de dx . Como as duas forças verticais sobre o elemento dx não são iguais (Fig.4.1b), há um excesso de sollicitação no sentido positivo do eixo y o que faz acelerar o elemento para cima. Considerando a massa por

unidade de comprimento (densidade linear) da corda igual a μ_1 , a massa de dx será $\mu_1 dx$, e aplicando a 2ª lei de Newton tem-se que:

$$\mu_1 dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx \quad (4.5)$$

Dividindo a Eq. (4.5) por dx , obtém-se a seguinte equação (equação da onda unidimensional):

$$\mu_1 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (4.6)$$

Para solucionar a Eq. (4.6), deve-se supor que a corda vibre harmonicamente e, na frequência natural, a corda terá uma configuração semelhante às formas modais de vibração. Isto implica dizer matematicamente que a função $y(x,t)$ pode ser escrita através da Eq. (4.7), que apresenta a separação das variáveis x e t :

$$y(x,t) = y(x) \text{sen} \omega t \quad (4.7)$$

Derivando a Eq. (4.7) são obtidas as equações:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \omega y \cos \omega t \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\omega^2 \text{sen} \omega t \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial y}{\partial x} \text{sen} \omega t \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{d^2 y}{dx^2} \text{sen} \omega t \quad (4.11)$$

Substituindo as Eqs. (4.9) e (4.11) na Eq. (4.6) obtém-se a Eq. (4.12), que é uma equação diferencial ordinária de segunda ordem:

$$\begin{aligned} -\mu_1 \omega^2 \operatorname{sen} \omega t &= T \frac{d^2 y}{dx^2} \operatorname{sen} \omega t \\ -\mu_1 \omega^2 y &= T \frac{d^2 y}{dx^2} \\ \frac{d^2 y}{dx^2} &= -\frac{\mu_1 \omega^2}{T} y \end{aligned} \quad (4.12)$$

Logo, a solução geral da Eq. (4.12) é dada pela Eq. (4.13), a qual determina a forma da corda no instante de deflexão máxima.

$$y(x) = C_1 \operatorname{sen} \left(\sqrt{\frac{\mu_1 \omega^2}{T}} \cdot x \right) + C_2 \cos \left(\sqrt{\frac{\mu_1 \omega^2}{T}} \cdot x \right) \quad (4.13)$$

As constantes de integração C_1 e C_2 são determinadas através das condições de contorno. Assumindo que as amplitudes nos extremos da corda sejam iguais a zero, tem-se:

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

Substituindo $x = 0$, tem-se:

$$y(0) = 0 = C_1 \cdot 0 + C_2 \cdot 1 \quad (4.14)$$

Então, assumindo que $C_2 = 0$, tem-se para $x = l$ que:

$$y(l) = 0 = C_1 \operatorname{sen} \left(\sqrt{\frac{\mu_1 \omega^2}{T}} \cdot l \right) \quad (4.15)$$

A solução da equação anterior pode ser alcançada, fazendo $C_1 = 0$, que fornece uma solução correta, mas particular, com a corda permanecendo estacionária. Entretanto, a Eq. (4.15) também pode ser satisfeita fazendo o argumento do seno igual a um múltiplo inteiro de π , o que é apresentado na equação a seguir:

$$\sqrt{\frac{\mu_l \omega^2}{T}} l = n\pi \quad (4.16)$$

sendo $n = 0, 1, 2, 3, \dots$, a variável inteira que representa o modo de vibração. Pode-se isolar ainda na Eq. (4.16) o valor da frequência natural através de um procedimento matemático, e chegar à Eq. (4.17).

$$\omega_n = \frac{n\pi}{l} \sqrt{\frac{T}{\mu_l}} \quad (4.17)$$

A Eq. (4.17) determina as frequências naturais, enquanto que as formas modais de vibração correspondentes podem ser encontradas através da substituição da Eq. (4.17) na Eq. (4.15). Os resultados são ilustrados na Fig. 4. 2.

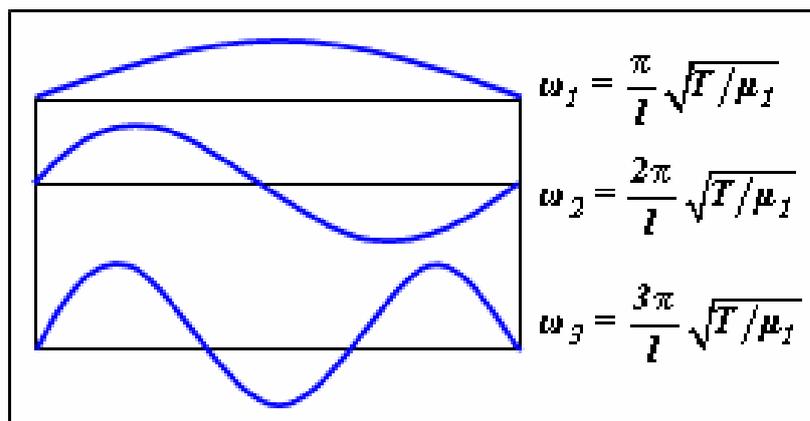


Figura 4.2 - Os três primeiros modos naturais de movimento de vibração lateral de uma corda uniforme (modificado, Den Hartog, 1972).

Há uma infinidade de curvas elásticas normais e, correspondentemente, uma infinidade de frequências naturais. O movimento em cada um desses modos é tal que a amplitude de cada ponto da corda varia harmonicamente com o tempo, e conseqüentemente, a curva natural permanece semelhante a si mesma.

Dessa forma, se uma corda é defletida numa das formas da Fig. 4.2 e depois abandonada, ela volta para sua posição original em um intervalo de tempo $\left(\frac{t}{4}\right)$ determinado pelo período natural de vibração (t). Nessa frequência e forma, as forças de inércia e de mola de cada elemento dx da corda estão em equilíbrio entre si a cada instante.

4.3 DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO DA CORDA VIBRANTE CONSIDERANDO O EFEITO DA RIGIDEZ FLEXURAL

Segundo Steidel (1989), Lord Rayleigh considerou a vibração de uma viga uniforme com carregamento axial e admitiu uma forma para a primeira curva elástica normal, a partir desta consideração, as energias potencial e cinética (máximas) são calculadas e igualadas. Naturalmente, se a forma “exata” fosse tomada como base para os cálculos, a frequência calculada seria exatamente correta, para uma forma que pouco se diferenciasse da curva exata. Por este motivo, obtém-se uma boa aproximação e bastante útil para a frequência. Este método é muito utilizado para calcular baixas frequências de sistemas contínuos.

Como exemplo deste tipo de problema, tem-se as vibrações em cabos de linhas de transmissão que têm aparecido em diversos lugares, mas as soluções são limitadas. O problema de vibrações em condutores é uma variação muito interessante de vibrações transversais em vigas uniformes.

A frequência natural de vibração de um cabo pode ser encontrada assumindo que o mesmo é igual a uma corda. Tal suposição negligencia as propriedades elásticas do cabo e a flexão do mesmo nos pontos próximo aos suportes, que é a causa de falhas. Conseqüentemente, a rigidez à flexão não pode ser ignorada.

O desprendimento regular de vórtices de um cabo causado por um vento suave é geralmente aceito como uma das razões básicas para a vibração em cabos. Entretanto, existem ainda danos causados por fadiga nos cabos.

Sob determinadas condições, como por exemplo o escoamento de ar acima de um cabo ou arame cilíndrico, o padrão de escoamento não é simétrico, mas é regularmente distribuído pela formação dos vórtices na parte de trás do cabo. Este escoamento assimétrico provoca alteração da pressão distribuída em torno do cabo.

Como os vórtices ou redemoinhos são áreas de pressão reduzida, seus períodos de formação resultam em uma diferença de pressão que alterna forças no cabo de baixo para cima e de cima pra baixo. Se esta periodicidade corresponder à frequência de ressonância, a amplitude de vibração se eleva, até que a energia transmitida para o cabo pelo vento se iguale à energia dissipada através de histerese. Esta alternância de flexão do cabo resulta em uma falha por fadiga nos engastes ou apoios. Este movimento alternado faz com que o cabo fique bastante tensionado nos ponto de fixação.

Pode-se encontrar a equação da corda vibrante que leva em consideração a rigidez flexural da seguinte forma: considere um pequeno elemento de cabo dx (Fig. 4.3b), que está

sujeito a forças de tensão, de esforço cortante e momento fletor. Este desbalanceamento de forças causa uma aceleração no elemento de cabo na direção vertical. Inicialmente, faz-se a somatória de forças na direção vertical, como é mostrado a seguir.

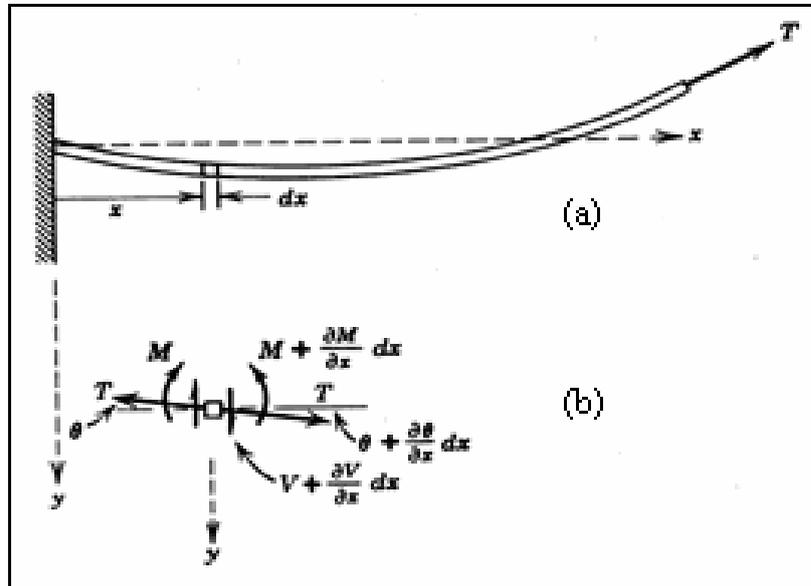


Figura 4.3 - (a) Cabo sujeito à esforços de tensão, cisalhamento e momento fletor; (b) um elemento infinitesimal do cabo (modificado, Steidel, 1989).

Aplicando a segunda lei de Newton em um elemento infinitesimal dx do cabo, tem-se que:

$$\sum F = \frac{w}{g} dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (4.18)$$

Na qual g e w são, respectivamente, a aceleração da gravidade e o carregamento (peso) para um elemento de comprimento dx . O segundo termo da equação é a aceleração do movimento. Desenvolvendo a somatória das forças, tem-se que:

$$\begin{aligned} \sum F &= -T \sin \theta + T \left[\sin \left(\theta + \frac{\partial \theta}{\partial x} dx \right) \right] - V + V + \frac{\partial V}{\partial x} dx \\ \sum F &= -T \cos \theta + T \left(\sin \theta \cos \frac{\partial \theta}{\partial x} dx + \cos \theta \sin \frac{\partial \theta}{\partial x} dx \right) + \frac{\partial V}{\partial x} dx \end{aligned} \quad (4.19)$$

Considerando que:

$$\text{sen} \frac{\partial \theta}{\partial x} dx \approx \frac{\partial \theta}{\partial x} dx$$

$$\text{cos} \frac{\partial \theta}{\partial x} dx \approx 1$$

$$H = T \cos \theta$$

Desta forma, tem-se que:

$$\sum F = -T \text{sen} \theta + T \text{sen} \theta + T \cos \theta \frac{\partial \theta}{\partial x} dx + \frac{\partial V}{\partial x} dx \quad (4.20)$$

$$\sum F = H \frac{\partial \theta}{\partial x} dx + \frac{\partial V}{\partial x} dx$$

Portanto, tem-se:

$$H \frac{\partial \theta}{\partial x} dx + \frac{\partial V}{\partial x} dx = \frac{w}{g} dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (4.21)$$

Considerando a corda engastada (Fig. 4.4), tem-se que:

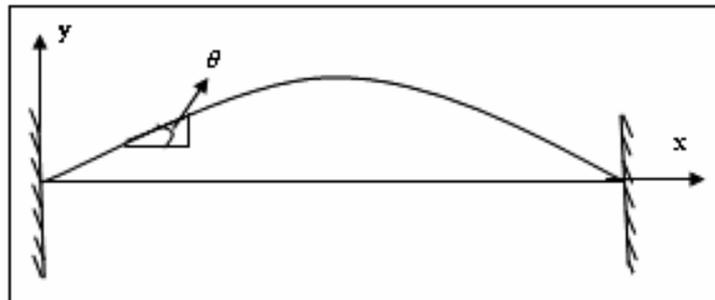


Figura 4.4 - Corda engastada.

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \theta$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} dx = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) dx = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx$$

Aplicando as relações gerais de deflexão, esforço cortante e momento fletor novamente, a forma final da Eq. (4.21) do movimento é uma equação parcial diferencial de quarta ordem, dada por:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) dx - H \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx + \frac{w}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} dx = 0 \quad (4.22)$$

A solução da Eq. (4.22) pode ser obtida pelo método clássico de separação de variáveis. Pode-se, assim, escrever a solução como um produto de duas funções separadas que individualmente dependem de x e t . Então:

$$y(x, t) = f_1(t) \cdot f_2(x) \quad (4.23)$$

Logo, as derivadas da Eq. (4.22) assumindo a função $y(x, t)$ descrita na Eq. (4.23) são:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 f_1(t)}{\partial t^2} \cdot f_2(x) \quad (4.24)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 f_2(x)}{\partial x^2} \cdot f_1(t) \quad (4.25)$$

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = \frac{\partial^4 f_2(x)}{\partial x^4} \cdot f_1(t) \quad (4.26)$$

Portanto, as componentes diferenciais das equações são:

$$\frac{d^2 f_1(t)}{dt^2} + \omega_n^2 f_1(t) = 0 \quad (4.27)$$

$$EI \frac{d^4 f_2(x)}{dx^4} - H \frac{d^2 f_2(x)}{dx^2} - \frac{w}{g} \omega_n^2 f_2(x) = 0 \quad (4.28)$$

Assumindo a solução dependente do tempo, sendo uma função harmônica da forma:

$$f_1(t) = A \cos \omega_n t + B \sin \omega_n t \quad (4.29)$$

Substituindo na Eq. (4.28), independente do tempo, a solução exponencial dada por $f_2(t) = Ce^{rx}$ e suas respectivas derivadas:

$$\frac{\partial f_2}{\partial x} = rCe^{rx} \quad (4.30)$$

$$\frac{\partial^2 f_2}{\partial x^2} = r^2 Ce^{rx} \quad (4.31)$$

$$\frac{\partial^3 f_2}{\partial x^3} = r^3 Ce^{rx} \quad (4.32)$$

$$\frac{\partial^4 f_2}{\partial x^4} = r^4 Ce^{rx} \quad (4.33)$$

Tem-se a equação do movimento dada por:

$$\begin{aligned} EI \frac{r^4 Ce^{rx}}{dx^4} - H \frac{r^2 Ce^{rx}}{dx^2} - \frac{w}{g} \omega_n^2 Ce^{rx} &= 0 \quad \div (EI) \\ \left(r^4 - \frac{H}{EI} r^2 - \frac{w\omega_n^2}{gEI} \right) Ce^{rx} &= 0 \end{aligned} \quad (4.34)$$

Sabe-se que o segundo termo da multiplicação não é nulo, portanto, tem-se que:

$$r^4 - \frac{H}{EI} r^2 - \frac{w\omega_n^2}{EIg} = 0 \quad (4.35)$$

Assumindo k e λ como as raízes quadráticas da equação característica, tem-se:

$$\begin{aligned} k^2 &= \frac{H}{2EI} + \left(\frac{H^2}{4(EI)^2} + \frac{w\omega_n^2}{gEI} \right)^{1/2} \quad (\text{Parte real}) \\ \lambda^2 &= \frac{H}{2EI} - \left(\frac{H^2}{4(EI)^2} + \frac{w\omega_n^2}{gEI} \right)^{1/2} \quad (\text{Parte imaginária}) \end{aligned} \quad (4.36)$$

Esta solução pode ser expressa através de uma função exponencial ou também por funções circulares e hiperbólicas, desde que se tenha usado anteriormente no desenvolvimento funções circulares e hiperbólicas. Portanto, é possível escrever a solução de $f_2(x)$ sendo:

$$f_2(x) = C_1 \cosh kx + C_2 \operatorname{senh} kx + C_3 \cos \lambda x + C_4 \operatorname{sen} \lambda x \quad (4.37)$$

Esta solução é admitida a partir da Eq. (4.36), que mostra as raízes quadráticas sendo:

$$k^2 = \text{Parte positiva (Real)}$$

$$\lambda^2 = \text{Parte negativa (imaginária)}$$

Portanto, a primeira raiz fornece uma exponencial com números reais (Eq. 4.38) e a segunda fornece uma exponencial complexa (Eq. 4.39). Logo, a solução é dada pela soma de funções hiperbólicas e circulares como visto na Eq. (4.37) e mostradas a seguir.

$$f_{21} = Ce^{\pm kx} = C_1 \cosh kx + C_2 \operatorname{senh} kx \quad (4.38)$$

$$f_{22} = Ce^{\pm \lambda x} = C_3 \cos \lambda x + C_4 \operatorname{sen} \lambda x \quad (4.39)$$

Substituindo na Eq. (4.28) as derivadas de segunda e quarta ordem (Eqs. 4.40 e 4.43) resultantes da Eq. (4.37), obtem-se a Eq. (4.44).

$$f'_2(x) = kC_1 \operatorname{senh} kx + kC_2 \cosh kx - \lambda C_3 \operatorname{sen} \lambda x + \lambda C_4 \cos \lambda x \quad (4.40)$$

$$f''_2(x) = k^2 C_1 \cosh kx + k^2 C_2 \operatorname{senh} kx - \lambda^2 C_3 \cos \lambda x - \lambda^2 C_4 \operatorname{sen} \lambda x \quad (4.41)$$

$$f'''_2(x) = k^3 C_1 \operatorname{senh} kx + k^3 C_2 \cosh kx + \lambda^3 C_3 \operatorname{sen} \lambda x - \lambda^3 C_4 \cos \lambda x \quad (4.42)$$

$$f''''_2(x) = k^4 C_1 \cosh kx + k^4 C_2 \operatorname{senh} kx + \lambda^4 C_3 \cos \lambda x + \lambda^4 C_4 \operatorname{sen} \lambda x$$

$$f''''_2(x) = k^4 \underbrace{(C_1 \cosh kx + C_2 \operatorname{senh} kx)}_{f_{2\text{ hiper}}} + \lambda^4 \underbrace{(C_3 \cos \lambda x + C_4 \operatorname{sen} \lambda x)}_{f_{2\text{ circ}}} \quad (4.43)$$

$$\begin{aligned}
& EI k^4 (f_{2hiper}) + EI \lambda^4 (f_{2circ}) - H k^2 (f_{2hiper}) + H \lambda^2 (f_{2circ}) - \frac{w}{g} \omega_n^2 (f_{2hiper}) - \frac{w}{g} \omega_n^2 (f_{2circ}) = 0 \\
& \left(EI k^4 - H k^2 - \frac{w}{g} \omega_n^2 \right) (f_{2hiper}) + \left(EI \lambda^4 + H \lambda^2 - \frac{w}{g} \omega_n^2 \right) (f_{2circ}) = 0
\end{aligned} \tag{4.44}$$

O termo f_{2hiper} não assume o valor zero, ou seja, apresenta uma tendência assintótica para o valor nulo, mas isto não acontece. O termo f_{2circ} assume o valor zero em certos instantes de tempo, porém como a solução encontrada é válida para qualquer instante de tempo t , admite-se que este valor também é diferente de zero. Para que a igualdade da Eq. (4.44) seja satisfeita, os outros dois termos devem ser iguais à zero. As constantes C_1 , C_2 , C_3 e C_4 são determinadas satisfazendo as condições de contorno apropriadas.

Para um vão simplesmente apoiado, as condições de contorno para as extremidades pinadas, devem ser tais que o deslocamento na vertical e o momento fletor sejam ambos iguais a zero em qualquer instante de tempo. Assumindo que estas condições de contorno sejam iniciais para a equação de frequência (Eq. 4.45), é realizado um simples procedimento matemático, como mostrado a seguir para encontrar o valor de ω_n (Eq. 4.46).

$$EI \lambda^4 + H \lambda^2 - \frac{w}{g} \omega_n^2 = 0 \tag{4.45}$$

$$\frac{w}{g} \omega_n^2 = EI \lambda^4 + H \lambda^2$$

$$\omega_n^2 = \frac{EIg}{w} \lambda^4 + \frac{gH}{w} \lambda^2$$

$$\omega_n^2 = \lambda^2 \left[\lambda^2 \left(\frac{EIg}{w} \right) + \left(\frac{gH}{w} \right) \right]$$

$$\omega_n = \lambda \sqrt{\lambda^2 \left(\frac{EIg}{w} \right) + \left(\frac{gH}{w} \right)} \tag{4.46}$$

O termo λ (autovalor de interesse) deve ser encontrado através da solução da equação da frequência. Negligenciando a rigidez de flexão, a equação de frequência assumirá a forma para o caso padrão de cordas vibrantes. Negligenciando a tensão axial, a equação de frequência assumirá a forma para o caso de uma viga uniforme simplesmente apoiada.

Portanto, para o cálculo de λ , negligencia-se a rigidez de flexão na Eq. (4.46), logo:

$$\omega_n^2 = \lambda^2 \frac{Hg}{w} \Leftrightarrow \omega_n^2 = \lambda^2 \frac{H}{\mu_1} \quad (4.47)$$

Considerando que:

$$w = \frac{m_c g}{L}$$

$$\mu_1 = \frac{m_c}{L}$$

Então, comparando a Eq. (4.47) com a equação da corda vibrante (Eq. 4.17), tem-se que:

$$\lambda = \frac{n\pi}{L} \quad (4.48)$$

Reescrevendo a Eq. (4.46) para o resultado em Hertz, tem-se que:

$$f_n = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\lambda^2 \frac{EI}{\mu_1} + \left(\frac{H}{\mu_1}\right)} \quad (4.49)$$

Se for negligenciada a tensão axial e adotada a consideração da Eq. (4.50), a Eq. (4.46) assume as formas das Eqs. (4.51) e (4.52).

$$\lambda = \frac{n\pi}{L} \Rightarrow \lambda^2 = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \quad (4.50)$$

$$f_n = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\mu_1}} \quad (4.51)$$

$$f_n = \frac{n^2 \pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI}{\mu_1}}$$

$$\omega_n = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\mu_1}} \quad (4.52)$$

A Eq. (4.52) demonstra que, desprezando a tensão do cabo na Eq. (4.46), a equação assume a forma que determina os valores de frequência natural para uma viga uniforme (Den Hartog, 1972).

4.4 CÁLCULO DA RIGIDEZ APROXIMADA DO CONDUTOR EM ESTUDO

A rigidez de um condutor é dada pelo produto entre seu módulo de elasticidade e seu momento de inércia de área. Esta propriedade tem influência direta sobre o comportamento do cabo condutor e, se não for controlada de maneira adequada, pode contribuir para o comprometimento global da estrutura.

Segundo CIGRÉ (1989), o valor aproximado da rigidez é calculado inicialmente assumindo que os fios estão soldados uns aos outros, o que eleva o valor da mesma para um valor máximo. Esta rigidez máxima (EI_{\max}) é determinada através da Eq. (4.53): sendo o momento de inércia máximo (I_{\max}) calculado por meio da Eq. (4.54), observando os dados apresentados na Fig. (4.5):

$$EI_{\max} = E_{Al} \sum L_{Al} + E_{A\zeta} \sum L_{A\zeta} \quad (4.53)$$

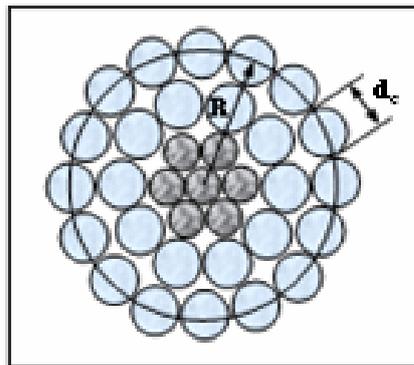


Figura 4.5 - Seção do condutor GROSBEAK 636 (modificado, CIGRE, 1989).

$$I_{\max} = \frac{N_c \pi d_c^2}{8} \left(\frac{d_c^2}{8} + R^2 \right) \quad (4.54)$$

sendo E_{Al} e $E_{A\zeta}$ respectivamente, o módulo de elasticidade do alumínio e do aço; d_c o diâmetro do fio da camada analisada; N_c o número de fios por camada e R o raio da camada do condutor.

Considera-se agora que o cabo possui os fios livres para se movimentar e sem fricção relativa entre os mesmos, condições estas que reduzem o valor da rigidez do condutor a um valor mínimo. O cálculo da rigidez para um condutor do tipo ACSR é realizado utilizando a Eq. (4.55), que determina a rigidez mínima (EI_{\min}) e a Eq. (4.56) para o valor do momento de inércia mínimo (I_{\min}):

$$EI_{\min} = \frac{\pi}{64} (E_{Al} d_{Al}^4 N_{Al} + E_{Aç} d_{Aç}^4 N_{Aç}) \quad (4.55)$$

$$I_{\min} = \frac{N_c d_c^4 \pi}{64} \quad (4.56)$$

sendo d_{Al} e $d_{Aç}$ os diâmetros dos fios de alumínio e aço, respectivamente e N_{Al} o número de fios de alumínio e $N_{Aç}$ o número de fios de aço.

4.5 COMPORTAMENTO ANALÍTICO DE CABOS E CORDAS VIBRANTES

No gráfico de frequência versus comprimento (Fig. 4.6) faz-se uma comparação entre o caso de cordas vibrantes e um caso típico de cabos, no qual se pode observar o comportamento das curvas com a adição da rigidez de flexão. Nos casos em que as extremidades são simplesmente apoiadas e engastadas é possível notar que a adição da rigidez à flexão provoca um aumento na frequência natural de cabos e cordas. Mas é importante ressaltar que esta variação ocorre até determinado comprimento e que, se comparado ao vão de linhas de transmissão pode ser negligenciado, ou seja, o efeito de rigidez à flexão pode ser desprezado no estudo de vibrações em linhas de transmissão. Qualitativamente, mostra-se na Fig. 4.7 as formas que os diagramas de deflexão e momento fletor poderiam apresentar se assumidas as condições de contorno de engaste e pinagem. Nota-se que a curva para o caso de pinagem (Fig. 4.7a) em comparação a curva de engaste (Fig. 4.7b) apresenta um elevado momento fletor, o qual oscila entre um valor negativo máximo e um valor positivo máximo, durante a ressonância é o principal motivo de falha por fadiga em cabos de linhas de transmissão.

Pode-se observar a seguir (Fig. 4.6), que para cordas vibrantes despreza-se a rigidez à flexão e para cabos, esta rigidez é levada em consideração.

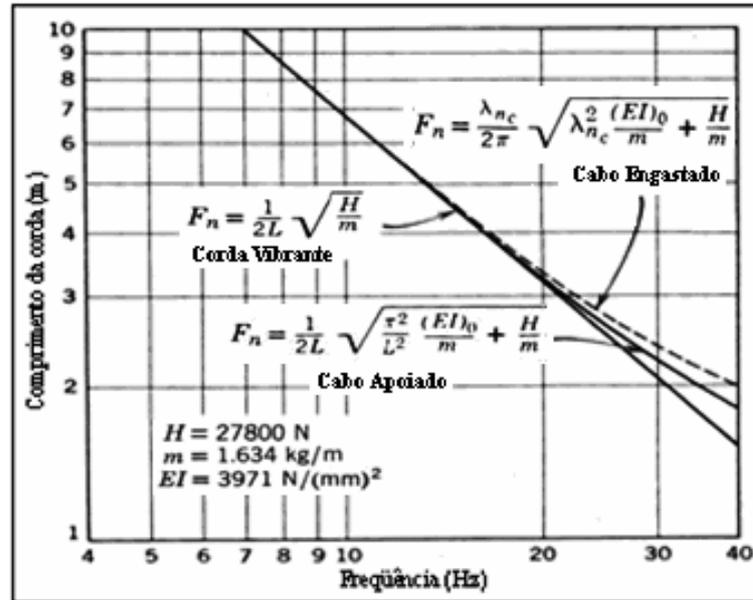


Figura 4.6 - Gráfico do comportamento das curvas de uma corda e um cabo (modificado, Steidel, 1989).

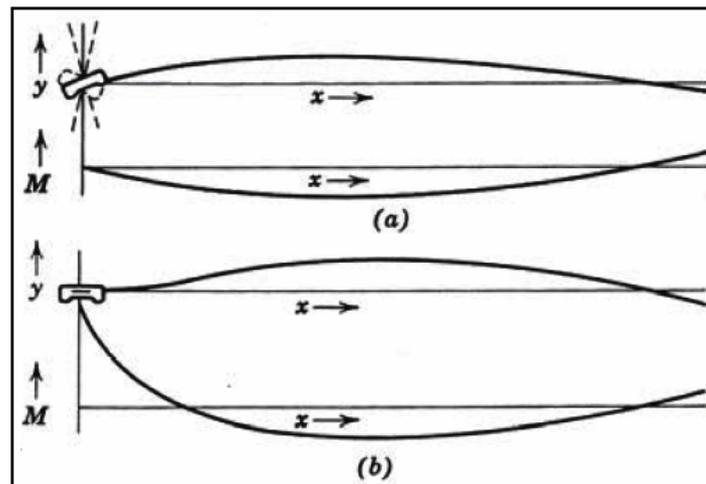


Figura 4.7 - (a) Formas da deflexão e do momento fletor para as extremidades apoiadas, (b) e para extremidades engastadas (modificado, Steidel, 1989).

Assim, confirma-se que a corda vibrante e o cabo apresentam comportamentos similares, com uma pequena diferença para comprimentos pequenos.

Uma rotina foi criada em ambiente MATLAB (*Apêndice A*) para reproduzir o comportamento de um cabo real de linha de transmissão a partir de valores extraídos de Aranha Júnior (2003) e compará-lo com o comportamento de uma corda vibrante (Fig. 4.8).

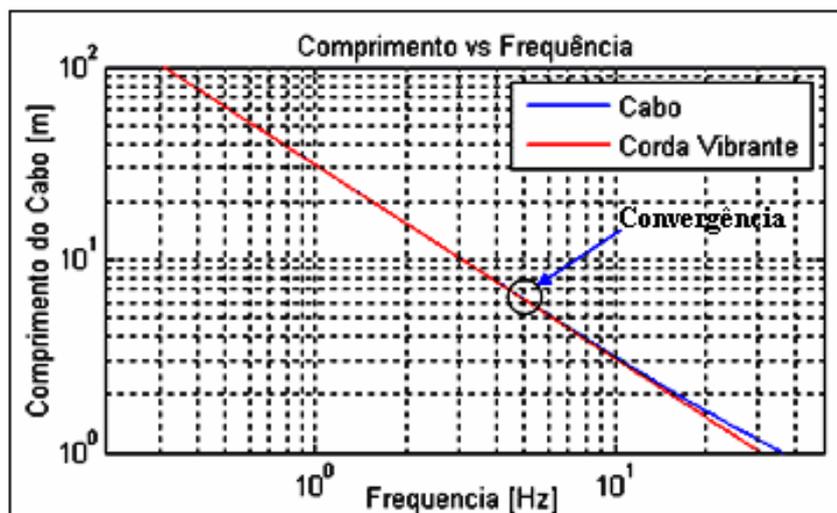


Figura 4.8 - Gráfico do comportamento das curvas do modelo real de um cabo e uma corda vibrante.

No gráfico da Fig. 4.8 mostra-se o ponto onde ocorreu a convergência entre o comportamento do cabo analisado com rigidez à flexão e a corda vibrante, o qual foi de aproximadamente 10 m. Este resultado reforça a teoria de que o comportamento de cabos de linha de transmissão elétrica pode ser considerado igual ao de cordas vibrantes, pois a parcela da equação que considera a rigidez à flexão torna-se negligenciável com o aumento do comprimento do cabo.

4.6 CONSIDERAÇÕES

O estudo aqui apresentado contribuiu para o entendimento da influência da rigidez à flexão imposta por um cabo metálico usado em linhas de transmissão. A teoria apresentada partiu da equação da corda vibrante, onde não se leva em conta a influência deste parâmetro e, em seguida, expressões para as frequências naturais foram obtidas considerando-se esta influência.

Considerando-se um comportamento linear do cabo, os exemplos aqui apresentados foram capazes de destacar que, em relação a uma corda vibrante, o cabo apresenta comportamento similar, com uma pequena diferença para comprimentos pequenos. Este resultado reforça a teoria de que o comportamento de cabos de linha de transmissão elétrica pode ser considerado igual ao de cordas vibrantes, pois a parcela da equação que considera a rigidez à flexão torna-se negligenciável com o aumento do comprimento do condutor. Entretanto, quando a linha apresenta grandes comprimentos, deve-se destacar que outros tipos de fatores passam a ser importantes como, por exemplo, a não linearidade geométrica.

CAPÍTULO 5 - FORÇAS AERODINÂMICAS

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo descreve as forças aerodinâmicas que atuam em corpos sólidos imersos em fluidos gasosos em movimento. Neste caso, as forças em questão são: a força de arrasto que age sempre em sentido oposto ao movimento e a força de sustentação que procura compensar o peso do corpo e atua perpendicularmente ao sentido do movimento. Neste capítulo, apresenta-se ainda como se calcula a força de arrasto sobre condutores de linha de transmissão de alta tensão através da NBR-6123 (1988) e a inserção da parcela flutuante da ação do vento.

5.2 CORPO SÓLIDO IMERSO EM UM FLUIDO

Um corpo de qualquer forma, quando imerso em um fluido em escoamento, fica sujeito a forças e momentos (White, 1986). Estas forças são três: o arrasto, que age numa direção paralela à direção da linha de fluxo, e duas forças de sustentação, que agem em direções ortogonais. A atuação destas forças no corpo causa momentos, conforme ilustra a Fig. 5.1.

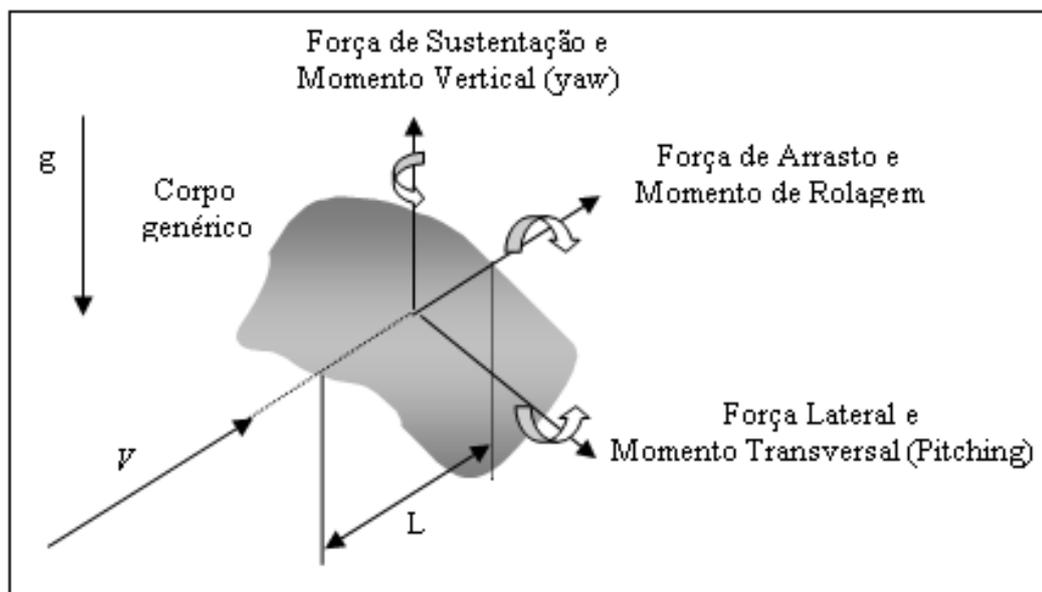


Figura 5.1 - Forças e momentos atuantes em um corpo genérico imerso em um escoamento (modificado, França, 2003).

5.2.1 Coeficiente de Arrasto

Na sua forma adimensional, a força de arrasto é expressa pelo coeficiente de arrasto C_A , que é a razão entre F_A e uma força característica associada à pressão dinâmica da linha de fluxo, $\left(\frac{1}{2}\rho V^2\right)$, sendo ρ a densidade e V a velocidade da linha de fluxo. Tem-se que:

$$C_A = \frac{F_A}{(1/2)\rho AV^2} \quad (5.1)$$

A área característica do corpo dada por A poderia ser igual a L^2 (L é a dimensão linear característica do número de Reynolds), mas é usual encontrá-la definida como:

- *Área Frontal* – é a projeção da área em um plano perpendicular à direção da linha de fluxo (é a área “vista” pela linha de fluxo). É freqüentemente utilizada para corpos ‘rombudos’ ou não-delgados, como esferas, cilindros, carros, mísseis, etc.
- *Área de Topo* – é a projeção da área no plano paralelo à linha de fluxo (é à vista de topo). É utilizada para corpos delgados, como perfis de asa e hidrofólios.
- *Área Molhada* – é a área total de contato do corpo com o fluido, costumeiramente utilizada para superfícies de cascos de embarcações.

Sabe-se que, em escoamentos com baixa velocidade, o coeficiente de arrasto de um corpo é uma função apenas do número de Reynolds:

$$C_A = f(\text{Re}) \quad (5.2)$$

Sendo o número de Reynolds (Re) definido em termos da velocidade da linha de fluxo V , de um comprimento característico do corpo L , densidade ρ e a viscosidade μ do fluido, pode-se obtê-lo através da Eq. (5.3). A dimensão característica do corpo pode ser a corda (dimensão transversal) ou o comprimento do corpo, medido em direção paralela à linha de fluxo.

Se dividirmos a densidade pela viscosidade obtém-se a viscosidade cinética ν e a Eq. (5.3) pode ser reescrita através da Eq. (5.4).

$$\text{Re} = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (5.3)$$

$$\text{Re} = \frac{VL}{\nu} \quad (5.4)$$

Assim, a utilização de dados experimentais sobre arrasto ou outras forças exercidas pelo escoamento em corpos submersos pressupõe o conhecimento das dimensões linear e de área utilizadas no cálculo do número de Reynolds e do coeficiente de arrasto.

O arrasto exercido no corpo é composto pelas duas parcelas que aparecem na Eq. (5.5). O primeiro termo à direita do sinal de igualdade é o chamado “arrasto de atrito”, pois resulta da integração do produto entre o tensor das tensões viscosas, τ_w , que age na superfície, e a área superficial. A outra parcela, chamada de “arrasto de forma”, resulta da integração da pressão P que age sobre a superfície do corpo.

$$F_A = \iint_S \tau_w \cdot \vec{n} \cdot dS + \iint_S p \cdot \vec{n} \cdot dS \quad (5.5)$$

Portanto, dS é o elemento de área na superfície do corpo e \vec{n} a projeção, na direção do escoamento, do vetor unitário normal à superfície. Se dividirmos todos os termos da Eq. (5.5) pela força característica, obteremos uma expressão similar para o coeficiente de arrasto, Eq. (5.6).

$$C_A = C_{A\text{atrito}} + C_{A\text{forma}} \quad (5.6)$$

5.2.2 Separação da Camada Limite

Mostra-se na Fig. 5.2 o comportamento das linhas de fluxo sobre uma esfera lisa com atrito linear e na Fig. 5.3 o gráfico do comportamento do coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds sobre uma esfera e um cilindro, ambos lisos.

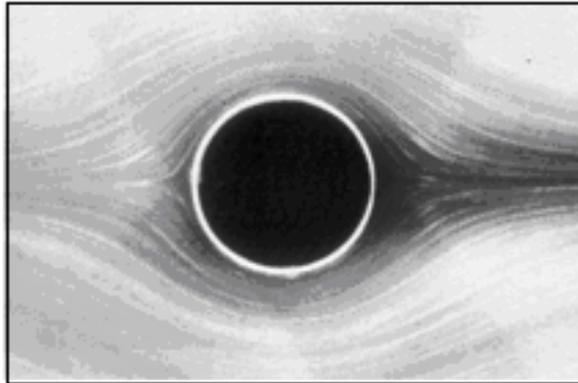


Figura 5.2 - Linhas de fluxo de uma esfera com atrito linear (modificado, Aguiar, 2005).

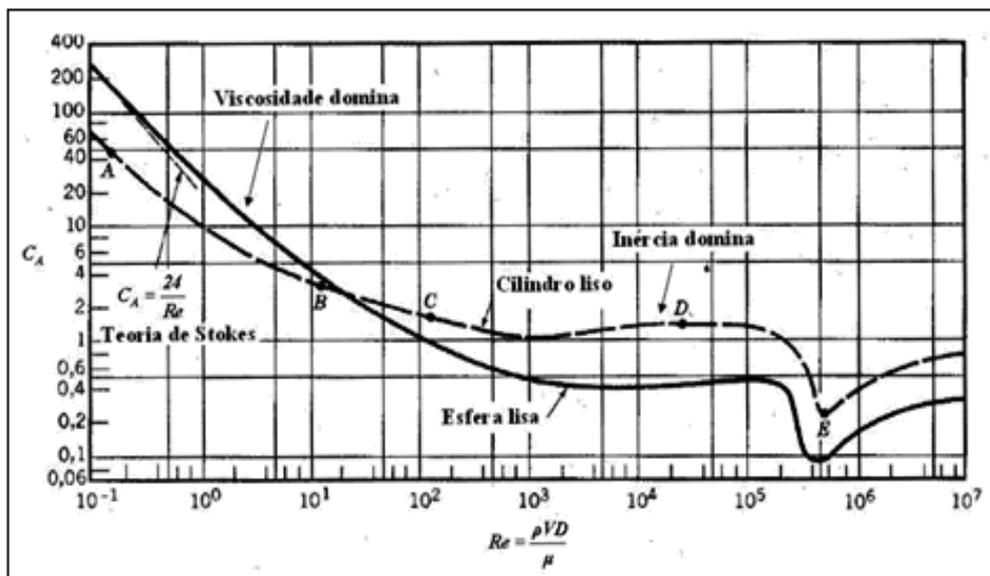


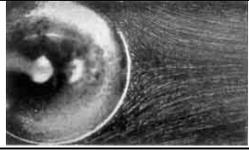
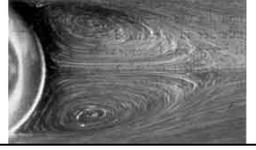
Figura 5.3 - Comportamento do coeficiente de arrasto de uma esfera e um cilindro, ambos lisos como uma função do número de Reynolds. (modificado, Munson *et al.*, 2004).

A determinação analítica ou numérica do arrasto, Eqs. (5.5) ou (5.6), ainda é um desafio à teoria da mecânica dos fluidos, exceto para uma placa plana ou corpos muito delgados. Isto se deve ao fenômeno da “separação do escoamento”. A teoria da camada limite pode determinar o ponto de separação, mas ainda não avalia satisfatoriamente a pressão (usualmente baixa) na região de separação. E mesmo a própria determinação do ponto de

separação do escoamento pode ser comprometida. Por exemplo, o fluxo que se descola do corpo na região de separação pode causar uma perturbação significativa no escoamento livre. Nestes casos, a teoria da camada limite pode ser aplicada somente se a distribuição de pressão no corpo for previamente conhecida (determinada experimentalmente, por exemplo).

A separação da camada limite depende diretamente do número de Reynolds, a Tabela 5.1 e a Fig. 5.4 ilustram, respectivamente, este comportamento sobre uma pequena esfera e um cilindro.

Tabela 5.1 - Separação da camada limite de uma esfera (modificado, Aguiar, 2005).

| Número de Reynolds | Separação da Camada Limite | Número de Reynolds | Separação da Camada Limite |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 9,15 |  | 73,6 |  |
| 26,8 |  | 118 |  |
| 37,7 |  | 133 |  |

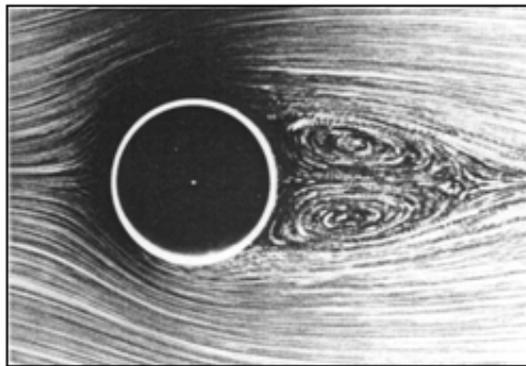


Figura 5.4 - Comportamento da camada limite em um cilindro (modificado, Aguiar, 2005).

No gráfico da Fig. 5.5 são apresentadas as distribuições de pressão sobre um cilindro colocado transversalmente ao escoamento, de acordo com a teoria potencial e valores medidos em escoamentos laminar e turbulento.

Em escoamentos subsônicos com número de Reynolds elevado ($Re > 1000$, por exemplo), o arrasto de forma pode superar em várias ordens de grandeza o arrasto de atrito. Entretanto, não se pode generalizar, pois a proporção dependerá da forma do corpo, isto é, se ela favorecerá ou não a separação hidrodinâmica.

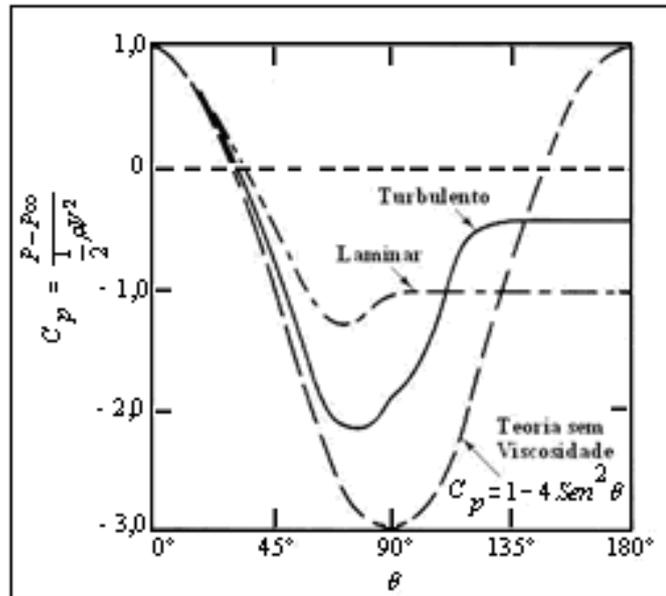


Figura 5.5 - Distribuições de pressão num cilindro, causadas por um escoamento: potencial (teórico), camada limite laminar e turbulenta (modificado, França, 2003).

Apresentam a seguir, os valores de coeficiente de arrasto para corpos com formas distintas: cilindro (Fig. 5.6a), cilindro com nariz arredondado (Fig. 5.6b), cilindro com nariz arredondado e traseira delgada (Fig. 5.6c) e cilindro transversal ao escoamento (Fig. 5.6d), para escoamentos com $Re_L > 10000$.

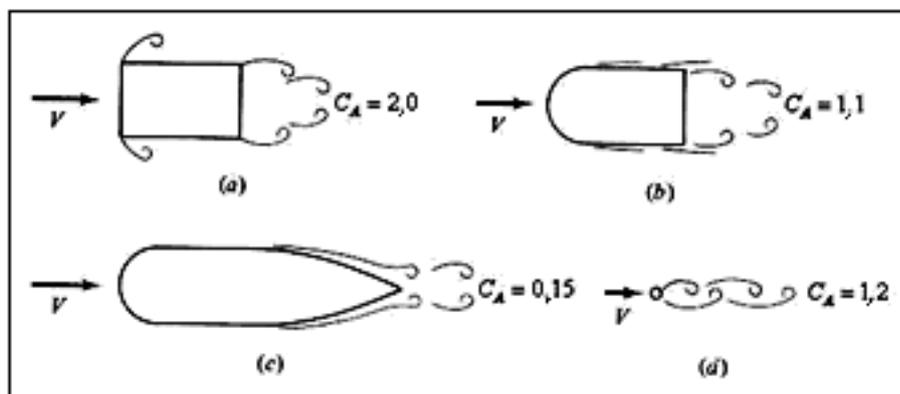


Figura 5.6 - Coeficientes de arrasto para corpos de formas geométricas diferentes em escoamentos com $Re_L > 10000$ (modificado, França, 2003).

Em todos estes casos, a área característica para o cálculo do coeficiente de arrasto foi a área frontal do corpo. Observa-se que o coeficiente de arrasto para os corpos rombudos (não delgados), representados nas Figs. 5.6a, 5.6b e 5.6d, tem valores entre 2 e 1,1. Já para o corpo com uma traseira delgada, que previne melhor a separação do escoamento na Fig. 5.6c, há uma substancial redução do arrasto para $C_A = 0,15$. Isto é, se o cilindro da Fig. 5.6a é a referência, nota-se que ao arredondar a frente do cilindro da Fig. 5.6b, reduz-se o arrasto em 45 %; com a introdução de uma carenagem na parte traseira, entretanto, a redução do arrasto chega a 93 % na Fig. 5.6c.

A magnitude dos arrastos de forma e de atrito de um corpo delgado (*streamlined*) com razão de aspecto (h/j) variando entre 0,05 a 0,4 está mostrada na Fig. 5.7. Para $(h/j) \rightarrow 0$ a forma do corpo aproxima-se de uma placa plana e o arrasto de atrito representa 83 % do arrasto total. Por outro lado, quando (h/j) aumenta, isto é, o corpo torna-se mais bojudo (arredondado), o arrasto de forma também aumenta.

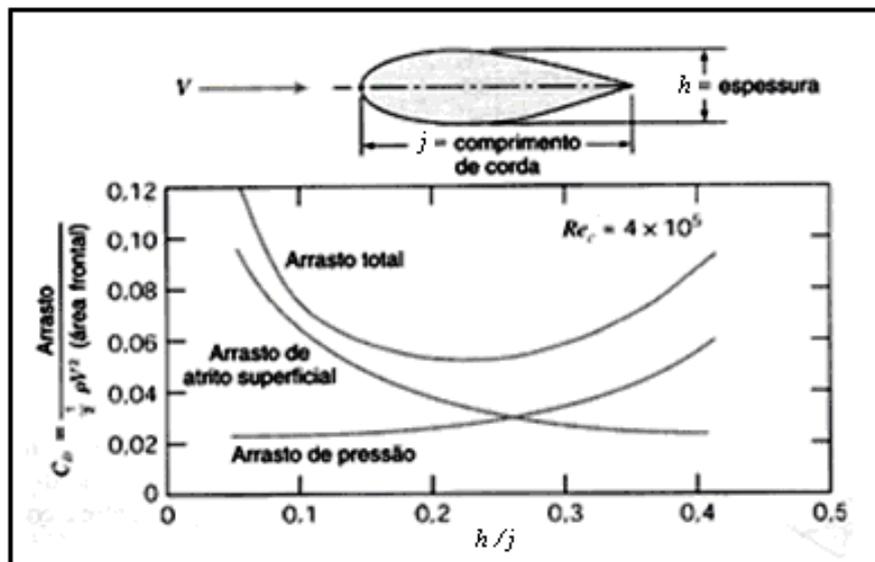


Figura 5.7 - Influência do arrasto de atrito e de forma no arrasto total para um corpo delgado (carenado) em função da razão de aspecto (h/j) (modificado, Fox e McDonald, 2001).

Em corpos não delgados, tais como cilindros e placas planas normais ao escoamento, o arrasto de pressão é dominante e corresponde a mais que 90 % do arrasto total. Isto pode ser facilmente identificado se observamos a Fig. 5.8, que mostra o C_A em função do Re para corpos de formas variadas. Para escoamentos com $Re > 1000$, por exemplo, corpos delgados com formas de placas planas, aerofólios, asas de pássaros, etc, têm $C_A < 0,1$. Nestes corpos,

como visto na Fig. 5.7, os arrastos de forma e atrito são igualmente importantes na constituição do arrasto total. Por outro lado os corpos como, barra de seção quadrada, cilindro transversal ao escoamento e placa plana normal ao escoamento tem $C_A \cong 1$.

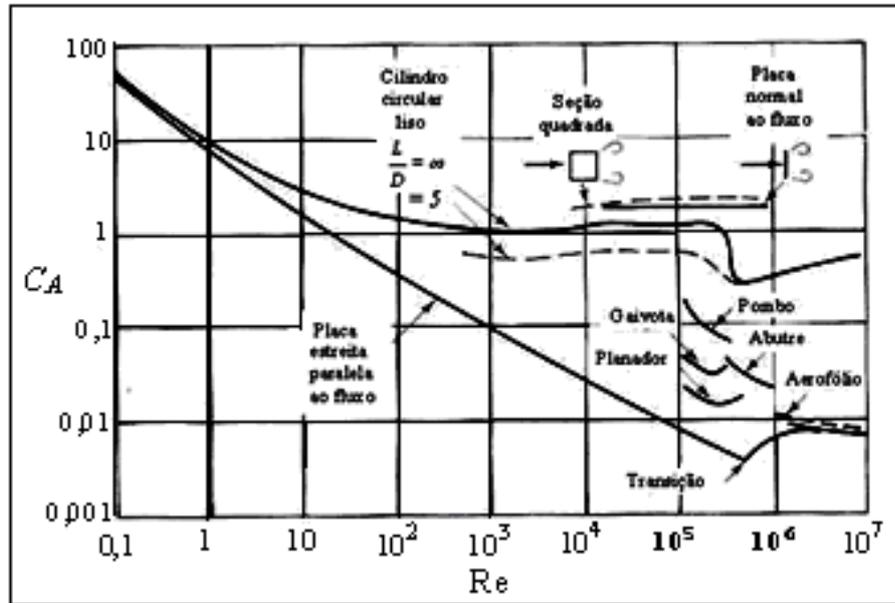


Figura 5.8 - Coeficientes de arrasto para corpos bi-dimensionais em função do número de Reynolds (modificado, França, 2003).

A razão para os corpos rombudos apresentarem C_A próximo da unidade é que a força de arrasto total é bem próxima do produto entre a pressão dinâmica e a área frontal. De maneira aproximada, pode-se estimar a força total de arrasto considerando que a diferença de pressão entre as superfícies do corpo, à montante e à jusante em relação ao escoamento, corresponde à pressão dinâmica, $(1/2)\rho V^2$, no ponto de estagnação frontal. Esta diferença de pressão vezes a área frontal do corpo é $(1/2)\rho AV^2$, que é uma estimativa do arrasto total. Isto então justifica o fato, de que nestes corpos rombudos, o arrasto de forma ser a componente dominante no arrasto total.

Ainda com relação à Fig. 5.8, deve-se destacar um comportamento peculiar do C_A do cilindro para números de Reynolds variando entre 10^5 e 10^6 . Nesta faixa há uma súbita diminuição do C_A de 1,2 para 0,3. Este fenômeno também é conhecido como “crise do arrasto” e deve-se a uma transição de regime laminar para turbulento da camada limite que se desenvolve na superfície do cilindro.

Enquanto a camada limite laminar separa-se em uma posição angular de aproximadamente 82° a partir do ponto de estagnação frontal, na camada limite turbulenta a separação ocorre em aproximadamente 120° , ver a representação esquemática na Fig. 5.9. Na transição de laminar para turbulento, o escoamento na camada limite do cilindro consegue extrair mais energia do escoamento externo e retardar o ponto de separação para 120° .

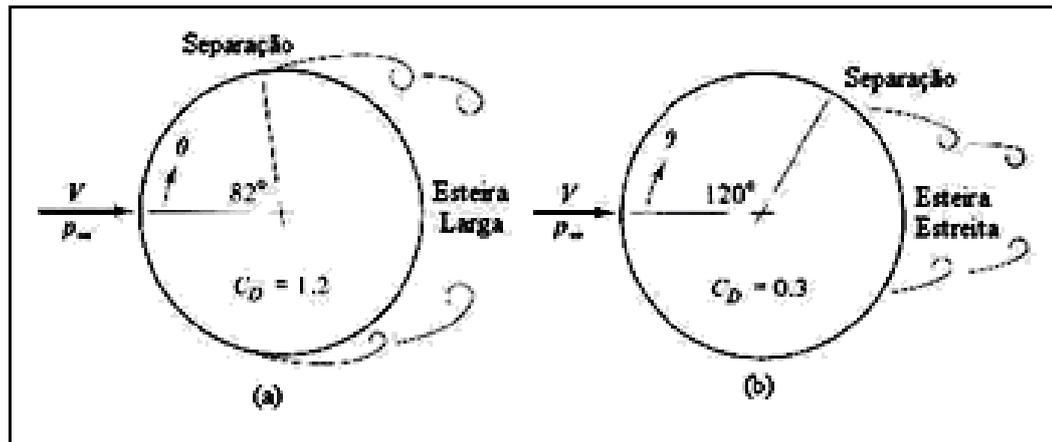


Figura 5.9 - Representação esquemática do ponto de separação escoamento em um cilindro em regime (a) laminar e (b) turbulento (modificado, França, 2003).

A redução do arrasto também pode ser observada na distribuição de pressão no cilindro para os diferentes regimes, como mostra a Fig. 5.6. A curva tracejada é uma distribuição simétrica obtida da solução do escoamento potencial; as linhas “traço-ponto” e “contínua” são assimétricas e são valores medidos de escoamentos de camada limite laminar e turbulenta. A assimetria na distribuição de pressão resulta, naturalmente, da separação do escoamento. A partir do valor máximo de estagnação frontal, o caso laminar apresenta uma pressão negativa e constante a partir de 82° . No caso turbulento o ponto de separação desloca-se para 120° e a distribuição de pressão é mais simétrica que a do caso laminar: portanto, o arrasto é menor.

Logo, pode-se afirmar que a transição do escoamento de laminar para turbulento causa uma redução do arrasto total do cilindro. Na transição do escoamento de laminar para turbulento, o arrasto de atrito aumenta. Entretanto, neste regime e para esta forma de corpo, a contribuição desta parcela de arrasto para o arrasto total é muito pequena quando comparada com a do arrasto de pressão. Portanto, como a mudança do escoamento de laminar para turbulento torna mais simétrica a distribuição de pressão, ela também reduz o arrasto total.

5.2.3 Força de Sustentação

Segundo Pinho (2002), os perfis alares ou asas têm como objetivo providenciar sustentação. Como se sabe, a ocorrência de uma força de sustentação (F_s) tem, sobretudo origem na distribuição de pressões em torno do objeto submerso no escoamento e é necessário que essa distribuição seja assimétrica, pois se assim não for não haverá força de sustentação. A seguir, pode-se ver a Eq. (5.7) que determina o coeficiente de sustentação (C_s) e o tipo de nomenclatura utilizada no estudo de escoamentos em torno de perfis alares (Fig. 5.10).

$$C_s = \frac{F_s}{(1/2)\rho AV^2} \quad (5.7)$$

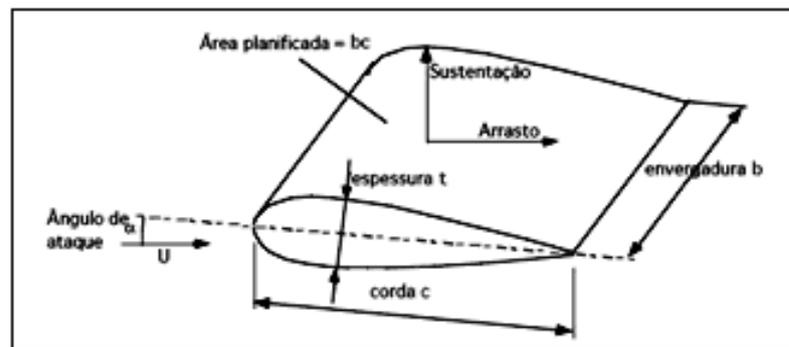


Figura 5.10 - Nomenclatura utilizada em perfis de asas (modificado, Pinho, 2002).

Para que se tenham condições favoráveis ao surgimento da força de sustentação é necessário que o objeto seja assimétrico, ou mesmo que seja simétrico que esteja colocado numa posição relativamente assimétrica ao escoamento. Mostram-se estes dois casos na Fig. 5.11.

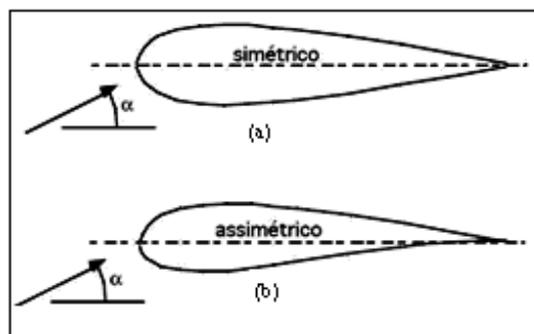


Figura 5.11 - Escamento sobre perfis de (a) asa simétrica e (b) assimétrica (modificado, Pinho, 2002).

No entanto, isto não significa que uma situação de geometria com assimetria não possa dar origem a uma força de sustentação nula. As asas, mesmo aquelas de geometria assimétrica, apresentam um coeficiente de sustentação nulo quando o ângulo de ataque toma um determinado valor negativo, como se pode ver na Fig. 5.12 (Munson *et al.*, 1998) que apresenta a variação do quociente entre os coeficientes de sustentação e arrasto (C_S/C_A) para um perfil de asa específico. Além disso, a mesma apresenta também o coeficiente de arrasto sob a forma de uma curva polar (esta é uma representação do coeficiente de arrasto em função do coeficiente de sustentação) onde estão marcadas as posições da asa.

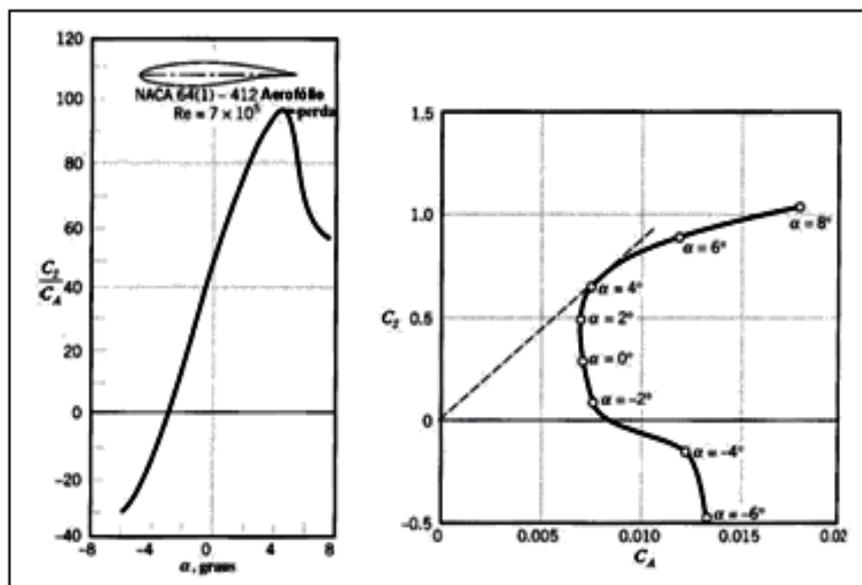


Figura 5.12 - Coeficientes de sustentação e arrasto de um perfil NACA 64412 de envergadura infinita em função do ângulo de ataque (modificado, Munson *et al.*, 1998).

Como se pode ver na figura anterior, para um ângulo de ataque de aproximadamente -2.5° o coeficiente de sustentação é nulo. A partir desta ilustração pode-se ver melhor o desempenho da asa e a condição de perda, a qual corresponde ao valor mais elevado de C_S . Normalmente isto ocorre para baixos ângulos de ataque em que o C_A é baixo e relativamente constante com o ângulo de ataque. É mais freqüente a apresentação dos resultados sob a forma de uma representação dos coeficientes em função do ângulo de ataque, como se mostra na Fig. 5.13. A mesma apresenta também o efeito que a abertura de *flaps* (estrutura que varia o deslocamento de fluido) tem sobre o comportamento aerodinâmico de um perfil simétrico aumentando a força de sustentação consideravelmente, mas também aumentando a força de arrasto. Contudo, deve-se notar que as necessidades de sustentação ocorrem na aterrissagem e

descolagem, à baixa velocidade, sendo que neste caso é mais importante ter um elevado valor de C_S para evitar perdas de sustentação e a questão do elevado coeficiente de arrasto é menos importante.

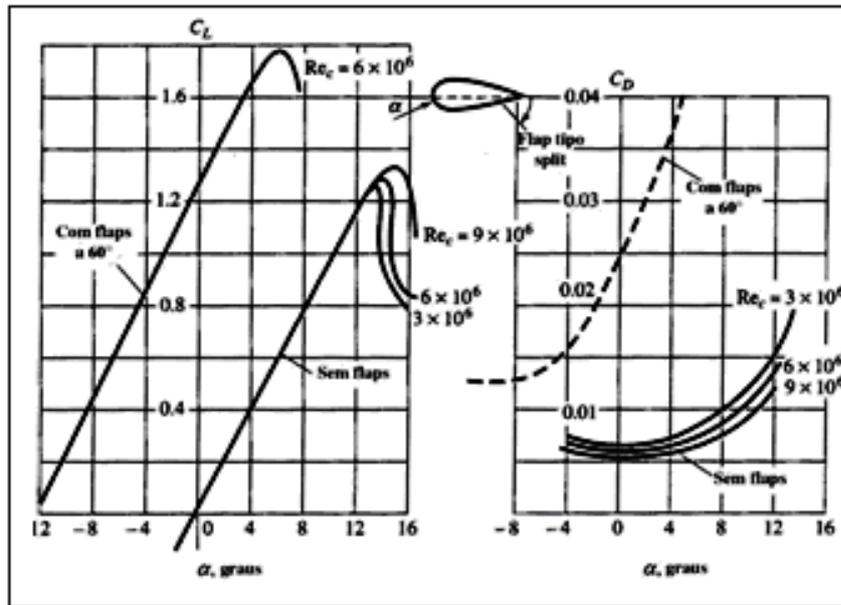


Figura 5.13 - Características aerodinâmicas de um perfil de asa com e sem flaps (modificado, White, 1999).

5.3 DETERMINAÇÃO DAS AÇÕES ESTÁTICAS DO VENTO SEGUNDO A NORMA BRASILEIRA REULAMENTADORA – NBR – 6123

Segundo Manfrim (2006), dificilmente se observa o colapso total de uma estrutura devido à ação do vento. Em geral, quando isso acontece, o colapso é causado por falhas locais. Por isso é importante, tanto do ponto de vista econômico como estrutural, estudar cuidadosamente as ações locais causadas pelo vento. As pressões do vento são transformadas em forças estáticas, atuando na superfície perpendicular à direção do vento.

5.3.1 Velocidade Básica

A velocidade básica do vento V_0 , adequada ao local onde a estrutura se localiza é determinada através das “isopletras” de velocidades básica, as quais foram elaboradas a partir dos registros de diversas estações meteorológicas (Fig. 5.14).

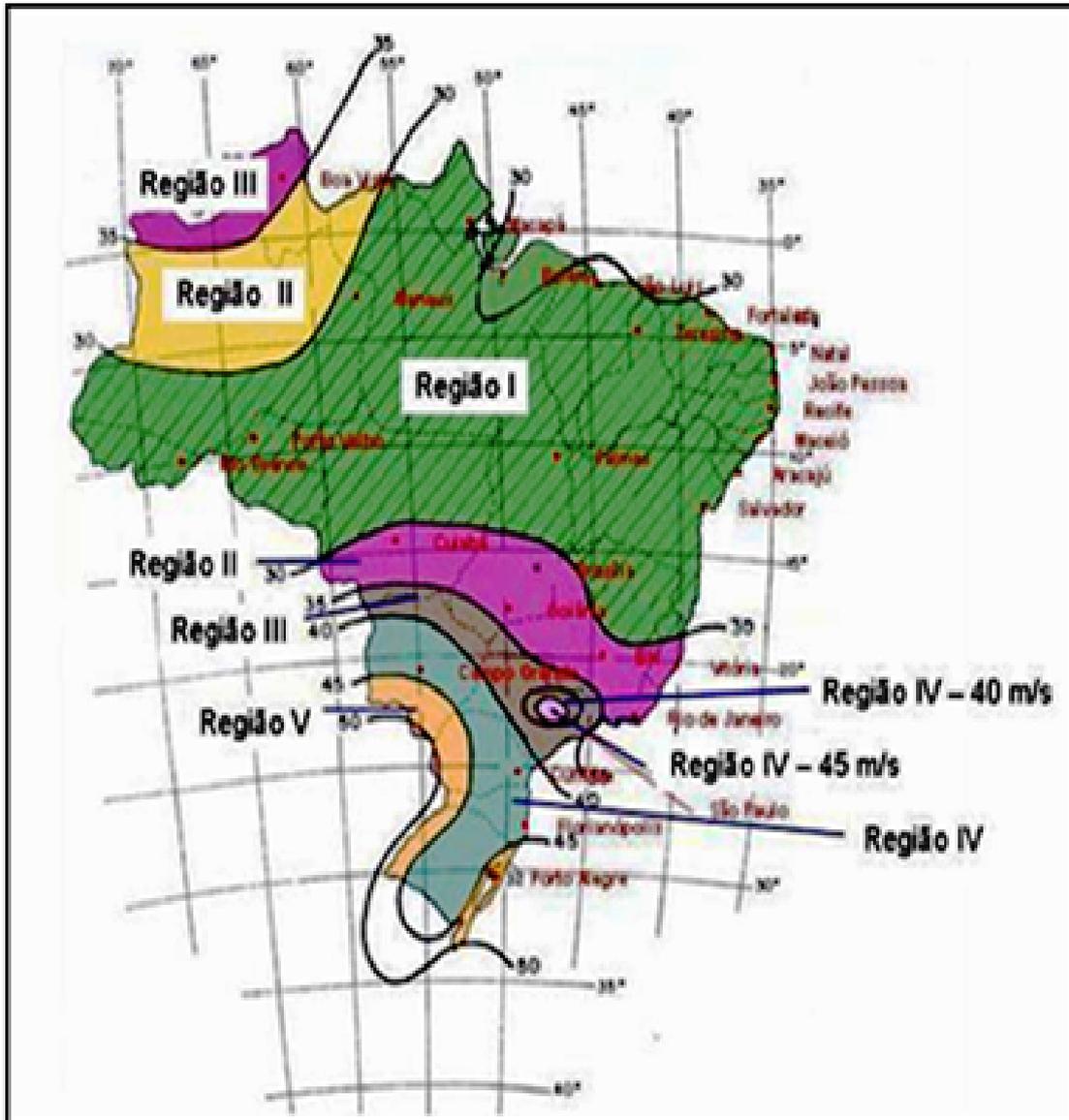


Figura 5.14 - Isopletas da velocidade básica V_o em m/s (modificado, Celebrace, 2007).

Estas velocidades são definidas como a velocidade de uma rajada de 3 segundos, exercida em média uma vez em 50 anos, a 10 metros acima do solo em campo aberto e plano. Como regra geral é admitido que o vento básico possa soprar de qualquer direção horizontal.

5.3.2 Velocidade Característica e Velocidade de Projeto

A velocidade característica do vento V_k é a utilizada no cálculo da pressão dinâmica nas estruturas, obtida a partir da velocidade básica corrigida por fatores de ajuste, segundo a Eq. (5.8) apresentada pela NBR-6123 (1988):

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (5.8)$$

A velocidade de projeto V_p , corresponde à velocidade média sobre 10 min a 10 m de altura sobre o solo, em terreno de categoria II:

$$V_p = 0,69 V_0 S_1 S_3 \quad (5.9)$$

Nas Eqs. (5.8) e (5.9) V_0 é a velocidade básica do vento; S_1 , S_2 e S_3 os coeficientes de ajuste da velocidade básica, os quais são abordados a seguir, e 0,69 o fator que representa uma adequação do tempo de exposição a 10 minutos.

Como citado anteriormente, os valores de velocidade básica são obtidos do gráfico das isopletras da NBR-6123 (1988), os coeficientes de ajuste têm como finalidade adequar a velocidade básica às particularidades do local da edificação, suas dimensões e grau de segurança desejado.

5.3.3 Fator Topográfico (S_1)

O fator S_1 leva em consideração a influência da topografia local na variação da velocidade do vento. Como primeira aproximação, a NBR-6123 (1988) sugere os valores indicados no seu item 5.2, ressaltando que estes devem ser usados com precaução. Caso seja necessário um conhecimento mais preciso da influência do relevo ou se a complexidade deste tornar difícil a aplicação dos valores sugeridos, deve-se proceder a ensaios de modelos topográficos em túnel de vento ou a medidas anemométricas no próprio terreno.

5.3.4 Fator de Rugosidade (S_2)

De acordo com a NBR-6123 (1988), o fator S_2 considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte desta. A altura considerada é tomada a partir do nível do terreno ao ponto desejado. Entretanto, pode-se dividir a altura da edificação em trechos, determinando-se S_2 com base na altura medida do terreno à cota do topo de cada trecho.

A rugosidade do terreno é classificada em cinco categorias (Tab. 5.2) e quanto às dimensões da edificação a norma divide as edificações e suas partes em três classes (Tab. 5.3), com intervalos de tempo para o cálculo da velocidade média de 3, 5 e 10 segundos e dimensões máximas, vertical ou horizontal, de 20, 50 e 80 m. Nas edificações em que a maior dimensão ultrapasse 80 m, o intervalo de tempo é obtido das instruções fornecidas no *Anexo A* da referida norma. A norma considera ainda, no seu item 5.5, os casos de transição de rugosidade.

Tabela 5.2 - Categorias em função da rugosidade do terreno (NBR-6123, 1988).

| | | |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Categoria I | Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais 5 km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ mar calmo; ✓ lagos e rios; ✓ pântanos sem vegetação. |
| Categoria II | Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ zonas costeiras planas; ✓ pântanos com vegetação rala; ✓ campos de aviação; ✓ pradarias e charnecas; ✓ fazendas sem sebes ou muros. |
| Categoria III | Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ granjas e casas de campo, com exceção das partes com matos; ✓ fazenda com sebes e/ou muros; ✓ subúrbios a considerável distância do centro, com casas e esparsas. |
| Categoria IV | Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ zonas de parques e bosques com muitas árvores; ✓ cidades pequenas e seus arredores; ✓ subúrbios densamente construídos de grandes cidades. |
| Categoria V | Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ florestas com árvores altas, de copas isoladas; ✓ centros de grandes cidades; ✓ complexos industriais bem desenvolvidos. |

Tabela 5.3 - Classes de terreno em função das dimensões da edificação (NBR-6123, 1988).

| | |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Classe A | Todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20 m. |
| Classe B | Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 e 50 m. |
| Classe C | Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m. |

O fator S_2 pode ser obtido a partir da Eq. (5.10) que é aplicável até a altura z_g , que define o contorno superior da camada atmosférica. Os valores de S_2 para as diversas categorias de rugosidade do terreno e classe de dimensões das edificações são encontrados na Tabela 5.4 da NBR-6123 (1988), sendo permitida a interpolação linear entre os valores apresentados. Os parâmetros F_r , b e p para a Eq. (5.10) são retirados da Tabela 5.4.

$$S_2 = b F_r \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (5.10)$$

sendo b o parâmetro meteorológico; p o expoente da lei potencial de variação de S_2 ; F_r o fator de rajada, o qual sempre corresponde à categoria II e z a altura acima do nível geral do terreno.

Tabela 5.4 - Parâmetros meteorológicos (NBR-6123, 1988).

| Categoria | z_g (m) | Parâmetro | Classes | | |
|-----------|--------------|-----------|---------|-------|-------|
| | | | A | B | C |
| I | 250 | b | 1,10 | 1,11 | 1,12 |
| | | p | 0,06 | 0,065 | 0,07 |
| II | 300 | b | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| | | F_r | 1,00 | 0,98 | 0,95 |
| | | p | 0,085 | 0,09 | 0,10 |
| III | 350 | b | 0,94 | 0,94 | 0,93 |
| | | p | 0,10 | 0,105 | 0,115 |
| IV | 420 | b | 0,86 | 0,85 | 0,84 |
| | | p | 0,12 | 0,125 | 0,135 |
| V | 500 | b | 0,74 | 0,73 | 0,71 |
| | | p | 0,15 | 0,16 | 0,175 |

5.3.5 Fator Estatístico (S_3)

O fator S_3 é baseado em conceitos estatísticos e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. O grau de segurança necessário é função da finalidade da edificação, que é classificada pela norma em cinco grupos dentro desse critério. No caso de edificações normais destinadas a moradias, hotéis, etc (grupo 2), adota-se o nível de probabilidade de 63 % e uma vida útil de 50 anos. Na falta de uma norma específica sobre segurança nas edificações ou de indicações correspondentes na norma estrutural, os valores mínimos do fator S_3 são indicados na Tabela 5.5. Pode-se obter ainda, S_3 para outros níveis de probabilidade e vida útil a partir da Eq. (5.11) que se encontra no *Anexo B* da NBR-6123 (1988), e é importante ressaltar que em nenhum caso pode ser adotado um fator S_3 menor que o indicado na Tabela 5.5.

$$S_3 = 0,54 \left[-\frac{\ln(1 - P_m)}{m} \right]^{-0,157} \quad (5.11)$$

sendo P_m a probabilidade de ocorrência e m o período de retorno ou tempo de recorrência.

Tabela 5.5 - Valores mínimos do fator estatístico S_3 (NBR-6123, 1988).

| Grupo | Descrição | S_3 |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 1 | Edificação cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicações, etc). | 1,10 |
| 2 | Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação. | 1,00 |
| 3 | Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc). | 0,95 |
| 4 | Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc). | 0,88 |
| 5 | Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção. | 0,83 |

5.3.6 Cálculo da Força de Arrasto para Fios e Cabos

Para a determinação do coeficiente de arrasto C_A e posteriormente da força de arrasto dos cabos de uma linha de transmissão, faz-se necessário encontrar o valor do número de Reynolds (Re) e obter dados referentes ao condutor estudado, que são r' o raio dos fios ou cabos secundários da camada externa do cabo; d o diâmetro do círculo circunscrito da seção do fio ou cabo e L o comprimento do fio ou cabo. O valor do número de Reynolds que é necessário para encontrar o coeficiente de arrasto é calculado através da Eq. (5.12), na qual V_k é a velocidade característica, já citada anteriormente (Eq. 5.8).

$$Re = 70000 V_k d \quad (5.12)$$

Através do número de Reynolds, consulta-se a Tabela 5.6 que apresenta os valores do coeficiente de arrasto para cabos que possui a razão entre seu comprimento e seu diâmetro maior que 60. Finalmente, verifica-se o valor da razão entre o raio dos fios ou cabos secundários da camada externa do cabo e o diâmetro do círculo circunscrito da seção do fio ou cabo (r' / d).

Tabela 5.6 - Coeficiente de arrasto (C_A) para fios e cabos com $L/d > 60$ (NBR-6123, 1988).

| Regime de Fluxo ($Re = 7000 V_k d$) [V_k em m/s; d em m] | Coeficiente de arrasto C_A para: | | | |
|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| | Fio liso | Fio moderadamente Liso (galvanizado ou pintado) | Cabos torcidos de fios finos $r' / d \leq 1/30$ | Cabos torcidos de fios grossos $r' / d \geq 1/25$ |
| $Re \leq 2,5 \cdot 10^4$ | - | - | 1,2 | 1,3 |
| $Re \geq 4,2 \cdot 10^4$ | - | - | 0,9 | 1,1 |
| $Re \leq 2,5 \cdot 10^5$ | 1,2 | 1,2 | - | - |
| $Re \geq 4,2 \cdot 10^5$ | 0,5 | 0,7 | - | - |

Para Re e r' / d intermediários, os valores de C_A são obtidos por interpolação.

Para fios e cabos perpendiculares à direção do vento, a força de arrasto é calculada por:

$$F_A = C_A q L d \quad (5.13)$$

Na equação da força de arrasto os parâmetros C_A , L e d já foram mencionados exceto q que é a pressão dinâmica do vento, correspondente à velocidade característica V_k , em condições normais de pressão, ou seja, a uma pressão de 1 atm e a uma temperatura de 15 °C, valor este que é encontrado a partir da Eq. (5.14).

$$q = 0,613 V_k^2 \quad (5.14)$$

Se a direção do vento (suposta horizontal) formar um ângulo α com a corda do fio ou cabo, a força F_y , perpendicular à corda, é calculada como se mostra a seguir, e a força F_x na direção da corda, pode ser desprezada:

$$F_y = F_A \operatorname{sen} \alpha \quad (5.15)$$

5.3.7 Cálculo da Força de Arrasto no Condutor Utilizado no Trecho em Estudo

Esta seção apresenta como calcular a força de arrasto causada pela parcela média da rajada de vento sobre os condutores da linha de transmissão. O cabo condutor do trecho de linha analisado é o GROSBEAK 636 com base no projeto de um trecho construído pela ELETRONORTE, foi possível obter o comprimento do vão que é de 450 m e, a partir deste dado e de equações disponíveis em Labegalini *et al.* (1992), calculou-se o comprimento do cabo que é de 450,63 m. Para este trabalho, considerando a localização do vão estudado e prezando por uma maior segurança, a velocidade básica escolhida foi de 50 m/s. Devido à topografia do terreno, o mesmo foi considerado plano ou fracamente acidentado, classificado na categoria II quanto à rugosidade e em função das dimensões da edificação como classe B.

O grupo estatístico adotado para este caso foi o primeiro, e a seguir são apresentados na Tabela 5.7 os valores correspondentes às considerações assumidas e os parâmetros necessários para o cálculo.

Tabela 5.7 - Parâmetros de entrada para o cálculo do carregamento estático.

| | | | |
|-------|--------|------|-----------|
| V_0 | 50 m/s | p | 0,09 |
| S_1 | 1,00 | z | 28,15 m |
| S_3 | 1,10 | r' | 0,00985 m |
| b | 1,00 | d | 0,02515 m |
| F_r | 0,98 | L | 450 m |

Com os dados da Tabela 5.7 foi encontrado o valor de S_2 igual a 1,10 que é calculado através da Eq. (5.10). Em seguida, com a utilização da Eq. (5.8) determinou-se o valor da velocidade característica que é de 54 m/s. Na seqüência, obteve-se a pressão dinâmica do vento pela Eq. (5.14) que foi de 1.787,5 N/m². De posse desta pressão, através da Eq. (5.12), foi determinado o número de Reynolds igual a 95.067.

Então, depois de calculados estes valores iniciais, é preciso saber o valor da relação r' / d para a determinação do tipo de cabo a ser considerado, segundo a Tabela 5.6. Com os dados apresentados anteriormente, concluímos que o resultado desta relação é 0,078 e que o condutor encontra-se na condição de cabos torcidos de fios grossos. Assim, depois de consultada a Tabela 5.6 para cabos torcidos de fios grossos e com $Re \geq 4,2 \cdot 10^4$, obteve-se um coeficiente de arrasto igual a 1,10. Finalmente, de posse de todos estes dados e substituindo-se na Eq. (5.13) encontra-se que a força de arrasto no cabo é 22.253 N.

5.4 DETERMINAÇÃO DA AÇÃO DINÂMICA DO VENTO

Segundo Oliveira (2006), um dos carregamentos mais importantes a serem considerados na análise de torres de transmissão de energia elétrica tem como origem o vento, que pode ser interpretado como uma função temporal aleatória. Em seu trabalho ele sugere a utilização de modelos dinâmicos capazes de representar a natureza não determinística do problema.

A Fig. 5.15 apresenta, de forma esquemática, a velocidade do vento ao longo do tempo, decomposta conforme a Eq. (5.16).

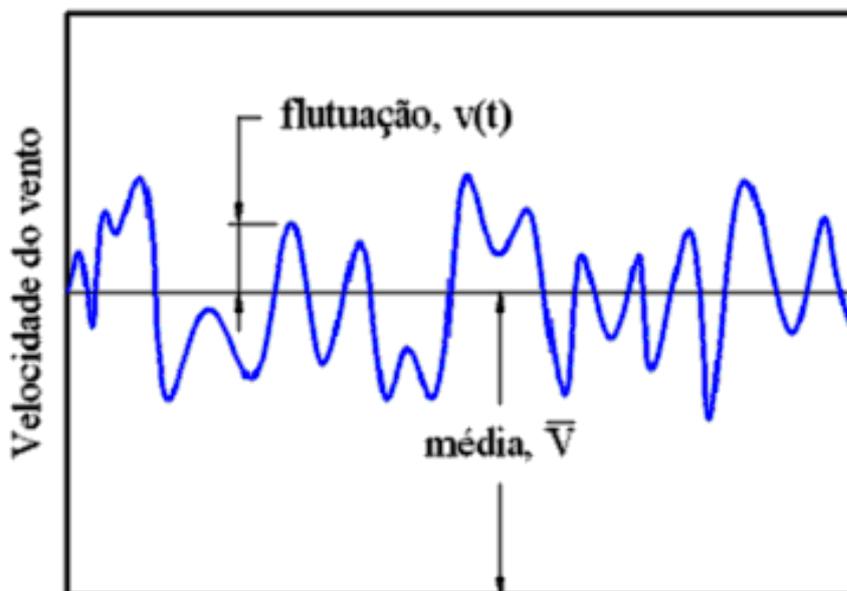


Figura 5.15 - Histórico de velocidade do vento (modificado, Oliveira, 2006).

Em Blessmann (2005), a velocidade do vento é expressa como uma função temporal constituída por uma parte média e uma flutuante:

$$V(t) = \bar{V} + v(t) \quad (5.16)$$

sendo $V(t)$ a velocidade longitudinal do vento em função do tempo; \bar{V} o valor médio da componente longitudinal do vento; e $v(t)$ a flutuação da velocidade longitudinal do vento no tempo.

5.4.1 Procedimento Para Encontrar a Parcela Flutuante de Força Devida à Ação do Vento

Para determinar o valor da velocidade do vento é necessário, inicialmente, encontrar através da Eq. (5.9) o valor médio da componente longitudinal do vento. Posteriormente, é encontrada por meio de um procedimento bastante complexo, a parcela flutuante da

velocidade do vento no tempo, a qual é determinada a partir de parâmetros estatísticos: distribuição de probabilidade, espectro de potência e funções de correlação cruzada.

Este procedimento começa com a discretização do vão de linha de transmissão que se deseja estudar em perfis de velocidade aleatórios. No esquema apresentado na Fig. 5.16 são consideradas faixas de atuação de dimensão fixa para cada função temporal.

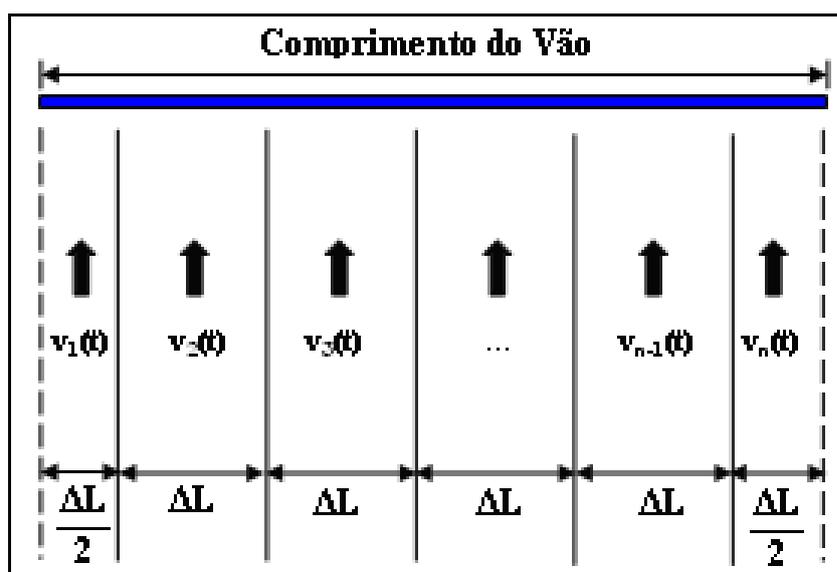


Figura 5.16 - Esquema de distribuição das funções temporais (modificado, Oliveira, 2006).

Em seguida, deve-se obter em função da largura de faixa a função covariância cruzada (Eq. 5.17), assumindo que as rajadas de vento são simultâneas. Esta função pode gerar, a partir de uma transformada de Fourier, uma função de densidade espectral, denominada função densidade espectral cruzada.

$$C^{V_1, V_2}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} S^V(f) \cdot e^{-f \cdot c} df \quad (5.17)$$

A função covariância cruzada é composta pelo produto de duas funções: a função densidade espectral que representa o espectro de potência do vento e uma função exponencial, a qual possui em seu expoente um coeficiente de arrasto superficial (c) relativo à velocidade média a 10 m de altura.

Muitos pesquisadores como Davenport, Harris, Lumley, Panowsky, Karman e Kaimal contribuíram com seus estudos para a representação do espectro de potência do vento através

de uma expressão matemática. A expressão proposta por Kaimal (Eq. 5.18) é a mais atual e aceita pela comunidade científica, por apresentar uma relação de dependência com a altura z .

A importância desta relação foi comprovada por vários pesquisadores, inclusive por Davenport, como é citado em Blessmann (1995). Ela é dada por:

$$S^V(f) = \frac{200x_k}{(1+50x_k)^{5/3}} \cdot \frac{\mu_*^2}{f} \quad (5.18)$$

O espectro de Kaimal é uma função que depende da frequência (f), da função representada por x_k que é dada pela Eq. (5.19) e da velocidade de fricção (μ_*) também conhecida como velocidade tangencial (Eq. 5.20):

$$x_k = x(z, f) = \frac{z f}{\bar{V}_z} \quad (5.19)$$

$$\mu_* = \frac{K \bar{V}_z}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (5.20)$$

Na Eq. (5.19), a velocidade média na altura z , representada por \bar{V}_z , é calculada pela Eq. (5.21), na qual \bar{V}_{10} é igual à velocidade de projeto (Eq. 5.9):

$$\bar{V}_z = \bar{V}_{10} \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad (5.21)$$

Os parâmetros z_0 e K da Eq. (5.20) representam, respectivamente, o comprimento de rugosidade e a constante de Karman, que é igual a 0,4.

A Eq. (5.21) é a aplicação da lei de Hellmann, na qual p é o expoente relativo à rugosidade do terreno. Então, para finalmente obter o valor da função covariância, deve-se encontrar o valor do coeficiente de arrasto superficial (c) relativo à velocidade média a 10 m de altura, o qual é calculado através da Eq. (5.22):

$$c = \frac{C_{1x}^2 (x_1 - x_2)^2 + C_{1z}^2 (z_1 - z_2)^2}{\bar{V}(10)} \quad (5.22)$$

Os parâmetros C_{1x} e C_{1z} são os coeficientes de decaimento na direção lateral e vertical, respectivamente. Conforme Oliveira (2006), $C_{1x} = 16$ e $C_{1z} = 10$ são valores conservadores, sendo indicados para projetos. Os valores de x_1 e x_2 são referentes aos deslocamentos no eixo x e os valores z_1 e z_2 referentes aos deslocamentos no eixo z .

No esquema apresentado na Fig. 5.16, foram adotadas faixas de atuação de dimensão fixa para cada função temporal. Se o valor da função de covariância cruzada $C^{V_1, V_2}(0)$ for calculado para diferentes faixas de atuação é possível construir o gráfico apresentado na Fig. 5.17.

Então, ao se escolher uma determinada faixa de atuação (ΔL) para a função a ser gerada é possível extrair o valor da covariância cruzada correspondente C_1 .

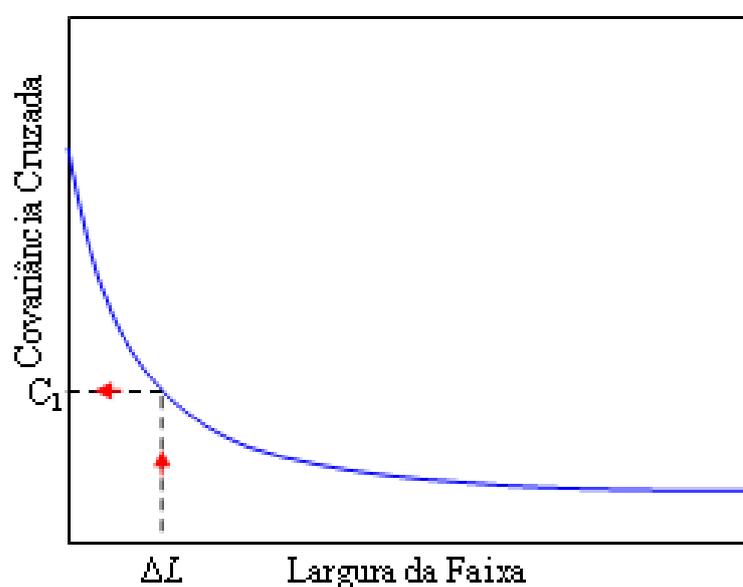


Figura 5.17 - Função de covariância cruzada (τ nulo) para diferentes faixas de atuação (modificado, Oliveira, 2006).

Para correlacionar as funções temporais ($v_1(t)$ e $v_2(t)$) das parcelas flutuantes da velocidade longitudinal do vento em dois diferentes pontos no espaço, foi utilizada a Eq. (5.17), que fornece o valor da função de covariância cruzada para τ nulo ($\tau = 0$).

Essa consideração assume, portanto, que os eventos são simultâneos, ou seja, os processos $v_1(t)$ e $v_2(t)$ são tomados no mesmo instante de tempo. Sendo conhecida a função de autocovariância dos processos (Eq. 5.23), é possível determinar o tempo τ_1 (Fig. 5.18) que faz com que a autocovariância se iguale à covariância cruzada para τ nulo (C_1).

Dessa forma, as funções temporais correlacionadas espacialmente podem ser expressas por uma mesma série, havendo uma defasagem entre elas de um intervalo de tempo igual a τ_1 :

$$C^V(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S^V(f) \cdot e^{i2\pi f\tau} df \quad (5.23)$$

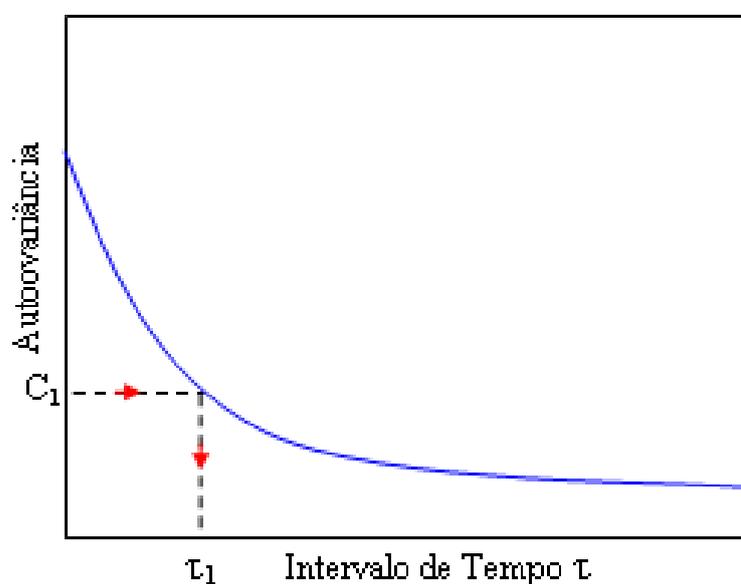


Figura 5.18 - Função de autocovariância do processo (modificado, Oliveira, 2006).

Após a determinação do intervalo de tempo τ_1 é possível gerar as funções temporais necessárias ao processo de determinação do carregamento dinâmico devido à ação do vento. Estas funções são geradas através de uma série de Fourier, com base no espectro de Kaimal (Eq. 5.18). Considerando que a parcela flutuante da velocidade do vento seja representada de forma simplificada por uma única função harmônica, obtém-se a seguinte expressão:

$$v(t) = v_0 \cos(2\pi f t) \quad (5.24)$$

Adotando-se que uma função temporal para a parcela flutuante da velocidade longitudinal do vento possa ser expressa por “N” harmônicos, é possível escrevê-la na forma da Eq. (5.25). Na Fig. 5.19 mostram-se quatro perfis de velocidade gerados a partir desta equação.

$$v_n(t) = \sqrt{2} \sum_{i=1}^N \sqrt{S^V(f_i) \Delta f} \cos(2\pi f_i(t + \tau_n) + \theta_i) \quad (5.25)$$

sendo N o número de divisões consideradas no espectro; f a frequência em Hz; Δf o incremento da frequência em Hz; θ_i o ângulo de fase aleatório entre 0 e 2π ; e τ_n é um múltiplo do intervalo de tempo τ_1 .

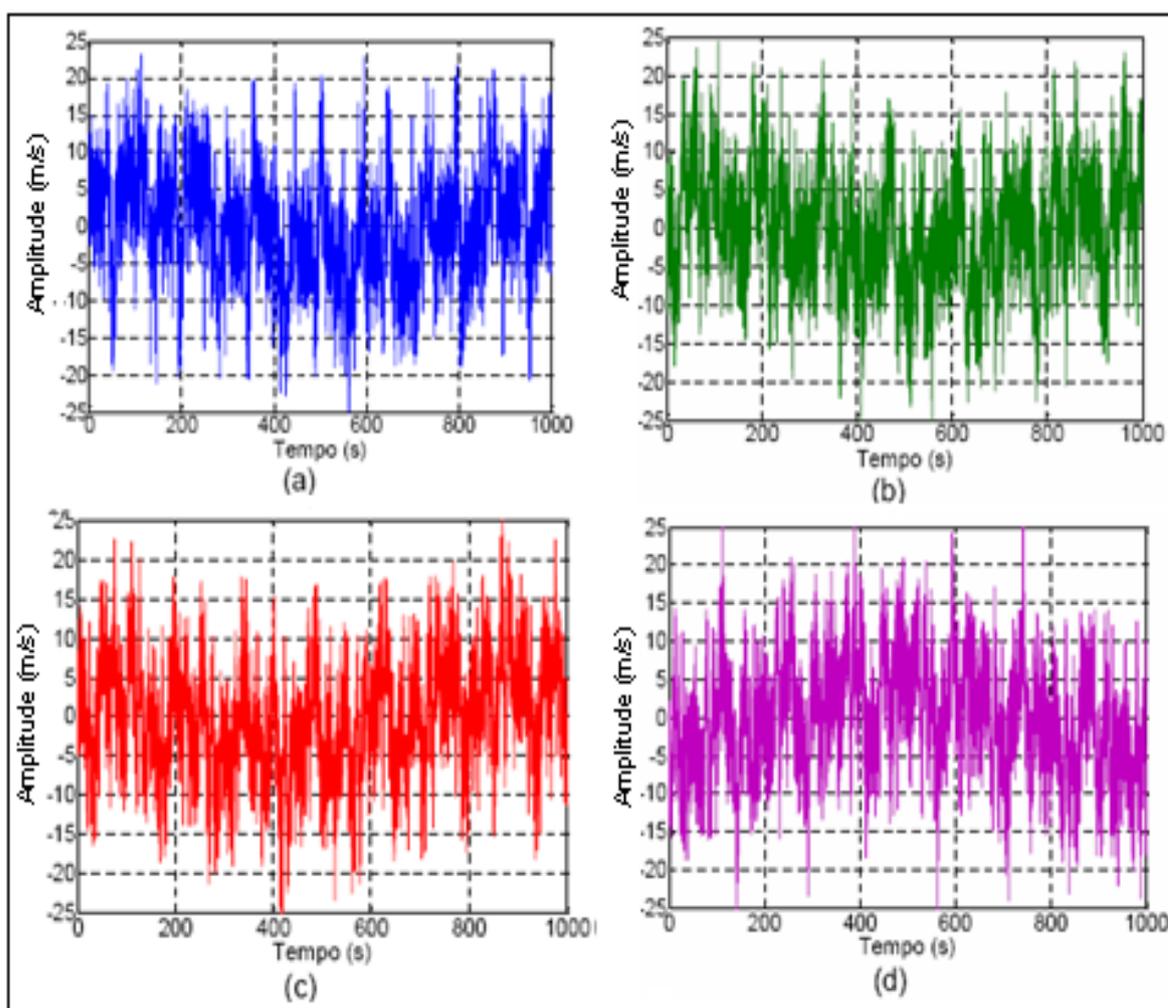


Figura 5.19 - Perfis de flutuação de velocidade do vento no tempo (modificado, Oliveira, 2006).

O passo seguinte é determinar o carregamento dinâmico, assumindo que as pressões atuantes na estrutura são funções diretas da velocidade (modelo clássico de Davenport), não sendo estudadas funções densidade espectral e correlação cruzada para flutuação de pressões. Dessa maneira, a pressão aerodinâmica é calculada pela Eq. (5.25), conforme Blessmann (2005):

$$Q(t) = \bar{Q} + q(t) \quad (5.25)$$

sendo $Q(t) = 0,613V_z$, conforme a NBR-6123 (1988). Assim, através de um pequeno procedimento matemático pode-se escrever a Eq. (5.25) na seguinte forma:

$$Q(t) = 0,613 \left[v(t) + \bar{V}_{10} \right]^2 \quad (5.26)$$

Finalmente, pode-se determinar o valor da força $F(t)$ atuante no processo. Os esforços atuantes são resultado da integração da pressão na área do trecho da estrutura a ser considerado, os quais são calculados pela Eq. (5.27):

$$F(t) = A_i C_{Ai} Q(t) \quad (5.27)$$

onde A_i é a área frontal efetiva do trecho “ i ” da estrutura e C_{Ai} é o coeficiente de arrasto associado ao trecho “ i ”.

5.5 CONSIDERAÇÕES

Neste capítulo foi dado destaque às forças que atuam sobre um corpo mergulhado em um fluido. Assim, apresentou-se a teoria relativa à mecânica dos fluidos com destaque para as forças de arrasto e sustentação, como principais agentes que surgem como consequência do escoamento de um fluido em torno de um corpo. Estas forças variam de acordo com a forma do corpo, ângulo de ataque do fluxo, densidade do fluido, entre outros parâmetros.

Realizou-se ainda, uma breve apresentação da NBR-6123 (1988), no que diz respeito ao método de cálculo da força de arrasto causada pela parcela média do vento, a qual leva em consideração inúmeros parâmetros como: a velocidade do vento na região, a topografia e

rugosidade do terreno, o fator de rajada do vento, parâmetros meteorológicos, fatores estatísticos, entre outros. Nesta linha de abordagem, foi introduzido o procedimento para a determinação da parcela dinâmica do vento em função do espectro de potência de Kaimal, tendo por base a representação em série de Fourier do histórico da função que descreve a parcela flutuante da velocidade, a qual é utilizada para determinar a pressão aerodinâmica sobre os condutores e, conseqüentemente, a parcela flutuante de força.

CAPÍTULO 6 - ANÁLISE MODAL NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE CONDUTORES DE LINHA DE TRANSMISSÃO

6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo mostra-se a criação do modelo numérico de um único condutor submetido a uma tensão de trabalho para a análise modal através do programa ANSYS, análise esta que determina as propriedades dinâmicas da estrutura: as frequências naturais e formas modais.

O modelo foi obtido através de etapas consecutivas, como a escolha dos elementos a serem utilizados, o tipo de material, características físico-geométricas, disposição dos elementos no conjunto, o tipo de análise a ser contemplada, entre outras.

Para validar os resultados obtidos na modelagem numérica, é apresentada também uma Análise Modal Experimental realizada na bancada de cabos do Laboratório de Engenharia Civil da UFPA e uma rotina desenvolvida em ambiente MATLAB, a qual determina os valores das frequências naturais. Este capítulo contempla ainda uma análise modal numérica mais detalhada, que incorpora o efeito de não-linearidade que é aplicada tanto a um condutor como a um feixe de condutores.

6.2 MODELO NUMÉRICO GERADO PARA O CABO ESTICADO (RETO)

O modelo numérico foi criado através do programa ANSYS com o auxílio de uma rotina preexistente no mesmo, a qual foi adaptada de acordo com nossas necessidades de projeto. Para o trecho de linha de transmissão modelado são apresentados os seguintes dados: o elemento utilizado foi o Link8, o comprimento do vão foi de 10,56 metros, o módulo de elasticidade do condutor é 74 Gpa, a área da seção transversal do condutor é 374,33 mm², a densidade do condutor é 1,3 kg / m³ e a deformação inicial aplicada foi igual a 0,583 mm.

O elemento utilizado pode ser usado para modelar pilares, cabos curvados, elementos de ligação em estruturas, molas, etc. O Link8 é uniaxial de tensão ou compressão com três graus de liberdade em cada nó: translações nodais nas direções x, y, e z.

O elemento supracitado utiliza, para a análise modal do condutor tensionado, um valor denominado de deformação inicial(ε). Esta deformação decorre da aplicação de uma carga

máxima de trabalho (T), da área da seção transversal do condutor (A) e do módulo de elasticidade do condutor (E). A equação para o cálculo da deformação inicial do condutor é mostrada a seguir:

$$\varepsilon = \frac{T}{E.A} \quad (6.1)$$

A geometria, as posições dos nós e o sistema de coordenadas para este elemento são mostrados na Fig. 6.1. Os elementos são definidos por dois nós, a área de seção transversal, uma tensão ou uma deformação inicial e as propriedades isotrópicas do material. O eixo x do elemento é orientado ao longo do comprimento do elemento do nó I para o nó J.

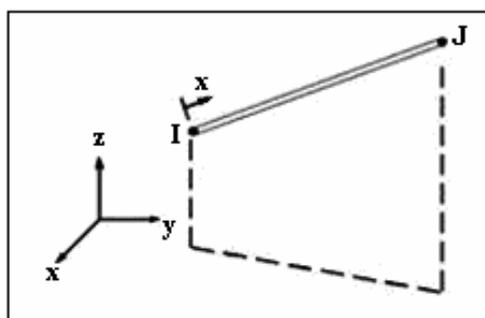


Figura 6.1 - Geometria do elemento Link8.

O modelo do cabo seguiu as seguintes características: o cabo foi desenhado esticado (reto); em uma das extremidades é aplicada uma força de tração T ; o número de elementos utilizado na malha foi 512 (teste de convergência); sobre o cabo não é aplicada a força da gravidade; o cabo está engastado em uma de suas extremidades e na outra simplesmente apoiada, como mostra a Fig. 6.2.

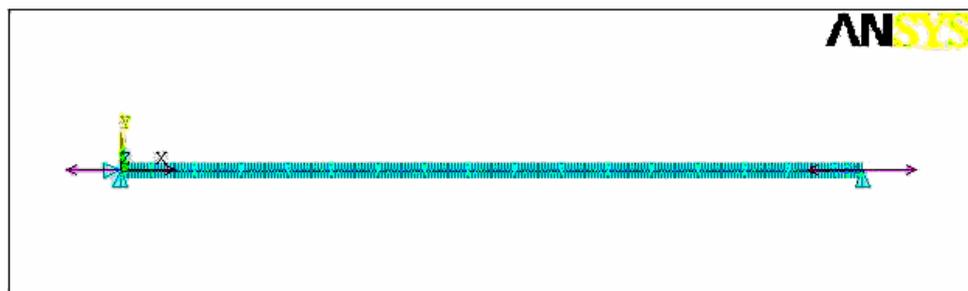


Figura 6.2 - Modelo do cabo reto tracionado.

Para se estabelecer o número de elementos da malha a ser definida no modelo numérico do cabo, foi realizada uma análise de convergência considerando 16, 32, 64, 128, 256 e 512 elementos. Este critério foi adotado em virtude de que, a partir de 16 elementos, as frequências naturais tornam-se representativas, ou seja, iniciam uma convergência com o modelo analítico e 512 elementos foi o limite superior de divisões adotado.

Esta discretização para o modelo modal convergiu em todas as frequências naturais dos modos extraídos, seguindo o critério de convergência de 0,1 % de erro relativo entre uma discretização e outra, utilizando como parâmetro comparativo o valor da nona frequência natural, que é o autovalor mais dependente da divisão da malha.

Extraíram-se do modelo, portanto, os 9 primeiros modos de vibração para as discretizações anteriormente citadas. Todas as frequências naturais obtidas são apresentadas na Tabela 6.1. A partir destes valores, foram construídas 5 curvas que mostram o comportamento de convergência de malha (Fig. 6.3).

Para se ter uma maior confiabilidade ao teste de convergência, calculou-se ainda todos os erros entre as frequências naturais consecutivas (Tab. 6.2) e construiu-se uma curva de convergência apenas para os erros calculados para o nono modo de vibração (Fig. 6.4).

Tabela 6.1 - Frequências naturais obtidas através do ANSYS em função do número de elementos.

| Modo | Freq. Natural (Hz) 16 Elem. | Freq. Natural (Hz) 32 Elem. | Freq. Natural (Hz) 64 Elem. | Freq. Natural (Hz) 128 Elem. | Freq. Natural (Hz) 256 Elem. | Freq. Natural (Hz) 512 Elem. |
|-------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 1 | 5,2905 | 5,2831 | 5,2814 | 5,2810 | 5,2809 | 5,2809 |
| 2 | 10,6390 | 10,5800 | 10,5660 | 10,5630 | 10,5620 | 10,5620 |
| 3 | 16,1040 | 15,9040 | 15,8570 | 15,8460 | 15,8440 | 15,8430 |
| 4 | 21,7450 | 21,2680 | 21,1590 | 21,1320 | 21,1260 | 21,1240 |
| 5 | 27,6210 | 26,6880 | 26,4730 | 26,4210 | 26,4090 | 26,4050 |
| 6 | 33,7860 | 32,1750 | 31,8040 | 31,7140 | 31,6920 | 31,6870 |
| 7 | 40,2880 | 37,7450 | 37,1540 | 37,0120 | 36,9780 | 36,9690 |
| 8 | 47,1470 | 43,4110 | 42,5280 | 42,3160 | 42,2640 | 42,2510 |
| 9 | 54,3410 | 49,1870 | 47,9280 | 47,6260 | 47,5520 | 47,5340 |

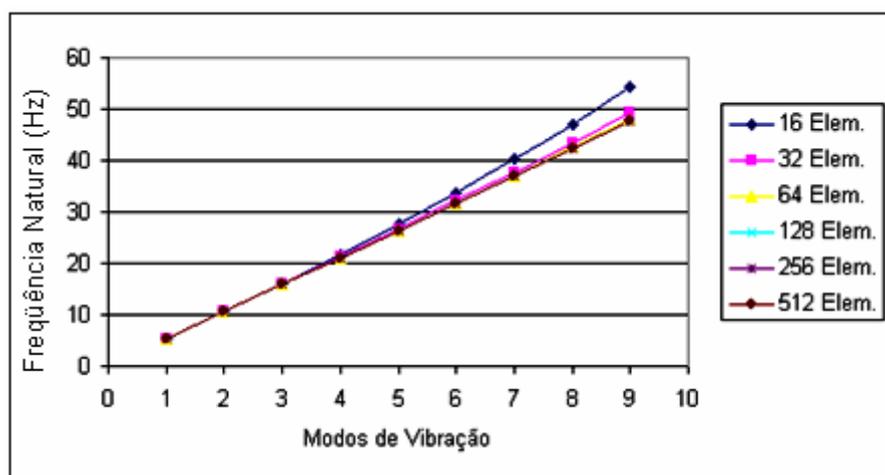


Figura 6.3 - Análise de convergência da frequência natural.

O erro relativo utilizado para definir o critério de convergência da quantidade de elementos a ser utilizada é definido a seguir, sendo que a fórmula apresentada foi utilizada na construção da Tabela 6.2.

$$E(\%) = \frac{\left| (f_n \text{ discr. ant.} - f_n \text{ discr. post.}) \right|}{f_n \text{ discr. ant.}} * 100 \quad (\%) \quad (6.2)$$

sendo $f_n \text{ discr. ant.}$ a frequência natural da discretização anterior e $f_n \text{ discr. post.}$ a frequência natural da discretização posterior.

Tabela 6.2 - Erros calculados entre as frequências naturais consecutivas.

| Modo | Erro (16-32) | Erro (32-64) | Erro (64-128) | Erro (128-256) | Erro (256-512) |
|------|--------------|--------------|---------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,14% | 0,03% | 0,01% | 0,00% | 0,00% |
| 2 | 0,55% | 0,13% | 0,03% | 0,01% | 0,00% |
| 3 | 1,24% | 0,30% | 0,07% | 0,01% | 0,01% |
| 4 | 2,19% | 0,51% | 0,13% | 0,03% | 0,01% |
| 5 | 3,38% | 0,81% | 0,20% | 0,05% | 0,02% |
| 6 | 4,77% | 1,15% | 0,28% | 0,07% | 0,02% |
| 7 | 6,31% | 1,57% | 0,38% | 0,09% | 0,02% |
| 8 | 7,92% | 2,03% | 0,50% | 0,12% | 0,03% |
| 9 | 9,48% | 2,56% | 0,63% | 0,16% | 0,04% |

Pode-se observar através da Fig. 6.3 e da Tabela 6.2 que o erro relativo às frequências naturais mais elevadas é maior e por este motivo tomou-se como referência os valores de erros obtidos para o nono modo de vibração.

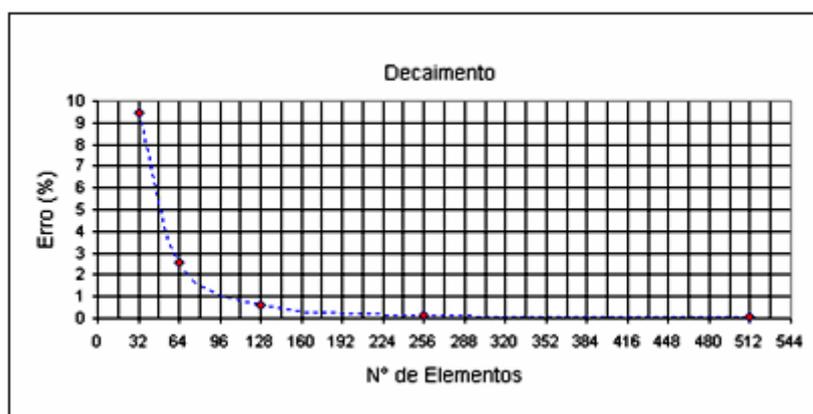


Figura 6.4 - Curva de convergência do erro versus número de elementos para o décimo modo de vibração.

A rotina utilizada pelo programa ANSYS para esta modelagem é apresentada no *Apêndice B* e a seguir, mostra-se a Tabela 6.3 na qual estão os valores de frequência natural e as formas modais para os nove primeiros modos de vibração do sistema.

Tabela 6.3 - Frequências naturais e formas modais em ANSYS.

| Modo de Vibração | Frequência Natural (Hz) | Formas Modais |
|------------------|-------------------------|---------------|
| 1 | 5,2809 | |
| 2 | 10,5620 | |
| 3 | 15,8430 | |
| 4 | 21,1240 | |
| 5 | 26,4050 | |
| 6 | 31,6870 | |
| 7 | 36,9690 | |
| 8 | 42,2510 | |
| 9 | 47,5340 | |

6.3 MODELO EXPERIMENTAL

A Fig. 6.5 mostra o arranjo utilizado no experimento realizado no Laboratório de Engenharia Civil e não está em escala, o qual é constituído de uma bancada para o estudo de vibrações eólicas em cabos de linhas de transmissão, na qual estão posicionados um acelerômetro fixado através de uma braçadeira, um dinamômetro para medir a força de tração sobre o cabo, o pré-formado e isoladores elétricos.

Nesta mesma figura, pode-se observar o *shaker* utilizado para introduzir a força de excitação, necessária para a obtenção das FRFs, o amplificador, a cabeça de impedância e o *stinger*. Por fim, o esquema mostra o analisador de sinais com dois canais, utilizado para tratamento dos dados.

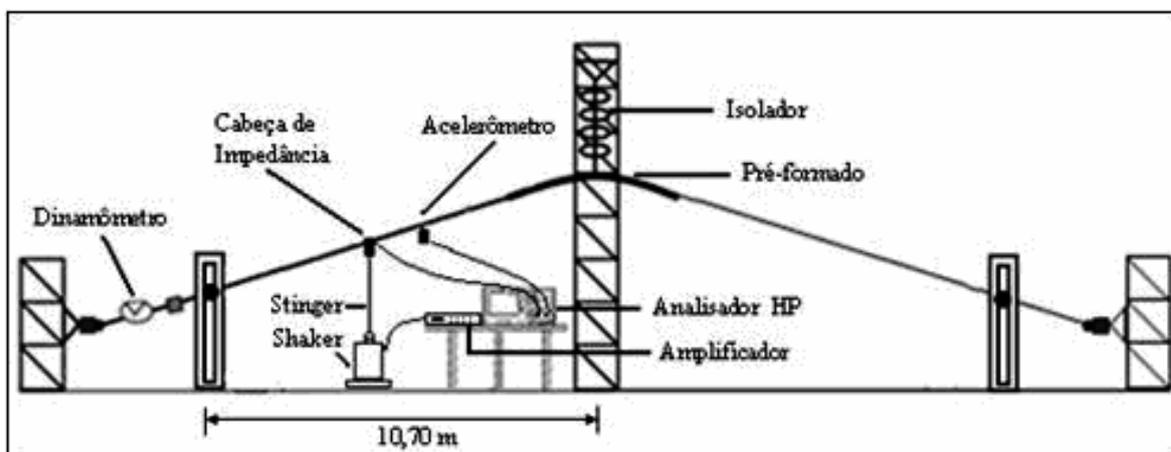


Figura 6.5 - Arranjo experimental.

Os equipamentos e materiais utilizados no teste modal são apresentados a seguir. Assim como, as especificações dos componentes estruturais que constituem a bancada de ensaios destinada à simulação e testes de vibrações em cabos de linhas de transmissão.

✓ Bancada de Ensaio para Linhas de Transmissão.

Segundo Aguilera (2005), em função de um estudo sobre diversos arranjos de bancadas já existentes para a simulação de vibração em cabos condutores, optou-se por seguir o mesmo padrão de um arranjo proposto pelo CIGRÉ (1989). A bancada foi projetada e construída pela equipe do Departamento de Engenharia Civil que utilizou como referência um trecho real da linha de transmissão que se encontra operando no sistema Guamá-Utinga (Fig. 6.6).



Figura 6.6 - Pontos de fixação da bancada (modificado, Aguilera, 2005).

✓ Cabo GROSBEAK 636

Comprimento de cabo analisado: 10,56 m

Fios de Alumínio: 26

Diâmetro do Fio de Alumínio: 3,97 mm

Fios de Aço (Alma): 7,0

Diâmetro do Fio de Aço: 3,07 mm

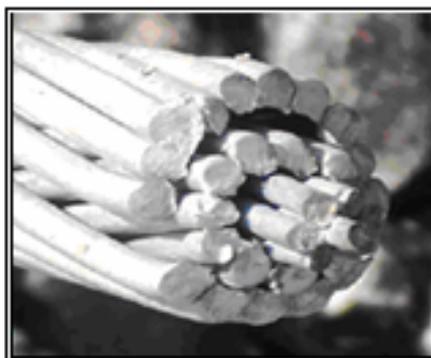


Figura 6.7 - Cabo GROSBEAK 636 (modificado, Aguilera, 2005).

✓ Dinamômetro

Proprietário: Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A

Numero de Série: 4554

Capacidade Máxima: 2000 kgf

Precisão: 1 % da capacidade total

Diâmetro: 270 mm

Peso: 4 kg



Figura 6.8 - Dinamômetro circular.

✓ Acelerômetro

As especificações do acelerômetro (Fig.6.9) utilizado para a aquisição do sinal oriundo do cabo, seguem abaixo:

Fabricante: PCB Piezo Eletronic.

Modelo: 352B68

Número de Série: 7300

Sensibilidade: 104,5 mV/g

Faixa de Freqüência: 1 – 7000 Hz

Nível de Polarização da Saída: 11,0 V

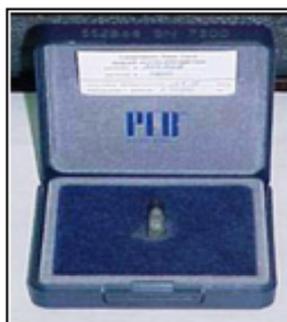


Figura 6.9 - Acelerômetro.

✓ Cabeça de Impedância

A cabeça de impedância (Fig. 6.10) possui duas saídas, na qual uma é destinada à medição de força, em virtude deste aparato apresentar uma célula de carga e outra se destina à medição de aceleração, por apresentar um acelerômetro axial.

Fabricante: Brüel & Kjaer

Modelo: 8001

Número de Série: 10320

Sensibilidade de referência: 50 Hz

Faixa de Frequência: 1 – 10000 Hz

Peso: 31 g



Figura 6.10 - Cabeça de impedância.

✓ Pré-Amplificadores

Fabricante: *Brüel & Kjaer*

Modelo: 2647^a



Figura 6.11 - Pré-amplificadores.

✓ *Shaker*

Fabricante: *Brüel & Kjaer*

Modelo: 4808

Número de Série: 2546758

Faixa de Frequência: 5 Hz a 10 kHz

Força Máxima: 112 N

Corrente Máxima de Entrada: 15 Arms

Diâmetro/ Altura: 215 mm / 200 mm

Peso: 35 kg



Figura 6.12 - *Shaker*.

✓ Amplificador

Fabricante: *Brüel & Kjaer*

Modelo: 2719

Faixa de Freqüência: 40 a 10 kHz

Potência de Saída: 180 VA a 0,8 Ω

Voltagem de Saída: 12 V



Figura 6.13 - Amplificador.

✓ Analisador de Sinais

O analisador dinâmico de sinais utilizado no experimento é o *Hewlett-packard - 35665A* (Fig. 6.14), com o algoritmo da *fast Fourier Transform* e dois canais (analisador de espectro e de rede). As suas características podem ser observadas abaixo:

Fabricante: *Hewlett-Packard*

Modelo: 35665A

Faixa de Freqüência: 244 μ Hz - 102,4 kHz

Memória Interna: 1,44 Mb

Velocidade de Processamento: 8 Traços/s

Média Rápida: 12,8 kHz



Figura 6.14 - Analisador dinâmico de sinais com dois canais.

6.3.1 Procedimentos do Ensaio

Depois de calculada a curva de correção para o dinamômetro, a bancada para o estudo de vibrações em cabos foi montada com onze isoladores em sua coluna central (Fig. 6.15) e o cabo tracionado com uma força de 16.167,47 N.



Figura 6.15 - Coluna central da bancada.

Em virtude de limitações físicas, como por exemplo, o comprimento do cabo BNC que conecta o acelerômetro ao analisador de sinais apenas uma parte do cabo foi numerada e dividida em 32 segmentos de tamanhos iguais a 0,33 m. O acelerômetro foi fixado no cabo Grosbeak por meio da adaptação de uma braçadeira metálica (Fig. 6.16).



Figura 6.16 - Fixação do acelerômetro.

O conjunto *shaker*, *stinger* e cabeça de impedância foram fixados a uma distância de 2,80 m da primeira marcação (Fig. 6.17), gerando mais um ponto de medição (ponto 10). A cabeça de impedância deve estar posicionada em um lugar no qual não haja existência de nenhum dos pontos nodais da estrutura, evitando que ocorra uma falha na aquisição das FRF's e conseqüentemente falhas na obtenção dos parâmetros modais.



Figura 6.17 - Fixação do conjunto excitador.

As subdivisões geraram 34 pontos, dos quais é importante ressaltar que o primeiro e o último são considerados os apoios da estrutura. Por este motivo adota-se que eles não possuem deslocamentos transversais.

No teste modal, a força de excitação exercida pelo *shaker* manteve-se fixa no ponto 10, enquanto que a posição da resposta obtida através do acelerômetro deslocou-se ao longo do cabo. Entretanto, o teste modal pode ser realizado de maneira inversa, visto que a matriz modal obtida é simétrica.

Assim, segundo Soeiro (2003), uma linha da matriz de aceleração ou inércia, contém os mesmos parâmetros modais que uma coluna da mesma.

Para a validação dos resultados obtidos na análise o analisador dispõe ainda da função de coerência (Fig. 6.18) que permite inferir a qualidade da FRF medida. O valor desta função oscila de zero a um e decai se o sinal obtido apresentar ruído ou não-linearidade no sistema. O analisador de sinais foi configurado para 100 (cem) médias em cada ponto do cabo e uma faixa de frequência de 100 Hz.

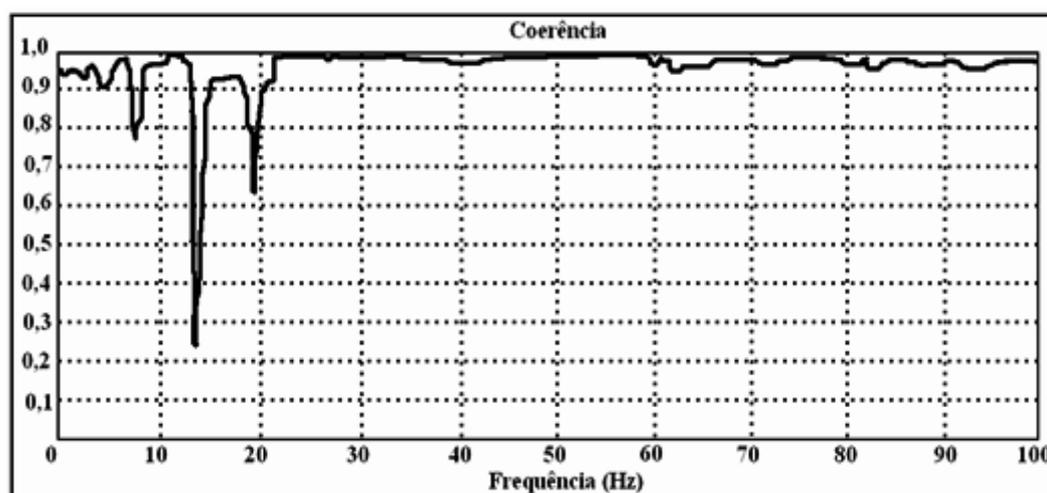


Figura 6.18 - Coerência Pontual.

As Figs. 6.19 e 6.20 mostram, respectivamente, uma FRF pontual e uma de transferência.

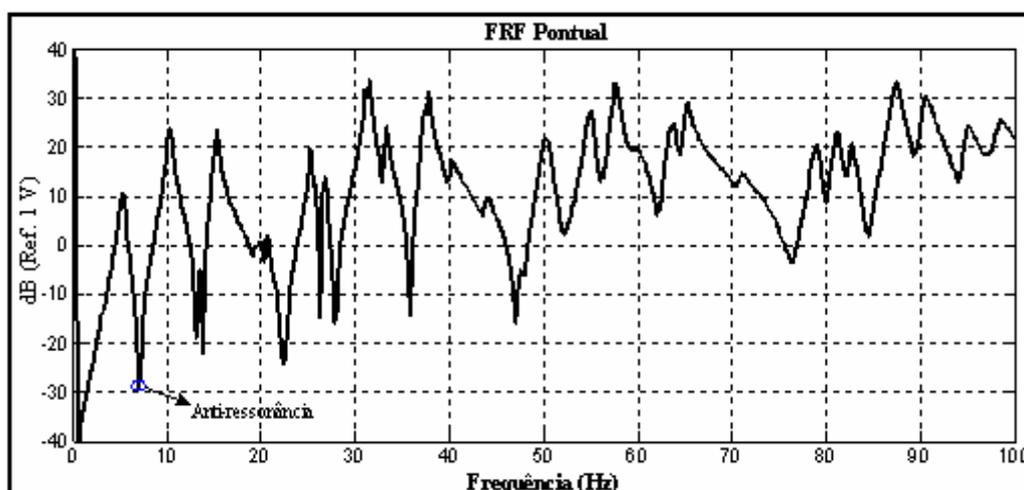


Figura 6.19 - Função de resposta em frequência pontual.

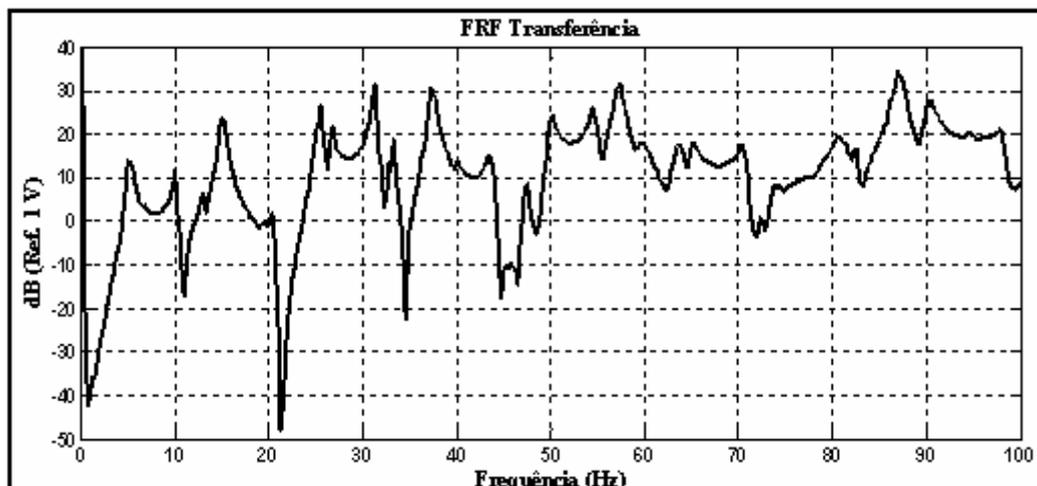


Figura 6.20 - Função de resposta em frequência de transferência.

6.3.2 Tratamento dos Dados Experimentais

Depois de realizadas todas as medições no cabo, os dados foram armazenados em um disquete em formato “dat”, o qual foi levado para o Grupo de Vibrações e Acústica, onde os arquivos foram convertidos para o formato universal “uf”, através do programa conversor “SDFTO58.exe”, que é fornecido pelo próprio fabricante do analisador de sinais *Hewlett-packard (HP)*.

Para a extração dos parâmetros modais do cabo analisado, utilizou-se o *software LMS Test.Lab 4B* e o método aplicado foi o *Polymax*, que é uma evolução do método *LSCF (Least Squares Complex Frequency-Domain)*.

A vantagem deste método é que ele possui um diagrama de estabilização mais “limpo” do que o método *LSCE (Least Squares Complex Exponential)*, ou seja, o método converge de maneira mais exata.

Outra diferença entre os dois métodos é que o *LSCE* atua inicialmente no domínio do tempo, utilizando as funções de resposta impulsivas (FRI's), na determinação dos coeficientes do polinômio usado na determinação dos autovalores e autovetores, já o método *Polymax* atua nesta etapa dos cálculos, com as funções de resposta em frequência (FRF's).

A seguir pode-se observar o modelo geométrico (Fig. 6.21) e o diagrama de estabilização (Fig. 6.22), obtidos para o ensaio através do método *Polymax*.

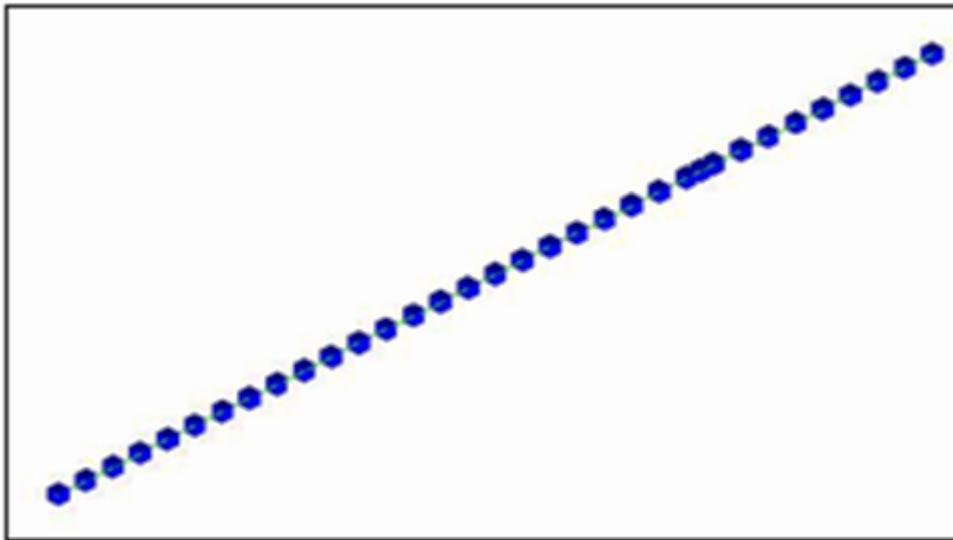


Figura 6.21 - Modelo geométrico.

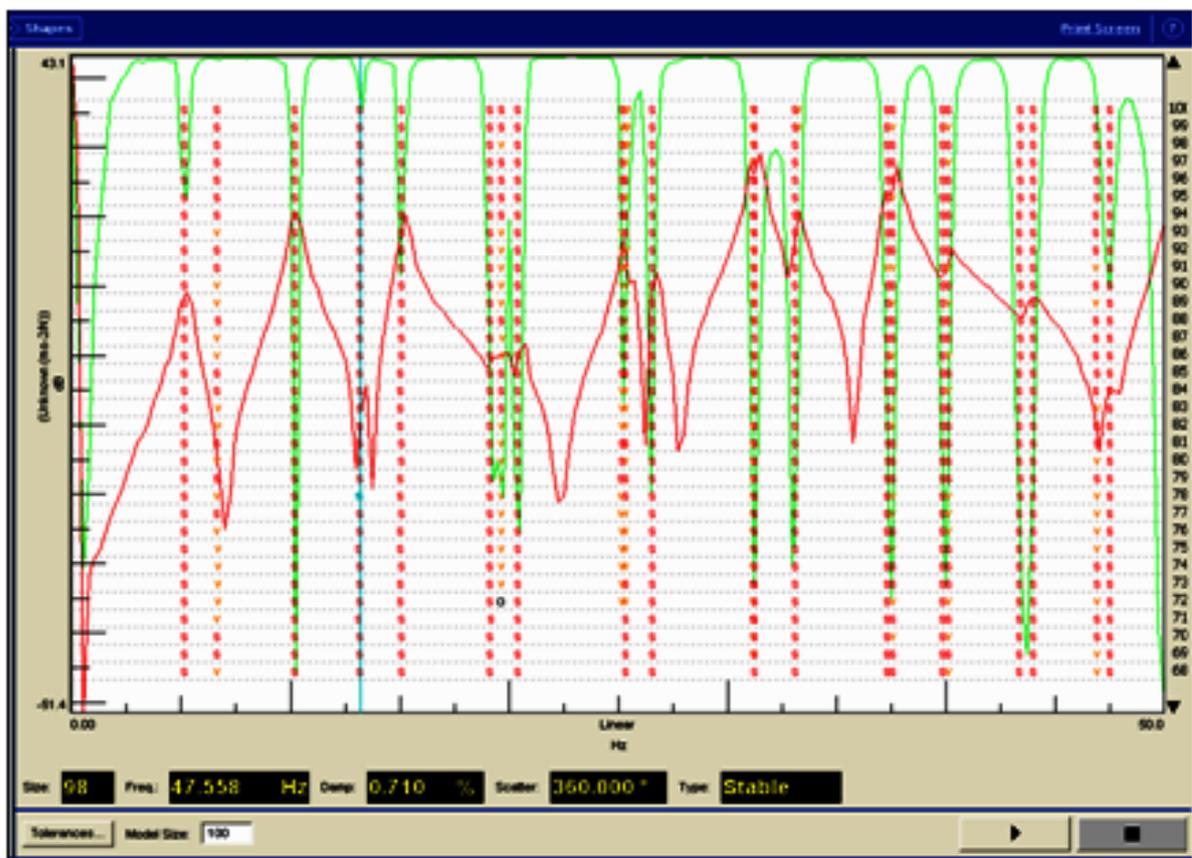
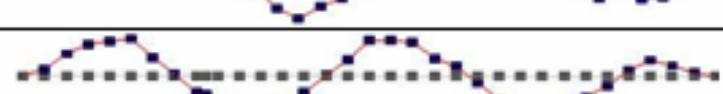
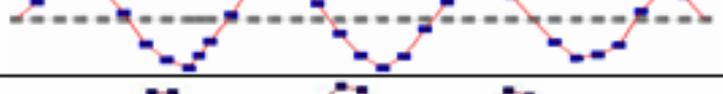


Figura 6.22 - Diagrama de estabilização do método *polimax*, FRF pontual.

As frequências naturais, os modos e as formas modais do cabo são apresentados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 - Frequências naturais e formas modais em Test.Lab.

| Modo de Vibração | Frequência Natural (Hz) | Formas Modais |
|------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 5,1928 |  |
| 2 | 10,2147 |  |
| 3 | 15,0726 |  |
| 4 | 20,4673 |  |
| 5 | 25,3526 |  |
| 6 | 31,2109 |  |
| 7 | 37,6280 |  |
| 8 | 43,9028 |  |
| 9 | 47,3302 |  |

Aguilera (2005) relata que em testes modais as formas modais sofrem influência dos seguintes fatores:

- ✓ discretização do sistema em análise que deve possuir o número de pontos no mínimo igual a duas vezes o número de modos a serem visualizados mais um;
- ✓ o aparecimento de modos complexos devido à presença de amortecimentos não proporcionais e outras não-linearidades do sistema que geram defasagem entre os pontos, fazendo surgir modos não uniformes.

Além dos fatores citados, é importante ressaltar que o ruído que penetra no sinal medido através de folgas na montagem do arranjo experimental, interfere diretamente nos modos de frequência mais baixas o que pode ser facilmente constatado através da função de coerência.

6.3.3 Dados Analíticos Obtidos em MATLAB

Para o cálculo no ambiente MATLAB utilizou-se a equação da corda vibrante (Eq. 6.3):

$$\omega = \frac{n\pi}{l} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (6.3)$$

sendo n correspondente ao modo de vibração, l ao comprimento do cabo, T a tração aplicada no cabo e μ a densidade linear do condutor (NBR-7270, 1989). A rotina utilizada em MATLAB para o cálculo das frequências naturais é apresentada no *Apêndice C* e os valores encontrados para os nove primeiros modos de vibração são apresentados na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 - Frequências naturais analíticas, calculadas em ambiente MATLAB.

| Modo de Vibração | Frequência Natural (Hz) |
|------------------|-------------------------|
| 1 | 5,2762 |
| 2 | 10,5524 |
| 3 | 15,8286 |
| 4 | 21,1048 |
| 5 | 26,3810 |
| 6 | 31,6572 |
| 7 | 36,9334 |
| 8 | 42,2960 |
| 9 | 47,4858 |

Para finalizar a análise de resultados são apresentados respectivamente nas Tabelas 6.6, 6.7 e 6.8 os erros percentuais entre os resultados analíticos e experimentais, entre resultados numéricos e experimentais e entre resultados numéricos e analíticos.

Tabela 6.6 - Frequências naturais analítica e experimental.

| Modo de Vibração | Frequência Natural Analítica (Hz) | Frequência Natural Experimental (Hz) | Erro (%) |
|------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|----------|
| 1 | 5,2762 | 5,1928 | 1,58 |
| 2 | 10,5524 | 10,2147 | 3,20 |
| 3 | 15,8286 | 15,0726 | 4,78 |
| 4 | 21,1048 | 20,4673 | 3,02 |
| 5 | 26,3810 | 25,3526 | 3,90 |
| 6 | 31,6572 | 31,2109 | 1,41 |
| 7 | 36,9334 | 37,6280 | 1,88 |
| 8 | 42,2960 | 43,9028 | 3,80 |
| 9 | 47,4858 | 47,3302 | 0,33 |

Tabela 6.7 - Frequências naturais numérica e experimental.

| Modo de Vibração | Frequência Natural Numérica (Hz) | Frequência Natural Experimental (Hz) | Erro (%) |
|-------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------|
| 1 | 5,2809 | 5,1928 | 1,67 |
| 2 | 10,5620 | 10,2147 | 3,29 |
| 3 | 15,8430 | 15,0726 | 4,86 |
| 4 | 21,1240 | 20,4673 | 3,10 |
| 5 | 26,4050 | 25,3526 | 3,99 |
| 6 | 31,6870 | 31,2109 | 1,50 |
| 7 | 36,9690 | 37,6280 | 1,78 |
| 8 | 42,2510 | 43,9028 | 3,91 |
| 9 | 47,5340 | 47,3302 | 0,43 |

Tabela 6.8 - Frequências naturais numérica e analítica.

| Modo de Vibração | Frequência Natural Numérica (Hz) | Frequência Natural Analítica (Hz) | Erro (%) |
|-------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|-----------------|
| 1 | 5,2809 | 5,2762 | 0,09 |
| 2 | 10,5620 | 10,5524 | 0,09 |
| 3 | 15,8430 | 15,8286 | 0,09 |
| 4 | 21,1240 | 21,1048 | 0,09 |
| 5 | 26,4050 | 26,3810 | 0,09 |
| 6 | 31,6870 | 31,6572 | 0,09 |
| 7 | 36,9690 | 36,9334 | 0,10 |
| 8 | 42,2510 | 42,2960 | 0,11 |
| 9 | 47,5340 | 47,4858 | 0,10 |

Apesar das condições criadas em laboratório não reproduzirem fielmente as condições reais de uma linha de transmissão, devido principalmente a limitações de espaço físico e a montagem do aparato técnico, os resultados obtidos nesta análise com a bancada de ensaios do Laboratório de Construção Civil da Universidade Federal do Pará apresentaram-se bastante satisfatórios. Observa-se que os valores de erro percentual resultantes da comparação entre os valores numérico e analítico são extremamente pequenos. Os valores experimentais, quando comparados aos analíticos, apresentam erros maiores, porém aceitáveis, diante das limitações antes mencionadas e para cálculos de engenharia.

6.4 MODELO NUMÉRICO PARA UM CABO DESENHADO ATRAVÉS DA EQUAÇÃO DA PARÁBOLA

Este modelo representa mais uma etapa de evolução para se chegar à modelagem de um vão real de linha aérea de transmissão (condutores, espaçadores-amortecedores e acessórios

de linha de transmissão). Com a finalidade de reproduzir o comportamento de um vão real de linha de transmissão, para a primeira etapa de construção deste modelo foi adotado o comprimento de vão (l_v) de 450 m e a equação da parábola. Para a determinação dos coeficientes da equação da parábola foram adotados os pontos P_1 , P_2 e P_3 . Considerando que o primeiro ponto encontra-se na origem dos eixos x e z , que o segundo está localizado no centro do vão transladado, no ponto de flecha máxima do condutor (f_m), e o terceiro na outra extremidade do vão (Fig. 6.23) pode-se obter através do procedimento matemático a seguir os valores dos coeficientes da parábola em função do comprimento e da flecha máxima do vão. A equação da parábola é dada pela Eq. (6.4):

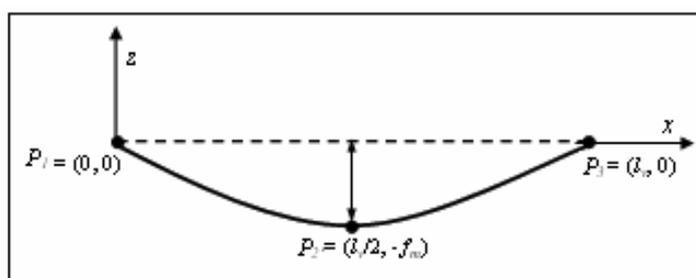


Figura 6.23 - Forma da parábola.

$$z(x) = a_p x^2 + b_p x + c_p \quad (6.4)$$

Se substituirmos o ponto P_1 nesta equação chegar-se a conclusão que o termo independente da parábola (c_p) é igual a zero. Então, ao substituirmos os pontos P_2 e P_3 encontremos um simples sistema do primeiro grau que nos fornecerá o coeficiente angular (a_p) e o coeficiente linear (b_p) como apresentado, respectivamente, pelas Eqs. (6.5) e (6.6). Logo, pode-se reescrever a Eq. (6.4) substituindo seus coeficientes e obter a Eq. (6.7).

$$a_p = \frac{4f_m}{l_v^2} \quad (6.5)$$

$$b_p = \frac{-4f_m}{l_v} \quad (6.6)$$

$$z(x) = \frac{4f_m}{l_v^2} x^2 - \frac{4f_m}{l_v} x \quad (6.7)$$

A flecha máxima pode ser calculada por meio da Eq. (6.8), a qual é descrita em Labegolini *et al.*, (1992) e depende do peso por unidade de comprimento (w), do comprimento do vão (l_v) e da Tração aplicada no condutor (T):

$$f_m = \frac{wl_v^2}{8.T} \quad (6.8)$$

Para a etapa seguinte do modelo numérico foram utilizados mais dois elementos da biblioteca do ANSYS, além do elemento Link8 que foi utilizado no modelo anterior. O primeiro foi o elemento BEAM189, que é um elemento de pórtico espacial formado por 3 nós (“I”, “J” e “K”) e possui 6 graus de liberdade por nó. Um nó adicional (“L”) é utilizado para orientação espacial, conforme mostrado na Fig. 6.24. O eixo longitudinal do elemento é definido como “x” com a seção transversal pertencente ao plano “yz”. Este elemento foi aplicado na construção do condutor, principalmente, para permitir a incorporação do efeito de não-linearidade geométrica apresentado pelo mesmo.

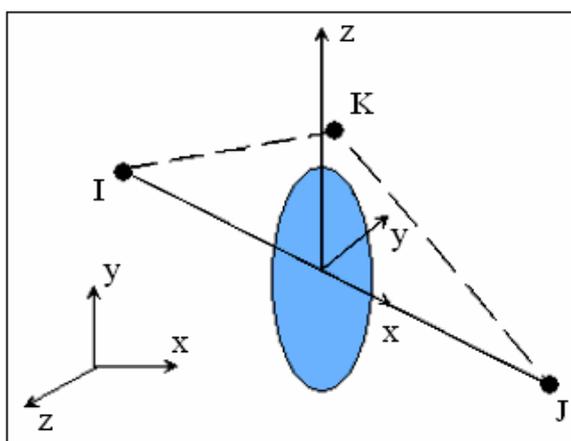


Figura 6.24 - Geometria do elemento BEAM189.

O segundo foi o elemento COMBIN14, utilizado no modelo na construção de molas para a representação da continuidade da linha de transmissão nas extremidades do vão considerado. Este elemento possui capacidade de aplicação longitudinal ou torcional de forças em até três dimensões (Fig. 6.25). A opção de mola-amortecedor longitudinal representa um elemento uniaxial de tração-compressão com três graus de liberdade em cada nó: translações nas direções nodais x , y e z . Flexões ou carregamentos axiais não são considerados. Este elemento possui dois nós, uma constante elástica k e coeficientes de amortecimento c_1 e c_2 .

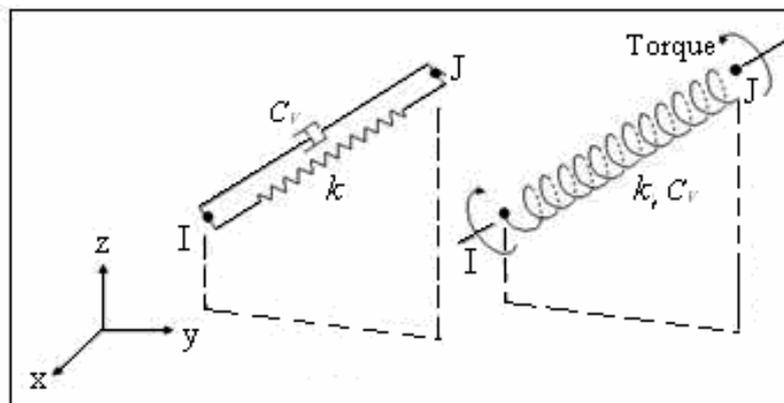


Figura 6.25 - Geometria do elemento COMBIN14.

Os elementos BEAM189 e COMBIN14 permitiram a sofisticação do modelo através da incorporação dos efeitos de não-linearidade geométrica, que a linha de transmissão sofre no momento em que é submetida à tração e a rigidez dos vãos adjacentes. O elemento LINK8, que havia sido utilizado anteriormente na construção do condutor, foi usado para criar um isolador equivalente para sustentar o condutor. Para complementar este modelo foi inserida a aceleração da gravidade.

Finalmente, é realizada uma análise estática não-linear para incorporar as tensões provocadas pelo peso próprio do sistema e na seqüência a análise modal é realizada com 512 elementos, valor este encontrado também por um teste de convergência que seguiu os mesmos critérios do realizado para o cabo esticado (reto). A rotina criada em ambiente ANSYS para a realização desta modelagem está disponível no *Apêndice D* e a Fig. 6.26 mostra esquematicamente a forma geométrica do modelo construído (fora de escala).

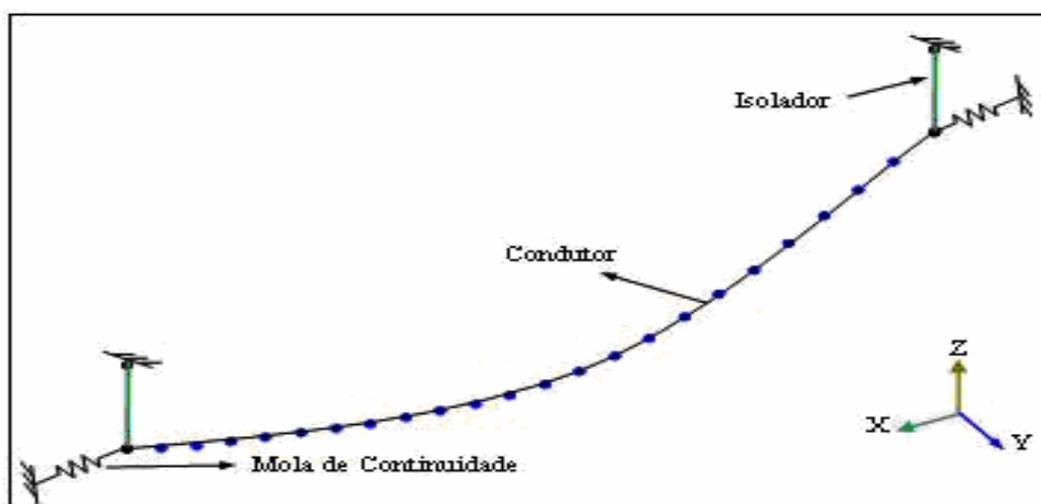
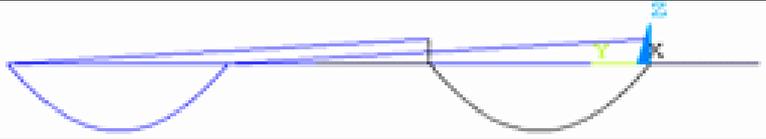
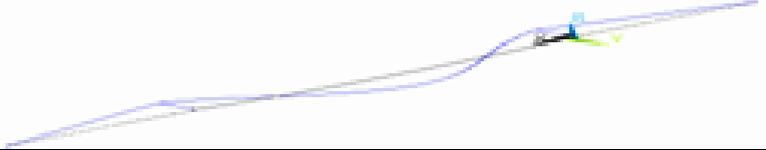
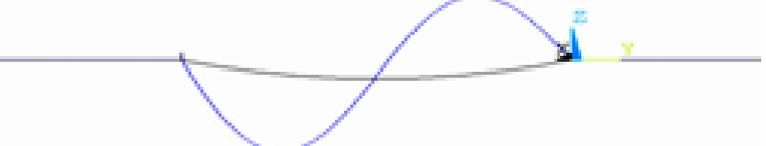
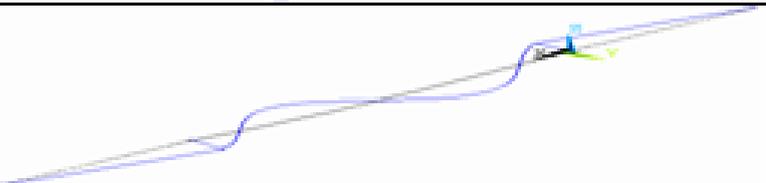
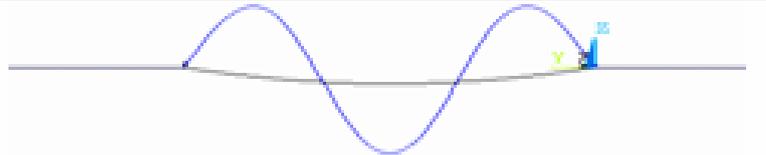
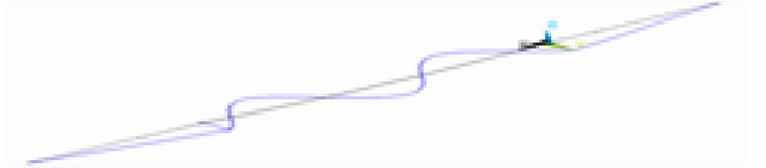
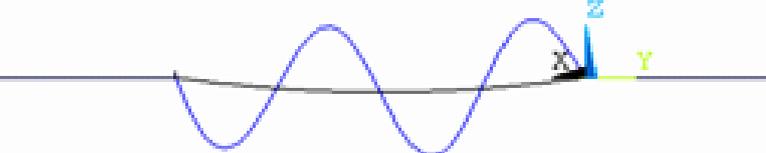


Figura 6.26 - Modelo esquemático do cabo desenhado.

A Tabela 6.9 apresenta os valores de frequência natural e as formas modais para os nove primeiros modos de vibração do sistema.

Tabela 6.9 - Frequências naturais e formas modais do condutor desenhado em parábola.

| Modo de Vibração | Frequência Natural (Hz) | Formas Modais |
|------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 0,96161E-04 |  |
| 2 | 0,15398 |  |
| 3 | 0,19661 |  |
| 4 | 0,30903 |  |
| 5 | 0,34215 |  |
| 6 | 0,46159 |  |
| 7 | 0,51551 |  |
| 8 | 0,62330 |  |
| 9 | 0,63123 |  |

6.5 MODELO NUMÉRICO PARA UM FEIXE DE QUATRO CONDUTORES DESENHADO ATRAVÉS DA EQUAÇÃO DA PARÁBOLA

Este modelo tem sua construção baseada no modelo numérico para um cabo desenhado através da equação da parábola. Para dar continuidade à evolução do modelo numérico-computacional e chegar ao nível de desenvolvimento esperado, que é o mais próximo possível do comportamento real de um feixe de condutores, o modelo desta seção está associado a um trecho de linha de transmissão real, Tucuruí - Marabá, localizado na travessia sobre a PA - 150 na estaca 1728 progressiva - 220 345,95. O trecho modelado da linha de transmissão compreende os seguintes itens: um vão de condutores elétricos, com quatro cabos, acoplados uns aos outros por sete espaçadores-amortecedores e sustentados por dois conjuntos de cadeias de isoladores, com 24 isoladores por conjunto. A Fig. 6.27 mostra de forma esquemática, o trecho de linha de transmissão sobre o qual foi construído o modelo estrutural em estudo e no capítulo 7 será apresentado em detalhes o espaçador-amortecedor, a coluna de sustentação e o cálculo da rigidez dos vão adjacentes.

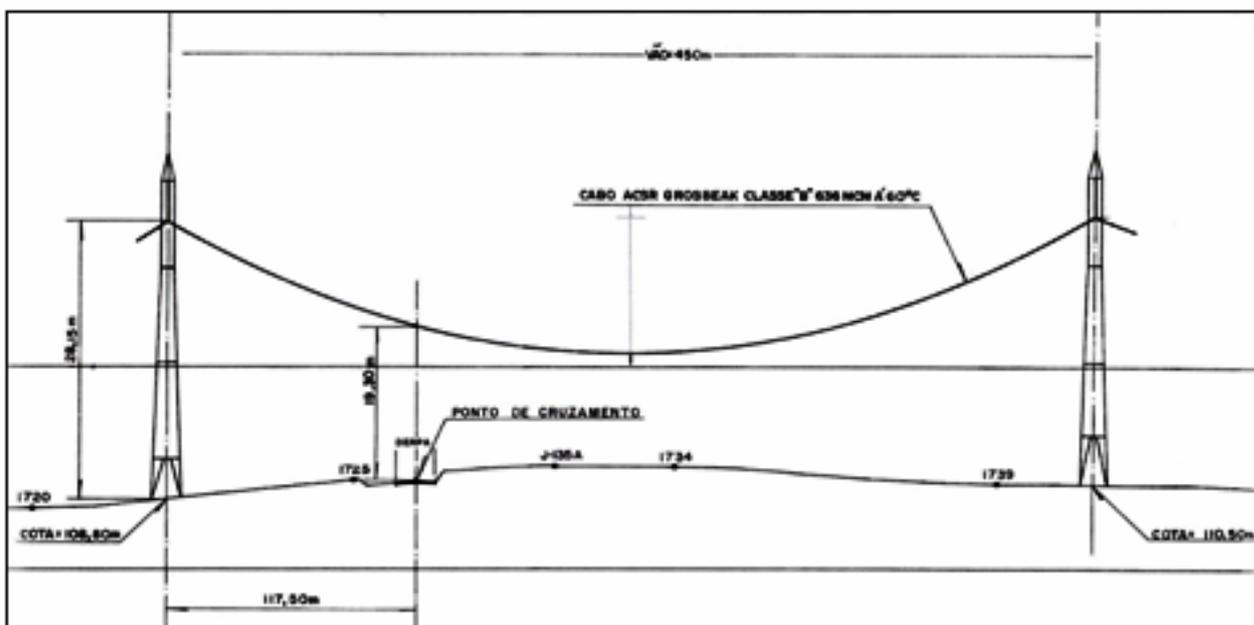


Figura 6.27 - Desenho do trecho da linha de transmissão em estudo.

O sistema estrutural descrito anteriormente é modelado através do Método dos Elementos Finitos (MEF). A representação do comportamento físico dos elementos estruturais do trecho modelado da linha de transmissão dá-se a partir de quatro tipos de elementos finitos pertencentes à biblioteca de elementos do programa ANSYS. As cadeias de isoladores são

consideradas pinadas em suas extremidades. Esse fato indica que o elemento finito adequado para representá-las é o de treliça espacial (LINK8), com dois nós, que possui três graus de liberdade por nó. Neste caso, apenas os esforços axiais são considerados.

Os condutores possuem uma rigidez à flexão relativamente baixa frente aos comprimentos considerados e não possuem rigidez alguma à compressão, pois sofreriam flambagem perante aplicação de cargas muito pequenas. Por este motivo outros tipos de elementos foram pesquisados para que baixos valores não fossem inseridos na matriz de rigidez geométrica do sistema, o que causaria uma instabilidade numérica. Dessa forma, para a representação dos cabos condutores é empregado o elemento de pórtico espacial (BEAM189) de três nós com seis graus de liberdade por nó. Este elemento, além de possibilitar a estabilidade numérica da solução, também se mostra mais adequado para a representação da geometria inicial adotada para os cabos (arco de parábola). Para a construção dos espaçadores-amortecedores foram utilizados elementos de viga (BEAM4). E, como no modelo anterior, foi utilizado o elemento de mola (COMBIN14) para representar a rigidez dos vãos adjacentes. Abaixo, a Fig. 6.28 apresenta de forma esquemática e fora de escala o sistema modelado.

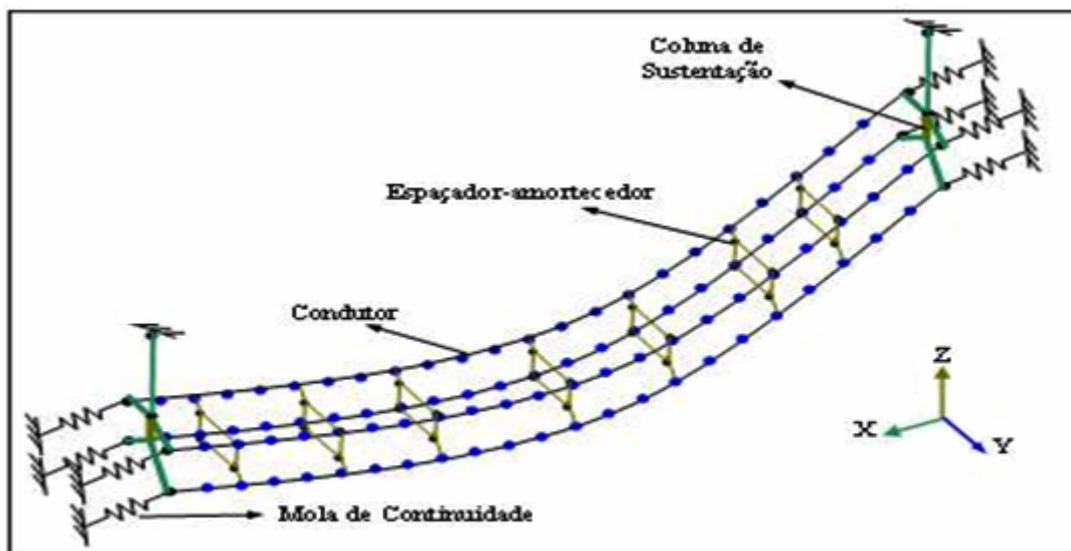


Figura 6.28 - Modelo esquemático do feixe de condutores construído.

6.5.1 Análise Modal do Sistema

A análise realizada mostrou que o comportamento modal para quatro cabos se assemelha muito ao de apenas um cabo. Os primeiros 200 modos calculados encontram-se em

uma faixa de frequência de 0,15 a 4,82 Hz , o que demonstra que o sistema possui uma alta densidade modal. Para exemplificar este comportamento são apresentados o primeiro modo de vibração do conjunto que é de corpo rígido no plano “yz” (Fig. 6.29), o segundo modo que apresenta vibração longitudinal também no plano “xz” (Fig. 6.30), o terceiro modo que apresenta uma vibração combinada de flexão dos condutores com as colunas de sustentação vibrando fora de fase no plano “xy” (Fig. 6.31) e as respectivas frequências naturais de cada forma modal. A rotina computacional desenvolvida para a modelagem deste sistema é construída com base na rotina apresentada no *Apêndice D*.

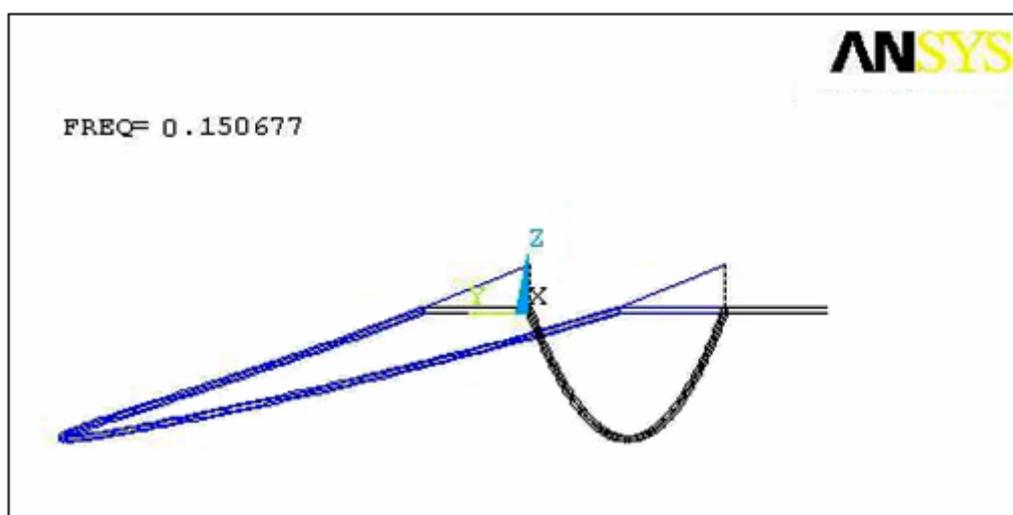


Figura 6.29 - Primeira forma modal do sistema no plano yz.

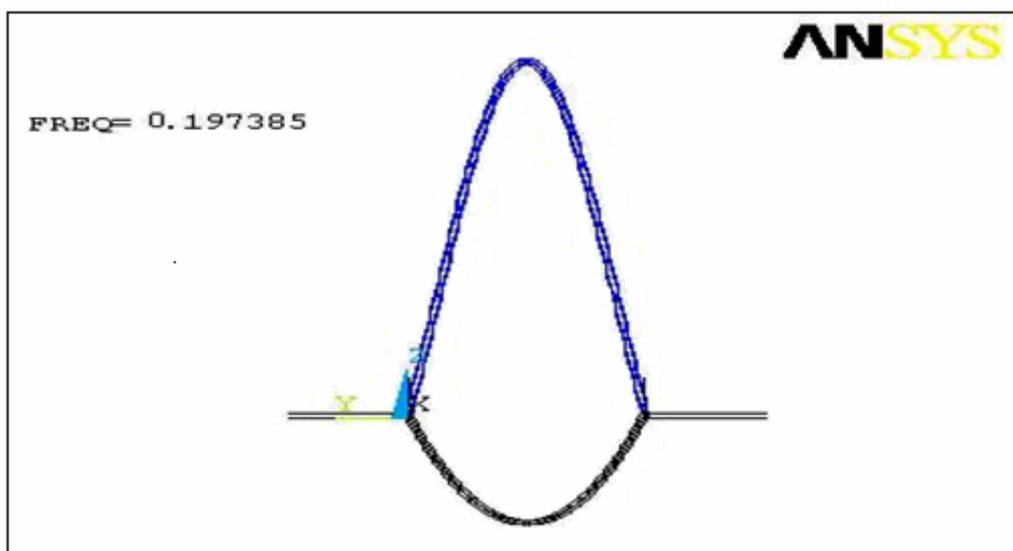


Figura 6.30 - Segunda forma modal do sistema no plano xz.

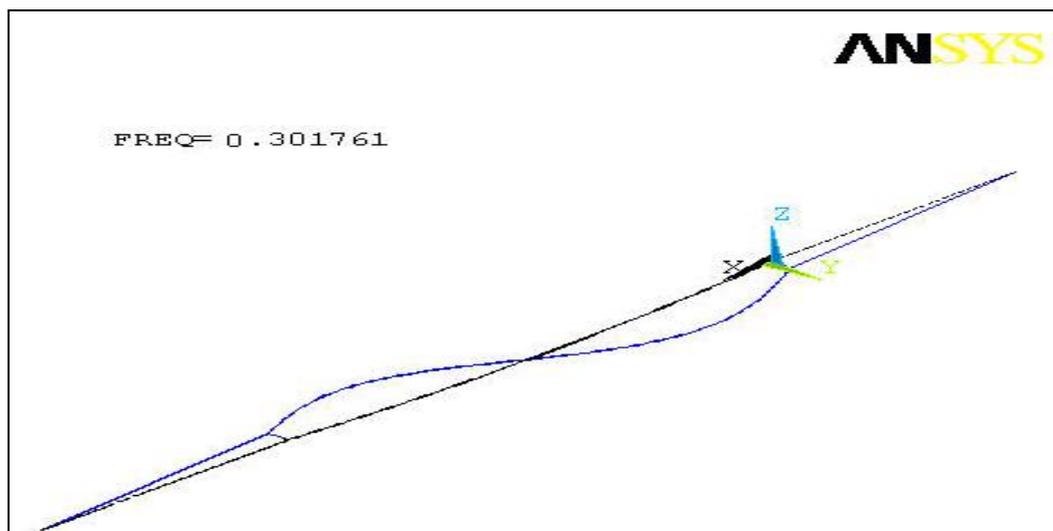


Figura 6.31: Terceira forma modal do sistema no plano xy.

6.6 CONSIDERAÇÕES

Inicialmente, este capítulo preocupou-se em construir uma base sólida para a construção de um modelo numérico que pudesse reproduzir o comportamento de um vão de linha de transmissão de quatro condutores. Para isto, desenvolveu-se um algoritmo baseado no método dos elementos finitos, criado para a modelagem de um único condutor reto e tracionado considerando a análise do sistema linear, o qual apresentou bons resultados. Este modelo inicial foi validado experimentalmente no Laboratório de Engenharia Civil da UFPA em uma bancada de ensaios de condutores de linha de transmissão. Mas, como o modelo precisava ser mais sofisticado, evoluiu para um cabo desenhado através da equação da parábola e a análise passou a levar em consideração a não-linearidade geométrica do sistema.

Os resultados foram bastante satisfatórios e permitiram a execução da etapa seguinte que foi a construção do modelo de múltiplos condutores separados por espaçadores-amortecedores. Esta análise mostrou que o comportamento modal para quatro cabos se assemelha muito ao de apenas um cabo e que o sistema possui uma alta densidade modal, pois os primeiros 200 modos calculados se localizaram em uma faixa de frequência de 0,15 a 4,82 Hz.

CAPÍTULO 7 - ANÁLISE NUMÉRICA DINÂMICA DE UM FEIXE DE CONDUTORES SUBMETIDO AO CARREGAMENTO DE VENTO

7.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo mostra a análise dinâmica do modelo numérico para um feixe de condutores criado no capítulo anterior. O modelo é submetido à parcela média de carregamento do vento e à parcela variável, a qual é inserida no processo como uma função do tempo. Apresenta-se ainda como é calculada a rigidez da mola que representa os vãos adjacentes. Para se chegar ao resultado final da análise, que tem como objetivo a verificação das forças e tensões a que estão submetidos os condutores, foi necessário dividi-la em três etapas consecutivas, as quais estão bem definidas ao longo do capítulo.

7.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO E CARREGAMENTOS APLICADOS

A solução numérica completa do sistema estrutural dos condutores analisados envolve várias etapas de carregamento:

- ✓ 1ª Etapa: As forças gravitacionais são aplicadas gradualmente, sendo a configuração final dos cabos obtida a partir de uma análise não-linear estática.
- ✓ 2ª Etapa: As forças aerodinâmicas correspondentes à parcela média da velocidade do vento são aplicadas aos cabos a partir de forças nodais. A configuração de equilíbrio é obtida, mais uma vez, a partir da solução não-linear estática do problema.
- ✓ 3ª Etapa: A parcela variável das forças de vento é incluída na análise como uma função arbitrária do tempo. É processada, então, a solução da análise dinâmica em regime transiente.

Cabe ressaltar que não foi utilizado um procedimento numérico específico para a protensão dos cabos condutores. A geometria inicial adotada para os cabos foi escolhida de forma que a flecha final fosse obtida após a primeira fase da análise.

A etapa inicial da análise recebeu cuidados especiais na especificação das condições de contorno. Isso ocorreu porque, inicialmente, os condutores não se encontram tracionados. Nessa etapa, é necessário restringir os deslocamentos horizontais ortogonais à linha de transmissão para prevenir a entrada de elementos nulos na diagonal da matriz de rigidez do sistema. A Fig. 7.1 (fora de escala) apresenta as condições de contorno no início da análise.

Após a aplicação do peso próprio do sistema, os condutores encontram-se tracionados, o que faz com que a matriz de rigidez passe a ter termos não singulares associados aos graus de liberdade horizontais e ortogonais ao eixo da linha de transmissão. Na segunda etapa da análise, os deslocamentos translacionais restritos na primeira etapa são liberados (enquanto as demais condições são mantidas) e a parcela média do carregamento produzido pelo vento é incluída ao sistema a partir de forças nodais, como mostrado na Fig. 7.2 (fora de escala).

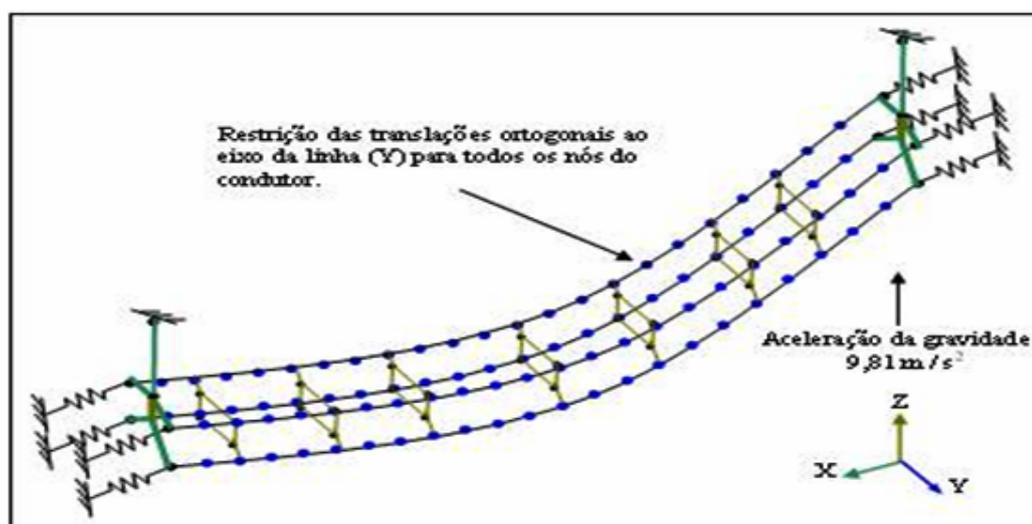


Figura 7.1 - Condições de contorno e carregamento da 1ª etapa de análise.

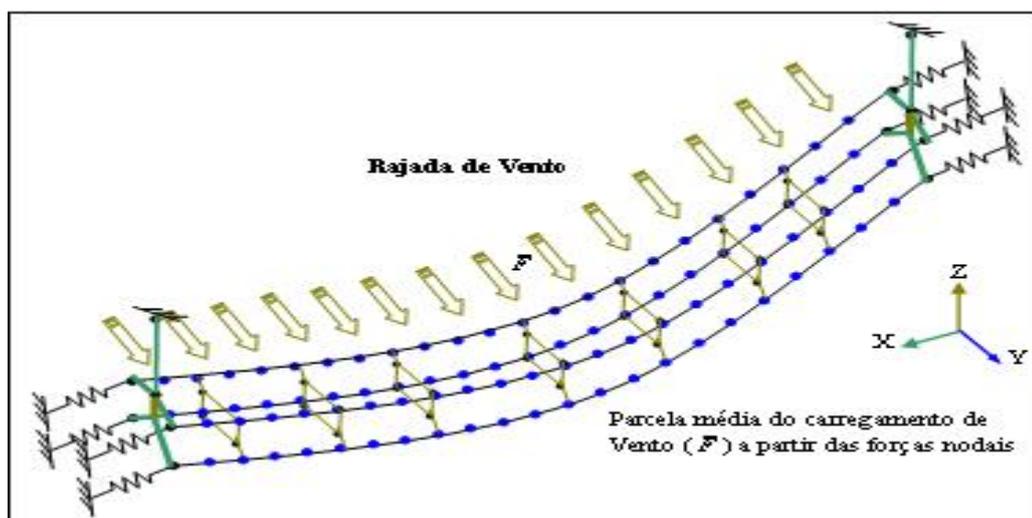


Figura 7.2 - Condições de contorno e carregamento da 2ª etapa de análise.

A terceira etapa de análise diz respeito à inclusão da parcela variável das forças de vento, tomadas como processos não-determinísticos, as quais são especificadas a partir de uma função arbitrária no tempo, de acordo com a Fig. 7.3 (fora de escala). É importante

lembrar que o modelo numérico-computacional desenvolvido neste estudo inclui somente um vão constituído de quatro condutores ligados a ancoragens que estão diretamente conectados a molas que representam a continuidade dos vãos adjacentes.

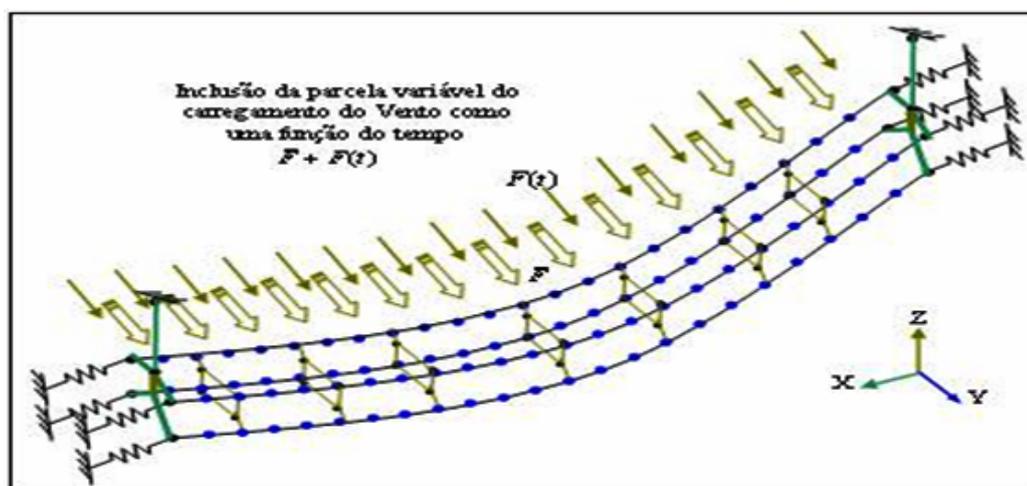


Figura 7.3 - Condições de contorno e carregamento da 3ª etapa de análise.

Esta continuidade foi representada a partir da inserção de elementos de mola lineares nas extremidades dos cabos condutores (Fig. 7.4), de acordo com o mecanismo de modelagem usado por Desai *et al.* (1995), o qual permitiu o cálculo das constantes de mola usadas no sentido longitudinal da linha associadas a estes elementos, a partir da Eq. (7.1).

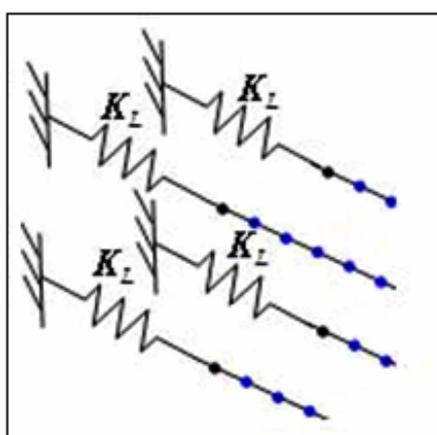


Figura 7.4 - Elementos de molas das extremidades.

$$K_L = \left(\frac{L_T}{A_S E} + \frac{w_Z^2 L_X^3}{12 H^3} \right) \quad (7.1)$$

sendo K_L o coeficiente de rigidez longitudinal; L_T comprimento total do cabo; A_s a área da seção transversal do cabo; E o módulo de elasticidade; w_z peso específico linear do cabo; L_x é a dimensão da projeção horizontal do cabo e H a componente horizontal da tração estática.

As análises realizadas tiveram como finalidade a avaliação do comportamento dos cabos condutores do vão de linha de transmissão escolhido. Isto torna a modelagem das torres das extremidades desnecessária.

7.3 MODELO ESTRUTURAL

A seguir são apresentadas as características físicas e geométricas referentes ao trecho de 450 m da linha de transmissão, modelada com o intuito de avaliar o comportamento dinâmico do sistema (cabos e espaçadores). Considera-se neste trabalho, que a linha tem a função de suportar quatro cabos condutores de alumínio com alma de aço CAA 636MCM-26/7, GROSBEAK.

O tipo de espaçador-amortecedor utilizado no vão é fabricado pela BURNDY, modelo S4D422R-40-SG2, o qual possui garras parafusadas e parafusos *break-away* (Fig. 7.5). Os principais objetivos de espaçador-amortecedor são: proporcionar a uniformidade e estabilidade do feixe de condutores em casos de vento, amortecer as vibrações dos condutores e resistir aos esforços dinâmicos em caso de curto-circuito (Yamamura *et al.*, 2003).



Figura 7.5 - Espaçador-amortecedor da BURNDY.

A altura típica da cadeia de isoladores é de 3,36 m e seu peso total é de 914 N. Se a manilha de fixação ao suporte de sustentação dos condutores e o estribo de ligação entre a

cadeia de isoladores e a estrutura da torre for considerada, a altura total da biela de suspensão chega a 3,87 m, (Fig. 7.6). Assumindo uma velocidade $V_0 = 50$ m/s, a qual corresponde à velocidade média tomada sobre 3s, medida a 10 m de altura e associada a uma probabilidade anual de ocorrência de 2 %, ou seja, com tempo de recorrência de 50 anos conforme citado anteriormente.

Todas as cargas de vento são calculadas com base no vento incidente na direção ortogonal com relação ao eixo da linha de transmissão.

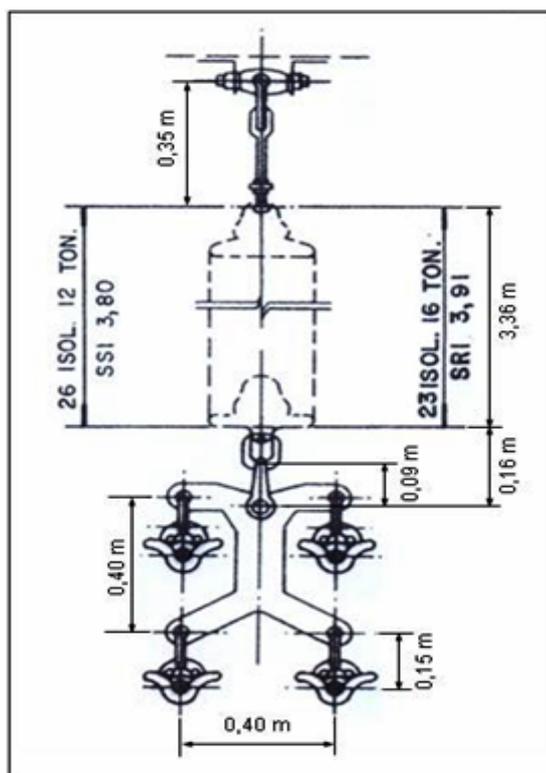


Figura 7.6 - Coluna de sustentação.

As forças de vento atuantes nos cabos condutores foram determinadas a partir da pressão aerodinâmica, de acordo com a Eq. (5.27), tomando como base a velocidade do vento referente às funções temporais da velocidade de vento a partir da Eq. (5.24). O coeficiente de arrasto adotado foi igual a 1,10 o mesmo adotado por Oliveira (2006) e Rodrigues (2004).

Relembrando que a representação da continuidade da linha de transmissão baseou-se em Desai *et al.* (1995) para o cálculo das constantes das molas, posicionadas no sentido longitudinal da linha (Eq. 7.1).

Na análise dinâmica transiente o amortecimento foi do tipo proporcional. De acordo com esta formulação, a matriz de amortecimento do sistema é proporcional às matrizes de

rigidez e de massa. É importante ressaltar que todo o procedimento para calcular a parcela média e flutuante de velocidade do vento que geram as forças de carregamento média e flutuante nos condutores é apresentado no capítulo 5 (Forças Aerodinâmicas).

7.4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção são expostos os resultados da análise estática não-linear e dinâmica não-linear no domínio do tempo para o sistema estrutural completo, formado pelos condutores, espaçadores-amortecedores e coluna de sustentação.

7.4.1 Análise Estática Não-linear do Sistema

A análise estática não-linear do sistema incluiu os carregamentos de peso próprio e tração de projeto nos condutores elétricos observando-se, portanto, a não-linearidade dos cabos em parábola. O seguinte passo, ainda estático não-linear, foi a aplicação da componente estática das forças de vento no modelo, parcela da velocidade média. Para que assim fosse alcançado o estado de equilíbrio estático. A seguir a Fig. 7.7 apresenta o sistema em equilíbrio estático e no detalhe mostra-se a forma deformada e não deformada do deslocamento dos condutores no centro do vão (Fig. 7.8).

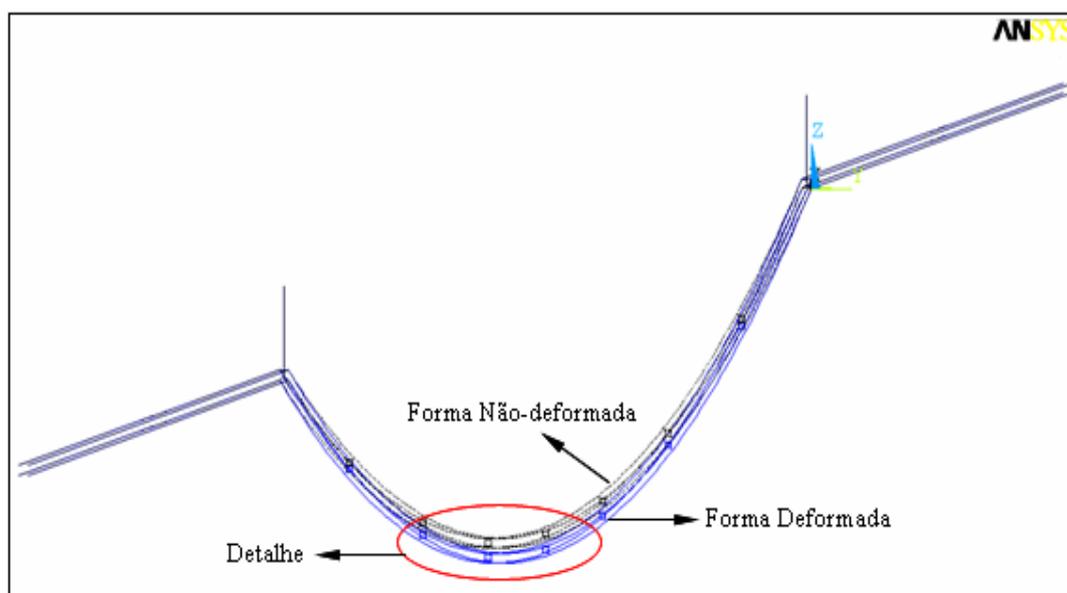


Figura 7.7 - Equilíbrio estático do sistema.

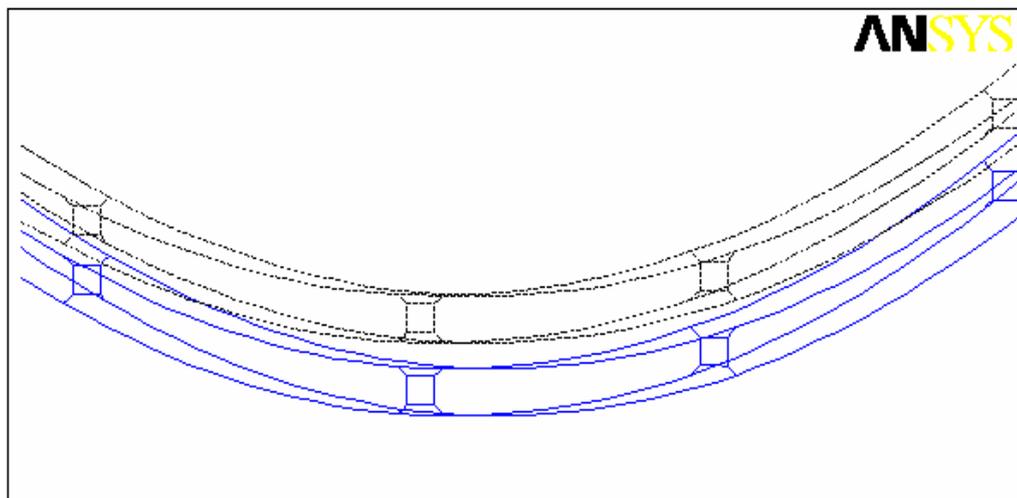


Figura 7.8 - Deslocamento dos condutores no centro do vão.

7.4.2 Análise Dinâmica Não-linear no Domínio do Tempo

De acordo com Oliveira *et al.* (2007), a análise dinâmica de sistemas não-lineares deve ser realizada a partir de integração direta, passo a passo. Esta seção dedica-se, portanto, à apresentação dos resultados obtidos a partir da análise transiente completa do sistema em estudo.

Para a avaliação do comportamento dinâmico da coluna de sustentação dos condutores no que diz respeito aos deslocamentos máximos, foram monitorados os valores de translação no eixo y dos nós 10062 (primeira coluna) e 10072 (segunda coluna), os quais são mostrados nas Figs. 7.9 e 7.10. Estes nós foram escolhidos por serem pontos de suspensão dos cabos condutores.

O monitoramento destes deslocamentos teve também a finalidade de permitir a avaliação dos ângulos de inclinação das colunas de isoladores ao longo do tempo. As Fig. 7.11 e 7.12 ilustram o histórico de deslocamentos na direção de atuação do vento, incidente na direção ortogonal com relação ao eixo da linha de transmissão, nos nós escolhidos.

O máximo deslocamento transversal ao eixo da linha, nos pontos considerados, foi da ordem de 2,94 m. A Tabela 7.1 apresenta os deslocamentos nos pontos de fixação dos condutores às colunas suspensão. As Figs. 7.13 e 7.14 apresentam o histórico da variação angular dos isoladores na direção do eixo y e ao longo do tempo.

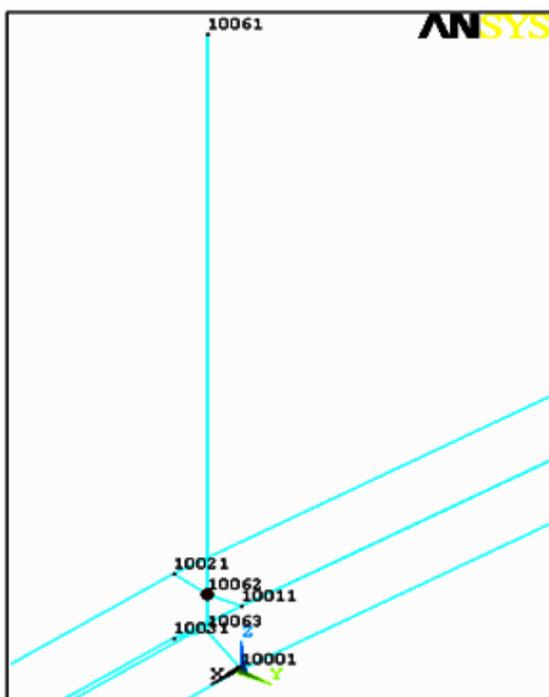


Figura 7.9 - Localização do nó 10062 na primeira coluna de sustentação.

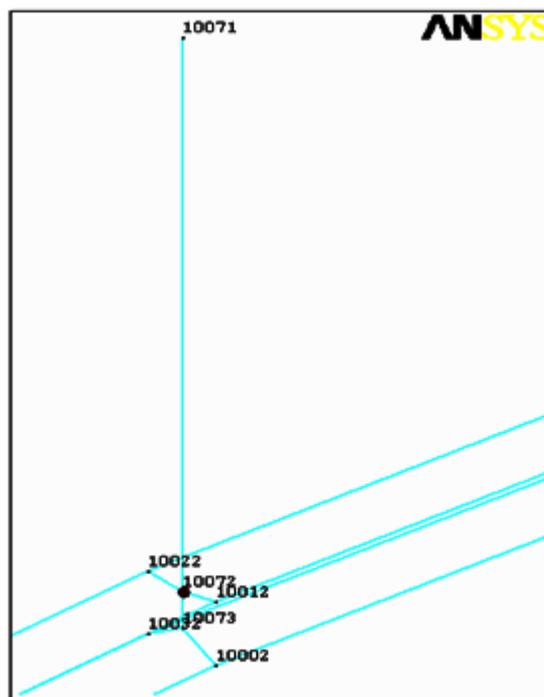


Figura 7.10 - Localização do nó 10072 na segunda coluna de sustentação.

Tabela 7.1 - Deslocamento dos nós 10062 e 10072.

| Nós em Análise | Deslocamento na direção y | | |
|----------------|---------------------------|------------------|-----------------|
| | Valor Mínimo (m) | Valor Máximo (m) | Valor Médio (m) |
| 10062 | 1,21177 | 2,90056 | 2,05616 |
| 10072 | 1,43254 | 2,94736 | 2,18995 |

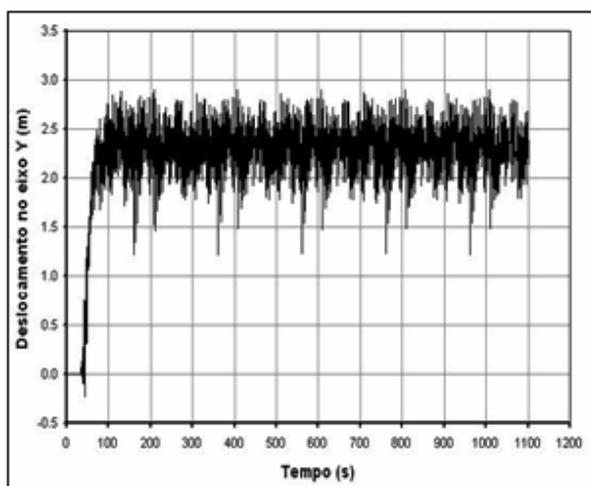


Figura 7.11 - Deslocamento do nó 10062 na direção y.

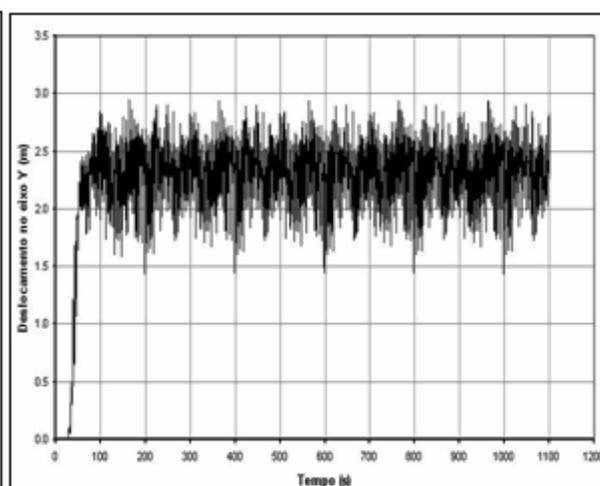


Figura 7.12 - Deslocamento do nó 10072 na direção y.

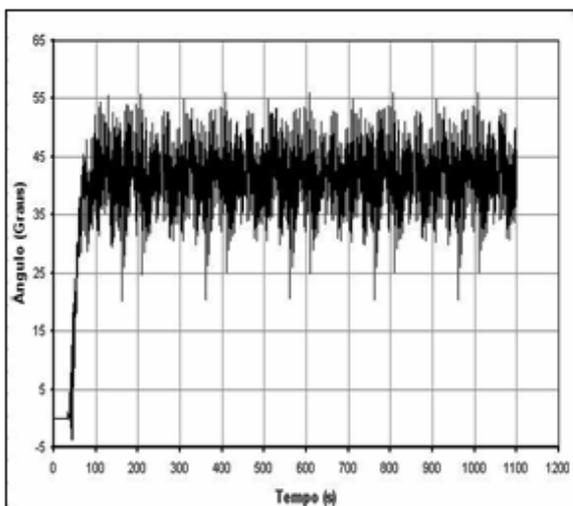


Figura 7.13 - Variação angular da primeira coluna de sustentação na direção y.

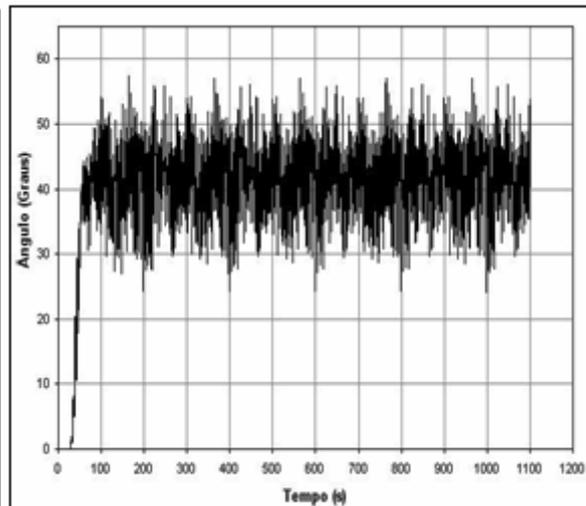


Figura 7.14 - Variação angular da segunda coluna de sustentação na direção y.

7.4.3 Comparação entre as Análises Não-lineares Estática e Dinâmica

Este item apresenta a comparação dos resultados de força e tensão ao longo do elemento 191 do condutor (eixo longitudinal), o qual foi submetido aos maiores carregamentos nas análises não-linear estática e dinâmica. O gráfico da Fig. 7.15 apresenta a variação de força sobre o elemento 191 no decorrer do tempo.

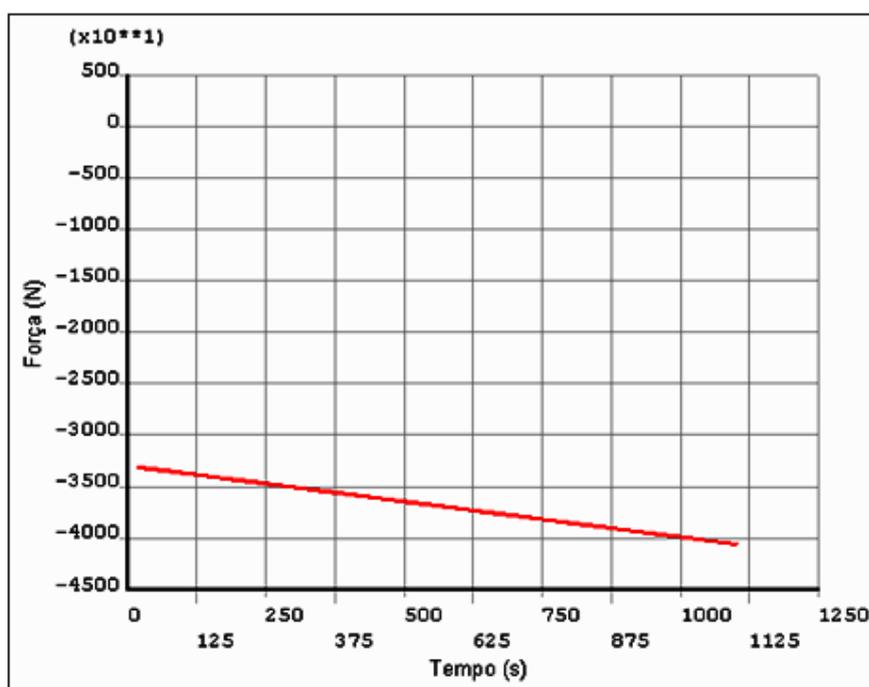


Figura 7.15 - Gráfico da força em função do tempo no elemento 191 do condutor.

A Tabela 7.2 apresenta os valores máximos de força e tensão sobre o elemento 191, o qual está localizado próximo a uma das ancoragens como apresenta a Fig. 7.16, para se fazer uma comparação com o valor máximo de tração que uma linha de transmissão deste tipo suporta.

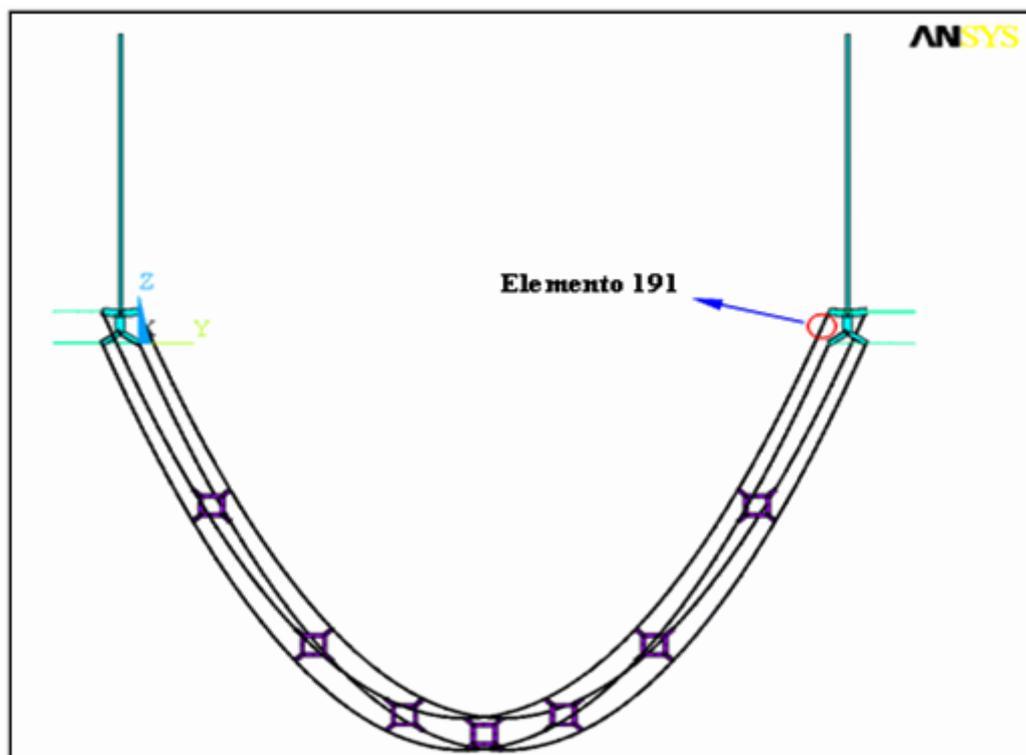


Figura 7.16 - Localização do elemento 191 no sistema.

Tabela 7.2 - Comparação dos valores de força e tensão no elemento 191 do condutor.

| Tipo de Análise | Força (N) | Tensão (Mpa) |
|-------------------------|------------------|---------------------|
| Análise Estática | 38.402 | 102,70 |
| Análise Dinâmica | 40.557,4 | 108,24 |

Em geral os condutores utilizados neste tipo de circuito de linha aérea de transmissão são dimensionados para suportar uma carga de ruptura de 108.577 N. Através dos valores apresentados na Tabela 7.2 pode-se afirmar que mesmo adotando valores bastante conservadores para realizar as análises, como foi o caso da velocidade básica, ainda obteve-se um fator de segurança de 2,68 para o sistema. A rotina para esta análise transiente está disponível no Apêndice E.

7.5 CONSIDERAÇÕES

O modelo tridimensional final, obtido neste capítulo, foi constituído por elementos finitos de pórtico, treliça espacial e molas lineares, o qual considerou o efeito de não-linearidade geométrica e a ação dinâmica do vento, inserida como um processo aleatório com base em suas propriedades estatísticas.

Os resultados da análise dinâmica transiente mostraram que as cadeias de isoladores, alcançarem inclinações próximas a 60° , valor estes que não causam preocupação alguma à estrutura. Inclinações ainda maiores foram obtidas em Oliveira (2006) e Rodrigues (2004). Ao comparar os resultados fornecidos pela análise estática não-linear e pela análise dinâmica (também não-linear) do sistema para um determinado elemento do condutor, foi possível constatar um incremento nos valores máximos de força e tensão. Estes valores mantiveram-se dentro dos limites para o projeto da linha de transmissão, mantendo assim a segurança da estrutura.

CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

8.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Inicialmente, mostram-se as conclusões e observações obtidas através das pesquisas, experimentos e modelagens executadas. Após a apresentação das conclusões, é sugerida a realização de estudos que podem contribuir significativamente para uma melhor compreensão desta linha de pesquisa, dando continuidade ao trabalho desenvolvido nesta dissertação.

8.2 CONCLUSÕES FINAIS

A pesquisa realizada objetivou compreender melhor o comportamento dinâmico de linhas de transmissão de energia elétrica com condutores múltiplos e espaçadores, as quais são utilizadas para a transmissão de energia em altas tensões com benefícios econômicos.

Dentro das características regionais, o estudo dos tipos de vibrações em cabos condutores mostrou que em função de fatores como o clima, características do vento e da linha de transmissão, pode-se indicar que o tipo de vibração mais comum é a vibração eólica.

As análises realizadas em cabos condutores ao longo deste trabalho, para verificar a influência da rigidez flexural em seu comportamento, confirmaram que quando comparados a uma corda vibrante dentro do regime linear, apresentam comportamentos similares, com uma pequena diferença para comprimentos pequenos. Este resultado reforça a teoria de que o comportamento de cabos de linha de transmissão elétrica pode ser considerado igual ao de cordas vibrantes, pois a parcela da equação que considera a rigidez à flexão torna-se negligenciável com o aumento do comprimento do condutor.

A modelagem dos condutores da linha de transmissão exigiu, além do estudo de vários tipos de elementos finitos, a criação de inúmeros modelos que procuram retratar com fidelidade o comportamento de uma linha de transmissão, os quais permitiram definir o melhor tipo de elemento finito a ser utilizado na representação dos condutores e as propriedades a serem consideradas para o sistema.

O algoritmo baseado no método dos elementos finitos, desenvolvido para a modelagem de um único condutor reto e tracionado considerando a análise do sistema linear, apresentou bons resultados. Este modelo inicial foi validado experimentalmente no Laboratório de Engenharia Civil da UFPA em uma bancada de ensaios de condutores de linha de

transmissão. Como o modelo precisava ser mais sofisticado, evoluiu para um cabo desenhado através da equação da parábola, e a análise passou a levar em consideração a não-linearidade geométrica do sistema. Os resultados foram bastante satisfatórios e permitiram a execução da etapa seguinte que foi a construção do modelo de múltiplos condutores separados por espaçadores-amortecedores. Esta análise mostrou que o comportamento modal para quatro cabos se assemelha muito ao de apenas um cabo e que o sistema possui uma alta densidade modal, pois os primeiros 200 modos calculados se localizaram em uma faixa de frequência de 0,15 a 4,82 Hz, o que permitiu chegar a uma boa estimativa do comportamento do sistema.

O modelo tridimensional final foi constituído por elementos finitos de pórtico, treliça espacial e molas lineares. Considerou-se o efeito de não-linearidade geométrica decorrente, principalmente, dos grandes deslocamentos sofridos pelos condutores. A ação dinâmica do vento foi inserida como um processo aleatório com base em suas propriedades estatísticas.

A solução da análise dinâmica transiente a partir da utilização de um modelo tridimensional final requer um grande volume de memória e tempo, do ponto de vista computacional. Os resultados da análise dinâmica transiente mostraram também que as cadeias de isoladores alcançaram inclinações próximas a 60°, valores estes que não causam preocupação alguma à estrutura. Inclinações ainda maiores foram obtidas em Oliveira (2006) e Rodrigues (2004).

Ao comparar os resultados fornecidos pela análise estática não-linear e pela análise dinâmica (também não-linear) do sistema para um determinado elemento do condutor, foi possível constatar um incremento nos valores máximos de força e tensão. Estes valores se mantiveram dentro dos esperados para o projeto da linha de transmissão, mantendo assim a segurança da estrutura.

8.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os *softwares* comerciais baseados na teoria de elementos finitos têm contribuído de forma significativa para a simulação do comportamento de sistemas que dificilmente podem ser reproduzidos em laboratório. Porém eles ainda possuem muitas limitações, como por exemplo, o tipo de elemento finito utilizado ou mesmo o método de solução adotado para as análises.

Neste trabalho foi abordada apenas a análise de um vão de linha aérea de transmissão de 450 m, composto de um feixe de quatro condutores, separados uns dos outros por sete

espaçadores-amortecedores, com espaçamentos variados e duas colunas de sustentação. Sendo assim, para futuros trabalhos seria interessante levar em consideração as seguintes sugestões:

- verificar os efeitos do posicionamento em distâncias iguais e aleatórias dos espaçadores-amortecedores sobre a linha de transmissão;
- variar o número de espaçadores-amortecedores na linha de transmissão para otimizar o número necessário por vão;
- trabalhar com diferentes tipos de amortecedores-espaçadores de diferentes fabricantes para comparar o desempenho de cada tipo;
- a correlação espacial entre as funções de flutuação da velocidade do vento utilizada foi apenas horizontal. Existe, portanto, o interesse no desenvolvimento de uma metodologia mais formal para correlação espacial horizontal e vertical das funções de flutuação da velocidade do vento em futuras contribuições;
- existe o interesse em estudar o comportamento do sistema estrutural formado por torre e cabos segundo diferentes hipóteses de carga, ou seja, diferentes direções de incidência do vento;
- outra sugestão para a continuidade da pesquisa é, exatamente, dar início aos estudos que levem à modelagem mais fiel do comportamento de feixes de cabos. Esse estudo deve ser iniciado com um modelo de um ou dois vãos do feixe, onde as características da torre fossem consideradas nas condições de contorno, inicialmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-GHAFFAR, A. M., ALI H. M., Modeling the Nonlinear Seismic Behavior of Cable-stayedbridges with Passive Control Bearings. *Computers & Structures*, vol. 54, n. 3, pp. 461-492, 1995.

AGUIAR, C. E., *Aerodinâmica da Bola de Futebol*. Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <<http://omnis.if.ufrj.br>>. Acesso em: 18 dez. 2007.

AGUIAR, C. E., RUBINI, G., A Aerodinâmica da Bola de Futebol. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 26, pp. 297, 2004.

AGUILERA, J. R. F., *Estudo de Dispositivos para Avaliação de Vibração e Análise Modal Experimental de Cabos de Linhas de Transmissão*. Trabalho de Conclusão de Curso - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará. PA, 78 p, 2005.

ALCAN CABLE CATALOGUE. *Bare Overhead Cable*. Disponível em: <<http://www.cable.alcan.com>>. Acesso em: 20 de Mar. de 2007.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. *ANSI - American National Standard Wind Design Standards for Edge Systems Used with Low slope Roofing Systems*. Washington, 1998.

ANDERSON, K., HAGEDORN, P., On the Energy Dissipation in Spacer Dampers in Bundled Conductors of Overhead Transmission Lines. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 180, pp. 539-556, 1995.

ARANHA JUNIOR. G. Y. R., *A Formulação de um Elemento Finito de Barra para Análise Dinâmica Não-linear Geométrica, com Aplicação a Cabos de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará. PA, 145 p, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - *NBR 6810 - Fios e Cabos Elétricos - Tração à Ruptura em Componentes Metálicos*. Rio de Janeiro, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - *NBR 62072 - Arame de Aço - Ensaio de Tração*. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - *NBR 5422 - Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica*. Rio de Janeiro, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - *NBR 7270 - Cabos de Alumínio com Alma de Aço para Linhas Aéreas*. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - *NBR 6123 - Forças Devido ao Vento em Edificações*. Rio de Janeiro, 1988.

BELLOLI, M., COLLINA, RESTA, F., *Cables Vibrations Due to Wind Action*. ORGANIZZAZIONE INTERNAZIONALE TRASPORTI A FUNE. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DOS TRANSPORTES POR CABO, X. Grenoble, França, 2006.

BLESSMANN, J., *Introdução ao Estudo das Ações Dinâmicas do Vento*. 2 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 282 p, 2005.

BLESSMANN, J., *O Vento na Engenharia Estrutural*, 1 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 166 p, 1995.

BLEVINS, R. D., *Flow-Induced Vibration*. 2nd Florida: Editora Krieger Publishing Company, 477 p, 1994.

BRAUN, A. L., AWRUCH, A. M., Aerodynamic and Aeroelastic Analysis of Bundled Cables by Numerical Simulation. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 284, pp. 51-73, 2005.

BROCH, J. T., *Mechanical Vibration and Shock Measurements*. Bruel & Kjaer Publication, 1980.

CEBRACE, Empresa. *Informações técnicas sobre pressão e Mapas*. Disponível em: <<http://www.cebrace.com.br>>. Acesso em: 10 set. 2007.

CELLA, P., Methodology for Exact Solution of Catenary. *Journal of Structural Engineering*, p. 1451-1453, 1999.

CHURCH, A. H., *Mechanical vibrations*. 2nd New York and London: John Wiley & Sons, 432 p, 1963.

CIGADA, A., DIANA, G., FALCO, M., FOSSATI, F., MANENTI, A., Vortex Shedding and Wake-Induced Vibrations in Single and Bundle Cables. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 72, pp. 253-263, 1997.

CLAREN. R., DIANA. G., GIORDANA. F., MASSA. E., *The Vibrations of Transmission Line Conductor Bundles*. The Transmission & Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society for presentation at the IEEE Winter Power Meeting, New York, N.Y., January 31-February 5, pp. 1796-1814, 1971.

COELHO, F., GUEIRAL, N., *Força de Arrasto de um Fluido*. Laboratório de Física, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2004. Disponível em: < <http://www.defi.isep.ipp.pt>>. Acesso em: 20 dez. 2007.

CUNHA, L. D., *Vibração Induzida por Vórtices: Análise Crítica de Modelos Fenomenológicos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. SP, 204 p, 2005.

DART, F. C., DOMINGUÊS, L. A. M. C., CARVALHO, A. R. C. D., PING, W. W., SALLES, F. P., FILHO, J. C. S., JUNIOR, O. R., NETO, A. P., CAVALCANTI, S. J. G., *Novas Concepções de Linhas de Transmissão - Impacto nos Estudos de Planejamento e Análise de Sistemas*. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, XV. Foz do Iguaçu, PR - Brasil, 1999.

DEN HARTOG, J. P., *Vibrações nos Sistemas Mecânicos*. Tradução de Mauro Ormeu Cardoso Amrelli. São Paulo: Edgar Blücher, Ed. da Universidade de São paulo, 366 p, 1972.

DENG, H., JIANG, Q. F., KWAN., A. S. K., Shape Finding of Incomplete Cable-Strut Assemblies Containing Slack and Prestressed Elements. *Computers & Structures*, vol. 83, pp. 1767-1779, 2005.

DESAI, Y. M., YU, P., POPPLEWELL N., SHAH, A. H., Finite Element Modeling of Transmission Line Galloping. *Computers and Structures*, vol. 57, p. 407-420, 1995.

DIANA, G., BOCCIOLONE, M., CHELI F., CIGADA, A., MANENTI, A., *Large Wind-Induced Vibrations on Conductor Bundles: Laboratory Scale Measurements to Reproduce the Dynamic Behavior of the Spans and the Suspension Sets*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, n. 2, pp. 1617-1624, 2005.

DIANA, G., BRUNI, S., CHELI, F., FOSSATI, F., MANENTI, A., Dynamic Analysis of the Transmission Line Crossing "Lago De Maracaibo. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 74-76, pp. 977-986, 1998.

DYKE, P. V., HARDY, C., ST-LOUIS, M., GARDES, J. L., *Comparative Field Tests of Various Practices for the Control of Wind-Induced Conductor Motion*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, n. 2, pp. 1029-1034, April 1997.

FILHO, J. M., *Estudo de Numérico para a Determinação das Pressões Devidas á Ação do Vento em Edifícios Industriais*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista. SP, 112 p, 2006.

FOATA, M., NOISEUX. D., *Computer Analysis of the Effects of Asymmetries of a Two-Conductor Bundle Upon its Aeolian Vibration*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, n. 3, pp. 1132-1138, 1991.

FONSECA, B. Q. A., CIMINI JUNIOR, C. A., análise de Vida Útil de Cabos Condutores de Linhas Aéreas de Transmissão. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, XVII - SNPTEE, pp. 19-24, Uberlândia - Brasil, 2003.

FOX, R. W., MCDONALD, A. T., *Introdução à Mecânica dos Flúidos*. 5 ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 504 p, 2001.

FRANÇA, F. A., *Determinação do Arrasto Total em Perfil Aerodinâmico*. Laboratório de Calor e Flúidos, Universidade Estadual de Campinas, 2003. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br>>. Acesso em: 15 nov. 2007.

HALVORSEN, W. G., BROWN, L. D., Impulse Technique for Structural frequency Response Testing. *Sound and Vibration*, November, pp. 8-21, 1977.

HEARNshaw, D., *Spacer Damper Performance - A Function of In-span Positioning*. IEEE Transmission & Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society for presentation at the IEEE PES Winter Meeting, New York, N.Y., January 27-February 1, pp. 1298-1309, 1974.

HENGHOLD, W. M., RUSSELL, J. J., Equilibrium and Natural Frequencies of Cable Structures (a nonlinear finite element approach). *Computers and Structures*, vol. 6, pp. 267-271, 1975.

HENRIQUES, A. M. D., *Bancada de Ensaios Mecânicos à Fadiga de Cabos Condutores de Energia*. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal de Brasília. DF, 162 p, 2006.

INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS. CIGRÉ - SC 22 WORKING GROUP 04. *Recommendations for the Evaluation of the Lifetime of Transmission Line Conductors*. n. 63, pp. 103-145, 1979.

INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS. CIGRÉ - SC 11. *Report on Aeolian Vibration*. Electra n. 124, pp. 39-77, Paris, 1989.

INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS. CIGRÉ - IEC 826. *Loading and Strength Overhead of Lines*. Paris, 1996.

INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS. CIGRÉ - B2.15. *Consultation Models for Overhead Lines Projects*. Paris, 2005a.

INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS. CIGRÉ - B2.11. *State of the Art Survey on Spacers and Spacer Dampers*. Paris, 2005b.

INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS. CIGRÉ - B2.06. *Reliability Based Design Methods for Overhead Lines Advantages. Applications and Comparisons*, Paris, 2006.

IRVINE, M., *Cable Structures*. Cambridge, Mass: MIT Press, 1981.

IRVINE, M., Statics of Suspend Cables. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, vol. 101, n. EM3, pp. 187-205, 1975.

IRVINE, T., Acoustics, Shock, Vibration e Signal Processing. *Vibrationdata. Newsletter*, May 2006.

JAYARAMAN, H. B., KNUDSON, W. C., A Curved Element for Analysis of Cable Structures. *Computers & Structures*, vol. 14, n. 3-4, pp. 325-333, 1981.

JENNINGS, A., Discussion of Cable Movements Under Two-dimensional Loads. *Journal of the Structural Division*, vol. 91, n. ST1, pp. 307-311, 1965.

JUDD, B. J., WHEEN, R. J., Nonlinear Cable Behavior. *Journal of the Structural Division*, vol. 104, n. ST3, 1978.

CARRIL JUNIOR, C. F., *Análise Numérica e Experimental do Efeito Dinâmico do Vento em Torres Metálicas Treliçadas Para Telecomunicações*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. SP, 143 p, 2000.

KAROUMI, R., Some Modeling Aspects in the Nonlinear Finite Element Analysis of Cable Supported Bridges. *Computer & Structures*, vol. 71, n. 4, pp. 397-412, 1999.

KIM, H., NGUYEN, T., *Analysis of Galloping Amplitude for Conductors with Interphase Spacers*. The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp 1520-1525, November, Busan, Korea, 2004.

KUKUREKA, S. N., WEI, C. Y., *Damage Development in Pultruded Composites for Optical Telecommunications Cables Under Tensile and Flexural Fatigue*. *Composites Science and Technology*, n 63, pp. 1795-1804, 2003.

LABEGALINI, P. R., LABEGALINI, J. A., FUCHS, R. D., ALMEIDA, M. T., *Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão*. Edgard Blücher, São Paulo, 1992.

LAVANDOSKI, R., DAMILIANO, J. G., TEIXEIRA J., *Análise Numérica e Experimental para Determinar a Vida Útil de Cabos Condutores de Linhas de Transmissão*. CTEEP e CEMEF, 2002.

LECKAR, H., SAMPAIO, R., *Aspectos Matemáticos de Vibrações Mecânicas*. SEMINÁRIO BRASILEIRO DE ANÁLISE, 2000.

LEONARD, J. W., *Nonlinear Dynamics of Curved Cable Elements*. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, vol. 99, n. EM3, pp. 616-629, 1973.

LEPIDI, M. A., GATTULLI, V. A., VESTRONI, F., *Static and Dynamic Response of Elastic Suspended Cables with Damage*. *International Journal of Solids and Structures*, vol. 44, pp. 8194-8212, 2007.

LILIEN, J. L., PAPAILIOU, K. O., *Calculation of Spacer Compression for Bundle Lines Under Short-Circuit*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, n. 2, pp. 839-845, April 2000.

LILIEN J., SNEGOVSKI D., *Wake-Induced Vibration in Power Transmission Line Parametric Study*. Flow Induced Vibration, de Langre & Axis ed, Ecole Polytechnique, July - Paris, 2004.

LOREDO-SOUZA A. M., DAVENPORT, A.G., Wind Tunnel Aeroelastic Studies on the Behavior of Two Parallel Cables. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 90, pp. 407-414, 2002

LU, L. Y., CHAN, S. L.; LU, Z. H., An Analytical Approach for Nonlinear Response of Elastic Cable Under Complex Loads. *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 5, n. 3, pp. 329-338, 1997.

MANFRIM, S.T., *Estudo Numérico Para a Determinação das Pressões Devidas à Ação do Vento em Edifício Industriais*. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) - Faculdade de Engenharia, Unesp Campus de Ilha Solteira, 112 p, 2006.

MARIANI, A. L., ORTIZ, J. P., PEREIRA, M. T., DOMINGO, S., CECCATO, S. R., IKEDA, S., *Escoamento de Ar ao Redor de um Cilindro em Túnel de Vento*. Guia de Laboratório de Mecânica dos Fluidos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005. Disponível em: <http://www.poli.usp.br/d/pme2237/PME2237_apres.htm>. Acesso em: 20 nov. 2007.

MERIAM, J. L. *Estática*. Tradução de Augusto César Alcoforado do Couto, revisão técnica de Afrânio Sérgio Pinho dos Santos. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 435 p, 1979.

MICHALOS, J., BIRNSTIEL, C., *Movements of a Cable Due to Changes in Loading*. Transactions, ASCE, vol. 127, n. 3368, pp. 267-303, 1962.

MUNARO, M., PIAZZA, F., SOUZA, G. P. S., FERRACIN, R. J., TOMIOKA, J., RUVOLO, A., LINERO, L. E., *Fatores de Influência na Compatibilidade de Cabos Protegidos, Isoladores e Acessórios Utilizados em Redes Aéreas Compactas de Distribuição de Energia Elétrica, sob Condição de Multi-Estresseamento*. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 2, Salvador, 13-14 Nov. 2003. Anais. Salvador, ANEEL, vol.1, pp. 555-560, 2003.

MUNSON, B., YOUNG, O., OKIISHI, T., *Fundamentos da Mecânica dos Fluidos*. 4ª ed Editora Edgard Blucher, São Paulo, 2004.

O'BRIEN, W. T., FRANCIS, A. J., Cable Movements Under Two-dimensional Loading. *Journal of Structural Division*, vol. 90, n. ST3, pp. 89-123, 1964.

O'BRIEN, W. T., Behavior of Loaded Cable Systems. *Journal of the Structural Division*, vol. 94, n. ST10, 1968.

OLIVEIRA, A. R.E., FREIRE D. G., *Vibrações Eólicas em Feixes de Condutores para Linhas de Transmissão*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, XXII, pp. 1335-1338, Brasília, Dezembro 1993.

OLIVEIRA, A.R.E., *Vibrações em Linhas de Transmissão: Aspectos de Projeto de Manutenção*. In: SEMINÁRIO AVANÇADO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, pp. 263-270, Belo Horizonte - Brasil, 1996.

OLIVEIRA, M. I. R., *Análise Estrutural de Torres de Transmissão de Energia Submetidas aos Efeitos Dinâmicos Induzidos pelo Vento*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Área de Concentração: Estruturas, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. RJ, 150 p, 2006.

OLIVEIRA, M. I. R., SILVA, J. G. S., ANDRADE, S. A. L., VELLASCO, P. C. G. S., LIMA, L. R. O., *Análise Estrutural de Torres de Aço de Transmissão de Energia Submetidas aos Efeitos Dinâmicos Induzidos pela Ação do Vento*. In: CMNE/CILAMCE 2007. Portugal, Junho 2007.

OLIVEIRA, P. A., MACHADO R. D., HECKE M. B., *Análise Estática Não-linear de Cabos Utilizando o Método dos Elementos Finitos*. pp. 22, Universidade Federal do Paraná - Brasil, 2002.

OZDEMIR, H., A Finite Element Approach for Cable Problems. *International Journal of Solids Structures*, vol. 15, pp. 427-437, 1978.

PAULETTI, R. M. O., *Sobre Cabos e Cordas*. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. In: Simpósio Nacional sobre Tensoestruturas, I. SP - Brasil, maio, 2002.

PEREIRA, A.M.B., SILVA T. R., SOUZA M. R., *Desenvolvimento de Sistemas Orientados a Objetos para Análise Estática e para Avaliação do Nível de Vibração de Cabos Condutores de Linhas Aéreas de Transmissão*. In: XXVI CILAMCE Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, 2005, Guapapari - ES, 2005.

PERES, N. A. M., *Influência das Vibrações do Cabo na Instabilidade Aeroelástica de uma Viga Simples*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo - SP, 72 p, 2005.

PERFORMED LINE PRODUCTOS CATALOGUE, *Transmission Lines*. Disponível em: <www.performed.com>. Acesso em: 25 de Mar. de 2007.

PEYROT A. H., GOULOIS, A. M., Analysis of Flexible Transmission Lines. *Journal of the Structural Division*, vol. 104, pp. 763-779, 1978.

PHELPS DODGE INTERNATIONAL CORPORATION CATALOGUE. Disponível em: <<http://www.pdic.com>>. Acesso em: 25 de Mar. de 2007.

PINHO, F. T., *Escoamentos Exteriores*. Texto produzido no âmbito da disciplina de Mecânica dos Fluidos para a licenciatura de Gestão e Engenharia Industrial. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2002.

POOVARODOM, N., YAMAGUCHI, H., Mode Localization in Multispan Cable Systems. *Engineering Structures*, vol. 21, pp. 45-54, 1999.

PUGSLEY, A. G., The Gravity Stiffness of a Suspension Bridge Cable. *Quarterly Journal Mechanics and Applied Mathematics*, vol. 5, pp. 385-394, 1952.

RAWLINS, C. B., *Fundamental Concepts in the Analysis of Wake-Induced Oscillation of Bundled Conductors*. IEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-95, n. 4, pp.1377-1393, 1976.

RICCIARDI G., SAITTA F., A Continuous Vibration Analysis Model for Cables with Sag and Bending Stiffness. *Engineering Structures*, 2007.

RODRIGUES, R. S., *Mecânica do Colapso Aeroelástico de Torres TEE*. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. RJ, 183 p, 2004.

ROSÁRIO, A. P. L., OLIVEIRA, R. N., *Análise Estrutural de Torres de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica Submetidas à Ação do Vento*. Trabalho de Conclusão de Curso - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará. PA, 132 p, 2006.

SAMPAIO, R. A. C., ANHOLETI, G. C., PEREIRA, A. M. B., SOUZA, R. M., ROLIM, A. L., SILVA, T. R., ROSA NETO, J. P., SOUZA NETO, F. V., *Desenvolvimento de Sistema Computacional para Avaliação de Vida Útil de Condutores de Linhas Aéreas*. In: XXVI CILAMCE, 2006, Belém. Anais do XXVI CILAMCE, 2006.

SARKAR, A., MANOHAR, C. S., Dynamic Stiffness Matrix of a General Cable Element. *Archive of Applied Mechanics*, vol. 66, pp. 315-325, 1996.

SCHREFLER, B. A., ODORIZZI, S., A Total Lagrangian Geometrically Non-linear Analysis of Combined Beam and Cable Structures. *Computers & Structures*, vol. 17, n. 1, pp. 115-127, 1983.

SCHMITDBERG, R., PAL, T., Solving Vibration Problems Using Modal Analysis. *Sound and Vibration*, vol. 20, n 3, pp. 32-42, Mar 1986.

SILVA, I. L. M., *Análise de Edifícios de Alvenaria Estrutural Sujeitos às Ações do Vento*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. SP, 81 p, 1996.

SILVA, V. P., *Estudo Numérico e Experimental em Amortecedores Stockbrigde Para Linhas de Transmissão Aéreas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica do Paraná. PR, 94 p, 2006.

SILVA, T. R., *Desenvolvimento de um Applet Orientado a Objetos Para Análise Estática de Cabos de Linhas de Transmissão*. Trabalho de Conclusão de Curso - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará. PA, 67 p, 2005.

SIMPSON, A., SALMON, N. J., TAYLOR, C. N., *Computational Comparison of Efficacies of Aeolian Vibration Damping Devices for Multiconductor Overhead Power Lines*. IEE Proceedings, vol. 137, n. 3, pp. 225-232, 1990.

SMITH, G. W., MAILEY, S., *The Henday Radisson Dorsey 500kV DC Transmission Line Spacer Damper Rehabilitation Project*. Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, IEEE ESMO, 2003. In: International Conference, 10th. Vol. 6-10, pp. 67-73, April 2003.

SNEGOVSKI, D., *Health Monitoring of Overhead Power Transmission Line: User Needs*. In: SAMCO Workshop, Vth. Vienna, January 2004.

SOEIRO, N. S. Análise Modal Experimental. *Notas de Aulas*. Programa de Pós-graduação de Engenharia Mecânica. Vibrações e Acústica, 2003.

SOUZA, R. M., SOUZA, R. A., ROSA NETO, J. P., ARANHA JÚNIOR, G. Y. R., *Análise de Vibrações em Cabos Considerando a Rigidez à Flexão, a Rigidez ao Cisalhamento e a Inércia à Rotação da Seção*. In: XXVI CILAMCE Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, 2005, Guarapari - ES, 2005.

SOUZA, W. S., *Relatório do Projeto: Otimização de Projeto e de Materiais de Espaçadores de Linha de Transmissão Para Uma Melhor Performance às Excitações Dinâmicas*. Programa de Pós-graduação de Engenharia Mecânica. Vibrações e Acústica, Universidade Federal do Pará, 45 p, 2006.

STEIDEL, R. F. *An Introduction to Mechanical*. 3rd New York: John Wiley & Sons, 439 p, 1989.

SURMAS, R., DOS SANTOS, L. O. E., PHILIPPI, P. C., *Características da Formação e Desprendimento de Vórtices em Grupos de Cilindros*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS, 2º, 2003.

TEXEIRA, P. H., *Controle de vibrações em cabos Singelos das Linhas de Transmissão Aéreas de Energia Elétrica Através de Neutralizadores Viscoelásticos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.

VERMA, H., *The Stockbridge Damper as a Continuous Hysteretic System in Single Overhead Transmission Lines*. Dissertação (Master in Structural Engineering) - Department of civil Engineering Indian Institute Technology Bombay Mumbai 400076, INDIA - 81 p, 2002.

VIAKON CONDUTORES MONTERREY CATALOGUE. *Cable Viakon*. Disponível em: <[http:// www.viakon.com](http://www.viakon.com)>. Acesso em: 26 de Mar. de 2007.

YAMAMURA, G. M., LEMOS, J. C. V., LAVANDOSCKI, R., SIQUEIRA, F. J. S., *Aplicação de Espaçadores em Linhas de Transmissão, Uma Visão Crítica da CTEEP*. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, XVII. Uberlândia, MG - Brasil, 2003.

YOJO, T., *Análise Não-Linear Geometricamente Exata de Pórticos Espaciais, Com Aplicação a Torres de Transmissão de Alta Tensão*. Tese de Doutorado. USP, 1993.

WHITE, F. M., *Fluid Mechanics*. 2nd New York Editora: McGraw Hill, 1986.

WU, W. J., CAI, C. S., Experimental Study of Magnetorheological Dampers and Application to Cable Vibration Control. *Journal of Vibration and Control*, pp. 67-82, 2006.

ZHOU, Y., KAREEM, A., GU, M., Gust Loading Factors for Design Applications. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 91, pp. 1301-1328, 2003.

APÊNDICE

APÊNDICE A - ROTINA PARA COMPARAR O COMPORTAMENTO DA RIGIDEZ FLEXURAL ENTRE UM CABO E UMA CORDA VIBRANTE EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA E DO COMPRIMENTO

CLC; CLEAR ALL; CLOSE ALL;
% DADOS DE ENTRADA

n=1; % Número De Harmônicos Da Corda Vibrante
 % Com 70% de Espaços Preenchidos
 % Modulo de Elasticidade igual a 1.31e11 Gpa
 % Momento de Inércia igual a 5.725e-9 m⁴

EI=749.975; % Rigidez a Flexão [N/m]
mi=4.71; % Densidade Linear [Kg/m]
H=17794; % Tração No Cabo [N]

% COMPRIMENTO DO CABO

L=1:0.01:312.7;

%CÁLCULO DE LAMBDA

lamb=n.*pi./L;

% CÁLCULO DA FREQUENCIA NATURAL PARA O CABO [Hz]

Fn=(lamb.*(sqrt(((lamb.^2).*(EI/mi))+(H/mi))))/(2.*pi);

% CÁLCULO DA FREQUENCIA NATURAL PARA A CORDA VIBRANTE [Hz]

% Suposição:

% Negligenciando a Rigidez a Flexão EI

Fnc=lamb.*(sqrt(H/mi))/(2.*pi);

% GRÁFICO DA FREQUÊNCIA VS COMPRIMENTO DO CABO

figure(1)

loglog(Fn,L,'b',Fnc,L,'r')

legend('Cabo','Corda Vibrante')

xlabel('Frequencia [Hz]')

ylabel('Comprimento do Cabo [m]')

title('Grafico Comprimento vs Frequencia')

grid on

set(gcf,'color',[1 1 1])

% FIM

APÊNDICE B – ROTINA PARA A MODELAGEM DE UM CABO RETO TENSIONADO

/PREP7

/TITLE, VM53, VIBRACAO DE UMA LT TENSIONADA COM LINK8

| | |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ANTYPE, STATIC | ! Análise Estática |
| PSTRES, ON | ! Incluir Efeitos de Pré-tensionamento (Esta é necessária para a realização da análise modal a ser desenvolvida em seguida) |
| ET, 1, LINK8 | ! Definição do Tipo de Elemento |
| R, 1,3. 7433E-4, 0.583E-3 | ! Área da Seção Transversal e Deformação Inicial |
| MP, EX, 1,74E9 | ! Propriedades do Material |
| MP, DENS, 1,3470. 2 | ! Módulo de Elasticidade |
| N, 1 | ! Densidade |
| N, 512, 10.56 | ! Definição dos Nós |
| FILL | |
| E, 1,2 | ! Definição dos Elementos |
| EGEN, 511, 1,1 | |
| D, ALL, ALL | ! Restrição de Todos os Graus de Liberdade Para Receber as Tensões Estáticas |
| FINISH | |
| /SOLU | |
| SOLVE | |
| FINISH | |
| /SOLU | |
| ANTYPE, MODAL | ! Análise Modal |
| MODOPT, SUBSP, 9 | ! Extração dos 9 Primeiros Modos Naturais Utilizando O Método de Iteração de Subespaço |
| MXPAND, 9 | ! Expansão dos 9 Primeiros Modos Naturais |
| PSTRES, ON | ! Inclusão dos Efeitos de Pré-tensionamento |
| DDELE, 2, UX, 511 | ! Liberação dos Graus de Liberdade dos Nós Interiores |
| DDELE, 2, UY, 511 | ! (Aqueles que Não Fazem Parte dos Apoios) |
| SOLVE | ! Soluciona a Análise Modal |

APÊNDICE C – ROTINA PARA A EQUAÇÃO DO CÁLCULO DA FREQUÊNCIA DE UMA CORDA VIBRANTE

CLEAR

CLC

FORMAT SHORT

n=1:1: 10

! Número do Modo

T=16167,47;

! Tração no Condutor

mi=1.302;

! Densidade Linear

L=10.56;

! Comprimento Inicial do Condutor

Wn= ((n*pi)/L)*sqrt(T/mi)

! Equação da Frequência Natural em rad/s

Fn=Wn/ (2*pi)

! Equação da Frequência Natural em Hz

APÊNDICE D – ROTINA DO MODELO NUMÉRICO PARA UM CABO DESENHADO ATRAVÉS DA EQUAÇÃO DA PARÁBOLA

/PREP7

!*****

!* DEFINIÇÃO DOS TIPOS DE ELEMENTOS *

!*****

ET, 101, BEAM189 ! Para o cabo condutor

ET, 111, LINK8 ! Para os isoladores

ET, 1001, COMBIN14 ! Elemento de mola

!*****

!* PARÂMETROS GERAIS *

!*****

F = 5.10 ! Flecha no centro do vão

L = 450.00 ! Comprimento do vão

Ndiv_X = 512 ! N° de segmentos (par)

N_NO = Ndiv_x-1 ! N° de nós

N_ELEM = Ndiv_x/2 ! N° de elementos

Delt_X = L/Ndiv_X

A = 4*F/L**2 ! Coeficiente A da parábola

B = -A*L ! Coeficiente B da parábola

*DIM, Pos_X, ARRAY, 10000

*DIM, Pos_Z, ARRAY, 10000

! EQUAÇÃO DA PARÁBOLA

*DO, I, 1, Ndiv_X - 1, 1

X = Delt_X*I

Pos_X(I) = I*Delt_X

Pos_Z(I) = A*X**2 + B*X

*ENDDO

!*****

!* DEFINIÇÃO DO MATERIAL DO CONDUTOR *

!*****

Area = 374.7E-6 ! Área média da seção do condutor

A_aco = 52.4E-6 ! Área média dos fios de aço

A_alu = 322.3E-6 ! Área média dos fios de alumínio

E_aco = 206000E6 ! Módulo de elasticidade do aço

E_alu = 68900E6 ! Módulo de elasticidade do alumínio

E_equiv = 76600E6*1.00 ! Módulo de elasticidade do condutor

Mass_lin = 1.30 ! Massa por unidade de comprimento do condutor

Dens_equiv = Mass_lin/Area ! Densidade do condutor

! PROPRIEADES DO MATERIAL DO CONDUTOR

MP, NUXY, 101, 0.3

MP, EX, 101, E_equiv

MP, DENS, 101, Dens_equiv

```

!*****
!* DEFINIÇÃO DA SEÇÃO E CONSTANTE REAL *
!*****
Pi = acos(-1)
d_aco = 3.09E-3      ! Diâmetro do fio de aço
d_alu = 3.97E-3      ! Diâmetro do fio de Alumínio
n_aco = 7            ! Número de fios de Aço
n_alu = 26           ! Número de fios de Alumínio
I_aco = Pi*d_aco**4/64 ! Cálculo do Momento de Inércia de um fio de aço
I_aco = I_aco*n_aco   ! Cálculo do Momento de Inércia para a alma do condutor
I_alu = Pi*d_alu**4/64 ! Cálculo do Momento de Inércia de um fio de alumínio
I_alu = I_alu*n_alu  ! Cálculo do Momento de Inércia para as camadas de
                    ! de Alumínio do condutor
I_equiv = (E_aco*I_aco + E_alu*I_alu)/E_equiv*1.0 ! Momento de Inércia Equivalente
d_equiv = sqrt(Area*4/Pi) ! Diâmetro Equivalente do Condutor

!*****
!* CRIAÇÃO DA SEÇÃO DO CONDUTOR *
!*****
SECTYPE, 101, BEAM, CSOLID, COND, 0
SECOFFSET, CENT
SECDATA,d_equiv/2,0,0,0,0,0,0,0,0,0

!*****
!* CRIAÇÃO DO ELEMENTO DO CONDUTOR *
!*****
TYPE, 101
SECNUM, 101
MAT, 101

!*****
!* CONSTRUÇÃO DO CONDUTOR *
!*****
NO_MAX = 100000
NO_INI = 1+10000
NL = 501+20000
N, NL, L/2, 0, 500
N,10001,0,0,0
N,10002,450,0,0
NUMSTR, NODE, NO_MAX

*DO, I, 1, Ndiv_X - 1, 1
  N, , Pos_X(I), 0, Pos_Z(I)
*ENDDO
*DO, I, 1, Ndiv_X - 4, 2
  E, NO_MAX + I, NO_MAX + I + 2, NO_MAX + I + 1, NL
*ENDDO
E, 10001, NO_MAX + 1, NO_MAX, NL
E, Ndiv_X + NO_MAX - 3, 10002, Ndiv_X + NO_MAX - 2, NL

```

```

!*****
!* CONSTRUÇÃO DA CONTINUIDADE DA LINHA *
!*****
N,10041,-225,0,0
N,10051,675,0,0

!*****
!* CONSTRUÇÃO DOS ELEMENTOS DE MOLA *
!*****
k_cond = 1.742e4          !CONSTANTE ELÁSTICA
R,1001,k_cond, , ,
TYPE, 1001
REAL, 1001
E,10001,10041
E,10002,10051
/VIEW,1,1,1,1
/VUP,1,Z
/REPLOT
GPLOT

!*****
!* CONSTRUÇÃO DOS ISOLADORES *
!*****
N,10061,0,0,3.87
N,10071,450,0,3.87

!*****
!* DEFINIÇÃO DO MATERIAL DO ISOLADOR *
!*****
L_iso = 3.87              ! Comprimento do isolador
A_iso = 1E-3              ! Área da seção transversal do isolador
M_iso = 99.6              ! Massa do isolador
Dens_iso = M_iso/(A_iso*L_iso) ! Densidade do isolador
! PROPRIEADES DO MATERIAL DO ISOLADOR
MP, NUXY, 111, 0.3
MP, EX, 111, E_aco*10000
MP, DENS, 111, Dens_iso
R, 111, A_iso, ,          ! Constante real do isolador

!*****
!* ELEMENTOS DOS ISOLADORES *
!*****
TYPE, 111
REAL, 111
MAT, 111
E,10001,10061 ! Isolador 1
E,10002,10071 ! Isolador 2

!*****
!* RESTRIÇÕES DA FIXAÇÃO *
!*****

```

```

|*****
!*                               ISOLADOR 1                               *
!* FIXAÇÃO DO ISOLADOR NA TORRE E DA EXTREMIDADE                       *
!*           DA MOLA DE CONTINUIDADE DA LINHA                           *
|*****

```

```

D,10061,ALL
D,10001,ALL
D,10041,ALL

```

```

|*****
!*                               ISOLADOR 2                               *
!* FIXAÇÃO DO ISOLADOR NA TORRE E DA EXTREMIDADE                       *
!*           DA MOLA DE CONTINUIDADE DA LINHA                           *
|*****

```

```

D,10071,ALL
D,10002,ALL
D,10051,ALL

```

```

|*****
!* RESTRIÇÃO DE TODOS OS OUTROS NÓS EM UY E ROTX PARA ANÁLISE *
!* DE PRÉ-TENSÃO (ANÁLISE ESTÁTICA), ANTES DA ANÁLISE MODAL          *
|*****

```

```

D,ALL,ROTX
D,ALL,UY

```

```

|*****
!* LIBERAÇÃO DOS GRAUS DE LIBERDADE DO NÓ AUXILIAR DO BEAM189 *
|*****

```

```

DDELE,20501,ALL
FINISH
/SOLU

```

```

|*****
!* PARÂMETROS DE SOLUÇÃO                                               *
|*****

```

```

ACEL,0,0,9.81,      ! Aceleração da gravidade
ANTYPE,STATIC      ! Especificação de análise estática
NLGEOM,ON          ! Inclusão dos efeitos de não-linearidade geométrica
PSTRES,ON          ! Ativação da matriz de pretensão
NROPT,FULL, ,OFF   ! O método resolvidor é o Newton-raphson full
LUMPM,OFF          ! Não utiliza parâmetros de massa concentrados
EQSLV,FRONT, ,2    ! Equações resolvidas pelo frontal solver
PRECISION,0        ! Especifica dupla precisão no calculo
MSAVE,OFF          ! Usa montagem global para a matriz de rigidez
PIVCHECK,OFF
TOFFST,0,
NEQIT, 40          ! Número de iterações por substep
Nsub_ini = 200     ! Quantidade inicial de substeps
Nsub_min = 20      ! Mínima quantidade de substeps
Nsub_max = 200000 ! Máxima quantidade de substeps

```

```

NSUBST,Nsub_ini,Nsub_max,Nsub_min,OFF
AUTOTS,ON          ! Ativa o recurso auto time-stepping
TIME, 200          ! Loadstep 1 - Peso próprio

```

SOLVE
FINISH

! ANÁLISE MODAL COM PRÉ-TENSÃO
/SOLU

!*****

!* PREPARANDO PARA A ANALISE MODAL *

!*****

!*****

!* LIBERAÇÃO DOS GRAUS DE LIBERDADE DO SISTEMA *

!*****

DDELE,ALL,ALL

!*****

!* RESTRIÇÃO DOS NÓS DOS ISOLADORES E MOLAS EM UY E ROTX *

!*****

NSEL,S,,10041

NSEL,A,,10051

NSEL,A,,10061

NSEL,A,,10071

D,ALL,ALL

ALLSEL,ALL

!*****

!* ANÁLISE MODAL PROPRIAMENTE DITA *

!*****

ANTYPE,MODAL ! Analise Modal

UPCOORD,1.0,OFF ! Mostra a forma modal no posprocessamento
! relativa a geometria deformada.

PSTRES,ON ! Ativação da matriz de pretensão

MODEPT,SUBSP,20 ! Extração dos 20 primeiros modos (Subespaço).

MXPAND,20 ! Especifica o numero de modos a expandir.

PSOLVE,EIGFULL ! Calcula os autovalores e autovetores.

FINISH

/SOLU ! Solução adicional para expansão.

EXPASS,ON

PSOLVE,EIGEXP ! Expande a solução de autovetor

FINISH

APÊNDICE E – ROTINA DA ANÁLISE DINÂMICA PARA O MODELO NUMÉRICO DE UM FEIXE DE CONDUTORES DESENHADO ATRAVÉS DA EQUAÇÃO DA PARÁBOLA

```
/NERR, , 9999999, , , ,
/CONFIG, NRES, 300000
/PREP7
```

```
!*****
```

```
!* DEFINIÇÃO DOS TIPOS DE ELEMENTO *
```

```
!*****
```

```
ET, 1, BEAM4      ! Elemento de viga Ancoragem
ET, 2, BEAM4      ! Elemento de viga Espaçador
ET, 101, BEAM189 ! Para o cabo condutor
ET, 111, LINK8    ! Para os isoladores
ET, 1001, COMBIN14 ! Elemento de mola
```

```
!*****
```

```
!* PARÂMETROS GERAIS *
```

```
!*****
```

```
F = 5.10          ! Flecha no centro do vão
L = 450.00        ! Comprimento do vão
C_dist = 0.40     ! Distância entre condutores
Ndiv_X = 128      ! Nº de segmentos (par)
N_NO = Ndiv_x-1   ! Nº de nós
N_ELEM = Ndiv_x/2 ! Nº de elementos
Delt_X = L/Ndiv_X
A = 4*F/L**2      ! Coeficiente A da parábola
B = -A*L          ! Coeficiente B da parábola
```

```
*DIM, Pos_X, ARRAY, 10000
```

```
*DIM, Pos_Z, ARRAY, 10000
```

```
! EQUAÇÃO DA PARÁBOLA
```

```
*DO, I, 1, Ndiv_X - 1, 1
```

```
  X = Delt_X*I
```

```
  Pos_X(I) = I*Delt_X
```

```
  Pos_Z(I) = A*X**2 + B*X
```

```
*ENDDO
```

```
!*****
```

```
!* DEFINIÇÃO DO MATERIAL DO CONDUTOR *
```

```
!*****
```

```
Area = 374.7E-6      ! Área média da seção do condutor
A_aco = 52.4E-6     ! Área média dos fios de aço
A_alu = 322.3E-6    ! Área média dos fios de alumínio
E_aco = 206000E6    ! Módulo de elasticidade do aço
E_alu = 68900E6     ! Módulo de elasticidade do alumínio
E_equiv = 76600E6*1.00 ! Módulo de elasticidade do condutor
Mass_lin = 1.30      ! Massa por unidade de comprimento do condutor
Dens_equiv = Mass_lin/Area ! Densidade do condutor
! PROPRIEADES DO MATERIAL DO CONDUTOR
MP, NUXY, 101, 0.3
MP, EX, 101, E_equiv
MP, DENS, 101, Dens_equiv
```

```

|*****
!* DEFINIÇÃO DA SEÇÃO E CONSTANTE REAL *
|*****
Pi = acos(-1)
d_aco = 3.09E-3      ! Diâmetro do fio de aço
d_alu = 3.97E-3      ! Diâmetro do fio de Alumínio
n_aco = 7           ! Número de fios de Aço
n_alu = 26          ! Número de fios de Alumínio
I_aco = Pi*d_aco**4/64 ! Cálculo do Momento de Inércia de um fio de aço
I_aco = I_aco*n_aco   ! Cálculo do Momento de Inércia para a alma do condutor
I_alu = Pi*d_alu**4/64 ! Cálculo do Momento de Inércia de um fio de alumínio
I_alu = I_alu*n_alu   ! Cálculo do Momento de Inércia para as camadas de
                    ! de Alumínio do condutor
I_equiv = (E_aco*I_aco + E_alu*I_alu)/E_equiv*1.0 ! Momento de Inércia Equivalente
d_equiv = sqrt(Area*4/Pi) ! Diâmetro Equivalente do Condutor

|*****
!* CRIAÇÃO DA SEÇÃO DO CONDUTOR *
|*****
SECTYPE, 101, BEAM, CSOLID, COND, 0
SECOFFSET, CENT
SECDATA,d_equiv/2,0,0,0,0,0,0,0,0,0

|*****
!* CRIAÇÃO DO ELEMENTO DO CONDUTOR *
|*****
TYPE, 101
SECNUM, 101
MAT, 101

|*****
!* CONSTRUÇÃO DO CONDUTOR 1 *
|*****
NO_MAX = 100000
NO_INI = 1+10000
NL = 501+20000
N, NL, L/2, 0, 500
N,10001,0,0,0
N,10002,450,0,0
NUMSTR, NODE, NO_MAX

*DO, I, 1, Ndiv_X - 1, 1
  N, , Pos_X(I), 0, Pos_Z(I)
*ENDDO
*DO, I, 1, Ndiv_X - 4, 2
  E, NO_MAX + I, NO_MAX + I + 2, NO_MAX + I + 1, NL
*ENDDO
E, 10001, NO_MAX + 1, NO_MAX, NL
E, Ndiv_X + NO_MAX - 3, 10002, Ndiv_X + NO_MAX - 2, NL

|*****
!* CONSTRUÇÃO DO CONDUTOR 2 *
|*****
NO_MAX = 200000

```

```

NO_INI = 11+10000
NL = 502+20000
N, NL, L/2, 0, 500
N,10011,0,0,0.4
N,10012,450,0,0.4
NUMSTR, NODE, NO_MAX

*DO, I, 1, Ndiv_X - 1, 1
  N, , Pos_X(I), 0, Pos_Z(I) + 0.4
*ENDDO
*DO, I, 1, Ndiv_X - 4, 2
  E, NO_MAX + I, NO_MAX + I + 2, NO_MAX + I + 1, NL
*ENDDO
E, 10011, NO_MAX + 1, NO_MAX, NL
E, Ndiv_X + NO_MAX - 3, 10012, Ndiv_X + NO_MAX - 2, NL

!*****
!* CONSTRUÇÃO DO CONDUTOR 3      *
!*****
NO_MAX = 300000
NO_INI = 21+10000
NL = 503+20000
N, NL, L/2, -c_dist, 500
N,10021,0,-0.4,0.4
N,10022,450,-0.4,0.4
NUMSTR, NODE, NO_MAX

*DO, I, 1, Ndiv_X - 1, 1
  N, , Pos_X(I), -c_dist, Pos_Z(I) + 0.4
*ENDDO
*DO, I, 1, Ndiv_X - 4, 2
  E, NO_MAX + I, NO_MAX + I + 2, NO_MAX + I + 1, NL
*ENDDO
E, 10021, NO_MAX + 1, NO_MAX, NL
E, Ndiv_X + NO_MAX - 3, 10022, Ndiv_X + NO_MAX - 2, NL

!*****
!* CONSTRUÇÃO DO CONDUTOR 4      *
!*****
NO_MAX = 400000
NO_INI = 2+10000
NL = 504+20000
N, NL, L/2, -C_dist, 500
N,10031,0,-0.4,0
N,10032,450,-0.4,0
NUMSTR, NODE, NO_MAX
*DO, I, 1, Ndiv_X - 1, 1
  N, , Pos_X(I), -c_dist, Pos_Z(I)
*ENDDO
*DO, I, 1, Ndiv_X - 4, 2
  E, NO_MAX + I, NO_MAX + I + 2, NO_MAX + I + 1, NL
*ENDDO
E, 10031, NO_MAX + 1, NO_MAX, NL
E, Ndiv_X + NO_MAX - 3, 10032, Ndiv_X + NO_MAX - 2, NL

```

```
!*****
```

```
!* CONSTRUÇÃO DA CONTINUIDADE DA LINHA *
```

```
!*****
```

```
N,10041,-30,0,0
```

```
N,10042,-30,0,0.4
```

```
N,10043,-30,-0.4,0.4
```

```
N,10044,-30,-0.4,0
```

```
N,10051,480,0,0
```

```
N,10052,480,0,0.4
```

```
N,10053,480,-0.4,0.4
```

```
N,10054,480,-0.4,0
```

```
!*****
```

```
!* CONSTRUÇÃO DOS ELEMENTOS DE MOLA *
```

```
!*****
```

```
k_cond = 1.742e4
```

```
!CONSTANTE ELÁSTICA
```

```
R,1001,k_cond, , ,
```

```
TYPE, 1001
```

```
REAL, 1001
```

```
E,10001,10041
```

```
E,10002,10051
```

```
E,10011,10042
```

```
E,10012,10052
```

```
E,10021,10043
```

```
E,10022,10053
```

```
E,10031,10044
```

```
E,10032,10054
```

```
/VIEW,1,1,1,1
```

```
/VUP,1,Z
```

```
/REPLOT
```

```
GPLOT
```

```
!*****
```

```
!* CONSTRUÇÃO DA ANCORAGEM *
```

```
!*****
```

```
N,10061,0,-0.2,3.87
```

```
N,10062,0,-0.2,0.37
```

```
N,10063,0,-0.2,0.14
```

```
N,10071,450,-0.2,3.87
```

```
N,10072,450,-0.2,0.37
```

```
N,10073,450,-0.2,0.14
```

```
!*****
```

```
!* DEFINIÇÃO DO MATERIAL DA ANCORAGEM *
```

```
!*****
```

```
MP, NUXY, 1, 0.3
```

```
MP, EX, 1, 100000E9
```

```
MP, DENS, 1, 8139.66
```

```
!*****
```

```
!* DEFINIÇÃO DE SEÇÕES TRANSVERSAIS DA ANCORAGEM *
```

```
!*****
```

```

!*****
!* SEÇÃO TRANSVERSAL 1      *
!*****
Area = 0.197046E-02
lyy = 1.3E-06
lzz = 8.05E-08
lxx = lyy + lzz
tky = 22.14E-03
tkz = 89E-03
teta = 8.5
R , 2, Area, lzz, lyy, tkz, tky,teta,
RMORE, , lxx , , , , ,

```

```

!*****
!* SEÇÃO TRANSVERSAL 2      *
!*****
Area = 0.197046E-02
lyy = 1.3E-06
lzz = 8.05E-08
lxx = lyy + lzz
tky = 22.14E-03
tkz = 89E-03
teta = 171.5
R , 3, Area, lzz, lyy, tkz, tky,teta,
RMORE, , lxx , , , , ,

```

```

!*****
!* SEÇÃO TRANSVERSAL 3      *
!*****
Area = 0.1850E-02
lyy = 5.276e-8
lzz = 1.54E-06
lxx = lyy + lzz
tky = 100E-03
tkz = 18.50E-03
teta = 0
R , 4, Area, lzz, lyy, tkz, tky,teta,
RMORE, , lxx , , , , ,

```

```

!*****
!* SEÇÃO TRANSVERSAL 4      *
!*****
Area = 0.13875E-02
lyy = 0.650E-06
lzz = 3.96E-08
lxx = lyy + lzz
tky = 18.50E-03
tkz = 75E-03
teta = 215
R , 5, Area, lzz, lyy, tkz, tky,teta,
RMORE, , lxx , , , , ,

```

```
!*****
```

```
!* SEÇÃO TRANSVERSAL 5 *
```

```
!*****
```

```
Area = 0.13875E-02
```

```
lyy = 0.650E-06
```

```
lzz = 3.96E-08
```

```
lxx = lyy + lzz
```

```
tky = 18.50E-03
```

```
tkz = 75E-03
```

```
teta = 325
```

```
R , 6, Area, lzz, lyy, tkz, tky,teta,
```

```
RMORE, , lxx , , , ,
```

```
!*****
```

```
!* ELEMENTOS DA ANCORAGEM 1 *
```

```
!*****
```

```
TYPE,1
```

```
MAT,1
```

```
REAL,2
```

```
E,10062,10011
```

```
TYPE,1
```

```
MAT,1
```

```
REAL,3
```

```
E,10021,10062
```

```
TYPE,1
```

```
MAT,1
```

```
REAL,4
```

```
E,10063,10062
```

```
TYPE,1
```

```
MAT,1
```

```
REAL,5
```

```
E,10031,10063
```

```
TYPE,1
```

```
MAT,1
```

```
REAL,6
```

```
E,10063,10001
```

```
!*****
```

```
!* ELEMENTOS DA ANCORAGEM 2 *
```

```
!*****
```

```
TYPE,1
```

```
MAT,1
```

```
REAL,2
```

```
E,10072,10012
```

```
TYPE,1
```

```
MAT,1
```

```
REAL,3
```

```
E,10022,10072
```

```
TYPE,1
```

```
MAT,1
```

```
REAL,4
```

```
E,10073,10072
```

```
TYPE,1
```

```
MAT,1
```

```

REAL,5
E,10032,10073
TYPE,1
MAT,1
REAL,6
E,10073,10002

```

```

!*****

```

```

!* DEFINIÇÃO DO MATERIAL DO ISOLADOR *

```

```

!*****

```

```

L_iso = 3.87                ! Comprimento do isolador
A_iso = 1E-3                ! Área da seção transversal do isolador
M_iso = 99.6                ! Massa do isolador
Dens_iso = M_iso/(A_iso*L_iso) ! Densidade do isolador
! PROPRIEADES DO MATERIAL DO ISOLADOR
MP, NUXY, 111, 0.3
MP, EX, 111, E_aco*10000
MP, DENS, 111, Dens_iso
R, 111, A_iso, ,           ! Constante real do isolador

```

```

!*****

```

```

!* ELEMENTOS DOS ISOLADORES *

```

```

!*****

```

```

TYPE, 111
REAL, 111
MAT, 111
E,10062,10061 !isolador 1
E,10072,10071 !isolador 2

```

```

!*****

```

```

!* CONSTRUÇÃO DOS ESPAÇADORES *

```

```

!*****

```

```

! ESPAÇADOR 1

```

```

N,10081, 56.2500000000, -0.320000000000, -1.91125000000
N,10082, 56.2500000000, -0.320000000000, -2.15125000000
N,10083, 56.2500000000, -0.800000000000E-01, -1.91125000000
N,10084, 56.2500000000, -0.800000000000E-01, -2.15125000000
N,10085, 56.2500000000, -0.360000000000, -1.87125000000
N,10086, 56.2500000000, -0.360000000000, -2.19125000000
N,10087, 56.2500000000, -0.400000000000E-01, -1.87125000000
N,10088, 56.2500000000, -0.400000000000E-01, -2.19125000000
N,10089, 56.2500000000, -0.200000000000, -1.91125000000
N,10090, 56.2500000000, -0.200000000000, -2.15125000000
N,10091, 56.2500000000, -0.320000000000, -2.03125000000
N,10092, 56.2500000000, -0.800000000000E-01, -2.03125000000

```

```

! ESPAÇADOR 2

```

```

N,10097, 119.531250000, -0.320000000000, -3.65939453125
N,10098, 119.531250000, -0.320000000000, -3.89939453125
N,10099, 119.531250000, -0.800000000000E-01, -3.65939453125
N,10100, 119.531250000, -0.800000000000E-01, -3.89939453125
N,10101, 119.531250000, -0.360000000000, -3.61939453125
N,10102, 119.531250000, -0.360000000000, -3.93939453125
N,10103, 119.531250000, -0.400000000000E-01, -3.61939453125

```

| | | | |
|----------|----------------|----------------------|----------------|
| N,10104, | 119.531250000, | -0.400000000000E-01, | -3.93939453125 |
| N,10105, | 119.531250000, | -0.200000000000, | -3.65939453125 |
| N,10106, | 119.531250000, | -0.200000000000, | -3.89939453125 |
| N,10107, | 119.531250000, | -0.320000000000, | -3.77939453125 |
| N,10108, | 119.531250000, | -0.800000000000E-01, | -3.77939453125 |

! ESPAÇADOR 3

| | | | |
|----------|----------------|----------------------|----------------|
| N,10113, | 175.781250000, | -0.320000000000, | -4.53595703125 |
| N,10114, | 175.781250000, | -0.320000000000, | -4.77595703125 |
| N,10115, | 175.781250000, | -0.800000000000E-01, | -4.53595703125 |
| N,10116, | 175.781250000, | -0.800000000000E-01, | -4.77595703125 |
| N,10117, | 175.781250000, | -0.360000000000, | -4.49595703125 |
| N,10118, | 175.781250000, | -0.360000000000, | -4.81595703125 |
| N,10119, | 175.781250000, | -0.400000000000E-01, | -4.49595703125 |
| N,10120, | 175.781250000, | -0.400000000000E-01, | -4.81595703125 |
| N,10121, | 175.781250000, | -0.200000000000, | -4.53595703125 |
| N,10122, | 175.781250000, | -0.200000000000, | -4.77595703125 |
| N,10123, | 175.781250000, | -0.320000000000, | -4.65595703125 |
| N,10124, | 175.781250000, | -0.800000000000E-01, | -4.65595703125 |

! ESPAÇADOR 4

| | | | |
|----------|----------------|----------------------|----------------|
| N,10129, | 225.000000000, | -0.320000000000, | -5.02000000000 |
| N,10130, | 225.000000000, | -0.320000000000, | -4.78000000000 |
| N,10131, | 225.000000000, | -0.800000000000E-01, | -5.02000000000 |
| N,10132, | 225.000000000, | -0.800000000000E-01, | -4.78000000000 |
| N,10133, | 225.000000000, | -0.360000000000, | -4.74000000000 |
| N,10134, | 225.000000000, | -0.360000000000, | -5.06000000000 |
| N,10135, | 225.000000000, | -0.400000000000E-01, | -4.74000000000 |
| N,10136, | 225.000000000, | -0.400000000000E-01, | -5.06000000000 |
| N,10137, | 225.000000000, | -0.200000000000, | -5.02000000000 |
| N,10138, | 225.000000000, | -0.200000000000, | -4.78000000000 |
| N,10139, | 225.000000000, | -0.320000000000, | -4.90000000000 |
| N,10140, | 225.000000000, | -0.800000000000E-01, | -4.90000000000 |

! ESPAÇADOR 5

| | | | |
|----------|----------------|----------------------|----------------|
| N,10145, | 274.218750000, | -0.320000000000, | -4.53595703125 |
| N,10146, | 274.218750000, | -0.320000000000, | -4.77595703125 |
| N,10147, | 274.218750000, | -0.800000000000E-01, | -4.53595703125 |
| N,10148, | 274.218750000, | -0.800000000000E-01, | -4.77595703125 |
| N,10149, | 274.218750000, | -0.360000000000, | -4.49595703125 |
| N,10150, | 274.218750000, | -0.360000000000, | -4.81595703125 |
| N,10151, | 274.218750000, | -0.400000000000E-01, | -4.49595703125 |
| N,10152, | 274.218750000, | -0.400000000000E-01, | -4.81595703125 |
| N,10153, | 274.218750000, | -0.200000000000, | -4.53595703125 |
| N,10154, | 274.218750000, | -0.200000000000, | -4.77595703125 |
| N,10155, | 274.218750000, | -0.320000000000, | -4.65595703125 |
| N,10156, | 274.218750000, | -0.800000000000E-01, | -4.65595703125 |

! ESPAÇADOR 6

| | | | |
|----------|----------------|----------------------|----------------|
| N,10161, | 330.468750000, | -0.320000000000, | -3.65939453125 |
| N,10162, | 330.468750000, | -0.320000000000, | -3.89939453125 |
| N,10163, | 330.468750000, | -0.800000000000E-01, | -3.65939453125 |
| N,10164, | 330.468750000, | -0.800000000000E-01, | -3.89939453125 |
| N,10165, | 330.468750000, | -0.360000000000, | -3.61939453125 |

N,10166, 330.468750000, -0.360000000000, -3.93939453125
 N,10167, 330.468750000, -0.400000000000E-01, -3.61939453125
 N,10168, 330.468750000, -0.400000000000E-01, -3.93939453125
 N,10169, 330.468750000, -0.200000000000, -3.65939453125
 N,10170, 330.468750000, -0.200000000000, -3.89939453125
 N,10171, 330.468750000, -0.320000000000, -3.77939453125
 N,10172, 330.468750000, -0.800000000000E-01, -3.77939453125

! ESPAÇADOR 7

N,10177, 393.750000000, -0.320000000000, -1.91125000000
 N,10178, 393.750000000, -0.320000000000, -2.15125000000
 N,10179, 393.750000000, -0.800000000000E-01, -1.91125000000
 N,10180, 393.750000000, -0.800000000000E-01, -2.15125000000
 N,10181, 393.750000000, -0.360000000000, -1.87125000000
 N,10182, 393.750000000, -0.360000000000, -2.19125000000
 N,10183, 393.750000000, -0.400000000000E-01, -1.87125000000
 N,10184, 393.750000000, -0.400000000000E-01, -2.19125000000
 N,10185, 393.750000000, -0.200000000000, -1.91125000000
 N,10186, 393.750000000, -0.200000000000, -2.15125000000
 N,10187, 393.750000000, -0.320000000000, -2.03125000000
 N,10188, 393.750000000, -0.800000000000E-01, -2.03125000000

!*****
 !* DEFINIÇÃO DA SEÇÃO E CONSTANTE REAL *
 !*****

!*****
 !* DEFINIÇÃO DO MATERIAL DO ESPAÇADOR *
 !*****

MP, NUXY,2, 0.33
 MP, EX,2, 66228E6
 MP, DENS,2, 2770

!*****
 !* SEÇÃO TRANSVERSAL 7 *
 !*****

Area = 0.10203E-02
 lyy = 0.245E-06
 lzz = 0.307E-07
 lxx = lyy + lzz
 tky = 19E-03
 tkz = 53.7E-03
 teta = 45
 R , 7, Area, lzz, lyy, tkz, tky,teta,
 RMORE, , lxx , , , , ,

!*****
 !* SEÇÃO TRANSVERSAL 8 *
 !*****

Area = 0.10203E-02
 lyy = 0.245E-06
 lzz = 0.307E-07
 lxx = lyy + lzz
 tky = 19E-03

tkz = 53.7E-03
 teta = 135
 R , 8, Area, lzz, lyy, tkz, tky,teta,
 RMORE, , lxx , , , , ,

!*****
 !* SEÇÃO TRANSVERSAL 9 *
 !*****

Area = 0.10203E-02
 lyy = 0.245E-06
 lzz = 0.307E-07
 lxx = lyy + lzz
 tky = 19E-03
 tkz = 53.7E-03
 teta = 225
 R , 9, Area, lzz, lyy, tkz, tky,teta,
 RMORE, , lxx , , , , ,

!*****
 !* SEÇÃO TRANSVERSAL 10 *
 !*****

Area = 0.10203E-02
 lyy = 0.245E-06
 lzz = 0.307E-07
 lxx = lyy + lzz
 tky = 19E-03
 tkz = 53.7E-03
 teta = 315
 R , 10, Area, lzz, lyy, tkz, tky,teta,
 RMORE, , lxx , , , , ,

!*****
 !* SEÇÃO TRANSVERSAL 11 *
 !*****

Area = 0.05734E-02
 lyy = 0.711E-08
 lzz = 0.106E-06
 lxx = lyy + lzz
 tky = 47E-03
 tkz = 12.20E-03
 teta = 0
 R , 11, Area, lzz, lyy, tkz, tky,teta,
 RMORE, , lxx , , , , ,

!*****
 !* SEÇÃO TRANSVERSAL 12 *
 !*****

Area = 0.05734E-02
 lyy = 0.106E-06
 lzz = 0.711E-08
 lxx = lyy + lzz
 tky = 12.20E-03
 tkz = 47E-03
 teta = 0

R , 12, Area, lzz, lyy, tkz, tky,teta,
 RMORE, , lxx , , , , ,

!*****

!* ELEMENTOS DO ESPAÇADOR 1 *

!*****

TYPE,2
 MAT,2
 REAL,7
 E,10083,10087
 E,10087,200015
 TYPE,2
 MAT,2
 REAL,8
 E,10081,10085
 E,10085,300015
 TYPE,2
 MAT,2
 REAL,9
 E,10086,10082
 E,400015,10086
 TYPE,2
 MAT,2
 REAL,10
 E,10088,10084
 E,100015,10088
 TYPE,2
 MAT,2
 REAL,11
 E,10084,10092
 E,10092,10083
 TYPE,2
 MAT,2
 REAL,11
 E,10081,10091
 E,10091,10082
 TYPE,2
 MAT,2
 REAL,12
 E,10081,10089
 E,10089,10083
 TYPE,2
 MAT,2
 REAL,12
 E,10082,10090
 E,10090,10084

!*****

!* ELEMENTOS DO ESPAÇADOR 2 *

!*****

TYPE,2
 MAT,2
 REAL,7
 E,10099,10103

E,10103,200033
TYPE,2
MAT,2
REAL,8
E,10097,10101
E,10101,300033
TYPE,2
MAT,2
REAL,9
E,10102,10098
E,400033,10102
TYPE,2
MAT,2
REAL,10
E,10104,10100
E,100033,10104
TYPE,2
MAT,2
REAL,11
E,10098,10107
E,10107,10097
TYPE,2
MAT,2
REAL,11
E,10100,10108
E,10108,10099
TYPE,2
MAT,2
REAL,12
E,10098,10106
E,10106,10100
TYPE,2
MAT,2
REAL,12
E,10097,10105
E,10105,10099

!*****

!* ELEMENTOS DO ESPAÇADOR 3 *

!*****

TYPE,2
MAT,2
REAL,7
E,10115,10119
E,10119,200049
TYPE,2
MAT,2
REAL,8
E,10113,10117
E,10117,300049
TYPE,2
MAT,2
REAL,9
E,10118,10114

E,400049,10118
 TYPE,2
 MAT,2
 REAL,10
 E,10120,10116
 E,100049,10120
 TYPE,2
 MAT,2
 REAL,11
 E,10114,10123
 E,10123,10113
 TYPE,2
 MAT,2
 REAL,11
 E,10116,10124
 E,10124,10115
 TYPE,2
 MAT,2
 REAL,12
 E,10114,10122
 E,10122,10116
 TYPE,2
 MAT,2
 REAL,12
 E,10113,10121
 E,10121,10115

!*****
 !* ELEMENTOS DO ESPAÇADOR 4 *
 !*****

TYPE,2
 MAT,2
 REAL,7
 E,10132,10135
 E,10135,200063
 TYPE,2
 MAT,2
 REAL,8
 E,10130,10133
 E,10133,300063
 TYPE,2
 MAT,2
 REAL,9
 E,10134,10129
 E,400063,10134
 TYPE,2
 MAT,2
 REAL,10
 E,10136,10131
 E,100063,10136
 TYPE,2
 MAT,2
 REAL,11
 E,10129,10139

E,10139,10130
TYPE,2
MAT,2
REAL,11
E,10131,10140
E,10140,10132
TYPE,2
MAT,2
REAL,12
E,10129,10137
E,10137,10131
TYPE,2
MAT,2
REAL,12
E,10130,10138
E,10138,10132

!*****

!* ELEMENTOS DO ESPAÇADOR 5 *

!*****

TYPE,2
MAT,2
REAL,7
E,10147,10151
E,10151,200077
TYPE,2
MAT,2
REAL,8
E,10145,10149
E,10149,300077
TYPE,2
MAT,2
REAL,9
E,10150,10146
E,400077,10150
TYPE,2
MAT,2
REAL,10
E,10152,10148
E,100077,10152
TYPE,2
MAT,2
REAL,11
E,10146,10155
E,10155,10145
TYPE,2
MAT,2
REAL,11
E,10148,10156
E,10156,10147
TYPE,2
MAT,2
REAL,12
E,10146,10154

E,10154,10148
 TYPE,2
 MAT,2
 REAL,12
 E,10145,10153
 E,10153,10147

!*****
 !* ELEMENTOS DO ESPAÇADOR 6 *
 !*****

TYPE,2
 MAT,2
 REAL,7
 E,10163,10167
 E,10167,200093
 TYPE,2
 MAT,2
 REAL,8
 E,10161,10165
 E,10165,300093
 TYPE,2
 MAT,2
 REAL,9
 E,10166,10162
 E,400093,10166
 TYPE,2
 MAT,2
 REAL,10
 E,10168,10164
 E,100093,10168
 TYPE,2
 MAT,2
 REAL,11
 E,10162,10171
 E,10171,10161
 TYPE,2
 MAT,2
 REAL,11
 E,10164,10172
 E,10172,10163
 TYPE,2
 MAT,2
 REAL,12
 E,10162,10170
 E,10170,10164
 TYPE,2
 MAT,2
 REAL,12
 E,10161,10169
 E,10169,10163

!*****
 !* ELEMENTOS DO ESPAÇADOR 7 *
 !*****

TYPE,2
MAT,2
REAL,7
E,10179,10183
E,10183,200111
TYPE,2
MAT,2
REAL,8
E,10177,10181
E,10181,300111
TYPE,2
MAT,2
REAL,9
E,10182,10178
E,400111,10182
TYPE,2
MAT,2
REAL,10
E,10184,10180
E,100111,10184
TYPE,2
MAT,2
REAL,11
E,10178,10187
E,10187,10177
TYPE,2
MAT,2
REAL,11
E,10180,10188
E,10188,10179
TYPE,2
MAT,2
REAL,12
E,10178,10186
E,10186,10180
TYPE,2
MAT,2
REAL,12
E,10177,10185
E,10185,10179

!*****
!* RESTRIÇÕES DA FIXAÇÃO *
!*****

! ANCORAGEM 1
D,10061,ALL
D,10041,ALL
D,10042,ALL
D,10043,ALL
D,10044,ALL
D,10062,ALL
D,10063,ALL
D,10001,ALL
D,10011,ALL

D,10021,ALL
D,10031,ALL
! ANCORAGEM 2
D,10071,ALL
D,10051,ALL
D,10052,ALL
D,10053,ALL
D,10054,ALL
D,10072,ALL
D,10073,ALL
D,10002,ALL
D,10012,ALL
D,10022,ALL
D,10032,ALL

!*****
!* RESTRIÇÃO DOS NÓS DOS ESPAÇADORES *
!*****

! ESPAÇADOR 1

D,10081,ROTX
D,10082,ROTX
D,10083,ROTX
D,10084,ROTX
D,10085,ROTX
D,10086,ROTX
D,10087,ROTX
D,10088,ROTX
D,10089,ROTX
D,10090,ROTX
D,10091,ROTX
D,10092,ROTX

! ESPAÇADOR 2

D,10097,ROTX
D,10098,ROTX
D,10099,ROTX
D,10100,ROTX
D,10101,ROTX
D,10102,ROTX
D,10103,ROTX
D,10104,ROTX
D,10105,ROTX
D,10106,ROTX
D,10107,ROTX
D,10108,ROTX

! ESPAÇADOR 3

D,10113,ROTX
D,10114,ROTX
D,10115,ROTX
D,10116,ROTX
D,10117,ROTX
D,10118,ROTX
D,10119,ROTX

D,10120,ROTX
D,10121,ROTX
D,10122,ROTX
D,10123,ROTX
D,10124,ROTX

! ESPAÇADOR 4

D,10129,ROTX
D,10130,ROTX
D,10131,ROTX
D,10132,ROTX
D,10133,ROTX
D,10134,ROTX
D,10135,ROTX
D,10136,ROTX
D,10137,ROTX
D,10138,ROTX
D,10139,ROTX
D,10140,ROTX

! ESPAÇADOR 5

D,10145,ROTX
D,10146,ROTX
D,10147,ROTX
D,10148,ROTX
D,10149,ROTX
D,10150,ROTX
D,10151,ROTX
D,10152,ROTX
D,10153,ROTX
D,10154,ROTX
D,10155,ROTX
D,10156,ROTX

! ESPAÇADOR 6

D,10161,ROTX
D,10162,ROTX
D,10163,ROTX
D,10164,ROTX
D,10165,ROTX
D,10166,ROTX
D,10167,ROTX
D,10168,ROTX
D,10169,ROTX
D,10170,ROTX
D,10171,ROTX
D,10172,ROTX

! ESPAÇADOR 7

D,10177,ROTX
D,10178,ROTX
D,10179,ROTX
D,10180,ROTX
D,10181,ROTX

D,10182,ROTX
D,10183,ROTX
D,10184,ROTX
D,10185,ROTX
D,10186,ROTX
D,10187,ROTX
D,10188,ROTX

!*****

!* CRIAÇÃO DE CONJUNTO DE NÓS CONDUTORES_V1 *

!*****

ESEL,S,TYPE, ,101
CM, CONDUCT_V1, ELEM
NSLE,S
NSEL,U,LOC,Z,10,1000
CM, CONDUCT_V1_NODE, NODE

/SOLU

ALLSEL,ALL
CMSEL,S,CONDUCT_V1_NODE
ESEL,S,ENAME, ,BEAM4
ESEL,S,TYPE,,111
NSLE,U
D,ALL,ROTX
D,ALL,UY
ALLSEL,ALL
ACEL,0,0,9.81, ! Aceleração da gravidade

!*****

!* PARÂMETROS DE SOLUÇÃO *

!*****

ANTYPE, 4 ! Análise dinâmica transiente
TRNOPT,FULL ! O método é full (integração passo a passo)
LUMPM,0 ! Não utiliza matriz de massa concentrada
ALPHAD,0.03836*1.00 ! Inserção de amortecimento alpha >> [M]
BETAD, 0.00063*1.00 ! Inserção de amortecimento beta >> [K]
NLGEOM,1
KBC, 0 ! Gravidade aplicada como ramped loading
NLGEOM,1 ! Inclusão dos efeitos de não-linearidade geom.
NROPT,FULL, , ! O método resolvidor é o Newton-raphson full
LUMPM,1 ! Utiliza parâmetros de massa concentrados
EQSLV,FRONT, ,0, ! Equações resolvidas pelo frontal solver
PIVCHECK,OFF ! Não checa small pivot
SSTIF,1 ! Ativação do modo stress-stiffening
TOFFST,0,
NEQIT, 40 ! Número de iterações por substep
Nsub_ini = 200 ! Quantidade inicial de substeps
Nsub_min = 10 ! Mínima quantidade de substeps
Nsub_max = 200000 ! Máxima quantidade de substeps

NSUBST,Nsub_ini,Nsub_max,Nsub_min
OUTRES,ERASE
OUTRES,NSOL,-50

```

OUTRES,RSOL,-50
ISWRITE,1           ! Armazena as tensões
PSTRES,1
AUTOTS,1           ! Ativa o recurso auto time-stepping
TIME,20            ! Loadstep 1 - Peso próprio
SOLVE
SAVE

```

```

!*****
!* DETERMINAÇÃO DOS CARREGAMENTOS *
!*****

```

```

CMSEL,S,CONDUT_V1_NODE
DDELE,ALL,UY
ALLSEL,ALL

```

```

!*****
! * LIBERANDO OS NÓS DA ANCORAGEM 1 *
!*****

```

```

NSEL,S,,,10001
NSEL,A,,,10011
NSEL,A,,,10021
NSEL,A,,,10031
DDELE,ALL,UX
DDELE,ALL,UZ
DDELE,ALL,ROTY
DDELE,ALL,ROTZ
ALLSEL,ALL

```

```

!*****
! * LIBERANDO OS NÓS DA ANCORAGEM 2 *
!*****

```

```

NSEL,S,,,10002
NSEL,A,,,10012
NSEL,A,,,10022
NSEL,A,,,10032
DDELE,ALL,UX
DDELE,ALL,UZ
DDELE,ALL,ROTY
DDELE,ALL,ROTZ
ALLSEL,ALL

```

```

!*****
!* LIBERANDO OS NÓS CENTRAIS DAS ANCORAGENS 1 E 2 *
!*****

```

```

DDELE,10062,ALL
DDELE,10063,ALL
DDELE,10072,ALL
DDELE,10073,ALL

```

```

!*****
!* LIBERANDO AS RESTRIÇÕES ROTX DOS NÓS DOS ESPAÇADORES *
!*****

```

```

! ESPAÇADOR 1
DDELE,10081,ROTX

```

DDELE,10082,ROTX
DDELE,10083,ROTX
DDELE,10084,ROTX
DDELE,10085,ROTX
DDELE,10086,ROTX
DDELE,10087,ROTX
DDELE,10088,ROTX
DDELE,10089,ROTX
DDELE,10090,ROTX
DDELE,10091,ROTX
DDELE,10092,ROTX

! ESPAÇADOR 2

DDELE,10097,ROTX
DDELE,10098,ROTX
DDELE,10099,ROTX
DDELE,10100,ROTX
DDELE,10101,ROTX
DDELE,10102,ROTX
DDELE,10103,ROTX
DDELE,10104,ROTX
DDELE,10105,ROTX
DDELE,10106,ROTX
DDELE,10107,ROTX
DDELE,10108,ROTX

! ESPAÇADOR 3

DDELE,10113,ROTX
DDELE,10114,ROTX
DDELE,10115,ROTX
DDELE,10116,ROTX
DDELE,10117,ROTX
DDELE,10118,ROTX
DDELE,10119,ROTX
DDELE,10120,ROTX
DDELE,10121,ROTX
DDELE,10122,ROTX
DDELE,10123,ROTX
DDELE,10124,ROTX

! ESPAÇADOR 4

DDELE,10129,ROTX
DDELE,10130,ROTX
DDELE,10131,ROTX
DDELE,10132,ROTX
DDELE,10133,ROTX
DDELE,10134,ROTX
DDELE,10135,ROTX
DDELE,10136,ROTX
DDELE,10137,ROTX
DDELE,10138,ROTX
DDELE,10139,ROTX
DDELE,10140,ROTX

! ESPAÇADOR 5

DDELE,10145,ROTX
DDELE,10146,ROTX
DDELE,10147,ROTX
DDELE,10148,ROTX
DDELE,10149,ROTX
DDELE,10150,ROTX
DDELE,10151,ROTX
DDELE,10152,ROTX
DDELE,10153,ROTX
DDELE,10154,ROTX
DDELE,10155,ROTX
DDELE,10156,ROTX

! ESPAÇADOR 6

DDELE,10161,ROTX
DDELE,10162,ROTX
DDELE,10163,ROTX
DDELE,10164,ROTX
DDELE,10165,ROTX
DDELE,10166,ROTX
DDELE,10167,ROTX
DDELE,10168,ROTX
DDELE,10169,ROTX
DDELE,10170,ROTX
DDELE,10171,ROTX
DDELE,10172,ROTX

! ESPAÇADOR 7

DDELE,10177,ROTX
DDELE,10178,ROTX
DDELE,10179,ROTX
DDELE,10180,ROTX
DDELE,10181,ROTX
DDELE,10182,ROTX
DDELE,10183,ROTX
DDELE,10184,ROTX
DDELE,10185,ROTX
DDELE,10186,ROTX
DDELE,10187,ROTX
DDELE,10188,ROTX

!*****

!* 1ª FAIXA DE INCIDÊNCIA *

!*****

CMSEL, S, CONDUCT_V1_NODE
NSEL, R, LOC,X,0,45
ESLN, S
ESEL, R, TYPE,,101
CM, FUN001, NODE
ALLSEL, ALL

```
!*****  
!* 2ª FAIXA DE INCIDÊNCIA *  
!*****  
CMSEL, S, CONDUCT_V1_NODE  
NSEL , R, LOC,X,45,135  
ESLN , S  
ESEL , R, TYPE,,101  
CM, FUN002, NODE  
ALLSEL, ALL
```

```
!*****  
!* 3ª FAIXA DE INCIDÊNCIA *  
!*****  
CMSEL, S, CONDUCT_V1_NODE  
NSEL , R, LOC,X,135,225  
ESLN , S  
ESEL , R, TYPE,,101  
CM, FUN003, NODE  
ALLSEL, ALL
```

```
!*****  
!* 4ª FAIXA DE INCIDÊNCIA *  
!*****  
CMSEL, S, CONDUCT_V1_NODE  
NSEL , R, LOC,X,225,315  
ESLN , S  
ESEL , R, TYPE,,101  
CM, FUN004, NODE  
ALLSEL, ALL
```

```
!*****  
!* 5ª FAIXA DE INCIDÊNCIA *  
!*****  
CMSEL, S, CONDUCT_V1_NODE  
NSEL , R, LOC,X,315,405  
ESLN , S  
ESEL , R, TYPE,,101  
CM, FUN005, NODE  
ALLSEL, ALL
```

```
!*****  
!* 6ª FAIXA DE INCIDÊNCIA *  
!*****  
CMSEL, S, CONDUCT_V1_NODE  
NSEL , R, LOC,X,405,450  
ESLN , S  
ESEL , R, TYPE,,101  
CM, FUN006, NODE  
ALLSEL, ALL
```

```
!*****
!* ANÁLISE FULL TRANSIENTE *
!*****
KBC,0
ALPHAD,0.03836*1.15      ! Inserção de amortecimento alpha >> [M]
BETAD, 0.00063*1.15     ! Inserção de amortecimento beta >> [K]
time,550*2
AUTOTS,1.0
DELTIM,0.05, 0.00125/10, 0.075
OUTRES,ERASE
OUTRES,NSOL,-11000*1.25
OUTRES,RSOL,-11000*1.25
RESCONTRL,DEFINE,ALL,-10
NEQIT,100
/INPUT,'KAIMAL','txt', , , 0      ! Este programa é mostrado no anexo F
PARRES,CHANGE,'par','par', ' '

! FORÇAS NOS CONDUTORES

F,FUN001,FY,%FUNC001%
F,FUN002,FY,%FUNC002%
F,FUN003,FY,%FUNC003%
F,FUN004,FY,%FUNC004%
F,FUN005,FY,%FUNC005%
F,FUN006,FY,%FUNC006%

SAVE
SOLVE
```

APÊNDICE F – ROTINA COMPLEMENTAR DA ANÁLISE DINÂMICA

```

|*****
!* CARREGAMENTO NÃO-DETERMINÍSTICO DO VENTO *
!* GERAÇÃO DE SÉRIES TEMPORAIS PARA A PARCELA FLUTUANTE *
!* DA VELOCIDADE LONGITUDINAL DO VENTO *
|*****
|*****
!* DADOS DE ENTRADA 1 - VEL. BÁSICA, PARÂMETROS DE RUGOSIDADE *
|*****
U0 = 50.00          ! Velocidade básica do vento [m/s]
z = 28.15           ! Altura em [m]
z0 = 0.07           ! Comprimento de rugosidade
zd = 0              ! Deslocamento do plano zero (Aprox. nulo)
S1 = 1.00           ! Fator topográfico
S3 = 1.10           ! Fator estatístico
p = 0.15            ! Expoente relativo à rugosidade do terreno

|*****
!* DADOS DE ENTRADA 2 - INPUT PARA O ESPECTRO DE KAIMAL *
|*****
f_up = 12.0001      ! Frequência limite superior
f_lo = 0.0001       ! Frequência limite inferior
f_inc = 0.0010      ! Incremento da função

|*****
!* DADOS DE ENTRADA 3 - PROPRIEDADES DO HISTÓRICO DE VELOCIDADE *
|*****
time_low = 80.000    ! Lower boundary of time range
time_upp = 1280.000 ! Upper boundary of time range
time_inc = 0.0125    ! Time increment

div_spectrum = 500   ! Spectrum divisions
freq_sup = 10.0150   ! Frequencia superior
freq_inf = 0.0150    ! Frequencia inferior
tau = 4.350          ! Defasagem entre as funções

|*****
!* DADOS DE ENTRADA 4 - DADOS PARA GERAÇÃO DAS FORÇAS NODAIS *
|*****
Ca_cond = 1.1        ! Coeficiente de arrasto do condutor
diam = 25.16E-3      ! Diâmetro do condutor

|*****
!* DADOS CALCULADOS *
|*****

|*****
!* DEFINIÇÃO DE CONSTANTES *
|*****
pi = acos(-1)
r2 = sqrt( 2)

```

```

!*****
!* CÁLCULO DA VELOCIDADE MÉDIA DE REFERÊNCIA (10M DE ALTURA) *
!*****
V10 = 0.69*U0*S1*S3

!*****
!* CÁLCULO DA VELOCIDADE E FORÇA MÉDIA NA ALTURA "Z" *
!*****
Vz = V10*(z/10)**0.15
Press_avg = 0.613*Ca_cond*diam*Delt_X*(Vz)**2

!*****
!* DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE FRICÇÃO U *
!*****
v_fric = 0.4*Vz/(log(z/z0))

!*****
!* ENTRADA DO ESPECTRO DE KAIMAL *
!*****
num_f = (f_up-f_lo)/f_inc + 1
*DIM, Sv_0, TABLE, num_f, , , , ,
*DIM, Sv_1, TABLE, num_f, , , , ,
i = 1
*DO, f, f_lo, f_up, f_inc

x = f*(z-zd)/Vz
Sv_0(i, 1) = 200*x*v_fric**2/((1+50*x)**(5/3))/f
Sv_0(i, 0) = f

Sv_1(i, 1) = 200*x*v_fric**0/((1+50*x)**(5/3))
Sv_1(i, 0) = f
i = i + 1

*ENDDO

!*****
!* DIMENSIONAMENTO DAS FUNÇÕES FORÇA NO TEMPO *
!*****
func_n = 6 ! Number of defined functions
*DIM,NOME,CHAR,100

NOME( 1 ,1 ,1) ='FUNC001'
NOME( 2 ,1 ,1) ='FUNC002'
NOME( 3 ,1 ,1) ='FUNC003'
NOME( 4 ,1 ,1) ='FUNC004'
NOME( 5 ,1 ,1) ='FUNC005'
NOME( 6 ,1 ,1) ='FUNC006'

```

```

|*****
!* DETERMINAÇÃO DO HISTÓRICO ATRAVÉS DE SÉRIE DE FOURIER *
|*****
time_pos  = (time_upp - time_low)/time_inc
freq_inc  = (freq_sup - freq_inf)/div_spectrum
*DIM, FUNC000, TABLE, time_pos+4
*DIM, THET, ARRAY, div_spectrum+1
*DIM, FourCoef, ARRAY, div_spectrum+1
*DO, i, 1, func_n
*DIM, %NOME(i, 1, 1)%, TABLE, time_pos+4, , , , ,
*ENDDO

*VFILL, THET, RAND, 0, 2*pi,
k = 1
*DO, f, freq_inf, freq_sup, freq_inc
FourCoef(k) = SQRT(Sv_0(f)*freq_inc)
k = k + 1

*ENDDO

|*****
!* CARREGAMENTOS NOS CONDUTORES *
|*****
j = 1
FUNC001(j, 0) = 0
FUNC002(j, 0) = 0-tau*1
FUNC003(j, 0) = 0-tau*2
FUNC004(j, 0) = 0-tau*3
FUNC005(j, 0) = 0-tau*4
FUNC006(j, 0) = 0-tau*5

FUNC000(j, 1) = 0
FUNC001(j, 1) = 0
FUNC002(j, 1) = 0
FUNC003(j, 1) = 0
FUNC004(j, 1) = 0
FUNC005(j, 1) = 0
FUNC006(j, 1) = 0

j = 2
FUNC001(j, 0) = 50
FUNC002(j, 0) = 50-tau*1
FUNC003(j, 0) = 50-tau*2
FUNC004(j, 0) = 50-tau*3
FUNC005(j, 0) = 50-tau*4
FUNC006(j, 0) = 50-tau*5

FUNC000(j, 1) = 0
FUNC001(j, 1) = 0
FUNC002(j, 1) = 0
FUNC003(j, 1) = 0
FUNC004(j, 1) = 0
FUNC005(j, 1) = 0
FUNC006(j, 1) = 0

```

```

j = 3
FUNC001(j, 0) = time_low-time_inc
FUNC002(j, 0) = time_low-time_inc-tau*1
FUNC003(j, 0) = time_low-time_inc-tau*2
FUNC004(j, 0) = time_low-time_inc-tau*3
FUNC005(j, 0) = time_low-time_inc-tau*4
FUNC006(j, 0) = time_low-time_inc-tau*5

FUNC000(j, 1) = Vz
FUNC001(j, 1) = Press_avg
FUNC002(j, 1) = Press_avg
FUNC003(j, 1) = Press_avg
FUNC004(j, 1) = Press_avg
FUNC005(j, 1) = Press_avg
FUNC006(j, 1) = Press_avg

j = 4
*DO, t, time_low, time_upp, time_inc
k = 1
Soma = 0
*DO, f, freq_inf, freq_sup, freq_inc
Soma = Soma + FourCoef(k)*cos(2*pi*f*t+THET(k))
k = k + 1

*ENDDO

Float = r2*Soma
FUNC000(j, 1) = Float
Press = 0.613*Ca_cond*diam*Delt_X*(Vz+Float)**2

FUNC001(j, 1) = Press
FUNC002(j, 1) = Press
FUNC003(j, 1) = Press
FUNC004(j, 1) = Press
FUNC005(j, 1) = Press
FUNC006(j, 1) = Press

FUNC000(j, 0) = +t
FUNC001(j, 0) = +t
FUNC002(j, 0) = +t-tau*1
FUNC003(j, 0) = +t-tau*2
FUNC004(j, 0) = +t-tau*3
FUNC005(j, 0) = +t-tau*4
FUNC006(j, 0) = +t-tau*5

j = j + 1

*ENDDO

PARSAV,ALL,'par','par',''

```