

MECÂNICA DO COLAPSO AEROELÁSTICO DE TORRES TEE

Rosângela Santarem Rodrigues

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

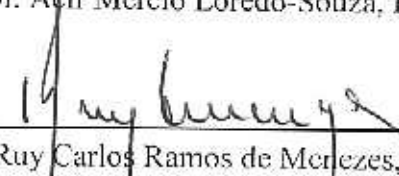
Aprovada por:

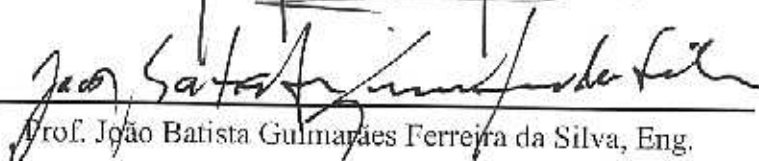
  
Prof. Ronaldo Carvalho Battista, Ph.D.

  
Prof. Michèle Schubert Pfeil, D.Sc.

  
Prof. Luiz Bevilacqua, Ph.D.

  
Prof. Acir Mécio Loredó-Souza, Ph.D.

  
Prof. Ruy Carlos Ramos de Menezes, D. Ing.

  
Prof. João Batista Guimarães Ferreira da Silva, Eng.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2004

RODRIGUES, ROSÂNGELA SANTAREM

Mecânica do Colapso Aeroelástico de  
Torres TEE [Rio de Janeiro] 2004

XXIII, 183p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,  
D.Sc., Engenharia Civil, 2004)

Tese – Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, COPPE

1.Torres TEE, 2. Dinâmica, 3.Instabilidade

I. COPPE/UFRJ    II. Título (série)

Aos meus pais,  
Luiz e Gessy.

Ao Rucos,  
pelo apoio e paciência em me ouvir.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Ronaldo Carvalho Battista pelo apoio, incentivo e por todo conhecimento que adquiri com sua ajuda ao longo desses anos de trabalho.

À Prof<sup>ª</sup>. Michèle Schubert Pfeil pela cessão e suporte com o programa Medifem.

Ao Marco Pinheiro pelo incentivo e grande ajuda com o Maple.

Aos colegas Roberto Almeida Souza, Vinícius Oliveira e Wendell Varela que, sempre solícitos, fizeram com que meus problemas computacionais deixassem de existir.

Ao Flávio Barbosa, Michèle Farage e Mayra Perlingeiro pelo incentivo e companhia nesses anos.

Aos colegas Emerson Figueiredo e Walber Correa pelo apoio com os preparativos para a defesa da tese.

À Ana Maria Teixeira, Norma Blandon, Patrícia Hallak e a todos os colegas, meus contemporâneos no Laboratório de Estruturas, que, com o convívio diário, me ajudaram a tornar esses anos muito mais leves.

Aos professores e funcionários da área de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

## MECÂNICA DO COLAPSO AEROELÁSTICO DE TORRES TEE

Rosângela Santarem Rodrigues

Março/2004

Orientador: Ronaldo Carvalho Battista

Programa: Engenharia Civil

Neste trabalho analisa-se o comportamento dinâmico e o mecanismo de colapso de torres de linhas de transmissão de energia elétrica – torres TEE – sob ação do vento. Investiga-se 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.

Os Capítulos II, III e IV são endereçados àqueles que vierem dar continuidade à esta linha de pesquisa, podendo ter sua leitura dispensada por especialistas no assunto, que poderão dirigir-se diretamente ao Capítulo V.

Com auxílio de um modelo tridimensional em elementos finitos, que contempla a interação entre o escoamento de ar – cabos elétricos – estrutura, e dos procedimentos da análise dinâmica não-linear, é possível reproduzir os grandes deslocamentos angulares das cadeias de isoladores e cabos elétricos, despertados pela ação do vento numa linha real. Os resultados numéricos são 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 é sugerido como ferramenta auxiliar para a análise preliminar do comportamento não-linear e para estimativa da frequência fundamental do sistema estrutural.

Finalmente, é 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.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

## MECHANICS OF THE AEROELASTIC COLLAPSE OF TRANSMISSION LINE TOWERS

Rosângela Santarem Rodrigues

March/2004

Advisor: Ronaldo Carvalho Battista

Department: Civil Engineering

In this work the dynamic behaviour and the collapse mechanism of transmission line towers under the action of wind is analysed. It is investigated the scenario of a great number of accidents in which the design wind speed had not been reached and, also, without any kind of damage to the electric components of the transmission system, except those related to the collapse of towers.

Chapters II, III and IV are directed to those lecturers which will continue the research on wind action on slender structures, and they can be discarded by experts in the subject, which can begin the reading directly in Chapter V.

Applying a 3D-FEM model which takes into account the air flow – electric cables – structure interaction, and the procedures of the non-linear dynamic analysis, it is possible to represent the large displacements of the electric cables allowed by large angular displacements of the chains of insulators, induced by the wind action on an actual transmission line. Then, the numerical results are used to the tower stability and strength analyses, identifying localized failures at the structural components, as well as the mechanics of the global collapse.

A simplified analytical model is suggested as an auxiliary tool to be used in the preliminary analysis of the non-linear behaviour and in the evaluation of the system fundamental frequency; finally, a proposal of tuned mass damper – TMD – to be installed is presented, which is the corrective action for the problem in both cases: existing transmission line systems as well as new ones to be designed.

# MECÂNICA DO COLAPSO AEROELÁSTICO DE TORRES TEE

## CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

I.1 HISTÓRICO .....	1
I.2 ESCOPO DO TRABALHO .....	3

## CAPÍTULO II – DESCRIÇÃO, AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS DE VENTO

II.1 VENTOS FORTES NO BRASIL .....	5
II.1.1 Ciclones e Anticiclones.....	5
II.1.2 Ciclones Extratropicais .....	6
II.1.3 Ciclones Tropicais.....	6
II.1.4 Tormentas Elétricas.....	7
II.1.5 Tornados.....	8
II.2 METODOLOGIA DE AQUISIÇÃO DE DADOS .....	9
II.2.1 Medida de Vento – Anemômetros .....	9
II.2.2 Instalação de Anemômetros.....	12
II.2.3 Aquisição de Dados .....	14
II.3 CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA – PERFIL VERTICAL DA VELOCIDADE MÉDIA ..	18
II.3.1 Lei Potencial .....	19
II.3.2 Lei Logarítmica.....	19
II.4 CLIMATOLOGIA ESTATÍSTICA DE VENTOS EXTREMOS .....	21
II.4.1 Confiabilidade dos Registros de Velocidade do Vento .....	21
II.4.2 Homogeneidade dos Registros de Velocidade do Vento.....	22
II.5 ROSA DOS VENTOS E AZIMUTE .....	25

## CAPÍTULO III – ESPECTROS DE ENERGIA DO VENTO – TURBULÊNCIA

III.1 ESPECTRO DA COMPONENTE LONGITUDINAL DA TURBULÊNCIA .....	29
III.1.1 Espectro de Davenport .....	29
III.1.2 Espectro de Kaimal.....	30
III.1.3 Definição de Espectros a partir de Dados Experimentais–Metodologia.	31

III.1.4 A Universalidade dos Espectros de Vento .....	33
III.1.5 Determinação Experimental de um Espectro de Vento.....	34
III.2 ESPECTROS DAS COMPONENTES LATERAL E VERTICAL DA TURBULÊNCIA.....	38

## **CAPÍTULO IV – TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS DE VENTO**

IV.1 ESTIMATIVA DE EXTREMOS EM REGIÕES DE VENTOS BEM COMPORTADOS .....	39
IV.2 MODELAGEM ESTATÍSTICA .....	40
IV.2.1 Variáveis Aleatórias e Distribuição de Probabilidade.....	40
IV.2.2 Comportamento de uma Variável Aleatória – Parâmetros Estatísticos ..	42
IV.2.3 Estatística de Valores Extremos.....	45
IV.3 APLICAÇÃO DA TEORIA DA PROBABILIDADE.....	56
IV.3.1 Identificação do Tipo de Distribuição Aplicável à Amostra de Dados...56	
IV.3.2 Métodos de Monte Carlo.....	58
IV.3.3 Estimativa de Parâmetros de Distribuição.....	59
IV.3.4 Estimativa de Velocidade do Vento com Período de Retorno $\bar{N}$ .....	63
IV.4 MODELAGEM PROBABILÍSTICA DA VELOCIDADE MÁXIMA ANUAL DO VENTO .66	
EVOLUÇÃO DA PESQUISA – COMENTÁRIOS	
IV.5 ESTIMATIVA DE EXTREMOS EM REGIÕES COM REGISTROS DE DADOS	
INSUFICIENTES.....	67
IV.6 EXEMPLO – DADOS DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE BOISE (IDAHO, EUA) .70	
IV.6.1 Características da Amostra.....	70
IV.6.2 Velocidade Máxima para o Intervalo de Recorrência de 50 anos.....	73

## **CAPÍTULO V – AÇÃO DO VENTO EM TORRES E LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

V.1 INTRODUÇÃO .....	74
V.2 O PROJETO CONVENCIONAL DAS TORRES .....	75
V.3 FENÔMENOS INDUZIDOS PELA AÇÃO DO VENTO EM LTS.....	77
V.4 AÇÃO DE TORMENTA ELÉTRICA .....	82
V.5 MODELAGEM DAS FORÇAS DE VENTO SOBRE A ESTRUTURA .....	83

V.5.1 Forças de Vento .....	83
V.5.2 Simulação Numérica da Turbulência Atmosférica.....	85

## **CAPÍTULO VI – MODELAGEM DO SISTEMA ESTRUTURAL TORRES - LINHAS TEE**

VI.1 DESCRIÇÃO DO MODELO DE ANÁLISE ESTRUTURAL .....	86
VI.2 MODELAGEM MATEMÁTICA – EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO .....	87
VI.3 MODELAGEM SIMPLIFICADA DO CONJUNTO ISOLADORES-CONDUTORES .....	88
VI.3.1 Efeito Dinâmico das Cadeias de Isoladores .....	88
VI.3.2 Modelo Matemático Simplificado – Pêndulo Duplo.....	89

## **CAPÍTULO VII – EXEMPLOS DE APLICAÇÃO E ANÁLISE**

VII.1 DESCRIÇÃO DA TORRE AUTOPORTANTE TIPO DELTA .....	97
VII.1.1 Interação Solo-Estrutura.....	97
VII.1.2 Características Dinâmicas do Modelo Estrutural.....	98
VII.1.3 Forças de Vento – Histórias no Tempo.....	100
VII.1.4 Resultados do Modelo Dinâmico Não-Linear.....	105
VII.1.5 Verificação de Estabilidade e Resistência da Torre .....	108
VII.1.6 Análise dos Condutores Elétricos e Pára-Raios .....	111
VII.1.7 Comportamento do Conjunto Cadeias de Isoladores – Condutores Elétricos.....	115
VII.1.8 Resultados para o Modelo Estrutural sob Ação de Tormenta Elétrica	120
VII.1.9 Resultados do Modelo Dinâmico Linear .....	123
VII.1.10 Comparação entre Resultados dos Modelos Linear e Não-Linear.....	126
VII.2 VERIFICAÇÃO DA TORRE DA CEEE VIA MODELAGEM DINÂMICA NÃO-LINEAR .....	127
VII.2.1 Características Dinâmicas do Modelo Estrutural.....	128
VII.2.2 Forças de Vento – Histórias no Tempo.....	132
VII.2.3 Resultados do Modelo Dinâmico Não-Linear.....	134
VII.3 TORRE DA CEEE – VERIFICAÇÃO SEGUNDO A NBR 6123.....	137
VII.3.1 Identificação da Metodologia.....	137
VII.3.2 Método Dinâmico Simplificado.....	137

VII.3.3	Resposta Estrutural na Direção Transversal à Incidência do Vento ....	139
VII.3.4	Forças de Vento no Sistema de Transmissão da CEEE .....	140
VII.3.5	Esforços Internos, Verificações de Estabilidade e Resistência da Torre .....	143
VII.3.6	Esforços Internos nos Cabos .....	144
VII.3.7	Método do Equivalente Estático .....	145
VII.4	CORRELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS COM OS VÁRIOS MODELOS DE ANÁLISE DA TORRE DA CEEE.....	149
<b>CAPÍTULO VIII – REDUÇÃO DE VIBRAÇÕES COM AMORTECEDORES APNL</b>		
VIII.1	INTRODUÇÃO .....	151
VIII.2	FORMULAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE MOVIMENTO .....	152
VIII.3	MODELO ANALÍTICO APLICADO À TORRE TIPO DELTA .....	153
VIII.4	MODELO 3D-MEF COM ATENUADOR PENDULAR NÃO-LINEAR.....	156
<b>CAPÍTULO IX – COMENTÁRIOS FINAIS E CONTINUIDADE DA PESQUISA</b>		
IX.1	COMENTÁRIOS FINAIS .....	158
IX.2	CONTINUIDADE DA PESQUISA.....	160
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>164</b>
<b>APÊNDICE A – ANEMÔMETROS.....</b>		<b>169</b>
<b>APÊNDICE B – NBR 6123 – COEFICIENTES DE ARRASTO SUPERFICIAL .....</b>		<b>173</b>
<b>APÊNDICE C – PROGRAMA MEDIFEM – ENTRADA DE DADOS .....</b>		<b>174</b>
<b>APÊNDICE D – FIGURAS E TABELAS DA NBR 6123 .....</b>		<b>180</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

I.1 Silhuetas Analisadas na Referência [1].....	2
---	---

### CAPÍTULO II – DESCRIÇÃO, AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS DE VENTO

II.1 Moinho de Vento .....	9
II.2 Cata-Vento – Desenho Esquemático .....	10
II.3 Anemômetro de Copo.....	11
II.4 Indicador de Direção do Vento .....	11
II.5 Sensores de Velocidade e/ou Direção do Vento.....	12
II.6 Rosa dos Ventos (Brest – França) [10].....	25
II.7 Rosa dos Ventos (Caen – França) [10] .....	26
II.8 Altitude e Azimute – Convenção.....	27
II.9 Variação do Azimute da Direção do Vento .....	28

### CAPÍTULO III – ESPECTROS DE ENERGIA DO VENTO – TURBULÊNCIA

III.1 Espectros de Davenport, Kaimal, Harris e Kármán [4].....	31
III.2 Velocidade do Vento – Amostra .....	35
III.3 Anemômetro Instalado no Vão Central da Ponte Rio-Niterói.....	35
III.4 Espectro de Davenport (z=10m, NBR 6123 – Categoria I).....	37
III.5 Espectro de Kaimal (z=10m, $\bar{U}(10) = 20$ m/s ) .....	37

## **CAPÍTULO IV – TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS DE VENTO**

IV.1 Histograma .....	41
IV.2 Função Densidade de Probabilidade .....	41
IV.3 Função Cumulativa de Distribuição .....	42
IV.4 Representação Gráfica da Mediana, Modo e Valor Esperado [19].....	43,44
IV.5 Distribuições de Extremos para Diferentes Valores de n.....	51
IV.6 Histograma de Ocorrências .....	71
IV.7 Distribuição da Densidade de Freqüência.....	71

## **CAPÍTULO V – AÇÃO DO VENTO EM TORRES E LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

V.1 Árvores de Carregamento .....	76
V.2 Estação Experimental de Hornsgrinde (1964).....	77
V.3 Amortecedores Tipo ADS – <i>Stockbridge</i> .....	79
V.4 Armadura Pré-Formada .....	79
V.5 Galope de Subvão – Desenho Esquemático [6].....	81
V.6 Espaçadores de Feixe.....	82
V.7 Ação de Língua de Vento sobre uma Torre Autoportante.....	82

## **CAPÍTULO VI – MODELAGEM DO SISTEMA ESTRUTURAL TORRES - LINHAS TEE**

VI.1 Modelo Estrutural.....	86
VI.2 Comportamento do Pêndulo Duplo – Comparação.....	88
VI.3 Pêndulo Duplo.....	89
VI.4 Formulação do Pêndulo – Resultados .....	94

## CAPÍTULO VII – EXEMPLOS DE APLICAÇÃO E ANÁLISE

VII.1 Torre Delta – Silhueta .....	97
VII.2 Modo 1 – Oscilação Lateral ( $f_1=0,158$ Hz) [1] .....	99
VII.3 Modo 3 – Oscilação Lateral ( $f_3=0,200$ Hz) [1] .....	99
VII.4 Modo 7 – Oscilação Lateral ( $f_7=0,481$ Hz) [1] .....	100
VII.5 Modo 10 – Oscilação Longitudinal ( $f_{10}=1,786$ Hz) [1] .....	100
VII.6 Perfil Vertical de Velocidades Médias [1] .....	101
VII.7 Turbulência – Função 1 ( $T_{\text{máx}}=840$ segundos).....	103
VII.8 Turbulência – Função 1 ( $T_{\text{máx}}=900$ segundos).....	104
VII.9 Função Densidade Espectral – Intervalo 0,00 ~ 0,50 Hz.....	104,105
VII.10 Nós 1e 2 – Detalhe .....	106
VII.11 Nó 1 – História de Deslocamentos na Direção X .....	106
VII.12 Nó 1 – Densidade Espectral de Resposta (Direção X).....	106
VII.13 Nó 2 – História de Deslocamentos na Direção X .....	107
VII.14 Nó 2 – Densidade Espectral de Resposta (Direção X).....	107
VII.15 Barras Subdimensionadas .....	108
VII.16 Esforços Axiais nos Montantes – Histórias no Tempo .....	110
VII.17 Densidade Espectral de Resposta (Esforço Axial no Montante) .....	111
VII.18 História no Tempo do Esforço Axial no Condutor Elétrico .....	112
VII.19 Deformada no Tempo $t=147,1$ segundos (Vista Geral) .....	113
VII.20 Geometria do Condutor Elétrico no Tempo $t=147,1$ segundos .....	113

VII.21	História no Tempo do Esforço Axial no Pára-Raio .....	114
VII.22	Geometria do Pára-Raio no Tempo $t=147,1$ segundos .....	114,115
VII.23	Esforço Axial na Biela de Suspensão – História no Tempo .....	115
VII.24	Configurações do Conjunto sob Ação do Vento.....	116
VII.25	Ângulo da Cadeia de Isoladores ( $\theta_1$ ) – História no Tempo .....	116
VII.26	Ângulo do Condutor Elétrico ( $\theta_2$ ) – História no Tempo.....	117
VII.27	Flecha do Condutor Elétrico – História no Tempo .....	118
VII.28	Ângulo do Condutor Elétrico sob Ação de Forças de Arrasto.....	118
VII.29	Deslocamentos na Extremidade da Viga em Treliça (Ação de Língua de Vento)	121
VII.30	Esforços Axiais nos Montantes sob Ação de Língua de Vento .....	122
VII.31	Espectro de Resposta no Intervalo $0,5 \sim 0,75$ Hz – Nó 2 .....	123
VII.32	Esforço Axial na Biela de Suspensão – História no Tempo .....	125
VII.33	Silhueta da Torre da CEEE .....	127
VII.34	Torre CEEE – Modo 1 – Oscilação Lateral ( $f_1=0,160$ Hz).....	129
VII.35	Torre CEEE – Modo 2 – Oscilação Longitudinal ( $f_2=0,174$ Hz) .....	129
VII.36	Torre CEEE – Modo 3 – Oscilação Lateral ( $f_3=0,207$ Hz).....	129
VII.37	Torre CEEE – Modo 4 – Oscilação Longitudinal ( $f_4=0,290$ Hz) .....	130
VII.38	Torre CEEE – Modo 5 – Oscilação Longitudinal ( $f_5=0,323$ Hz) .....	130
VII.39	Torre CEEE – Modo 6 – Oscilação Longitudinal ( $f_6=0,335$ Hz) .....	130
VII.40	Torre CEEE – Modo 7 – Oscilação Lateral ( $f_7=0,486$ Hz).....	131
VII.41	Torre CEEE – Modo 8 – Oscilação Longitudinal ( $f_8=0,689$ Hz) .....	131

VII.42 Torre CEEE – Modo 9 – Oscilação Lateral ( $f_9=1,830$ Hz).....	131
VII.43 Torre CEEE – Modo 10 – Oscilação Longitudinal ( $f_{10}=2,303$ Hz) .....	132
VII.44 Estrutura Danificada pela Ação do Vento [46].....	135
VII.45 História de Deslocamentos do Condutor Elétrico (Detalhe).....	136
VII.46 NBR 6123 – Modelo Discreto 3D Acoplado (Torre-Cabos) [5] .....	138
VII.47 Composição das Forças de Vento no Condutor Elétrico .....	143
VII.48 Composição das Forças de Vento no Pára-Raio .....	143

## **CAPÍTULO VIII – REDUÇÃO DE VIBRAÇÕES COM AMORTECEDORES APNL**

VIII.1 Torre Delta com Amortecedores Pendulares Não-Lineares .....	151
VIII.2 Torre com APNL e Sistema Mecânico Análogo Simplificado .....	152
VIII.3 Resposta da Estrutura Controlada e Não-Controlada ( $\omega_1=\omega_p=\omega_e=0,99$ rad/s).....	153
VIII.4 Resposta da Estrutura Controlada e Não-Controlada – $l=10,27$ m.....	154
$\omega_p = \omega_1 = 0,99$ rad/s e $\omega_e \cong 0,9 \omega_1 = 0,90$ rad/s	
VIII.5 Resposta da Estrutura Controlada e Não-Controlada – $l=12,37$ m.....	155
$\omega_1 = 0,99$ rad/s e $\omega_p = \omega_e \cong 0,9 \omega_1 = 0,90$ rad/s	
VIII.6 Resposta da Estrutura Controlada e Não-Controlada – $l=12,37$ m.....	156
$\omega_1 = 0,99$ rad/s $\omega_p \cong 0,9 \omega_1 = 0,90$ rad/s $\omega_e \cong 1,1 \omega_1 = 1,10$ rad/s	

## **CAPÍTULO IX – COMENTÁRIOS FINAIS E CONTINUIDADE DA PESQUISA**

IX.1 Torre em V, estaiada – Silhueta .....	161
--	-----

## **APÊNDICE A - ANEMÔMETROS**

A.1 Anemômetro Ultrasônico.....	170
A.2 Tubo de Pitot Simples.....	171

A.3 Tubo de Pitot com Tomada Piezométrica para Medida de Velocidade.....	172
--	-----

## **APÊNDICE D – FIGURAS E TABELAS DA NBR 6123**

A.1 Figura 1 da NBR 6123.....	180
-------------------------------	-----

A.2 Figura 6 da NBR 6123.....	181
-------------------------------	-----

A.3 Figura 9 da NBR 6123.....	181
-------------------------------	-----

A.4 Tabela 1 da NBR 6123 .....	182
--------------------------------	-----

A.5 Tabela 14 da NBR 6123 .....	182
---------------------------------	-----

A.6 Tabela 10 da NBR 6123 .....	183
---------------------------------	-----

## ÍNDICE DE TABELAS

### CAPÍTULO II – DESCRIÇÃO, AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS DE VENTO

II.1 Escala de Intensidade da Velocidade do Vento (Ref.: UWO, London, Canada).....	5
II.2 Características do Sensor Padrão Estabelecido pela Agência NOAA.....	15
II.3 Velocidade do Vento Estimada [m/s] .....	16
II.4 Relação $u_* / u_{*1}$ para $z_{01}=0,07m$ .....	23
II.5 Valores de $\beta$ em função do comprimento de rugosidade $z_0$ .....	24
II.6 Coeficientes $c(t)$ .....	25

### CAPÍTULO IV – TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS DE VENTO

IV.1 Estação Meteorológica de <i>Great Falls</i> , Ma, EUA .....	64
Velocidade Máxima do Vento – Período de 1944 a 1977	
IV.2 Intervalos de Confiança para Velocidade do Vento na Estação de <i>Great Falls</i> .....	65
IV.3 Máximas Velocidades de Vento Anuais – Estação de Boise, Idaho, EUA.....	70

### CAPÍTULO VI – MODELAGEM DO SISTEMA ESTRUTURAL TORRES - LINHAS TEE

VI.1 Freqüências Naturais e Formas Modais – Efeito das Bielas de Suspensão.....	95
VI.2 Deslocamentos na Extremidade da Viga (Figura VI.2) .....	96

### CAPÍTULO VII – EXEMPLOS DE APLICAÇÃO E ANÁLISE

VII.1 Freqüências Naturais e Formas Modais de Vibração – Classificação [1].....	98
VII.2 Esforços Axiais nos Montantes (El. 0,00m) .....	109
VII.3 Resultado da Verificação dos Montantes (Equações VII.3) .....	110
VII.4 Forças de Tração nos Cabos .....	111

VII.5	Análise da Torre no Tempo $t=61,0$ segundos (Equações VII.3).....	112
VII.6	Verificação dos Montantes sob Ação de Língua de Vento sobre a Torre.....	122
VII.7	Esforços Internos nos Montantes (Análise Dinâmica Linear) .....	124
VII.8	Esforços de Tração nos Cabos (Análise Dinâmica Linear) .....	125
VII.9	Comparação dos Resultados de Esforços Internos nos Montantes.....	126
VII.10	Comparação dos Resultados de Esforços Internos nos Condutores Elétricos .....	126
VII.11	Comparação dos Resultados de Esforços Internos nas Cadeias de Isoladores .....	126
VII.12	Torre CEEE – Frequências Naturais e Formas Modais de Vibração.....	128
VII.13	Torre CEEE – Velocidade Média de Projeto.....	133
VII.14	Torre CEEE – Coeficientes de Arrasto.....	134
VII.15	Análise da Torre CEEE (Equações VII.3) .....	136
VII.16	Forças de Tração nos Cabos.....	136
VII.17	Torre CEEE – Parcela da Velocidade Média (Equação VII.12).....	140
VII.18	Cabos – Parcela da Velocidade Média (Equação VII.12).....	141
VII.19	Força Global de Vento sobre a Torre e Bielas de Suspensão (Equação VII.11) ...	142
VI.20	Verificação dos Montantes (Modelo Discreto – NBR 6123).....	144
VI.21	Forças de Tração nos Cabos (Modelo Discreto – NBR 6123).....	144
VI.22	Perfil da Velocidade Característica do Vento (Equação VII.17) .....	146
VII.23	Forças de Vento – Parcela da Torre (Equação VII.19).....	147
VII.24	Verificação dos Montantes (Equivalente Estático – NBR 6123).....	148
VII.25	Torre CEEE – Comparação dos Resultados de Esforços Internos nos Montantes	149
VII.26	Torre CEEE – Comparação dos Resultados das Forças nos Cabos.....	150

## **SIMBOLOGIA**

### **MAIÚSCULAS ROMANAS**

A – área da seção transversal

$A_i$  – área frontal efetiva da estrutura relativa ao trecho  $i$

C – matriz de amortecimento

$C_{a_i}$  – coeficiente de arrasto relativo à coordenada  $i$

$C_D(\alpha)$  – coeficiente de arrasto relativo ao ângulo de ataque  $\alpha$ .

$C_m$  – coeficiente de equivalência de momentos (Capítulo VII)

D – diâmetro do cabo

E – módulo de elasticidade do material

$E(x)$  – valor significativo ou valor esperado

$F_H$  – força modal

$F_r$  – fator de rajada (Convenção da NBR 6123)

$G_x$  – função ponto percentual (Capítulo IV)

$I_y$  – intensidade da turbulência longitudinal

K – matriz de rigidez

L – vão médio da linha de transmissão

L – escala longitudinal de turbulência (Capítulo III)

L – lagrangeano (Capítulo VI)

$L(z)$  – escala longitudinal de turbulência na cota  $z$

$L_1$  – comprimento da biela de suspensão

$L_2$  – flecha relativa ao centro de massa da catenária (modelo do pêndulo duplo)

M – matriz de massa

$M_n$  – momento fletor resistente de cálculo (Capítulo VII)

$M_u$  – momento fletor solicitante de cálculo (Capítulo VII)

$N(t)$  – processo aleatório de média zero e variância 1

$\bar{N}$  – período de retorno

P – período

$P_{el}$  – carga de flambagem elástica (Capítulo VII)

$P_n$  – esforço normal resistente de cálculo (Capítulo VII)

$P_u$  – esforço normal solicitante de cálculo (Capítulo VII)

$Q_j$  – forças não-conservativas

$R_u$  – função autocorrelação do processo  $u(t)$  (Capítulo V)

S – densidade espectral

$S_1(f)$  – densidade espectral da componente longitudinal da turbulência na frequência  $f$

$S_1$  – fator topográfico (Convenção da NBR 6123)

$S_2$  – velocidade adimensional (Convenção da NBR 6123)

$S_3$  – fator estatístico (Convenção da NBR 6123)

$SD(X)$  – desvio padrão de uma variável aleatória X

T – energia cinética (Capítulo VI)

$T_{r_{max}}$  – força de tração máxima

$T_{r_0}$  – força de tração inicial

$T_{0_i}$  – força de tração no estado  $i$

U – velocidade do vento na direção da velocidade média

$\bar{U}_{ref}$  – velocidade média de referência

$\bar{U}(z)$  – velocidade média do vento na cota  $z$

$\bar{U}(z_{ref})$  – velocidade média do vento na altura de referência  $z_{ref}$

V – energia potencial (Capítulo VI)

$V_k$  – velocidade característica do vento (Convenção da NBR 6123)

$\bar{V}_p$  – velocidade média de projeto (Convenção da NBR 6123)

$V_0$  – velocidade básica do vento (Convenção da NBR 6123)

$\hat{X}_i$  – componente relativa à flutuação da velocidade média do vento no trecho  $i$   
(Convenção da NBR 6123)

$\bar{X}_i$  – componente relativa à velocidade média do vento no trecho  $i$   
(Convenção da NBR 6123)

$X_1$  – frequência adimensional (Capítulo III)

$Y_1$  – frequência adimensional (Capítulo III)

### **MINÚSCULAS ROMANAS**

$b$  – fator de correção da categoria de rugosidade do terreno (Convenção da NBR 6123)

$c$  – parâmetro de cauda (Capítulo IV)

$c_{as}$  – coeficiente de arrasto superficial

$c_{at}$  – coeficiente de tensão de deslizamento

$f$  – frequência

$f_{pd}$  – frequência fundamental do pêndulo duplo

$f_{ps}$  – frequência fundamental do pêndulo simples

$g$  – aceleração da gravidade

$k_p$  – rigidez do pêndulo

$l_{ps}$  – comprimento do pêndulo simples

$m_p$  – massa do pêndulo

$p$  – expoente relativo à rugosidade do terreno (Lei de Hellmann)

$p$  – probabilidade (Capítulo IV)

$p$  – ordem da auto-regressão (Capítulo V)

$q$  – nível de segurança (Capítulo IV)

$\bar{q}_o$  – pressão dinâmica de projeto

$s(X)$  – desvio padrão de uma variável aleatória  $X$

$u$  – flutuação da velocidade do vento na direção longitudinal (Capítulo V)

$u_*$  – velocidade de fricção

$u_0^*$  – velocidade de fricção junto à superfície

$v$  – flutuação da velocidade do vento na direção lateral (Capítulo V)

$w$  – flutuação da velocidade do vento na direção vertical (Capítulo V)

$z_0$  – comprimento de rugosidade

$z_d$  – deslocamento do plano zero

$z_g$  – altura gradiente

$z_i$  – altura do elemento  $i$  sobre o nível do terreno

### **MAIÚSCULAS GREGAS**

$\Gamma$  – função gama

$\phi$  – fator de minoração da resistência à tração/compressão (Capítulo VII)

$\phi_b$  – fator de minoração da resistência à flexão (Capítulo VII)

$\phi_s$  – parâmetros da auto-regressão

### **MINÚSCULAS GREGAS**

$\alpha$  – ângulo de incidência do vento

$\alpha_t$  – coeficiente de dilatação térmica do material

$\mu$  – peso próprio do cabo (Capítulo VI)

$\xi$  – taxa de amortecimento

$\rho$  – massa específica do ar

$\sigma_1$  – desvio padrão de uma variável aleatória

$\sigma_1^2$  – variância de uma variável aleatória

$\tau_0$  – tensão de deslizamento junto à superfície

$\omega_{pd}$  – frequência circular do pêndulo duplo

$\omega_{ps}$  – frequência circular do pêndulo simples

## **DEFINIÇÕES**

barlavento – região de onde sopra o vento, em relação à edificação

sotavento – região oposta àquela de onde sopra o vento, em relação à edificação

## **SÍMBOLOS ESPECIAIS**

APNL – atenuador pendular não-linear

APNLV – atenuador pendular não-linear virtual

BS – biela de suspensão

CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica do Rio Grande do Sul

CE – condutor elétrico

EHS – *Extra High Strength*

FAB – Força Aérea Brasileira

LRFD – *Load and Resistance Factor Design*

LT – linha de transmissão

NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration*

PPCC – *Probability Plot Correlation Coefficient*

PR – pára-raios

RMS – *root mean square*

SD – *standard deviation*

TEE – transmissão de energia elétrica

To – torre

2D – bidimensional

3D-MEF – tridimensional, método dos elementos finitos

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

---

### I.1 HISTÓRICO

A crescente demanda de energia elétrica associada à riqueza de recursos hídricos do território brasileiro tornaram as usinas hidrelétricas a única solução para o problema energético no Brasil, pelo menos até o fim dos anos 70 quando, também por razões estratégicas, teve início o programa nuclear brasileiro.

Ao longo das etapas de desenvolvimento do setor elétrico observa-se que a necessidade de projetar linhas de transmissão com maior potência, a medida que as fontes geradoras e os centros consumidores distanciavam-se, teve como consequência estruturas-suporte cada vez mais altas, em virtude da altura de segurança que deve ser mantida entre os condutores elétricos e o solo. Dessa forma, conjugar o binômio segurança *versus* economia, imperativo no exercício da Engenharia, tornou-se um desafio crescente para os grupos de projeto, visto que haveria perda de competitividade se as torres fossem superdimensionadas.

Embora o risco de falha seja real, em virtude dos critérios probabilísticos de verificação, resultados de estudos realizados a partir de estruturas acidentadas, ensaios de protótipos e a evolução dos critérios de projeto têm permitido uma redução substancial no número de acidentes em linhas de transmissão expostas à ação do vento. No entanto, um número significativo de acidentes ainda tem ocorrido para velocidades de vento inferiores ao valor recomendado nas normas de projeto e, na maioria das vezes, sem apresentar ruptura dos cabos elétricos, que são derrubados em virtude da queda das torres. Este padrão de comportamento mostra que essas estruturas tornaram-se cada vez mais altas e esbeltas e, portanto, susceptíveis aos efeitos dinâmicos da turbulência atmosférica.

O objetivo deste trabalho é dar continuidade aos estudos do comportamento de torres de linha de transmissão expostas à ação do vento, iniciados na tese de mestrado submetida ao Programa de Engenharia Civil da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ –

em abril de 1999, sob o título “*Colapso de Torres TEE sob Ação do Vento*” [1], onde foram analisados dois tipos de torres em aço: uma torre autoportante do tipo delta e uma torre em V, estaiada, ilustradas na Figura I.1.

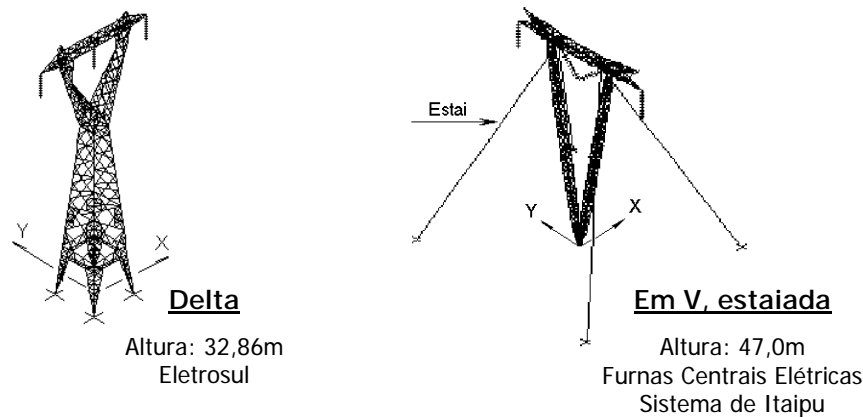


Figura I.1 – Silhuetas Analisadas na Referência[1]

A resposta dinâmica linear no domínio do tempo obtida com o modelo tridimensional em elementos finitos proposto em [1], vem mostrar a importância da interação fluido-cabos-estrutura na avaliação do comportamento das torres expostas à ação do vento. Os resultados obtidos indicaram que a oscilação lateral dos cabos elétricos em catenária, suportados por torres com características dinâmicas desfavoráveis, é a principal causa dos acidentes analisados; as torres não resistem às forças de inércia despertadas predominantemente pelos cabos.

A continuidade desse estudo iniciado em [1] se faz com a análise dinâmica não-linear, de forma a tratar adequadamente um modelo estrutural que apresenta grandes deslocamentos angulares nas bielas de suspensão constituídas pelas cadeias de isoladores (“balanço da cadeia”), assim como nos cabos elétricos em catenária, visando, desse modo, melhor descrever o comportamento mecânico real das linhas de transmissão, sem invalidar, entretanto, os resultados preliminares [1] de uma pesquisa que tem como objetivo o perfeito entendimento da mecânica do colapso aeroelástico de torres de transmissão de energia elétrica.

Desvendado esse mecanismo [2], o próximo passo é uma consequência natural: o refinamento do modelo estrutural com a aplicação das modernas técnicas de redução e controle de vibrações, visando garantir o grau de segurança e economia necessários nos

projetos de novas linhas de transmissão, assim como, com pequena interferência, assegurar a estabilidade dos sistemas de transmissão atualmente em operação.

Os atenuadores dinâmicos passivos do tipo pendular [3], indicados para a redução das oscilações por flexão observadas em torres altas e esbeltas, mostraram-se bastante eficientes ao serem utilizados na redução do nível das tensões nos elementos estruturais que compõem a estrutura das torres TEE sob ação do vento, e devem ser vistos como uma solução simples que deverá por fim ao padrão de acidente com queda de torres aqui relatado.

## **I.2 ESCOPO DO TRABALHO**

Este trabalho apresenta em nove capítulos e quatro apêndices os resultados da análise dinâmica não-linear, além de procurar esclarecer a mecânica do colapso das torres sob ventos fortes e propor medidas corretivas a serem implementadas.

Os Capítulos II, III e IV são endereçados àqueles que vierem dar continuidade à essa linha de pesquisa, podendo ter sua leitura dispensada por especialistas no assunto, que poderão dirigir-se, diretamente, ao Capítulo V.

O Capítulo II trata da aquisição e processamento de dados de vento, apresentando inicialmente os tipos de ventos fortes que sopram sobre o território brasileiro para, em seguida, mostrar de que forma a velocidade e direção do vento têm sido obtidas experimentalmente, desde a Antigüidade até os dias atuais. Esse capítulo apresenta, também, a forma como são asseguradas a homogeneidade e a confiabilidade dos registros de velocidade do vento, e as leis que permitem a representação do perfil vertical da velocidade média dentro da camada limite atmosférica, contendo ainda esclarecimentos sobre rosa dos ventos e azimute. Com a finalidade de não comprometer a objetividade do texto, foram transferidas para o Apêndice A algumas informações sobre os diversos tipos de anemômetros disponíveis, assim como um pouco da técnica empregada por cada um deles.

No Capítulo III são encontradas as expressões matemáticas propostas por alguns pesquisadores para representar o espectro da componente longitudinal da flutuação da velocidade do vento – turbulência – por eles estabelecidas a partir de resultados de pesquisas empíricas. Discute-se então, a validade do caráter universal que tem sido

atribuído a essas expressões nas últimas quatro décadas. Além disso, é possível encontrar no Capítulo III uma rotina experimental que permite a definição de espectros de vento específicos para uma determinada estrutura, conforme sugestão do Prof. Joaquim Blessmann em seu livro “*O Vento na Engenharia Estrutural*” [4].

O Capítulo IV discorre sobre o tratamento estatístico dos dados de vento, entretanto, a decisão de incluir esse capítulo visa apenas dar uma visão geral de um assunto tão amplo que não poderia ser tratado em tão poucas páginas. Logo, o enfoque é objetivo: a estimativa de extremos em regiões de ventos bem comportados, incluindo uma orientação sobre como tratar regiões com registros de dados insuficientes, porém indicando no texto referências bibliográficas que possam servir de ponto de partida para estudos mais detalhados.

O Capítulo V comenta, inicialmente, tudo de relevante que é possível trazer dos Capítulos II, III e IV para o projeto e análise de sistemas de transmissão de energia elétrica, no âmbito da Engenharia Estrutural; apresenta, em seguida, breves descrições dos procedimentos do projeto convencional e dos problemas de vibração causados pela ação do vento nos condutores elétricos e pára-raios e, encerrando o capítulo, a modelagem das forças de vento sobre a estrutura. Em seguida, o Capítulo VI apresenta a descrição do modelo de análise estrutural e uma modelagem simplificada do conjunto isoladores – condutores elétricos.

O Capítulo VII trata da análise dinâmica não-linear da torre autoportante tipo delta típica ilustrada na Figura I.1. A modelagem estrutural aqui proposta é, então, aplicada na verificação de torres de transmissão da CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica do Rio Grande do Sul, acidentadas em maio de 1998 e fevereiro de 1999. As torres da CEEE também são verificadas segundo as prescrições da norma brasileira NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações [5], admitindo dois modelos distintos: o modelo acoplado e sem acoplamento.

O Capítulo VIII apresenta uma proposta de instalação de atenuadores dinâmicos passivos do tipo pendular, que visa a redução dos grandes deslocamentos horizontais despertados nas torres TEE sob ação do vento e, concluindo este trabalho, o Capítulo IX apresenta os comentários finais e sugestões para continuidade da pesquisa.

Encontram-se listados no Apêndice B os coeficientes de arrasto superficial,  $c_{as}$ , utilizados na NBR 6123; no Apêndice C, algumas informações sobre o programa MEDIFEM e, no Apêndice D, figuras e tabelas da NBR 6123 utilizadas no Capítulo VII.

## CAPÍTULO II

### DESCRIÇÃO, AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS DE VENTO

#### II.1 VENTOS FORTES NO BRASIL [4]

A principal causa do vento natural é o aquecimento não uniforme da atmosfera, principalmente a partir da energia solar absorvida pela crosta terrestre e irradiada sob a forma de calor.

Os sistemas meteorológicos que dão origem a ventos de alta velocidade são tratados por tormentas, independentemente de seu mecanismo de formação.

Em função da velocidade, o vento pode ser classificado de acordo com a seguinte escala de intensidade mostrada na Tabela II.1:

Tabela II.1 – Escala de Intensidade da Velocidade do Vento  
(Ref.: *University of Western Ontario, London, Canada, www.blwtl.uwo.ca*)

Fraco	<i>Light</i>	0 – 9 km/h
Leve	<i>Moderate</i>	10 – 40 km/h
Moderado	<i>Strong / Windy</i>	41 – 60 km/h
Forte (Vendaval)	<i>Very Strong / Gales</i>	61 – 90 km/h
Muito Forte	<i>Very Strong / Storm Force</i>	Acima de 91 km/h
Furacão	<i>Hurricane Force</i>	Acima de 115 km/h

De forma concisa, serão focalizados neste trabalho apenas os tipos de ventos fortes que sopram sobre o território brasileiro. Todavia, é importante definir inicialmente o que significam, em meteorologia, os ciclones e anticiclones.

#### II.1.1 Ciclones e Anticiclones

Violentos ou não, os ciclones indicam um movimento circulatório do ar em torno de um centro de baixa pressão; no hemisfério sul este movimento se dá no sentido horário. Nos anticiclones, por sua vez, o movimento ocorre em torno de um centro de alta pressão, com sentido anti-horário.

Em termos de velocidade, nos anticiclones o vento nunca atinge as altas velocidades observadas nos ciclones bem desenvolvidos; quanto à dimensão, os anticiclones podem atingir diâmetros superiores aos dos ciclones, que são encontrados na faixa de 1000km.

Classificados quanto à origem, os ciclones são chamados de tropicais e extratropicais e, de modo geral, trazem mau tempo, com precipitações e ventos fortes. Os anticiclones costumam trazer bom tempo, temperaturas altas ou baixas por períodos relativamente longos.

A formação dos ciclones tropicais se dá sobre vastas extensões de oceanos com temperatura acima de 27° C, entre as latitudes 5° e 30° (sul e norte), em ar úmido e quente; sua energia decorre do calor latente liberado pela condensação do vapor d'água.

Os ciclones extratropicais são formados normalmente ao longo de frentes frias e sua energia provém do gradiente de temperatura na região dessas frentes.

### **II.1.2 Ciclones Extratropicais**

Os ciclones extratropicais provocam os ventos fortes que apresentam o melhor equilíbrio dinâmico com a rugosidade da superfície terrestre e, por esta razão, são os ventos fortes mais bem estudados, servindo de base para a maioria das normas sobre forças causadas pelo vento.

Estas tormentas são caracterizadas por uma atmosfera verticalmente estável, mantendo uma velocidade média razoavelmente constante por até algumas dezenas de horas.

### **II.1.3 Ciclones Tropicais**

Semelhantes na forma aos ciclones extratropicais são, contudo, mais intensos e mais localizados. A violência dos ciclones tropicais é acarretada pela enorme quantidade de energia liberada pela contínua condensação do vapor d'água.

Durante sua formação, se deslocam de leste para oeste, formando-se nos oceanos Índico e Pacífico, ao norte e ao sul da linha do Equador; no Oceano Atlântico, os ciclones tropicais não encontram condições favoráveis à sua formação apenas no

hemisfério sul. Entretanto, a Companhia de Resseguros de Munique, em 1990, previa que “a temperatura da água em algumas partes do Atlântico Sul alcançará a temperatura crítica de 27°C, abrindo a porta para o desenvolvimento de ciclones tropicais até agora não encontrados nesta parte do mundo; não é necessário dizer que tais ciclones constituirão então um tremendo risco ao longo da costa do Brasil”. Esse aumento de temperatura dos oceanos e da atmosfera é provocado pelo agravamento do efeito estufa [4].

Os ciclones tropicais recebem nomes especiais dependendo da região: nos Estados Unidos e no Golfo do México são chamados de furacão, enquanto no oceano Índico e nos mares da China são batizados de tufão, citando apenas duas das muitas designações.

#### **II.1.4 Tormentas Elétricas**

Trovoadas ou tormentas TS (*thunderstorm*) são outras designações dadas às tormentas elétricas, caracterizadas por uma atmosfera verticalmente instável, com formação de nuvens a grandes alturas, muitas vezes acima de 22km.

A força que movimenta o ar na direção vertical, a partir da superfície terrestre, pode ter sua origem em uma frente fria, na diferença de temperatura entre a terra e o mar, no movimento do ar subindo a encosta de montanhas ou no próprio aquecimento da superfície terrestre.

Resumidamente, uma tormenta elétrica se dá a partir da formação de uma nuvem *cumulus* pela elevação do ar quente e úmido até uma altura em torno de 8km. O ar úmido, com a atmosfera instável, continua subindo e transforma a nuvem em uma *cumulonimbus*, com uma altura de 12km ou mais. Neste ponto, o encontro com temperaturas mais baixas, inferiores à de congelamento da água, levam à formação de gotas de água, cristais de neve e partículas de gelo. A precipitação começa no momento em que estas gotas, cristais e partículas não conseguem mais manter o equilíbrio com as correntes ascendentes e, ao caírem, intensificam a precipitação ao esfriarem o ar, levando à formação de correntes descendentes, em virtude da fricção desses elementos com o ar.

A chegada destas correntes ao solo ocorre geralmente de forma brusca, com rajadas violentas e chuva torrencial; a diferença de potencial elétrico (*i*) entre partes de uma nuvem, (*ii*) entre nuvens ou (*iii*) entre nuvem e solo dá origem às descargas elétricas, ou seja, aos raios. O súbito aquecimento do ar, provocado por estas descargas, causa uma intensa vibração no ar, o trovão.

### **II.1.5 Tornados**

Os tornados são os temporais mais violentos, com múltiplo poder de destruição: pelas altas velocidades horizontais dos ventos tangentes ao movimento de circulação, pela depressão e altas velocidades verticais em seu núcleo e pelos detritos e objetos que apanha em sua trajetória e arremessa com violência mais adiante.

Na maioria das vezes os tornados se desenvolvem a partir de trovoadas muito violentas, principalmente aquelas oriundas de frentes frias. A velocidade com que se deslocam varia entre 30 e 100 km/h, com trajetória entre 10 e 30km, tipicamente. O movimento giratório começa na nuvem de tormenta, a *cumulonimbus*, e cresce gradualmente até tocar a superfície terrestre.

Os tornados são movimentos ciclônicos que concentram uma enorme quantidade de energia em uma pequena região e têm diâmetro que pode variar entre 100 e 3000m; o diâmetro típico, no entanto, é 300m. A velocidade horizontal tangencial estimada é da ordem de 350km/h, mas a possibilidade deste valor ser consideravelmente superior não deve ser descartada [6].

A formação dos tornados pode ocorrer tanto isoladamente como em grupo, e uma mesma nuvem de tormenta pode dar origem a vários deles. O maior conjunto de tornados registrado até agora ocorreu nos Estados Unidos, nos dias 3 e 4 de abril de 1974, com a formação de 148 tornados.

No Brasil há ocorrência de tornados nos estados do sul, principalmente no Rio Grande do Sul e Santa Catarina, aparecendo raramente no oeste do Paraná. As velocidades tangenciais máximas situam-se em torno de 200km/h, menos violentos, portanto, que nos Estados Unidos e nos países que hoje compõem a antiga União Soviética, os mais violentos já registrados [4].

Na região oeste de Santa Catarina, no dia 21 de fevereiro de 2003, um tornado com ventos de 135 km/h destruiu parcialmente o município de Paniel, onde centenas de árvores da espécie araucária foram arrancadas ou partiram-se. O Serviço de Meteorologia informou, na época, que esse tornado era da categoria 2 e que não era comum no oeste catarinense

Ampliando, ainda, as informações contidas no livro de BLESSMANN [4], *O Vento na Engenharia Estrutural*, principal referência desta seção, encontra-se registrado no Centro de Documentação da Rede Globo de Televisão, o aparecimento de um tornado na fronteira dos estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul, entre os dias 7 e 9 de março de 2000. Por fim, em maio de 2001, o Centro de Pesquisas em Agricultura da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) confirmou ter sido um tornado o vento de até 300km/h que atingiu a região de Campinas, interior do estado de São Paulo, no início da noite de 4 de maio de 2001. A cidade mais afetada foi Sumaré, localizada a 120km da capital paulista.

## **II.2 METODOLOGIA DE AQUISIÇÃO DE DADOS**

### **II.2.1 Medida de Vento – Anemômetros**

Existem formas muito simples de determinação da velocidade e direção do vento. Os moinhos de vento, por exemplo, comuns nas áreas agrícolas do hemisfério norte desde a Idade Média, são considerados como uma das formas mais rudimentares de instrumento que pode ser utilizado com esta finalidade (Figura II.1).



Figura II.1 – Moinho de Vento

Na verdade, a história dos moinhos de vento começa na Antigüidade, construídos na antiga Pérsia (atual Irã), Iraque, Egito e China. Hamurabi, rei da

Babilônia (séc.17a.C.), concebeu um projeto de irrigação da Mesopotâmia utilizando os moinhos de vento para aproveitamento da energia eólica [7].

Além deles, os antigos cata-ventos instalados no alto do campanário das igrejas (Figura II.2) e os indicadores direcionais de vento (“birutas”) obrigatoriamente instalados nos aeroportos, apesar da simplicidade são classificados como bons indicadores da direção do vento, de tal forma que o projeto de instrumentos meteorológicos utilizados oficialmente para medidas de vento teve como ponto de partida a combinação do princípio dos moinhos de vento com os ultrapassados cata-ventos.

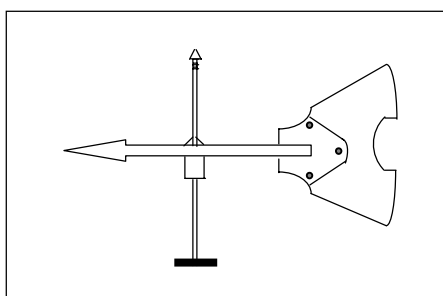


Figura II.2 – Cata-Vento – Desenho Esquemático

Durante a montagem, os cata-ventos (Figura II.2) eram fixados à base de modo que o atrito fosse mínimo e que estivessem perfeitamente balanceados em relação ao ponto de rotação; o desequilíbrio era apenas aparente, pois a ponteira era feita em chumbo.

Depois de algumas tentativas que resultaram em instrumentos pouco confiáveis para aquisição de dados de vento, o astrônomo irlandês Thomas Romney Robinson, em 1846, desenvolveu o anemômetro de copo (Figura II.3), no qual a velocidade do vento era traduzida em termos do número de revoluções num dado período de tempo [8]. Os anemômetros deste tipo nunca chegaram a ser um consenso entre os pesquisadores da área de instrumentação pois, devido à sua inércia, numa situação de vento com turbulência era possível obter apenas a velocidade média do vento, de modo que informações importantes relativas às rajadas eram perdidas com a utilização desses anemômetros. Além disso, o tempo de aceleração do copo era inferior ao de desaceleração, fazendo com que a velocidade média registrada fosse sempre superior à velocidade média real [9].



Figura II.3 – Anemômetro de Copo

A calibração dos anemômetros de copo era executada de modo que uma rotação completa correspondesse a  $1/60$  da unidade de comprimento adotada para a medida de velocidade de vento e que, cada uma dessas revoluções, provocasse um contato elétrico que levava ao disparo de uma campainha ou ao acender de uma pequena lâmpada. Assim, a contagem do número de revoluções por unidade de tempo e, conseqüentemente, a determinação da velocidade do vento, podia ser acompanhada à distância.

Era possível também, observar a direção do vento, bastava associar um cata-vento e ter tantos contatos elétricos quantas fossem as direções a serem identificadas. Associando estes contatos a um conjunto de lâmpadas dispostas segundo uma circunferência (Figura II.4), a direção do vento era definida a partir do tipo de arranjo que acendesse, por exemplo, vento com direção norte corresponderia à lâmpada superior acesa.

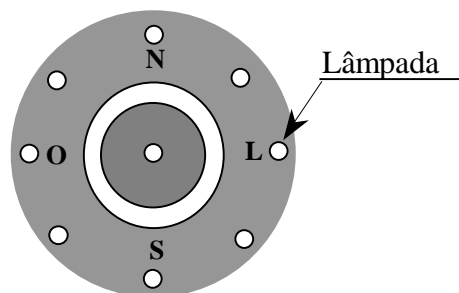


Figura II.4 – Indicador de Direção do Vento (Lâmpada central utilizada na contagem de revoluções para determinação da velocidade do vento)

Atualmente, o número de revoluções é registrado eletronicamente, sendo comum o acoplamento de um cata-vento e a substituição dos copos por uma hélice, de modo

que a instrumentação cumpra as duas funções, aquisição de dados de velocidade e direção do vento, com a instalação de um único sensor (Figura II.5).

A necessidade de informações cada vez mais detalhadas sobre as características do vento na camada limite atmosférica levou à grande variedade de anemômetros encontrados atualmente, desde os sensores digitais portáteis utilizados na prática de esportes, até mesmo os anemômetros baseados na mudança de fase do som (sônicos) ou na luz refletida pelas moléculas de ar (a laser).



(a) Sensor de Velocidade



(b) Sensor de Direção



(c) Sensor de Velocidade e Direção

Figura II.5 – Sensores de Velocidade e/ou Direção do Vento

No Apêndice A são apresentadas algumas informações sobre os tipos básicos de anemômetros disponíveis, para diferentes condições de monitoração da velocidade e direção do vento.

## II.2.2 Instalação de Anemômetros

Em sua grande maioria, os anemômetros são instalados em locais que não correspondem à situação ideal. Facilmente encontrados no alto de edifícios e arranha-céus, têm seus registros de dados influenciados pela rugosidade superficial, caracterizada pelos obstáculos naturais e artificiais encontrados no caminho do escoamento de ar. Junto à superfície, o vento é frenado por forças na direção do vento [4], oriundas do atrito direto com esses obstáculos, as forças de arrasto, como também pelas forças que aparecem em virtude do intercâmbio de quantidade de movimento entre as camadas horizontais de ar, devido à turbulência, que fazem sentir seus efeitos numa altura muito superior à dos obstáculos que as causaram.

Os resultados obtidos com os anemômetros instalados nos aeroportos podem ser considerados, a primeira vista, muito pouco influenciados pela rugosidade superficial. Entretanto, a ausência de edifícios altos nas proximidades, garantida na fase de projeto básico pela obrigatoriedade da construção ser executada afastada de assentamentos

urbanos, não é suficiente. Decerto que, se a direção do vento for a das pistas de pouso, projetadas sempre na direção do vento dominante para maior eficiência nas operações de pouso e decolagem, os registros estarão pouco influenciados pela rugosidade superficial. No entanto, se o vento soprar na direção do alinhamento dos hangares, o mesmo não pode ser afirmado. Além disso, o crescimento econômico que levou à construção do aeroporto, com o passar dos anos irá provocar também a ocupação da área próxima a ele, como consequência natural do crescimento da região. Neste caso, qualquer que seja a direção do vento, os resultados estarão sempre muito influenciados pela rugosidade superficial; um bom exemplo é o Aeroporto de Congonhas, na cidade de São Paulo.

Sempre que possível, o plano de instalação de anemômetros deve obedecer a uma padronização, na qual a escolha do local é tão importante quanto a altura em que os sensores serão fixados. Para evitar os efeitos dos obstáculos naturais e artificiais, a locação ideal é em campo aberto, onde a vegetação e as construções quando presentes, não devem ultrapassar a cota de 1m. Historicamente, era sugerida a altura da ordem de 9m para aquisição dos dados porque correspondia a altura média, acima do nível do mar, em que os anemômetros encontravam-se instalados nos navios [9].

Em resumo, a melhor forma de efetuar medidas de velocidade e direção do vento para fins normativos é a fixação dos anemômetros no topo de mastros estaiados ou torres metálicas, todos com a mesma altura, a altura de referência. Preferencialmente são escolhidos os mastros, por duas razões: a reduzida área de sombra e a facilidade na montagem.

Na impossibilidade de condições ideais para instalação de anemômetros, situação muito comum quando o objetivo é estudar a ação do vento sobre estruturas existentes, tais como obras de arte e estruturas marítimas, é fundamental o controle rigoroso das alterações quanto à rugosidade superficial e altura de referência, durante o período de monitoração da estrutura, de modo que as correções possam ser introduzidas na fase de tratamento estatístico dos dados coletados, com o auxílio de registros simultâneos de anemômetros instalados em campo aberto ou ao nível do mar.

### II.2.3 Aquisição de Dados

Os registros de velocidade e direção do vento, obtidos com os anemômetros, podem ser coletados e armazenados num pequeno computador – *data logger* – fixado no próprio mastro e alimentado, por exemplo, por uma bateria de longa duração. Mensalmente ou num outro intervalo de tempo qualquer desejado, a memória é retirada para leitura e substituída por outra, em branco, para novo período de aquisição. Um erro comum neste procedimento é misturá-las no momento da troca, perdendo ou deixando de registrar os dados de um dos períodos de aquisição [10].

Na Engenharia Estrutural, o objetivo das campanhas de medições é conhecer a velocidade média do vento e as flutuações em torno desta média para definir as magnitudes e variações das forças aeroelásticas; para fins normativos, as campanhas visam a identificação da velocidade média máxima anual para tratamento estatístico. A velocidade média é determinada para intervalos de tempo entre 10min ~ 1h e as flutuações instantâneas em torno da média – turbulência – na prática são calculadas como médias sobre pequenos intervalos de tempo, da ordem de segundos, pois os anemômetros não conseguem medir valores realmente instantâneos [4].

Usualmente, a velocidade do vento considerada é a média de 10 minutos, como forma de tornar compatíveis a grande maioria dos códigos internacionais e os algoritmos numéricos disponíveis para tratamento dos dados.

O plano de instalação de anemômetros destinados à aquisição de dados de vento para fins normativos deve padronizar o tipo de sensor a ser empregado além, naturalmente, das características geográficas locais e a altura em que serão fixados, itens já comentados na seção II.2.2. O manual meteorológico da agência governamental americana NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), por exemplo, estabelece que os sensores destinados à coleta de dados de vento deverão apresentar as características definidas na Tabela II.2.

Nesta seção, a agência NOAA [11] será a fonte bibliográfica utilizada; os valores de velocidade do vento, contudo, serão convertidos para unidades SI, mantendo-se apenas na Tabela II.2 a unidade inglesa *knot*, com a finalidade de conservar a referência.

Tabela II.2 – Características do Sensor Padrão Estabelecido pela Agência NOAA

Parâmetro	Unidade <sup>(*)</sup>	Intervalo	Precisão	Resolução
Direção	Grau	1° a 360°	±5° quando a velocidade for maior ou igual a 5 nós	10°
Velocidade	Nó	2 a 90 nós	±1 nó até 10 nós ±10% acima de 10 nós	1 nó

<sup>(\*)</sup> 1 nó=0,5144 m/s

Da mesma forma, deverão ser estabelecidos outros padrões de observação e apresentação dos dados de vento, entre os quais encontram-se:

a) Direção do Vento:

A direção do vento deve ser determinada como a média de um período de 2 minutos. Na hipótese dos sensores estarem fora de operação, em estações meteorológicas previamente determinadas, a direção do vento pode ser estimada a partir da observação do movimento dos galhos e folhas das árvores, fumaça etc ou com a exposição ao vento em área aberta, sem proteção.

b) Direção do Vento Variável:

A direção do vento pode ser considerada variável se, durante um período de avaliação de 2 minutos, a velocidade do vento é igual ou inferior a 3m/s. Obrigatoriamente, a direção é considerada variável se, durante o período de 2 minutos, varia 60° ou mais quando a velocidade média do vento é superior a 3m/s.

c) Velocidade do Vento:

A velocidade do vento deve ser determinada pela velocidade média calculada sobre um período de 2 minutos. Em estações meteorológicas pré-estabelecidas, os valores indicados na Tabela II.3 devem ser usados na estimativa da velocidade do vento quando a instrumentação estiver fora de serviço ou quando a velocidade for inferior à velocidade inicial do anemômetro utilizado.

Tabela II.3 – Velocidade do Vento Estimada [m/s]

<0,5	Calmo; a fumaça sobe verticalmente.
0,5 a 1,5	A direção do vento é mostrada apenas pelo rumo tomado pela fumaça, nunca pelos cata-ventos.
2 a 3	O vento é sentido na face; as folhas farfalham e os cata-ventos se movem.
3,5 a 5	Folhas e pequenos galhos em constante movimento; o vento estende pequenas bandeiras.
5,5 a 8	A poeira é levantada, papéis são levados; pequenos galhos se movem.
8,5 a 10,5	Arbustos balançam; águas paradas formam pequenas cristas.
11 a 13,5	Galhos robustos se movimentam; ouve-se o assobio dos cabos de alta tensão; os guarda-chuvas são usados com dificuldade.
14 a 16,5	As árvores se movimentam (inclusive o tronco); é difícil andar contra o vento.
17 a 20	Os galhos das árvores se quebram; não é possível caminhar.
20,5 a 23,5	São observados pequenos danos estruturais.
24 a 27,5	Árvores derrubadas; ocorrem danos consideráveis.
28 a 35,5	Danos em larga escala.

d) Rajada de Vento:

Na avaliação da ocorrência de rajadas deverão ser examinados os últimos 10 minutos de dados de velocidade de vento coletados (entenda-se último como o mais recente). Rajadas são indicadas pela rápida flutuação da velocidade do vento, com uma variação de 5m/s ou mais entre o pico e o abrandamento. A velocidade de uma rajada é igual à velocidade máxima instantânea do vento.

e) Mudança do Vento:

Os dados de vento devem ser examinados para que seja determinada a mudança na direção do vento, indicada pela variação de 45° ou mais, em menos de 15 minutos, sustentando a velocidade em 5m/s ou superior durante a mudança.

Em relação ao exposto, cabe ressaltar a dupla interpretação de rajada. Enquanto na aerodinâmica das construções entende-se por rajada ou turbulência a flutuação aleatória em torno da velocidade média, na navegação aérea só existe rajada quando a velocidade instantânea – rigorosamente a média em um pequeno intervalo de tempo devido à inércia dos anemômetros – ultrapassar a velocidade média em 5m/s ou mais.

Ainda sobre rajadas, é pertinente lembrar também que a finalidade primordial da aquisição de dados de vento é a navegação aérea, embora os mesmos dados venham a ser posteriormente utilizados para outros fins. Justifica-se, desse modo, a ênfase dada no texto à necessidade de empregar na análise de rajadas os 10 minutos mais recentes do registro.

No Brasil, a compilação de dados de vento para aplicação na Engenharia Estrutural teve início em 1973, no Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pesquisa logo intensificada pela necessidade de revisar a norma que, na época, era utilizada na determinação de cargas para o cálculo de estruturas de edifícios, a NB5/1961, e que resultou na publicação da NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações [5].

No trabalho de revisão da norma foram processadas séries de velocidades máximas anuais de 49 estações da Força Aérea Brasileira (máxima velocidade média registrada sobre 30 segundos e velocidade de rajada) e algumas estações do Ministério da Agricultura (máxima média mensal), para o traçado das isopleias correspondentes às velocidades com período de retorno médio de 50 anos, em todo o território brasileiro[12].

Atualmente, os documentos-base que estabelecem os requisitos aeronáuticos para medição da direção e velocidade do vento de superfície no Brasil são aqueles aprovados e editados pela Organização de Aviação Civil Internacional que, no Anexo 3, preconiza:

Altura do anemômetro: 6 a 10 metros em relação à pista;

Direção do Vento: Média de 10 minutos para fins de informação meteorológica e em relação ao norte verdadeiro;

Velocidade do Vento: Média de 10 minutos sendo que velocidades inferiores a 0,5m/s são informadas como vento calmo;

Rajada: Velocidade superior à média em 5m/s ou mais, representada pela média sobre 3 segundos.

Vale ressaltar que os critérios hoje utilizados não se modificaram ao longo do tempo, o que ocorre é que algumas estações da FAB, instaladas há muito tempo e ainda não relocadas, não estão dentro do padrão e seus registros de dados precisam ser tratados de modo a tornarem-se homogêneos <sup>1</sup>.

### **II.3 CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA – PERFIL VERTICAL DA VELOCIDADE MÉDIA**

Como já visto anteriormente, o movimento do ar é retardado junto à superfície terrestre por forças horizontais, na direção da velocidade média do vento, denominadas forças de arrasto superficial. O efeito destas forças sobre o escoamento diminui a medida que a altura acima do terreno aumenta, tornando-se desprezível acima de uma altura tal conhecida como a altura da camada limite atmosférica, região de interesse da Engenharia Estrutural. Acima da camada limite, a atmosfera é chamada de atmosfera livre [6].

A altura da camada limite atmosférica situa-se, em geral, entre 250 e 600m podendo, algumas vezes, atingir alturas muito superiores [4]. Nesta região as características do vento dependem principalmente da topografia do terreno, da forma, dimensão e distribuição dos obstáculos naturais e artificiais e da variação da temperatura vertical. Todos estes fatores originam turbulência, rapidamente disseminada por toda a camada limite atmosférica, na qual a velocidade média do vento varia de zero, junto à superfície, a velocidade gradiente, na interface com a atmosfera livre.

A agitação mecânica no ar será tanto maior quanto for a rugosidade superficial, maior também será o intercâmbio turbulento de quantidade de movimento e, conseqüentemente, maior será a altura da camada limite atmosférica ou altura gradiente. É fácil concluir que a altura gradiente é maior numa cidade do que em campo aberto ou sobre o mar, por exemplo.

---

<sup>1</sup> Ministério da Defesa, Comando da Aeronáutica – Departamento de Aviação Civil, Diretoria de Eletrônica e Proteção ao Voo, correspondência 24 a 27 de julho de 2000, Rio de Janeiro

Nos ventos fortes “bem comportados” (ciclones extratropicais), a influência da turbulência de origem térmica, dentro da camada limite atmosférica, pode ser desprezada porque neste caso a turbulência de origem mecânica, ou seja, causada pela rugosidade da superfície terrestre, é preponderante.

### II.3.1 Lei Potencial

A primeira representação do perfil vertical de velocidade média do vento em terreno horizontalmente homogêneo foi proposta por G. Hellman, em 1916, com a lei potencial [6], relacionando as velocidades médias em duas alturas quaisquer dentro da camada limite atmosférica:

$$\bar{U}(z) = \bar{U}(z_g) \left( \frac{z}{z_g} \right)^p \quad (\text{II.1})$$

Na Equação II.1,  $p$  é um expoente que depende da rugosidade superficial,  $z$  e  $z_g$  são alturas acima do terreno. Na prática, é comum fixar  $z_g$  como a altura gradiente ou a altura de 10m. Os valores de  $p$  e  $z_g$  são encontrados em diversas fontes, por exemplo, na Referência [4].

Utilizando a lei de potência, é possível obter uma boa aproximação com os dados experimentais, entretanto, a lei de Prandtl ou lei logarítmica, que será apresentada na próxima seção, é vista pelos meteorologistas como a melhor representação do perfil de ventos fortes na camada inferior da atmosfera [6].

### II.3.2 Lei Logarítmica

De acordo com diversos autores, a lei de Prandtl é acuradamente aplicável até cerca de 100m de altura. No caso de ventos fortes, em estabilidade neutra, sua validade pode ser estendida até umas poucas centenas de metros, confirmada por medições [4].

A lei logarítmica é expressa por:

$$\bar{U}(z) = \frac{1}{k} u_0^* \ln \frac{z}{z_0} \quad (\text{II.2})$$

Na Equação II.2,  $k \cong 0,4$  (constante de Kármán),  $z$  é a altura acima da superfície do terreno, o parâmetro  $z_0$  é geralmente chamado de *comprimento de rugosidade* e  $u_0^*$  é a velocidade de fricção junto à superfície.

#### Comprimento de Rugosidade ( $z_0$ )

Este parâmetro está diretamente ligado à altura dos obstáculos que formam a rugosidade da superfície terrestre e corresponde a uma pequena fração desta altura, servindo de referência para o grau de rugosidade superficial.

Valores típicos de  $z_0$  para vários tipos de terreno são facilmente encontrados na literatura [4,6]. Do ponto de vista da Engenharia Estrutural, em caso de dúvida é recomendada a adoção de valores próximos aos limites inferiores, dentro do conjunto de valores considerados possíveis para  $z_0$ , pois a utilização de valores mais baixos fica a favor da segurança [6].

#### Velocidade de Fricção junto à Superfície ( $u_0^*$ )

A velocidade de fricção  $u_0^*$  é definida pela expressão:

$$u_0^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (\text{II.3})$$

onde  $\rho$  é a massa específica do ar e  $\tau_0$  é a tensão de deslizamento junto à superfície, determinada por:

$$\tau_0 = \frac{1}{2} \rho \bar{U}_{\text{ref}}^2 c_{\text{at}} \quad (\text{II.4})$$

sendo:

$\bar{U}_{\text{ref}}$  - velocidade média de referência,

$c_{\text{at}}$  - coeficiente de tensão de deslizamento.

Assim como outros parâmetros já citados, indicações sobre o coeficiente  $c_{\text{at}}$  podem ser encontradas na literatura [4].

O valor da constante de Kármán ( $k \cong 0,4$ ), segundo SIMIU e SCANLAN [6], tem sido objeto de alguns debates no meio acadêmico. Entretanto, para efeito da aplicação

na engenharia apresentada neste trabalho, os resultados não seriam afetados de modo significativo se outro valor fosse o adotado.

É importante salientar que a formulação aqui apresentada para determinação do perfil vertical da velocidade média aplica-se aos ventos fortes com estabilidade neutra, como são os originados pelos ciclones extratropicais e, com aproximação aceitável, pelos ciclones tropicais. Nestes dois casos o vento mantém a velocidade média razoavelmente constante por dezenas de minutos ou, como nos ciclones extratropicais, até mesmo por algumas dezenas de horas. As flutuações do escoamento do ar são quase integralmente causadas pela agitação mecânica, originando as rajadas de vento [4].

## **II.4 CLIMATOLOGIA ESTATÍSTICA DE VENTOS EXTREMOS**

Climatologia é definida como o estudo científico do clima e tem como objetivo descobrir, explicar e explorar, em benefício do homem, o comportamento normal dos fenômenos atmosféricos, tendo sempre em mente que as irregularidades no comportamento da atmosfera são uma regra, não uma exceção [13].

A Climatologia Estatística é a área da climatologia que, executando análises probabilísticas, tem a tarefa de reduzir um conjunto de dados sobre a atmosfera, de tal forma que seja possível realizar a previsão das condições climáticas a longo prazo. Para a Engenharia Estrutural, a climatologia estatística fornece, por exemplo, as informações relativas aos ventos extremos que poderão afetar uma estrutura durante sua vida útil.

A Microclimatologia, por sua vez, identifica os fenômenos característicos da camada inferior da atmosfera, isolando os fatores que os controlam.

### **II.4.1 Confiabilidade dos Registros de Velocidade do Vento**

A confiabilidade de informações climatológicas, baseadas no tratamento de valores extremos da velocidade do vento, está condicionada à qualidade dos dados utilizados nesta análise. Estes valores são considerados confiáveis nas seguintes condições [6]:

- a) A instrumentação utilizada na aquisição de dados deve estar perfeitamente calibrada. Na hipótese da calibração não ter sido executada de modo adequado, os dados deverão ser ajustados;

- b) Os anemômetros devem ser expostos afastados de obstruções que possam produzir efeitos locais sobre o fluxo de ar. As obstruções que, porventura, passem a existir depois da instalação dos sensores, deverão ser cuidadosamente documentadas em relatórios de acompanhamento dos dados coletados;
- c) A atmosfera deve ser considerada como neutra, uma premissa aceitável para velocidades de vento da ordem de 10m/s na cota 10m acima do solo e em terreno aberto.

#### II.4.2 Homogeneidade dos Registros de Velocidade do Vento

No aspecto micrometeorológico, um conjunto de dados sobre a velocidade do vento é considerado homogêneo se as condições micrometeorológicas sob as quais os dados foram coletados forem idênticas ou equivalentes. Estas condições são representadas pela altura acima do solo, pela rugosidade do terreno e pelo tempo médio de amostragem que, dependendo do que foi registrado, pode ser a rajada mais forte, a média de um minuto etc.

##### Altura acima do Terreno

Caso haja necessidade de modificar, durante o período de aquisição, a elevação na qual o anemômetro foi originalmente instalado, os dados devem ser ajustados para uma elevação comum. Rigorosamente, na hipótese de ventos fortes com velocidade acima de 10m/s, a relação entre velocidades médias nas elevações  $z_1$  e  $z_2$ , em terreno horizontal com rugosidade uniforme, deve ser corrigida segundo a expressão:

$$\frac{\bar{U}(z_1)}{\bar{U}(z_2)} = \frac{\ln[(z_1 - z_d)/z_0]}{\ln[(z_2 - z_d)/z_0]} \quad (\text{II.5})$$

A Equação II.5 tem origem na lei de Prandtl ou lei logarítmica (Equação II.2), onde  $z_0$  é o comprimento de rugosidade e o parâmetro  $z_d$ , determinado empiricamente, representa um comprimento conhecido como *deslocamento do plano zero*. Em terrenos densamente cobertos por plantações altas, árvores ou casas, o nível do terreno (cota  $z=0$ ) não coincide com a origem do perfil logarítmico de velocidades médias teórico e, a rigor, é necessário efetuar um deslocamento no plano de referência, o *plano zero*. No contexto da Engenharia Estrutural, entretanto, o parâmetro  $z_d$  é considerado

aproximadamente nulo, o que transforma a Equação II.5 numa simples relação entre as velocidades médias nas elevações 1 e 2, calculadas segundo a lei de Prandl.

Pelo que foi exposto até agora, é possível concluir que, assim como a lei logarítmica, a lei potencial também pode ser utilizada no ajuste dos dados da velocidade média para uma elevação comum.

### Rugosidade do Terreno

Muitas vezes a locação de um anemômetro precisa ser modificada durante o período de aquisição de dados. Neste caso, os registros correspondentes podem ser uniformizados para uma rugosidade de terreno comum, desde que, considerando um terreno horizontal, esta rugosidade em cada uma das estações seja razoavelmente uniforme num raio de aproximadamente 100 vezes a elevação do anemômetro.

A velocidade do vento  $U(z_g, z_0)$  corrigida de modo a padronizar os registros para uma mesma rugosidade de terreno é dada por:

$$U(z_g, z_0) = 2,5u_* \ln \frac{z_g}{z_0} \quad (\text{II.6})$$

onde  $z_g$  é a altura acima do terreno,  $z_0$  é o comprimento de rugosidade e  $u_*$  é a velocidade de fricção. Na prática, para as camadas inferiores da atmosfera, região de interesse da Engenharia Estrutural, a variação da velocidade de fricção pode ser obtida a partir de uma relação entre comprimentos de rugosidade  $z_0$  e  $z_{01}$  entre duas elevações [6]:

$$\frac{u_*}{u_{*1}} = \left( \frac{z_0}{z_{01}} \right)^{0,0706} \quad (\text{II.7})$$

A Tabela II.4 apresenta a relação  $u_*/u_{*1}$  para  $z_{01}=0,07\text{m}$  e diversos valores de  $z_0$ .

Tabela II.4 – Relação  $u_*/u_{*1}$  para  $z_{01}=0,07\text{m}$

$z_0$ [m]	0,005	0,07	0,30	1,00	2,50
$u_*/u_{*1}$	0,83	1,00	1,15	1,33	1,46

A presença de efeitos de proteção ocasionados por pequenos obstáculos invalida a aplicação do modelo de similaridade aqui apresentado. Neste caso, os registros de

velocidade do vento devem ser ajustados segundo o procedimento sugerido por Wierenga (1976), indicado na Referência [6].

Na prática, uma situação muito comum já comentada na seção II.2.2 deste trabalho é a modificação, com o passar dos anos, das características da rugosidade superficial na área de instalação do anemômetro, como resultado do desenvolvimento econômico da região. O ajuste destes registros só é possível com o auxílio de relatórios de acompanhamento que indiquem, com rigor, a presença de obstáculos naturais e artificiais, durante as diversas fases de desenvolvimento da área.

Tempo Médio de Amostragem

Na hipótese de diferentes intervalos de tempo terem sido utilizados durante a aquisição de dados de velocidade do vento, os registros devem ser ajustados para um intervalo comum; o valor da velocidade média depende do tempo de amostragem, ou seja, tomando sempre a região de máximos, quanto menor for o intervalo de tempo adotado nos registros de dados, maior será o valor encontrado para a velocidade média do vento.

A relação entre a velocidade média calculada para t segundos,  $U_t(z)$ , e a velocidade calculada para um registro de dados de 1h de duração,  $U_{3600}(z)$ , é definida por:

$$U_t(z) = U_{3600}(z) \left( 1 + \frac{\beta^{1/2} c(t)}{2,5 \ln(z/z_0)} \right) \quad (II.8)$$

O parâmetro  $\beta$  relaciona a flutuação longitudinal da turbulência com a velocidade de fricção  $u_*$  e, normalmente, é considerado invariante com a altura. A Tabela II.5 apresenta os valores de  $\beta$  utilizados para fins de projeto estrutural [6].

Tabela II.5 – Valores de  $\beta$  em função do comprimento de rugosidade  $z_0$

$z_0$ [m]	0,005	0,07	0,30	1,00	2,50
$\beta$	6,50	6,00	5,25	4,85	4,00

O coeficiente  $c(t)$  depende apenas do intervalo de tempo e é determinado a partir de estudos estatísticos realizados com registros de velocidade do vento. Os valores de

$c(t)$  apresentados na Tabela II.6 são aplicáveis à Equação II.8 para velocidades de vento em terrenos com comprimento de rugosidade inferiores 2,50m [4,6].

Tabela II.6 – Coeficientes  $c(t)$  <sup>(1)</sup>

$t$ [s]	1	10	20	30	50	100	200	300	600	1000	3600
$c(t)$	3,00	2,32	2,00	1,73	1,35	1,02	0,70	0,54	0,36	0,16	0,00

<sup>(1)</sup> Comprimento de rugosidade máximo:  $z_0=2,5m$

## II.5 ROSA DOS VENTOS E AZIMUTE

O tratamento estatístico dos registros de dados de velocidade e direção do vento, obtidos em observações meteorológicas, permite a construção da rosa dos ventos, representação gráfica da distribuição da velocidade e frequência de variação da direção do vento, relativa a área em estudo. Como exemplo, a Figura II.6 mostra a rosa dos ventos de uma região da França, situada na costa do Atlântico [10].

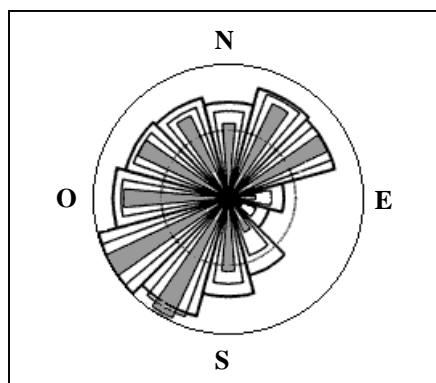


Figura II.6 – Rosa dos Ventos (Brest – França) [10]

A representação da rosa dos ventos da Figura II.6 foi executada a partir da divisão de um círculo em 12 setores, traçados a 30° com o horizonte, todavia, uma rosa dos ventos pode ser traçada com 8 ou 16 campos, ainda que 12 setores representem o padrão encontrado no Atlas Europeu de Vento, origem desta figura.

Nos setores, o raio externo fornece a frequência relativa da direção do vento, ou seja, o percentual de tempo em que o vento sopra na direção do setor considerado.

O raio subsequente dá a mesma informação mas, neste caso, como está multiplicado pela velocidade média em cada direção e o resultado normalizado, mostra a contribuição de cada setor no cálculo da velocidade média.

Assim como os anteriores, o raio interno (campos representados na cor cinza) também está relacionado com a direção do vento. Multiplicado pela terceira potência da velocidade média do vento na região em estudo e, em seguida, normalizando os resultados, o raio interno apresenta a contribuição de cada setor na energia total do vento, ou seja, a simples observação dos campos indicados em cinza na Figura II.6 mostra, por exemplo, que nesta região da França a direção sudoeste é a indicada para o melhor aproveitamento da energia eólica.

As rosas dos ventos variam de região para região, como exemplo a Figura II.7 mostra a rosa dos ventos de uma região afastada apenas 150km ao norte da anterior (Figura II.6). Apesar da direção principal de incidência do vento ser a mesma, toda a energia do vento, neste caso, vem das direções oeste e sudoeste, não existindo, praticamente, contribuição representativa nas outras direções que, numa situação de projeto, poderiam ser abandonadas.

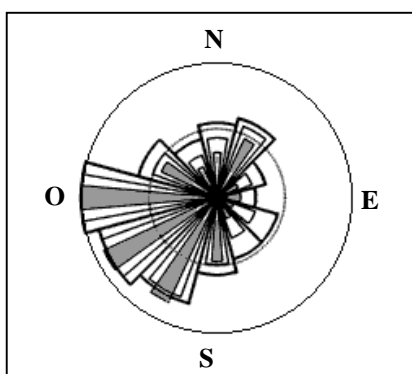


Figura II.7 – Rosa dos Ventos (Caen – França) [10]

Regiões vizinhas normalmente apresentam rosas dos ventos similares e, na prática, é muito comum fazer uma interpolação e considerar a média dos resultados encontrados com as rosas dos ventos das áreas próximas da região em estudo, cuja rosa dos ventos não tenha sido traçada. No entanto, essa estimativa apresenta resultados seguros apenas quando a rugosidade superficial é a mesma e, principalmente, quando não existe mudança de direção no alinhamento das montanhas e vales ou da linha da costa. A diferença observada na comparação das rosas dos ventos das regiões de Brest e

Caen (Figuras II.6 e II.7) deve-se exatamente ao fato desta última estar localizada na costa do Canal da Mancha, ainda que esteja apenas a 150km ao norte de Brest.

Os padrões de vento variam de ano para ano fazendo com que, dependendo do tipo de projeto a que se destinam, sejam utilizados resultados de observações meteorológicas realizadas por um determinado número de anos. O projeto de um aeroporto, por exemplo, exige informações de velocidade e direção do vento por um período mínimo de cinco anos; a instalação de uma usina para aproveitamento de energia eólica ainda que utilize registros locais de dados de apenas um ano, tem estes dados ajustados no projeto pelas informações obtidas em estações meteorológicas próximas durante vários anos.

Finalmente, ainda sobre rosa dos ventos, é importante enfatizar que ela fornece apenas a distribuição relativa da direção do vento, sem apresentar, portanto, qualquer indicação da velocidade média.

Passando à definição de azimute [14], existem duas variáveis –altitude e azimute – utilizadas para descrever a locação de um objeto no céu, visto de um determinado lugar e numa determinada hora pelo observador (Figura II.8).

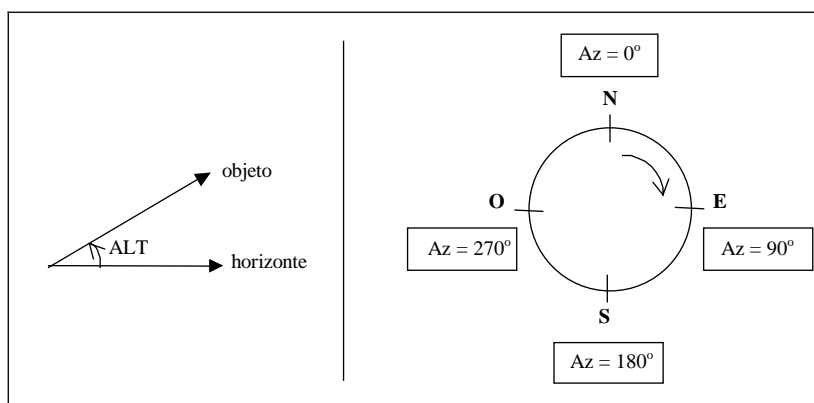
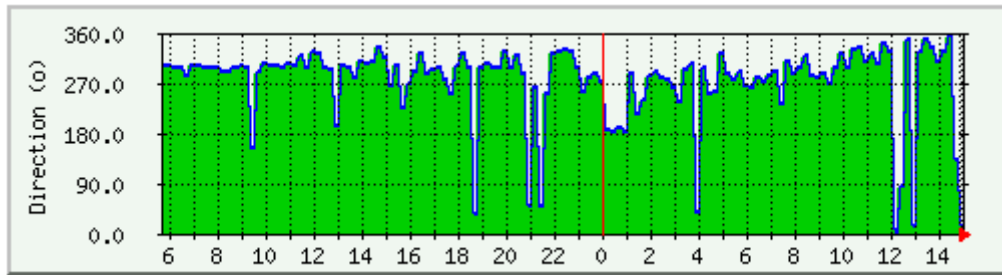


Figura II.8 – Altitude e Azimute – Convenção

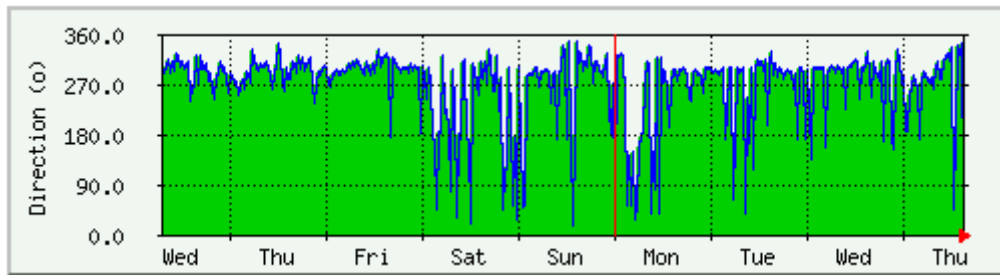
Altitude é a distância que o objeto parece estar acima do horizonte, o ângulo é medido a partir do ponto mais próximo no horizonte. Azimute de um objeto é a distância angular no horizonte, relativa à locação deste objeto. Convencionalmente, o azimute é medido no sentido horário de norte para leste, por exemplo: o vento que sopra da direção norte tem azimute  $0^\circ$ , caso sopra do leste terá azimute  $90^\circ$ .

Como ilustração, as Figuras II.9 apresentam a variação da direção do vento, em graus azimute, registrada por uma estação meteorológica do Observatório del Teide, nas Ilhas Canárias (Tenerife).



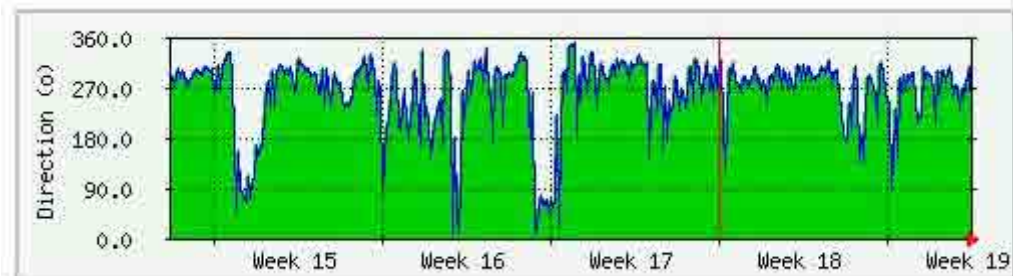
Max: 357.0° Average: 276.0° Current: 17.0°

Figura II.9a - Variação Diária do Azimute da Direção do Vento (Média de 15 minutos)



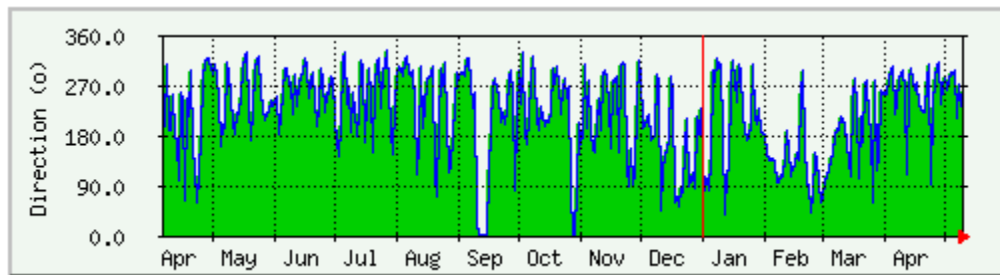
Max: 348.0° Average: 267.0° Current: 76.0°

Figura II.9b - Variação Semanal do Azimute da Direção do Vento (Média de 30 minutos)



Max: 352.0° Average: 259.0° Current: 222.0°

Figura II.9c - Variação Mensal do Azimute da Direção do Vento (Média de 2 horas)



Max: 332.0° Average: 221.0° Current: 262.0°

Figura II.9d - Variação Anual do Azimute da Direção do Vento (Média de 1 dia)

## CAPÍTULO III

### ESPECTROS DE ENERGIA DO VENTO - TURBULÊNCIA

---

#### III.1 ESPECTRO DA COMPONENTE LONGITUDINAL DA TURBULÊNCIA

A componente longitudinal do campo de velocidades do vento, definida no tempo  $t$  e numa altura  $z$  sobre o terreno, é composta pela velocidade média somada à turbulência, ou seja, às flutuações em torno desta média.

Existem algumas expressões matemáticas que representam o espectro dessa componente longitudinal da flutuação [4,6], baseadas no tratamento estatístico de um grande número de registros de dados de anemômetros, instalados em terrenos de diversas rugosidades e a diferentes alturas. Este procedimento mostrou que, assim como é possível estabelecer um espectro da componente longitudinal da turbulência para uma determinada região de interesse, invariante para um mesmo valor de velocidade média, é possível também generalizá-lo para outras regiões, bastando para isto adequar os valores da velocidade média e do coeficiente de arrasto superficial.

##### III.1.1 Espectro de Davenport

A pesquisa empírica realizada por DAVENPORT<sup>1</sup> (1961) levou à seguinte expressão para o espectro de energia da componente longitudinal da turbulência em ventos fortes, apresentada por BLESSMANN [4]:

$$\frac{fS_1(f)}{c_{as}\bar{U}^2(10)} = \frac{4X_1^2}{(1+X_1^2)^{4/3}} \quad (\text{III.1})$$

onde:

$S_1(f)$  - densidade espectral da componente longitudinal da turbulência na frequência  $f$   
(subentende-se que numa cota  $z$ );

$f$  – frequência [Hz];

$c_{as}$  – coeficiente de arrasto superficial relativo à velocidade média a 10m de altura, dado pela expressão:  $c_{as} = [u_0^*/\bar{U}(10)]^2$  ;

---

<sup>1</sup> DAVENPORT, A. G. – “*The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds*”, Quartely Journal of the Royal Meteorological Society, London, v.87, n.372, p.194-211, April 1961

$\bar{U}(10)$  - velocidade média horária a 10m de altura [m/s];

$X_1$  – frequência adimensional:  $X_1 = fL/\bar{U}(10)$ .

DAVENPORT sugeria adotar a escala longitudinal de turbulência,  $L$ , igual a 1200m, por ser este o valor que permitiu o melhor ajuste da curva aos resultados experimentais.

Mais tarde, em 1967, DAVENPORT<sup>2</sup> propôs considerar a influência da cota  $z$  na determinação do espectro de turbulência, passando a adotar a frequência adimensional  $X_1$  calculada pela expressão [4]:

$$X_1(z) = \frac{fL(z)}{\bar{U}(z)} \quad (\text{III.2})$$

onde  $\bar{U}(z)$  é a velocidade média horária na cota  $z$  e a escala longitudinal de turbulência  $L(z)$  é determinada por:

$$L(z) = 200\sqrt{3} z^{0,25} \text{ metros} \quad (\text{III.3})$$

### III.1.2 Espectro de Kaimal

O espectro da componente longitudinal de turbulência proposto por KAIMAL *et al.*<sup>3</sup> (1972) é dado pela seguinte expressão matemática, apresentada por BLESSMANN [4]:

$$\frac{fS_1(f)}{u_*^2} = \frac{200Y_1}{(1+50Y_1)^{5/3}} \quad (\text{III.4})$$

onde  $u_*$  é a velocidade de fricção e a frequência adimensional  $Y_1$  é dada por:

$$Y_1 = \frac{f(z-z_d)}{\bar{U}(z)} \quad (\text{III.5})$$

ou, admitindo o deslocamento do plano zero aproximadamente nulo ( $z_d \cong 0$ ),

$$Y_1 = \frac{fz}{\bar{U}(z)} \quad (\text{III.6})$$

---

<sup>2</sup> DAVENPORT, A G. – “*The dependence of wind loads on meteorological parameters*”. In: 2<sup>nd</sup> International Research Seminar on Wind Effects on Buildings and Structures, Ottawa, v.1, paper 2, p.19-82, 1967

<sup>3</sup> KAIMAL, J.C. et al. – “*Spectral characteristics of surface-layer turbulence*”, J. Royal Meteorol. Soc., n.98, p.563-589, 1972

Outras duas denominações também encontradas na literatura para referenciar a frequência adimensional  $Y_1$  (Equação III.6) são *coordenada de Monin* e *coordenada de semelhança*.

A Figura III.1 ilustra os espectros de Davenport (Equação III.1) e Kaimal (Equação III.4), entre outros. Comparando as curvas dos espectros estudados neste trabalho, observa-se que os valores obtidos em baixa frequência não são bem representados no espectro de Davenport. Entretanto, no intervalo de interesse da Engenharia Estrutural (3Hz~0,1 Hz), à direita do espectro, as curvas apresentam boa concordância. No eixo das ordenadas,  $\sigma_1^2$  representa a variância da densidade espectral  $S_1(f)$ , uma medida de dispersão em relação ao valor médio [4].

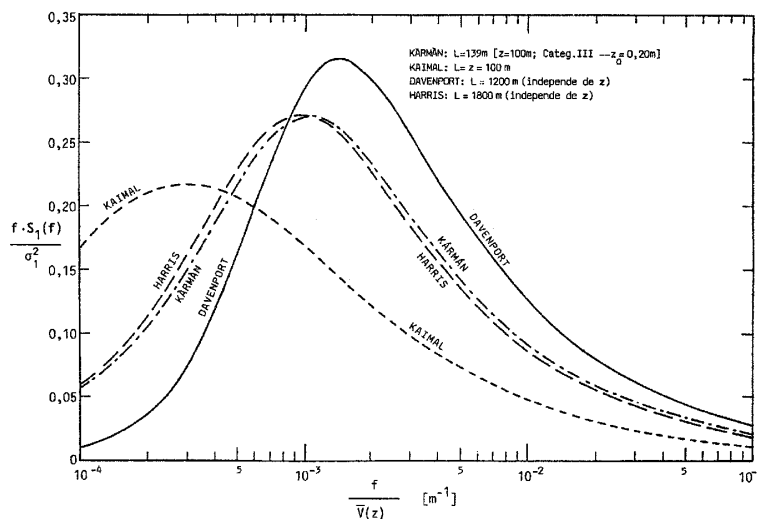


Figura III.1 – Espectros de Davenport, Kaimal, Harris e Karmán [4]

### III.1.3 Definição de Espectros a partir de Dados Experimentais Metodologia

Independentemente das expressões matemáticas já propostas por pesquisadores como Davenport e Kaimal, por exemplo, é possível definir espectros de vento específicos para uma determinada estrutura, a partir de dados obtidos experimentalmente. Neste caso, BLESSMANN [4] sugere transformar as flutuações do vento em um sinal elétrico, passando-o em seguida por um filtro passa-faixa estreita, de largura de faixa  $\Delta f$  e centrado numa determinada frequência  $f_0$ , que deverá variar ao longo do intervalo de frequências de interesse. A densidade espectral  $S_i(f)$  da

componente  $v_i$  do vetor turbulência será então determinada de acordo com os seguintes passos de cálculo:

- a) Filtragem do sinal, passando-o por um filtro de faixa estreita, com largura de faixa  $\Delta f$ , em torno da frequência central  $f_0$ . Obtém-se, dessa forma, a componente  $v_i$  em função de  $t$ ,  $f_0$  e  $\Delta f$ , ou seja,  $v_i(t, f_0, \Delta f)$ ;
- b) Cálculo da segunda potência dos valores instantâneos do sinal filtrado, o que significa determinar os valores de  $v_i^2(t, f_0, \Delta f)$ ;
- c) Cálculo da média desses valores da segunda potência em um determinado intervalo de tempo  $T$ ;
- d) Divisão do valor quadrado médio encontrado em (c) pela largura de faixa  $\Delta f$ , determinando assim o valor de  $S_i(f_0) = [v_i^2(t, f_0, \Delta f) / \Delta f]$ ;
- e) Variar a frequência central  $f_0$ , de modo a obter valores de densidade espectral para diversas frequências, permitindo o traçado da curva  $S_i(f)$ .

Concluindo, esse procedimento permite definir os valores da variância  $\sigma_i^2$  de  $v_i(t)$  na faixa de frequência  $\Delta f$  e frequência central  $f_0$ , assim como a densidade espectral de potência  $S_i(f_0)$  para a mesma frequência central, que são expressas, respectivamente, por:

$$\sigma_i^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T v_i^2(t, f_0, \Delta f) dt \quad (\text{III.7})$$

$$S_i(f_0) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \left[ \frac{1}{\Delta f} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T v_i^2(t, f_0, \Delta f) dt \right] \quad (\text{III.8})$$

Uma vez que  $f_0$  pode assumir valores quaisquer dentro do intervalo de frequências presentes nas flutuações do vento, é possível substituir  $S_i(f_0)$  por  $S_i(f)$  na Equação III.8.

A unidade da densidade espectral de potência  $S_i$  é dada pela relação (unidade de  $i$ )<sup>2</sup>/(unidade de frequência angular). Assim, no caso específico da componente  $v_i$  do vetor turbulência aqui estudado, a unidade de  $S_i(f)$  será (unidade de velocidade)<sup>2</sup>/Hz, ou ainda, (ms<sup>-1</sup>)<sup>2</sup>/Hz.

### III.1.4 A Universalidade dos Espectros de Vento

Com a pesquisa realizada para este trabalho foi possível concluir que, pelo menos nos últimos trinta anos, os espectros de vento são considerados independentes da área em estudo. Se, em 1972, SACHS [15] era categórico ao afirmar que os espectros podiam ser generalizados para diferentes regiões, bastando ajustar o valor da velocidade média e o coeficiente de arrasto superficial, SIMIU E SCANLAN em 1986 (1<sup>a</sup>. ed.) e 1996 (2<sup>a</sup>. ed.) [6], assim como BLESSMANN em 1995 [4], apresentam as mesmas expressões matemáticas propostas por Davenport e Kaimal, entre outros, obtidas a partir de pesquisas empíricas realizadas para terrenos de diversas rugosidades e diferentes alturas. Resta saber qual a abrangência, geograficamente falando, dos resultados obtidos experimentalmente. Os anemômetros não estariam localizados apenas nas regiões de atuação destes pesquisadores? Talvez, quem sabe, todas as estações meteorológicas se encontrassem no hemisfério norte ?!

Com a evolução das pesquisas nas áreas de sismo e exploração marítima de petróleo, os pesquisadores acabaram concluindo que os espectros de sismo e de mar apresentavam características regionais bem definidas. Os espectros de ondas do mar, por exemplo, são do tipo Pierson-Moskowitz, porém com características que dependem da estatística do estado de mar de cada região particular de interesse.

Impõe-se esclarecer se o fato de ser invariante para um dado valor de velocidade média e coeficiente de rugosidade é, realmente, uma característica do fenômeno vento ou se os pesquisadores ainda não dispõem de dados suficientes nas diversas regiões de interesse [16].

Essa mesma questão é discutida por TIELEMAN [17] em artigo sobre o caráter universal do espectro de vento, onde afirma que as expressões propostas por Davenport e Kaimal, entre outros, são casos particulares de uma expressão geral aplicável a terrenos de maior complexidade, isto é, terrenos com rugosidade de superfície não-homogênea e/ou acidentes topográficos. A simples presença de algumas obstruções isoladas, tais como, árvores, habitantes, pequenas elevações etc, ainda que estejam afastadas alguns quilômetros na direção do vento, fazem com que as Equações III.1 e III.4 deixem de ser representativas. A medida que aumenta a complexidade das condições do terreno, a turbulência deixa de estar em equilíbrio com o perfil de velocidade média e com os parâmetros que dele derivam, tais como, o comprimento de

rugosidade,  $z_0$ , e a velocidade de fricção,  $u_*$ , que passam a não descrever a turbulência de forma adequada.

Enfaticamente, TIELEMAN [17] diz que o espectro da componente longitudinal da velocidade do vento não pode ser descrito por uma relação universal, já que a forma desse espectro na região de baixa frequência parece ser influenciada de modo imprevisível pelas condições do terreno na direção de incidência do vento.

Em resumo, TIELEMAN [17] propõe um modelo geral de espectro que, para determinadas condições de terreno, converge para expressões mais simples, tais como as propostas de Davenport, Kaimal etc (Figura III.1), alertando também que parâmetros “regionais”, ou seja, variância e comprimento de escala, só deverão ser utilizados na normalização de um modelo de espectro quando associados a superfícies do tipo FSU (*flat, smooth and uniform*), por exemplo: em áreas rurais o terreno pode ser considerado nivelado (F) e uniforme (U), mas a presença de obstáculos isolados faz com que deixe de ser considerado liso (S), o que só ocorre quando apresenta vegetação rasteira, sem qualquer obstáculo. Em qualquer outra situação apenas parâmetros “locais” tais como velocidade de fricção,  $u_*$ , e altura,  $z$ , deverão ser utilizados no processo de normalização.

### **III.1.5 Determinação Experimental de um Espectro de Vento**

Como sugestão, esta seção apresenta uma metodologia para aquisição de dados de direção e velocidade do vento visando determinar o espectro a que está submetida uma determinada estrutura ou, até mesmo, com o objetivo de comparar espectros definidos experimentalmente com aqueles calculados aplicando as expressões matemáticas propostas por Davenport e Kaimal (ítems III.1.1 e III.1.2), adotando a velocidade média obtida com o tratamento estatístico dos resultados da monitoração.

Selecionados tipo e quantidade de anemômetros necessários, pares de velocidade e direção do vento seriam definidos como a média de 3 segundos, intervalo de tempo normalmente considerado na determinação das rajadas, tendo em vista a necessidade de vencer a inércia dos anemômetros. A velocidade média seria determinada, então, para diversas amostras de 10 minutos que, tratadas estatisticamente, permitiriam construir os espectros de vento relativos à área em estudo, mantendo-os freqüentemente atualizados. A Figura III.2 ilustra o aspecto dessas amostras, traçadas na frequência de digitalização

(ou taxa de amostragem) de 20 pontos por minuto (1min = 60s  $\Rightarrow$  60s/3s =20 pontos por minuto).

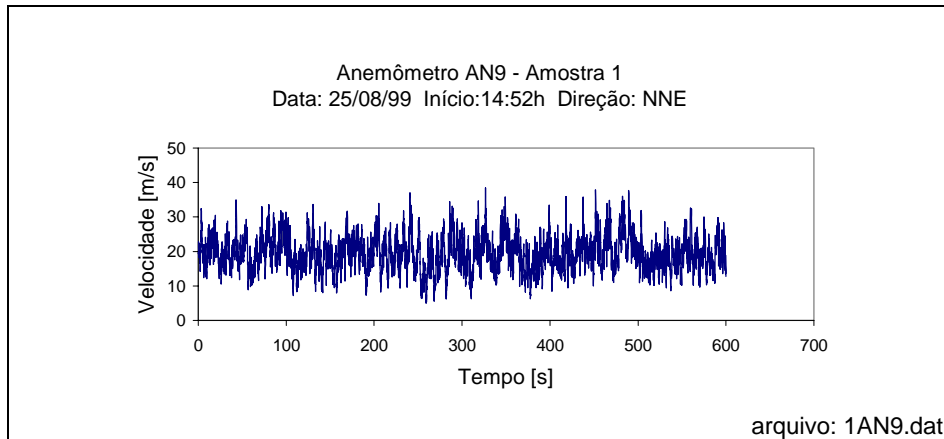
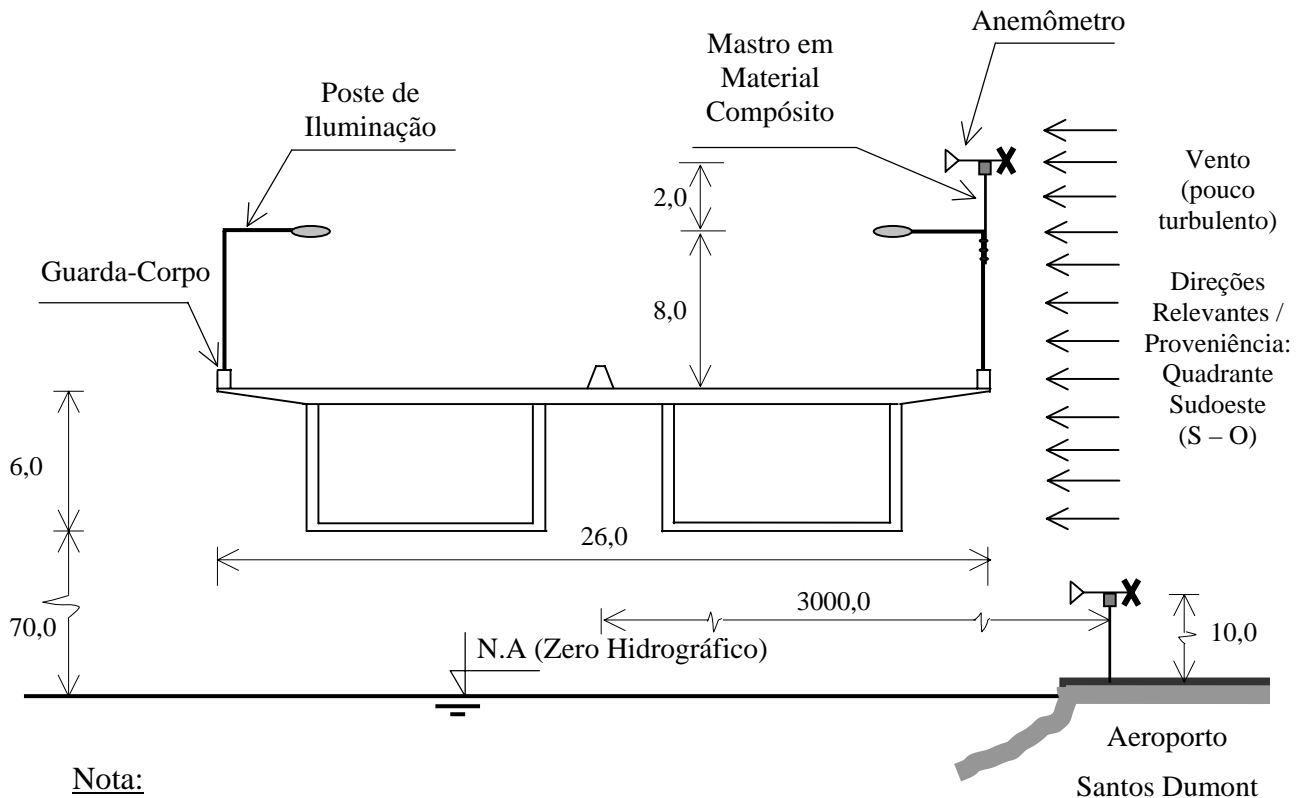


Fig. III.2 – Velocidade do Vento –Amostra

Na Ponte Rio – Niterói, onde deverão ser instalados anemômetros integrados ao sistema de monitoração de longo prazo da superestrutura metálica, a situação de instalação é ilustrada na Figura III.3.



Nota:  
Cotas em metros, dimensões aproximadas.

Figura III.3 – Anemômetro Instalado na Seção Transversal Média do Vão Central da Superestrutura Metálica da Ponte Rio-Niterói, sobre as Águas da Baía de Guanabara

Os registros simultâneos obtidos com o anemômetro do Aeroporto Santos Dumont, instalado no nível do mar, servirão de referência para a correção dos dados dos anemômetros fixados a postes de iluminação da ponte que, como explanado na seção II.2.2, estarão bastante influenciados por efeitos locais provocados pela incidência do escoamento de ar sobre a superfície lateral do caixão da ponte.

Se, por hipótese, os registros de vento fossem destinados ao projeto básico de uma ponte com as mesmas características geométricas e geográficas da ponte Rio-Niterói e que, após o tratamento estatístico, precedido das correções quanto a rugosidade e altura sobre o terreno, a velocidade média calculada fosse 20m/s, os espectros de vento definidos pelas expressões propostas por Davenport e Kaimal teriam a forma delineada nas Figuras III.4 e III.5. Por conveniência, as curvas são traçadas em escala linear e para os mesmos parâmetros utilizados na Fig.III.1, lembrando que a variância da densidade espectral,  $\sigma_1^2$ , é definida por:

$$\sigma_1^2 = \int_0^{\infty} S_1(f) df \quad (\text{III.9})$$

#### Espectro de Davenport

Substituindo na Equação III.9, a expressão da densidade espectral  $S_1(f)$  que resulta da Equação III.1, a variância será [4]:

$$\sigma_1^2 = 6,0c_{as}\bar{U}(10) \quad (\text{III.10})$$

Assim, para as coordenadas da Figura III.1, o espectro de Davenport é definido por:

$$\frac{fS_1(f)}{\sigma_1^2} = \frac{2X_1^2}{[3(1+X_1^2)^{4/3}]} \quad (\text{III.11})$$

Usando como referência para o cálculo da variância a norma brasileira de vento NBR 6123 [5], o coeficiente de arrasto superficial  $c_{as}$ , relativo a uma superfície lisa de grandes dimensões (Categoria I), tem valor  $2,8 \times 10^{-3}$ . No Apêndice B, incluído no fim deste trabalho, encontram-se os valores recomendados deste coeficiente para as diversas categorias de superfície previstas na norma.

Finalmente, a Figura III.4 apresenta o espectro de Davenport relativo ao problema proposto. No eixo das abscissas, em lugar da frequência decidiu-se por

considerar o valor da frequência dividido pela velocidade média obtida, por hipótese, do tratamento estatístico (20m/s). Como justifica BLESSMANN [4], esta é uma forma de tornar o espectro independente de  $\bar{U}(z)$  e, portanto, ampliar seu campo de aplicação.

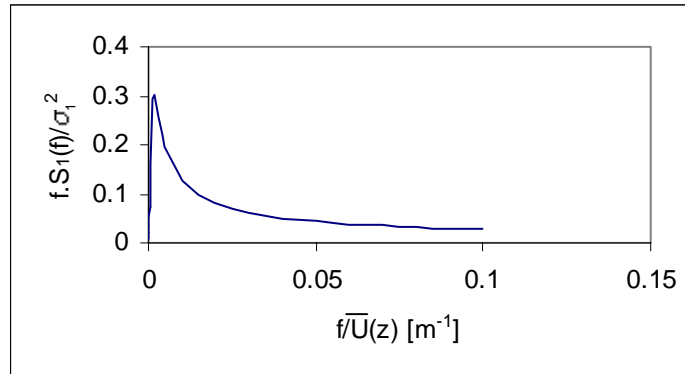


Figura III.4 – Espectro de Davenport (z=10m, NBR 6123 – Categoria I)

### Espectro de Kaimal

Aplicando a mesma metodologia empregada na determinação do espectro de Davenport, neste caso a variância é definida por:

$$\sigma_1^2 = 6u_*^2 \quad (\text{III.12})$$

Em função das coordenadas utilizadas na Figura III.1, o espectro tem a expressão:

$$\frac{fS_1(f)}{\sigma_1^2} = \left[ \frac{100}{3} \right] \left[ \frac{Y_1}{(1+50Y_1)^{5/3}} \right] \quad (\text{III.13})$$

A Figura III.5 apresenta, então, o espectro de Kaimal relativo ao exemplo proposto.

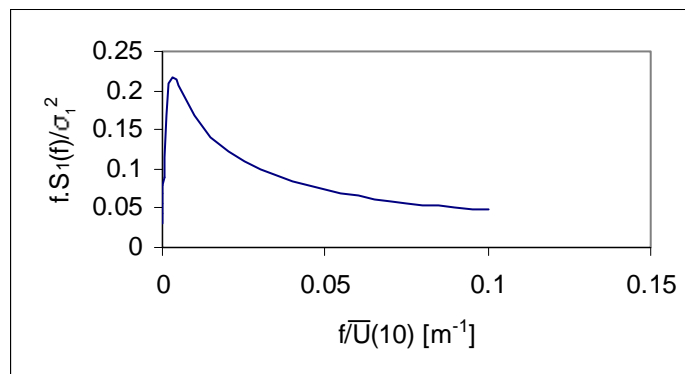


Figura III.5 – Espectro de Kaimal (z=10m,  $\bar{U}(10) = 20\text{m/s}$ )

Comparando os espectros de Davenport e Kaimal (Figuras III.4 e III.5) observa-se que, no âmbito das estruturas civis, os dois poderiam ser utilizados numa análise, sem qualquer prejuízo na qualidade dos resultados pois, a partir da abscissa  $0.025 \text{ m}^{-1}$ , os espectros são semelhantes, ou ainda, para a velocidade média do vento igual a  $20 \text{ m/s}$  utilizada no exemplo proposto, os espectros são similares a partir da frequência  $f=0,5 \text{ Hz}$ , aproximadamente.

Uma vez determinado o espectro de vento, a aplicação da transformada inversa de Fourier ou integral de Fourier devolverá o sinal para o domínio do tempo, etapa indispensável na análise de estruturas expostas à ação dinâmica do vento, na hipótese do modelo apresentar não-linearidade.

### **III.2 ESPECTROS DAS COMPONENTES LATERAL E VERTICAL DA TURBULÊNCIA**

Da mesma forma que o espectro da componente longitudinal da turbulência, existem expressões matemáticas que representam as outras duas componentes: lateral e vertical. Esses espectros, segundo BLESSMANN [4], não são muito estudados e, como as componentes lateral e vertical do campo de velocidades de vento são desprezadas no modelo proposto para análise de torres TEE sob ação do vento, não serão enfocados neste trabalho. Entretanto, é importante indicar as Referências [4] e [6] para estudos mais detalhados.

## CAPÍTULO IV

### TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS DE VENTO

---

#### IV.1 ESTIMATIVA DE EXTREMOS EM REGIÕES DE VENTOS BEM COMPORTADOS

A elaboração de normas de vento que destinem-se à aplicação na Engenharia Estrutural exige a determinação das máximas velocidades médias do vento (ou velocidade básica do vento), nas diversas regiões de aplicação da norma, na qual serão apresentadas sob a forma de mapas de isopletas. Esses valores de velocidade, recomendados para adoção em projetos estruturais, dependerão da frequência e intensidade dos ventos nas áreas de construção, assim como da probabilidade adotada no cálculo da velocidade de que seu valor não será ultrapassado durante a vida útil da estrutura.

O comportamento probabilístico dos ventos extremos é descrito, nas regiões de ventos bem comportados, pela contribuição de cada uma das séries de dados de ventos máximos anuais coletados pelas diversas estações meteorológicas. A análise estatística dessas séries irá permitir a previsão de ventos extremos a longo prazo [6].

Desse modo, cada estação definirá uma variável aleatória representada pela velocidade máxima anual. Se a estação é tal que os registros de vento cobrem um número consecutivo de anos, a função cumulativa de distribuição dessa variável poderá ser estimada e, assim, caracterizar o comportamento probabilístico da velocidade máxima anual. A velocidade básica do vento é então definida como a velocidade que corresponde a um valor específico  $p$  da função cumulativa de distribuição ou ainda, a um período de retorno  $\bar{N}$  definido por:

$$\bar{N} = \frac{1}{(1-p)} \quad (\text{IV.1})$$

Além dos erros relativos à aquisição de dados de vento, na análise estatística dos valores extremos dois outros tipos de erro poderão estar presentes: os erros de amostragem, consequência do tamanho limitado das amostras utilizadas na estimativa dos parâmetros de distribuição e os erros de modelagem, causados pela escolha inadequada do modelo probabilístico a ser utilizado. O primeiro deles – amostragem – torna-se desprezível a medida que o tamanho da amostra cresce infinitamente. O erro de

modelagem, no entanto, poderá conduzir a valores de velocidade básica do vento e período de retorno que levem, por exemplo, ao projeto de estruturas com probabilidade de falha elevada e irreal. Neste caso, testes deverão ser realizados no sentido de identificar o modelo probabilístico compatível, assunto tratado numa das próximas seções.

## **IV.2 MODELAGEM ESTATÍSTICA**

### **IV.2.1 Variáveis Aleatórias e Distribuição de Probabilidade**

#### Variável Aleatória – Classificação

Uma variável aleatória é dita discreta quando assume valores restritos a um conjunto finito de números; é considerada contínua quando pode assumir um valor qualquer dentro de um segmento do eixo real.

Convencionalmente, a variável aleatória é representada por letras maiúsculas, ao passo que valores específicos que essa variável possa assumir são representados por letras minúsculas.

#### Função Densidade de Probabilidade e Função Cumulativa de Distribuição

Admitamos que o intervalo de definição de uma variável contínua  $X$  associado a um determinado experimento possa ser dividido em intervalos iguais  $\Delta X$ . Admitamos também, que esse ensaio possa ser repetido  $n$  vezes. Será possível então, traçar o respectivo histograma (Figura IV.1), onde o número de vezes que a variável  $X$  assume valores nos intervalos  $X_1-X_0, X_2-X_1, \dots, X_i-X_{i-1}, \dots$  é dado por  $n_1, n_2, \dots, n_i, \dots$ , respectivamente.

Dividindo as ordenadas do histograma por  $n\Delta X$ , obtém-se o diagrama de distribuição de densidade da frequência, onde a frequência relativa do evento  $X_{i-1} < X < X_i$  é igual ao produto da ordenada da distribuição de densidade da frequência,  $n_i/n\Delta X$ , pelo valor do intervalo,  $\Delta X$ . Lembrando ainda que a área sob o histograma é igual a  $n\Delta X$ , ou seja,  $(n_1 + n_2 + \dots + n_i + \dots)\Delta X$ , deduz-se então que a área total sob o diagrama da distribuição de densidade da frequência é unitária.

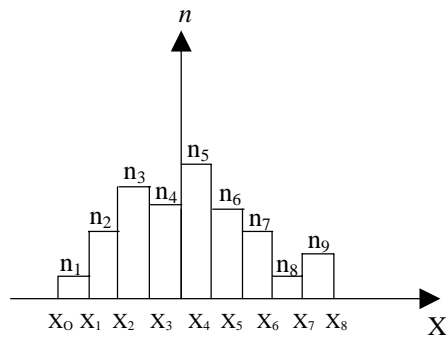


Figura IV.1 – Histograma

A medida que  $\Delta X$  se torna tão pequeno que é possível escrever  $\Delta X = dx$  e  $n$  cresce infinitamente, as ordenadas da distribuição de densidade da frequência se aproximam, no limite, de valores  $f(x)$ , onde  $x$  representa um valor que pode ser assumido pela variável aleatória  $X$ . Na literatura, a função  $f(x)$  é chamada de função densidade de probabilidade da variável aleatória  $X$  (Figura IV.2) e representa a densidade de distribuição de valores de  $x$  [18]. A simples observação da definição de  $f(x)$  leva a concluir que a probabilidade do evento  $x < X \leq x+dx$  é igual a  $f(x)dx$  e também que:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1 \quad (IV.2)$$

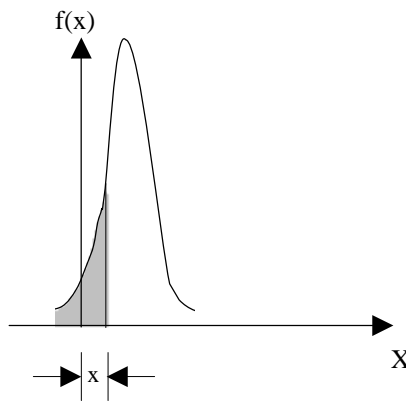


Figura IV.2 – Função Densidade de Probabilidade

No histograma (Figura IV.1), o número de vezes que  $X$  assume valores inferiores a  $X_i$  é igual a soma  $n_1 + n_2 + \dots + n_i$ . Da mesma forma, a probabilidade de  $X \leq x$ , denominada função cumulativa de distribuição da variável aleatória  $X$ , é expressa por:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx \quad (IV.3)$$

ou seja, na Figura IV.3 a ordenada relativa à abscissa  $X=x$  é igual à área representada em cinza na função densidade de probabilidade (Figura IV.2).

Da Equação IV.3 temos então que:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (\text{IV.4})$$

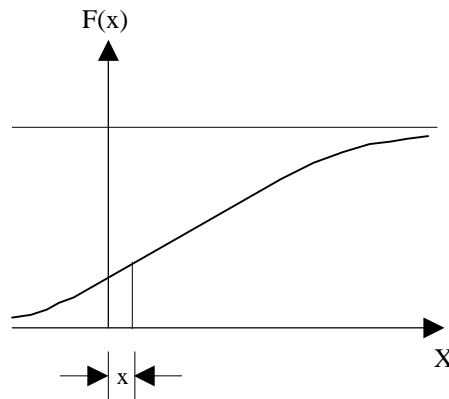


Figura IV.3 – Função Cumulativa de Distribuição

#### IV.2.2 Comportamento de uma Variável Aleatória – Parâmetros Estatísticos

Na descrição do comportamento de uma variável aleatória são utilizados alguns parâmetros que representam medidas de locação (valor significativo, mediana, modo) e também medidas de dispersão da variável em relação à média (variância, desvio padrão, coeficiente de variação).

##### Valor Significativo ou Valor Esperado

O valor significativo, ou ainda, valor mais provável de uma variável aleatória discreta  $X$  é expresso por:

$$E(X) = \sum_{i=1}^m x_i f_i \quad (\text{IV.5})$$

onde  $m$  corresponde ao número de possíveis valores de  $x$ .

Por analogia, se a variável  $X$  for contínua, teremos:

$$E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx \quad (\text{IV.6})$$

onde  $f(x)$  representa a função densidade de probabilidade.

A notação  $E(X)$  tem origem em “*the statistical expectation of*” [18].

### Mediana de uma Variável Aleatória Contínua $X$

A mediana de uma variável aleatória contínua  $X$  é o valor da variável que corresponde ao valor  $\frac{1}{2}$  da função cumulativa de distribuição.

### Modo de uma Variável Aleatória Contínua $X$

O modo de uma variável aleatória contínua  $X$  é o valor da variável que corresponde ao máximo da função densidade de probabilidade. Lembrando que  $\text{Prob}(x < X \leq x+dx)$  é igual a  $f(x)dx$ , o modo pode ser interpretado como o valor da variável com maior probabilidade de ocorrência dentre os valores possíveis.

As Figuras IV.4 ilustram a mediana, o modo e o valor esperado para três tipos de função densidade de probabilidade.

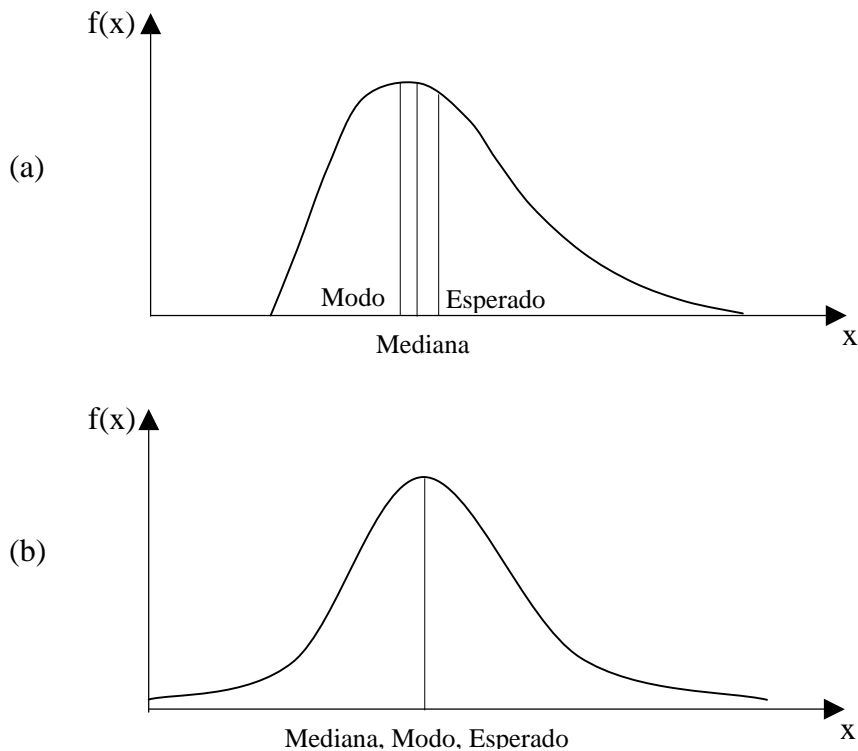


Figura IV.4 – Representação Gráfica da Mediana, Modo e Valor Esperado para Diferentes Tipos de Função Densidade de Probabilidade [19]

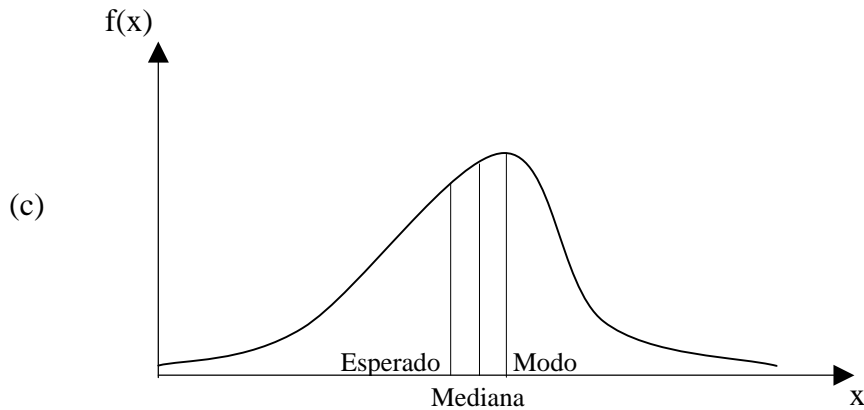


Figura IV.4 (Cont.) – Representação Gráfica da Mediana, Modo e Valor Esperado para Diferentes Tipos de Função Densidade de Probabilidade [19]

A mediana, o modo e o valor esperado são indicadores importantes na descrição da região do ponto em torno do qual a distribuição está centrada, daí serem tratados também como valores centrais da distribuição e definidos como medidas da “tendência central” [19].

### Variância

O valor mais provável de  $[x - E(X)]^2$  é definido como a variância da variável  $X$ . Recorrendo à definição de valor esperado da variável aleatória contínua  $X$  (Equação IV.6), a variância pode ser expressa por:

$$\text{Var}(X) = E\{[x - E(X)]^2\} = \int_{-\infty}^{\infty} [x - E(X)]^2 f(x) dx \quad (\text{IV.7})$$

### Desvio padrão

O desvio padrão de uma variável aleatória  $X$  é definido por:

$$\text{SD}(X) = [\text{Var}(X)]^{1/2} \quad (\text{IV.8})$$

### Coefficiente de Variação

A relação entre o desvio padrão  $\text{SD}(X)$  e o valor esperado  $E(X)$  de uma variável aleatória é tratada como coeficiente de variação de  $X$ . Este coeficiente mede, de forma adimensional, a dispersão dos dados em torno da média.

### IV.2.3 Estatística de Valores Extremos

#### Introdução

A finalidade da teoria estatística dos valores extremos é a análise de extremos observados e previsão de outros. Os extremos não são fixos, são na verdade novos valores estatísticos que dependem da distribuição inicial e do tamanho da amostra [20].

O estudo estatístico de valores extremos procura responder a duas questões: *i*) se um determinado valor de uma amostra, obtida de uma distribuição supostamente conhecida, está fora do que pode ser considerado uma expectativa razoável e *ii*) se uma série de valores extremos tem um comportamento regular. Nos dois casos, expectativa razoável e comportamento regular, são características que devem ser definidas por algum tipo de procedimento.

A distribuição de valores extremos e seus respectivos parâmetros deverão manter-se constantes com o tempo (ou espaço), caso contrário, essa dependência deve ser levada em conta ou eliminada. Uma outra limitação dessa teoria é a condição das observações que originaram os valores extremos serem independentes, o que dificilmente acontece. Os sistemas meteorológicos que dão origem às tormentas, por exemplo, normalmente afetam uma determinada localidade por um período maior que um dia, ou seja, os registros de velocidade do vento de dois ou mais dias não são necessariamente independentes. Baseados em estudos estatísticos realizados por Thom (1964), que recomenda períodos iguais ou superiores à duração de tormentas típicas, de quatro a oito dias, SIMIU e HECKERT [21] sugerem uma metodologia para tratamento de amostras formadas por oito registros diários e consecutivos de velocidade máxima do vento, visando justamente reduzir o grau de dependência que elas possam ter e, apesar de todo esse cuidado, nada garante que alguma pequena correlação entre os dados possa persistir.

As pesquisas relativas à teoria de valores máximos começaram com a distribuição normal, o que era razoável tendo em vista a importância prática: os astrônomos que lidavam com a observação repetida de um mesmo objeto, por exemplo o diâmetro de uma estrela, precisavam estabelecer um critério de aceitação ou rejeição dos valores estimados. Nesse sentido, GUMBEL [20] cita Peirce (1852) sugerindo um teste e Chauvenet (1878) um método, ambos largamente empregados.

Em algumas décadas não foram muitos os trabalhos importantes apresentados nessa área, alguns até foram vistos por muito tempo como simples curiosidade matemática. O primeiro autor a estudar valores extremos foi L. von Bortkiewicz em 1922. No ano seguinte, R. von Mises introduziu a noção fundamental de valores máximos característicos, ainda que não usasse esta denominação, e mostrou a relação assintótica que havia com o valor esperado dentre os valores máximos. Em 1925, estudos realizados por L.H.C. Tippett permitiram a construção de tabelas que passaram a ser uma ferramenta importante para aqueles que tratavam de valores máximos de distribuição normal.

Entretanto, o fato das pesquisas estarem sempre relacionadas a esse tipo de distribuição, impediram um maior desenvolvimento na área de valores extremos, uma vez que os teoremas fundamentais dessa teoria não estão relacionados de forma simples com a distribuição normal. O primeiro estudo de valores máximos com outro tipo de distribuição foi realizado por E.L.Dodd em 1923 e baseava-se em valores assintóticos, o que era novamente semelhante aos valores máximos característicos.

Segundo GUMBEL [20], o primeiro artigo baseado num tipo de distribuição inicial diferente da normal foi apresentado por M. Frèchet<sup>1</sup> em 1927, o primeiro também a obter uma distribuição assintótica de valores máximos, mostrando ainda que valores máximos obtidos de distribuições iniciais diferentes, mas que partilhem uma mesma propriedade, podem apresentar a mesma distribuição assintótica. Frèchet introduziu também o postulado da estabilidade, que diz que a distribuição de valor máximo deve ser igual à distribuição inicial. Entretanto, como o trabalho baseava-se num tipo de distribuição pouco freqüente, o artigo de Frèchet nunca recebeu o devido reconhecimento. No ano seguinte, 1928, R.A. Fisher e L.H.C. Tippett<sup>2</sup> publicaram um trabalho que é considerado básico para valores extremos: usando o mesmo postulado da estabilidade encontraram, em adição à distribuição assintótica de Frèchet, duas outras, válidas para outros tipos iniciais.

Mais tarde, a partir de resultados de ensaios de ruptura destinados a suas pesquisas para determinação de vida útil à fadiga, o engenheiro W. Weibull conseguiu

---

<sup>1</sup> FRÈCHET, M. – “*Sur la loi de probabilité de l’ecart maximum*”, Ann. de la Soc. Polonaise de Math. , Cracovie, 1927

<sup>2</sup> FISCHER, R.A., TIPPETT, L.H.C. – “*Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample*”, Proc. Cambridge Phil. Soc, 1928

estabelecer empiricamente um novo tipo de distribuição sobre o qual, a partir de 1939, passou a apresentar inúmeros artigos, assim como a utilizar em seus estudos.

Outras contribuições se sucederam, inclusive de Gumbel, que em 1954 publicou *Statistical Theory of Extreme Values and Some Practical Applications*, onde exemplos numéricos podiam ser encontrados.

Em resumo, existem apenas três tipos de distribuição assintótica de valores extremos conhecidos: Frèchet (também chamada Fischer-Tippett Tipo II ou segunda assíntota), Gumbel (Tipo I ou primeira assíntota) e Weibull (Tipo III ou terceira assíntota), colocando-os em ordem decrescente de comprimento da cauda. Esclarecendo, isto significa dizer que nas distribuições de Frèchet e Gumbel os valores possíveis são ilimitados nas duas direções, ou seja, tanto para a direita (na direção do valor máximo) quanto para a esquerda (na direção do valor mínimo), sendo que na distribuição de Gumbel o limite superior, ainda que infinito, é um pouco menor que o da distribuição de Frèchet; a terceira assíntota – distribuição de Weibull – se aplica a distribuições que apresentem limite finito para a direita ou para a esquerda (truncamento) [6, 20, 21].

Deve ser entendido também que esses três tipos de distribuição inicial não são definitivos. Melhor dizendo, nada garante que um conjunto de dados vá se enquadrar, obrigatoriamente, em um dos três tipos de distribuição inicial. Além disso, uma distribuição inicial que pertença a um tipo num extremo pode pertencer a outro tipo ou, até mesmo a nenhum tipo, no outro extremo [20].

Concluindo, valor extremo pode ser valor máximo ou valor mínimo. Este trabalho, no entanto, por ser dirigido à análise de dados de vento, tratará apenas de valores máximos.

Discorre-se, a seguir, sobre o que representam, no sentido matemático, todos esses conceitos.

### Distribuição Normal

Admitindo que a variável aleatória  $X$  consista na soma de pequenas e independentes contribuições  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , pode ser provado [6] que sob condições gerais, se  $n$  for grande, a função densidade de probabilidade de  $X$  é dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_x)^2}{2\sigma_x^2}\right) \quad (\text{IV.9})$$

onde  $\mu_x = E(X)$  e  $\sigma_x^2 = \text{Var}(X)$  são o valor esperado e a variância de  $X$ , respectivamente.

A distribuição de probabilidade de uma função linear de uma variável normalmente distribuída é normal, assim como a soma de duas ou mais variáveis normalmente distribuídas também será normalmente distribuída.

A distribuição normal ou gaussiana é utilizada em diversas aplicações no campo da Física e da Engenharia, por exemplo, na descrição de erros em medições, já que nasceu no cotidiano dos astrônomos ao observarem as estrelas. Ao mesmo tempo é necessário ter cuidado, porque muitos fenômenos não são normalmente distribuídos, a velocidade máxima do vento é um deles [6], qualquer que seja a localização geográfica.

### Postulado da Estabilidade (Frèchet)

Consideremos  $N$  amostras de tamanho  $n$ , tomadas de um mesmo universo. Em cada amostra existirá um valor máximo e o valor máximo em  $Nn$  observações será o maior valor dentre os  $N$  valores máximos obtidos das amostras de tamanho  $n$ . A distribuição de máximos em  $Nn$  observações tenderá para a mesma expressão assintótica da distribuição de valores máximos das amostras de tamanho  $n$ , desde que uma assíntota exista. Conseqüentemente, a assíntota será tal que o maior valor de uma amostra de tamanho  $n$  dela obtida terá a mesma distribuição assintótica.

Uma vez que uma transformação linear não altera a forma da distribuição, a probabilidade do valor máximo ser inferior a  $x$  deverá ser igual à probabilidade da função linear de  $x$ ,

$$F^n(x) = F(a_n + b_n x), \quad (\text{IV.10})$$

onde os parâmetros  $a_n$  e  $b_n$  são funções de  $n$  [20].

### Distribuição de Valores Extremos

A teoria clássica de valores extremos consiste na análise de dados que representem valores máximos de uma variável, selecionados em conjuntos de valores relativos a uma determinada época, na engenharia de ventos definida normalmente como anos do calendário [6].

Para valores possíveis independentes e identicamente distribuídos, com função cumulativa de distribuição  $F$ , a distribuição do valor máximo de um conjunto de  $n$  valores é dada por  $F^n$ . Com a escolha adequada de  $a_n$  e  $b_n$  e uma função  $F$  admissível,  $F^n(a_n + b_n x)$  converge para uma distribuição limite chamada distribuição assintótica que poderá ser a de Gumbel, Frèchet ou Weibull.

Contrastando com a teoria clássica, pesquisas recentes tornaram possível a análise de dados que excedam um determinado limite pré-estabelecido ou patamar (*threshold*), independente de serem valores máximos em seus respectivos conjuntos. Uma distribuição assintótica foi desenvolvida, a distribuição assintótica de Pareto, considerando que valores que ultrapassem um limite previamente estabelecido e suficientemente alto são eventos raros aos quais a distribuição de Poisson se aplica. A distribuição generalizada de Pareto (GPD) é expressa por:

$$G(y) = \text{Prob}[Y \leq y] = 1 - \left\{ \left[ 1 + \left( \frac{cy}{a} \right) \right]^{-1/c} \right\}, \quad a > 0, \quad \left( 1 + \frac{cy}{a} \right) > 0 \quad (\text{IV.11a})$$

A Equação IV.11a pode ser utilizada para representar a distribuição cumulativa do excedente  $Y=X-u$  da variável  $X$  acima do patamar  $u$ , dado  $X>u$  e para  $u$  suficiente grande. Relacionado ao comprimento da cauda, o parâmetro  $c$  define os domínios de atração:

- $c>0 \Rightarrow$  Distribuição de Frèchet,
- $c=0 \Rightarrow$  Distribuição de Gumbel,
- $c<0 \Rightarrow$  Distribuição de Weibull.

No domínio da distribuição de Gumbel,  $c=0$ , a expressão entre colchetes é entendida como a exponencial  $\exp(-y/a)$  [6].

Admitindo um patamar, o tamanho da amostra a ser analisada se amplia. Como mostram SIMIU e SCANLAN [6], se imaginarmos os registros de velocidade máxima do vento relativos a dois anos consecutivos com independência assegurada, na medida do possível, pela metodologia adotada no tratamento dos registros de dados, a adoção da teoria clássica faria com que apenas dois valores fossem utilizados na análise de extremos: os respectivos valores máximos de cada ano (época), digamos que 30m/s e 45m/s. Ao passo que admitindo um patamar de 30m/s, por exemplo, os valores entre 30 e 45m/s seriam considerados na estimativa de parâmetros da distribuição generalizada de Pareto. Esse valor limite pré-estabelecido poderia até ser menor, entretanto, o aumento de tamanho da amostra não garantirá, qualitativamente, uma melhor estimativa, uma vez que a condição do patamar ser assintoticamente alto estaria sendo violada. Em outro trabalho, agora de SIMIU e HECKERT [21], existe a indicação de que bons resultados poderão ser obtidos se na análise estatística de valores extremos de velocidade do vento o patamar escolhido for tal que o número de excedentes fique em torno de 10 valores por ano, alertando também que um patamar muito baixo poderá introduzir dependência nos dados, invalidando toda a teoria assintótica de valores extremos.

Considerando  $E(Y)$  e  $s(y)$  respectivamente o valor significativo e o desvio padrão da variável  $Y$ , os parâmetros  $a$  e  $c$  da distribuição generalizada de Pareto são dados por:

$$a = \frac{1}{2} E(Y) \left\{ 1 + \left[ \frac{E(Y)}{s(Y)} \right]^2 \right\} \quad (\text{IV.11b})$$

$$c = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \left[ \frac{E(Y)}{s(Y)} \right]^2 \right\} \quad (\text{IV.11c})$$

Seja a variável  $X$  o máximo de  $n$  variáveis aleatórias independentes  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ . Desde que  $X \leq x$  implique em  $Y_i \leq x, i=1, 2, \dots, n$ , temos que [6]:

$$F(X \leq x) = \text{Prob} (Y_1 \leq x, Y_2 \leq x, \dots, Y_n \leq x) = F_{Y_1}(x) F_{Y_2}(x) \dots F_{Y_n}(x) \quad (\text{IV.12})$$

As probabilidades  $F_{Y_i}(x)$  representam a distribuição inicial das variáveis  $Y_i$ , as quais constituem conjuntos de valores possíveis de onde os valores máximos  $X$  foram extraídos. Esses conjuntos são tratados no contexto da Estatística como *parent*

*population*. No caso particular em que todas as variáveis  $Y_i$  têm a mesma distribuição de probabilidade  $F_Y(y)$ , a Equação IV.12 se transforma em:

$$F_X(x) = [F_Y(x)]^n \quad (IV.13)$$

Sempre que a distribuição de probabilidade é ilimitada para a direita, as variáveis iniciais  $Y$  são ditas com distribuição do tipo exponencial se suas funções cumulativas de distribuição convergem (com  $y$  crescente) para a unidade, no mínimo tão rapidamente quanto uma função exponencial; as variáveis iniciais  $Y$  são ditas com distribuição de Cauchy sempre que:

$$\lim_{y \rightarrow \infty} [1 - F(y)]y^k = A, \quad A > 0 \text{ e } k > 0. \quad (IV.14)$$

As distribuições de valores máximos tendem para distribuições assintóticas quando  $n$  tende para infinito, o que pode ser observado na Figura IV.5, esboçada a partir da figura original apresentada no trabalho de ZURITA [22].

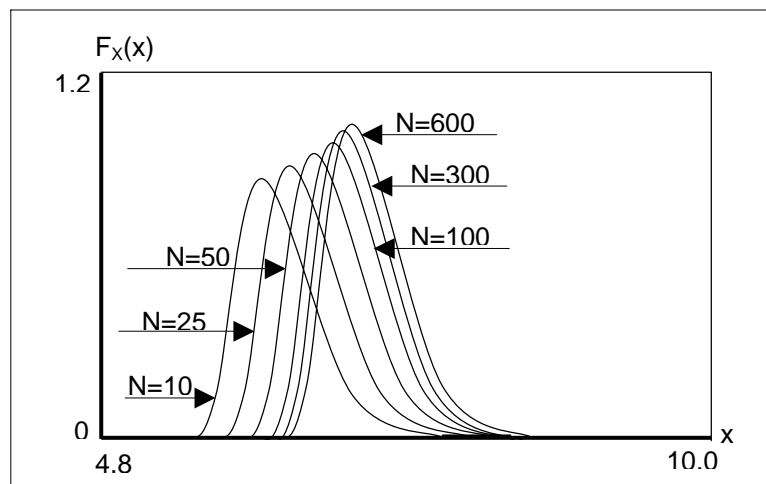


Figura IV.5 – Distribuições de Extremos para Diferentes Valores de  $n$

A medida que  $n$  tende para infinito, as distribuições  $F_X(x)$  de valores máximos se aproximam de limites chamados distribuição Tipo I e Tipo II, em função do tipo de distribuição inicial: na distribuição Tipo I (Gumbel) as variáveis iniciais apresentam distribuição exponencial, enquanto na Tipo II (distribuição generalizada de Frèchet), a distribuição de Cauchy [6].

Desse modo, é fácil concluir que a forma das distribuições assintóticas não depende da forma exata da distribuição de probabilidade inicial da variável aleatória, mas somente do comportamento do tramo (cauda) desta distribuição, na direção da

extremidade de interesse da variável inicial [22]: direita, se tratarmos de máximos, ou esquerda, na hipótese de mínimos.

Distribuição Assintótica de Gumbel (Tipo I)

A função cumulativa de distribuição relativa à distribuição de Gumbel tem a expressão:

$$F_I(x) = \exp\left\{-\exp\left[-\frac{x-\mu}{\sigma}\right]\right\} \quad \begin{cases} -\infty < x < \infty \\ -\infty < \mu < \infty \\ 0 < \sigma < \infty \end{cases} \quad (IV.15)$$

onde  $\mu$  e  $\sigma$  são parâmetros de escala e locação, respectivamente, e o valor esperado e o desvio padrão de X são dados por:

$$E(X) = \mu + 0,5772\sigma \quad (IV.16a)$$

$$SD(X) = \frac{\pi}{\sqrt{6}}\sigma \quad (IV.16b)$$

Distribuição Generalizada de Frèchet (Tipo II)

A função cumulativa de distribuição relativa à distribuição de valores extremos do Tipo II é dada por:

$$F_{II}(x) = \exp\left\{-\left[-\frac{x-\mu}{\sigma}\right]^{-\gamma}\right\} \quad \begin{cases} \mu < x < \infty \\ -\infty < \mu < \infty \\ 0 < \sigma < \infty \\ \gamma > 0 \end{cases} \quad (IV.17)$$

onde  $\mu$ ,  $\sigma$  e  $\gamma$  são, respectivamente, o parâmetro de locação, escala e forma, este último relativo ao comprimento da cauda. No caso particular em que  $\mu=0$ , a Equação IV.17 é chamada de distribuição de Frèchet apenas, em vez de distribuição generalizada de Frèchet.

Relações entre as Distribuições de Valores Extremos Tipo I e Tipo II

Reescrevendo a distribuição Tipo II na forma

$$F_{II}(y) = \exp\{-[(y - \mu_{II})/\sigma_{II}]^{-\gamma}\} \quad (IV.18)$$

e aplicando a transformação

$$y - \mu_{II} = \exp x,$$

a Equação IV.18 retorna para a expressão da distribuição de valores extremos Tipo I, com os seguintes parâmetros:

$$\mu = \ln\sigma_{II} \text{ e } \sigma = \frac{1}{\gamma} \quad (\text{IV.19a})$$

É possível demonstrar que, a medida que o parâmetro  $\gamma$  se aproxima de infinito, a distribuição Tipo II se aproxima assintoticamente da distribuição Tipo I [6].

### Função Ponto Percentual

A função ponto percentual não é mais um conceito dentre muitos apresentados até agora, na verdade é uma forma “invertida” de apresentar as distribuições Tipo I e II, ou seja, representa um valor  $x$  da variável aleatória que corresponde a um dado valor da função cumulativa de distribuição; na distribuição Tipo I é expressa por:

$$x(F_I) = \mu - \sigma \ln(-\ln F_I) \quad (\text{IV.20})$$

enquanto na distribuição Tipo II:

$$x(F_{II}) = \mu + \sigma (-\ln F_{II})^{-1/\gamma} \quad (\text{IV.21})$$

Representando o valor da função cumulativa de distribuição  $F_I$  ou  $F_{II}$  por  $p$  e  $x(F_I)$  ou  $x(F_{II})$  por  $G_X(p)$ , a função ponto percentual de cada uma das distribuições será:

$$\text{Tipo I: } G_X(p) = \mu - \sigma \ln(-\ln p) \quad (\text{IV.22a})$$

$$\text{Tipo II: } G_X(p) = \mu + \sigma (-\ln p)^{-1/\gamma} \quad (\text{IV.22b})$$

Lembrando que  $\text{Prob}(X > x) = (1-p)$  e admitindo que a variável aleatória  $X$  represente a velocidade máxima anual do vento em uma determinada região de interesse, cada ano pode ser visto como um ensaio no qual o evento da velocidade do vento  $X$  exceder algum valor  $x$  tem probabilidade de ocorrência igual a  $(1-p)$  e o período de retorno desse evento será:

$$\bar{N} = \frac{1}{(1-p)} \quad (\text{IV.23})$$

Assim, a velocidade do vento  $x$  relativa a um período de retorno  $\bar{N}$  será igual ao valor da função ponto percentual de  $X$  correspondente a:

$$p = 1 - \frac{1}{\bar{N}} \quad (\text{IV.24})$$

SIMIU E SCANLAN [6] mostram também, que é possível determinar o modo do valor máximo de uma amostra de tamanho  $n$  como uma aproximação da função ponto percentual  $G_X [1-(1/n)]$ , quando a distribuição de valores extremos for Tipo I. Pode ser demonstrado portanto que para valores de  $n$  suficientemente altos, digamos  $n > 10$ , temos:

$$G_X \left( 1 - \frac{1}{n} \right) \cong \mu - \sigma \ln \frac{1}{n} = \text{modo}(Z) \quad (\text{IV.25})$$

onde  $Z$  representa o maior valor de um conjunto de  $n$  valores de uma variável aleatória  $X$ , cada um deles com distribuição de valores extremos Tipo I. A Equação IV.25 mostra então que, se  $X$  é uma variável aleatória com distribuição Tipo I, o modo do valor máximo numa amostra de  $n$  valores de  $X$  é praticamente igual ao valor da variável aleatória correspondente ao intervalo de recorrência  $n$ .

#### Distribuição Assintótica de Weibull

Bastante referenciada na literatura como distribuição negativa de Weibull (*Reverse Weibull Distribution*), a distribuição Tipo III tem a expressão:

$$F_{III}(x) = \exp \left\{ - \left[ \frac{\mu - x}{\sigma} \right]^\gamma \right\}, \quad x < \mu \quad (\text{IV.26a})$$

sendo as relações entre os parâmetros de distribuição, o valor esperado  $E(X)$  e o desvio padrão  $s(X)$  dadas por:

$$\sigma = \frac{s(X)}{\left\{ \Gamma \left( 1 + \frac{2}{\gamma} \right) - \left[ \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right) \right]^2 \right\}^{1/2}} \quad (\text{IV.26b})$$

$$\mu = E(X) + \alpha \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right) \quad (\text{IV.26c})$$

onde  $\Gamma$  representa a função gama e o parâmetro de forma  $\gamma$  está relacionado com o parâmetro  $c$  da distribuição generalizada de Pareto pela expressão:

$$\gamma = -\frac{1}{c} \quad (\text{IV.26d})$$

Do mesmo modo que as distribuições Tipo I e II, “invertendo” a Equação IV.26a teremos a função ponto percentual da distribuição Tipo III:

$$x(F_{III}) = \mu - \sigma[-\ln(F_{III})]^{1/\gamma} \quad (IV.27a)$$

ou

$$G_x(p) = \mu - \sigma[-\ln(p)]^{1/\gamma} \quad (IV.27b)$$

Fazendo  $p=1$  na Equação IV.27b, isto é, quando a probabilidade do valor ser excedido é igual a zero uma vez que  $1-p=0$ , teremos  $G_x(p)=\mu$ , o que significa que o parâmetro  $\mu$  representa o valor máximo possível da variável  $x$ .

### Período de Retorno das Aproximações com Truncamento

Inicialmente foi apresentado o caso em que  $X$  correspondia ao valor máximo de uma variável aleatória durante um intervalo fixo de tempo (época). A probabilidade  $1-p$  que  $X > x$  era vista como a probabilidade de sucesso em todos os eventos e o período de retorno calculado pela Equação IV.23,  $\bar{N} = 1/(1-p)$ , por exemplo: imaginando que a probabilidade da velocidade do vento numa região superar um determinado valor seja 0,02/ano, por definição o período de retorno será  $1/0,02=50$  anos. Aplicando a função ponto percentual adequada (Equações IV.22a, IV.22b ou IV.27b), o valor  $x$  relativo a um período de retorno  $\bar{N}$  qualquer poderia ser obtido sem dificuldade. Este seria o procedimento se fosse adotada a teoria clássica.

Nas análises que adotam limites pré-estabelecidos (truncamento), o valor da velocidade do vento correspondente a um período de retorno  $\bar{N}$ , em anos, leva em conta o número médio  $\lambda$  de valores, por ano, que tenham excedido o patamar adotado. Conseqüentemente, em  $\bar{N}$  anos teremos o número médio de eventos igual a  $\lambda \bar{N}$  e a probabilidade de sucesso em qualquer um deles dada por  $1/(\lambda \bar{N})$ ; subentendo-se que sucesso significa a ocorrência de  $X > x$  ou, de forma equivalente,  $Y = X - u > y = x - u$ , teremos:

$$\text{Prob}(Y \leq y) = 1 - \frac{1}{\lambda \bar{N}} \quad (IV.28a)$$

Comparada à expressão da distribuição generalizada de Pareto (Equação IV.11a),

$$1 - \left[ 1 + \frac{cy}{a} \right]^{-1/c} = 1 - \frac{1}{\lambda \bar{N}} \quad (IV.28b)$$

logo,

$$y = \frac{-a[1 - (\lambda \bar{N})^c]}{c} \quad (\text{IV.28c})$$

e o valor procurado será:

$$x(\bar{N}) = y + u \quad (\text{IV.28d})$$

onde  $u$  é o limite pré-estabelecido (patamar).

### IV.3 APLICAÇÃO DA TEORIA DA PROBABILIDADE

#### IV.3.1 Identificação do Tipo de Distribuição Aplicável à Amostra de Dados

Na prática, obtido um conjunto de valores que resultem da observação de uma variável aleatória, por exemplo a velocidade do vento, admite-se, por hipótese, que seu comportamento possa ser descrito por uma das diversas formas de distribuição existentes, tais como: normal, lognormal, Gumbel, Frèchet, Weibull, negativa de Weibull etc. Em seguida, algum tipo de teste deverá ser aplicado com o objetivo de identificar a distribuição que melhor se adapte aos dados. Esses testes incorporam medidas quantitativas do grau de adaptação da amostra de dados à forma de distribuição escolhida ou ainda, quanto a amostra se afasta da distribuição; se o desvio for pequeno, a hipótese poderá ser aceita. Associada também a esses testes está a idéia do grau de incerteza que elas possam ter, o que corresponde à probabilidade de rejeitar a hipótese ainda que seja verdadeira. No estudo do comportamento de ventos extremos tem sido utilizado o teste PPCC (*probability plot correlation coefficient*), cujo coeficiente é definido por [6]:

$$r_D = \frac{\sum (X_i - \bar{X}) [M_i(D) - \overline{M(D)}]}{\left[ \sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (M_i(D) - \overline{M(D)})^2 \right]^{1/2}} \quad (\text{IV.29a})$$

onde,  $\bar{X}$  e  $\overline{M(D)}$  têm a expressão apresentada na Equação IV.29b,  $n$  é o tamanho da amostra e  $D$  é a probabilidade de distribuição em teste.

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n} \quad \text{e} \quad \overline{M(D)} = \frac{\sum M_i(D)}{n} \quad (\text{IV.29b})$$

Os valores  $X_i$  são obtidos com a re-ordenação do conjunto de dados a partir do menor deles, isto é,  $X_1$  é o menor valor,  $X_2$  o segundo menor, ...,  $X_i$  é o  $i$ -ésimo menor

valor do conjunto. A determinação dos valores  $M_i(D)$  se faz da seguinte forma: dada a variável aleatória  $X$  com probabilidade de distribuição  $D$  e uma amostra de tamanho  $n$ , a partir de considerações probabilísticas é possível obter matematicamente as distribuições do menor, do segundo menor e, em geral, dos  $i$ -ésimos menores valores de  $X$  na amostra; os valores  $M_i(D)$  são as médias de cada uma dessas distribuições.

Se os dados forem gerados pela distribuição  $D$ , além do fator de escala e locação, para todo  $i$  teremos  $X_i$  aproximadamente igual ao valor teórico de  $M_i(D)$ , de tal forma que o gráfico de probabilidade  $X_i$  versus  $M_i(D)$  será praticamente linear, o que significa que o coeficiente  $r_D$  será aproximadamente igual à unidade. Conseqüentemente, quanto mais próximo da unidade estiver o coeficiente  $r_D$ , melhor ajustada aos dados estará a distribuição escolhida.

Para verificar se o comportamento de um determinado conjunto de valores extremos é melhor descrito pela distribuição Tipo I ou pela distribuição Tipo II com parâmetro de comprimento de cauda  $\gamma$  desconhecido, o coeficiente  $r_D$  deve ser calculado para diversas distribuições de valores extremos definidas para valores de  $\gamma$  adequadamente espaçados, de  $\gamma=1$  a  $\gamma=\infty$ , não esquecendo que  $\gamma=\infty$  corresponde a distribuição Tipo I. Nesse caso, é importante escrever a variável nas distribuições de tal forma que, qualquer que seja o conjunto de dados, o coeficiente  $r_D$  dependa apenas de  $\gamma$ , independente dos parâmetros de forma e locação  $\mu$  e  $\sigma$ , sobre os quais nenhuma premissa é necessária. A distribuição que melhor se ajusta aos dados será a que apresentar o maior coeficiente  $r_D$  [6].

Parece pertinente esclarecer a idéia de grau de incerteza; o que poderia provocar a rejeição de uma hipótese, ainda que verdadeira? Durante os estudos que levaram à publicação da norma brasileira de vento NBR 6123, feito o ajuste das séries de ventos máximos anuais correspondentes a cada estação meteorológica, a comparação dos resultados permitiu detectar anomalias nos registros de dados, fazendo com que algumas estações fossem descartadas ou que seus registros fossem parcialmente aproveitados desde que houvesse indicação de funcionamento normal da instrumentação [12]. Diversas causas podem provocar essas anomalias, por exemplo, mau funcionamento do anemômetro, mudança de localização do sensor dentro da mesma estação, remoção para conserto, além de possíveis alterações na rugosidade superficial, sem que qualquer um desses fatores tenha sido indicado nos relatórios de acompanhamento.

Em relação aos testes que verificam se o modelo de distribuição adotado descreve de forma adequada os dados observados, HAHN e SHAPIRO [19] deixam claro que esses procedimentos permitem rejeitar um modelo por considerá-lo inadequado, no entanto, jamais será possível provar que o modelo está correto, no máximo poderemos dizer que não existem evidências de que o modelo de distribuição adotado seja inadequado. HAHN e SHAPIRO [19] afirmam também que os resultados desses testes dependem sobremaneira da quantidade de dados disponíveis – quanto maior for o número de dados, melhores serão as chances de rejeitar um modelo inadequado. Se a quantidade de dados disponível for muito pequena, nem mesmo um modelo que desvie grosseiramente quando tratado por um determinado tipo de distribuição poderá ser considerado inadequado.

### IV.3.2 Métodos de Monte Carlo

Sumariamente, os métodos de Monte Carlo [6] compõem o ramo da matemática experimental dedicado aos experimentos com números randômicos, onde um determinado fenômeno pode ser simulado com a aplicação de transformações adequadas a uma seqüência desses números. Desse modo, novas seqüências são obtidas e podem ser vistas como dados, cuja estatística da amostra é representativa das propriedades estatísticas do fenômeno em estudo. Exemplos de aplicação na área militar, assim como no campo da ciência, engenharia e indústria, entre outros, são apresentados por MIZE e COX [23].

Admitindo uma distribuição de valores extremos Tipo I com parâmetros  $\mu$  e  $\sigma$ , por exemplo, consideremos a seqüência de  $n$  números randômicos uniformemente distribuídos  $0 < Y_i < 1$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) gerados por um dos procedimentos apresentados em [23, 24] ou, ainda, uma das seqüências listadas por MIZE e COX [23]. Esses números são vistos como probabilidades de ocorrência dos dados  $X(Y_i)$  obtidos pela transformação:

$$X(Y_i) = \mu - \sigma \ln(-\ln Y_i) \quad (\text{IV.30})$$

Da amostra de tamanho  $n$ ,  $X(Y_i)$  ( $i=1,2,\dots,n$ ), é possível obter estimativas de  $\mu$  e  $\sigma$ , assim como da função ponto percentual  $G_X(p)$  para diferentes valores de  $p$ . Como as estimativas são números randômicos, em geral serão diferentes dos parâmetros e da função ponto percentual conhecidos da distribuição subjacente. Esse procedimento é repetido um número  $M$  de vezes, de modo que  $M$  conjuntos de valores  $\hat{\mu}$ ,  $\hat{\sigma}$ ,  $\hat{G}_X(p)$  e

histogramas correspondentes poderão ser obtidos. A partir desses conjuntos, será possível calcular por exemplo, a média, a variância e o desvio padrão de  $\hat{\mu}$ ,  $\hat{\sigma}$  e  $\hat{G}_x(p)$ .

Com muita propriedade, SIMIU e SCANLAN [5] alertam que, tendo essa amostragem um caracter randômico, é possível que o comportamento de algumas amostras seja melhor descrito pela distribuição Tipo II, por exemplo, cabendo então aplicar a cada uma das amostras o teste PPCC.

### IV.3.3 Estimativa de Parâmetros de Distribuição

Um estimador pode ser definido como a função  $\hat{\alpha}(X_1, X_2, \dots, X_n)$  de valores de uma amostra tal que  $\hat{\alpha}$  é uma aproximação admissível de um valor  $\alpha$  desconhecido do parâmetro de distribuição, ou seja, esse valor particular - um número portanto - que será assumido por  $\alpha$  é um valor estimado e, uma vez que  $\hat{\alpha}(X_1, X_2, \dots, X_n)$  é uma função de variáveis aleatórias,  $\alpha$  também será uma variável aleatória.

Um estimador  $\hat{\alpha}$ , por ser uma variável aleatória, também apresentará uma distribuição de probabilidade com dispersão em relação ao valor real  $\alpha$ , o que significa que numa amostra de dados estatísticos não é possível determinar o valor real do parâmetro  $\alpha$  desejado; deverão ser estimados intervalos de segurança (confiança) de forma que, com um determinado nível de segurança  $q$ , possa ser garantida a presença do valor  $\alpha$  desconhecido, dentro dos intervalos (grau de incerteza  $1-q$ ).

Estimadores eficientes deverão garantir níveis de confiança  $q$  correspondentes a intervalos de confiança muito pequenos. Considerados dois estimadores  $\hat{\alpha}_1$  e  $\hat{\alpha}_2$  de um mesmo parâmetro  $\alpha$ , o estimador  $\hat{\alpha}_1$  será mais eficiente se temos  $E[(\hat{\alpha}_1 - \alpha)^2] < E[(\hat{\alpha}_2 - \alpha)^2]$ .

A seguir serão apresentados dois estimadores de parâmetros aplicáveis à distribuição de valores extremos Tipo I, um deles voltado para as séries de dados tratadas pela teoria clássica e o outro para as aproximações com truncamento. A distribuição de Gumbel foi escolhida por ser muito utilizada no estudo de valores extremos de velocidade do vento [6]. No texto, os parâmetros indicados com acento circunflexo indicam sempre valores estimados.

### Teoria Clássica - Estimador para a Distribuição Tipo I

Um das formas clássicas de estimar parâmetros utiliza o método dos momentos, onde os parâmetros de distribuição podem ser obtidos substituindo o valor esperado e desvio padrão da variável aleatória  $X$  pelos parâmetros estatísticos da amostra, resultando as seguintes expressões para a distribuição Tipo I (Equações IV.16):

$$\hat{\sigma} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} s \quad (\text{IV.31a})$$

$$\hat{\mu} = \bar{X} - 0,5772\hat{\sigma} \quad (\text{IV.31b})$$

onde  $\bar{X}$  e  $s$  representam a média e o desvio padrão da amostra, respectivamente, ou seja:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum X_i \quad (\text{IV.32})$$

$$s = \left[ \frac{1}{n} \sum (X_i - \bar{X})^2 \right]^{1/2} \quad (\text{IV.33})$$

Com os parâmetros estimados (Equações IV.31), é possível escrever o estimador da função ponto percentual  $G_X(p)$ :

$$\hat{G}_X(p) = \bar{X} + s(y - 0,5772) \frac{\sqrt{6}}{\pi} \quad (\text{IV.34})$$

lembrando que  $y = -\ln(-\ln p)$ .

Assumindo que a média e o desvio padrão da amostra (Equações IV.32, IV.33) são assintótica e normalmente distribuídos, pode ser mostrado [6,20] que nas amostras com  $n$  elevado teremos:

$$SD[\hat{G}_X(p)] = \left[ \frac{\pi^2}{6} + 1,1396(y - 0,5772) \frac{\pi}{\sqrt{6}} + 1,1(y - 0,5772)^2 \right]^{1/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (\text{IV.35})$$

Alguns outros métodos utilizados em estimadores de parâmetros de distribuição Tipo I são apresentados por GUMBEL [20], tais como, o método da máxima verossimilhança, empregado no ajuste de parâmetros da NBR 6123 [5], e o método da ordem estatística que, segundo SIMIU e SCANLAN [6], foi utilizado por Lieblein para desenvolver um estimador de  $G_X(p)$  mais eficiente que o do método dos momentos porém, quando a finalidade é projeto estrutural, SIMIU e SCANLAN [6] mostram que o método dos momentos é bastante adequado.

O termo *ordem estatística* tem origem na etapa inicial do método, quando há a necessidade de ordenar e renumerar as observações partindo da menor para a maior em magnitude, isto é, imaginando que  $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n)}$  sejam as observações originais, então as observações *ordenadas* representadas por  $x_1, x_2, \dots, x_n$  serão tais que  $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$  [19].

O método da ordem estatística explica o ajuste de uma linha reta aos dados observados quando lançados em gráficos de probabilidade, construídos em um tipo de papel específico. A vantagem desse papel é o fato de transformar uma curva teórica  $F(x)$  *versus*  $x$  em uma linha reta, sempre que o modelo de distribuição adotado coincidir com o tipo de distribuição a que o papel se destina e, portanto, reduzindo a questão de aceitar ou rejeitar a função de probabilidade considerada no modelo a uma simples inspeção: se, com pequena dispersão, uma reta puder ser ajustada aos pares de pontos lançados no papel, o modelo poderá ser aceito [20]. Subentende-se, então, que diversos tipos de papel destinados a gráficos de probabilidade podem ser construídos e linhas retas poderão ser traçadas sempre que o modelo de distribuição adotado para os dados coincidir com o tipo de papel selecionado. Para diversas formas de distribuição, HAHN e SHAPIRO [19] mostram como podem ser traçados esses gráficos quando o papel específico não estiver disponível e, de certa forma, como proceder atualmente em algoritmos numéricos com a mesma finalidade.

SIMIU e SCANLAN [6] mostram também que o desvio padrão de qualquer estimador de parâmetro será sempre maior ou igual ao desvio padrão determinado teoricamente e conhecido como limite inferior de Cramér-Rao. Para a função ponto percentual da distribuição Tipo I, o limite inferior de Cramér-Rao tem a seguinte expressão:

$$SD_{CR}[\hat{G}_x(p)] = (0,60793y^2 + 0,51404y + 1,10866)^{1/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (IV.36)$$

onde  $y = -\ln(-\ln p)$ .

Nas amostras com tamanho adequado, tais como as que são utilizadas na análise de dados de velocidade do vento, e admitindo que a função ponto percentual estimada seja normalmente distribuída, podem ser consideradas aproximações bastante satisfatórias dizer que:

- (a) Em 68% dos casos o valor real de  $G_X(p)$  está contido em  $\hat{G}_X(p) \pm SD[\hat{G}_X(p)]$ ;
- (b) A percentagem aumenta para 95% quando consideramos  $\hat{G}_X(p) \pm 2SD[\hat{G}_X(p)]$ ;
- (c) A percentagem ultrapassa 99% ao adotarmos  $\hat{G}_X(p) \pm 3SD[\hat{G}_X(p)]$ .

Desse modo, é possível dizer, por exemplo, que teremos 68% de nível de segurança se, na estimativa de velocidade do vento com período de retorno igual a 50 anos, considerarmos a expressão  $\hat{G}_X(0,98) \pm SD[\hat{G}_X(0,98)]$ , lembrando que  $\bar{N} = 1/(1-p)$ , onde  $p=0,98$ .

#### Aproximações com Truncamento - Estimador para a Distribuição Tipo I

A partir de estudos desenvolvidos com o objetivo de comparar alguns estimadores destinados às aproximações com truncamento, SIMIU e SCANLAN [6] recomendam a adoção do método *de Haan*, pela vantagem de fornecer estimativas do nível de confiança. Esse foi o método adotado por SIMIU e HECKERT [21] numa pesquisa realizada para o NIST (*National Institute of Standards and Technology*), envolvendo o tratamento de registros de dados de vento, de períodos de 15 a 26 anos, obtidos em quarenta e quatro estações meteorológicas americanas localizadas em regiões não expostas à ação de furacões.

Seja, segundo o método *de Haan*, o número de dados acima do patamar estabelecido representado por  $k$ , de tal forma que o patamar  $u$  corresponda ao  $(k+1)$ -ésimo ponto mais alto dos dados. Seja também  $\lambda = k/n_{\text{anos}}$ , onde  $n_{\text{anos}}$  corresponde ao comprimento do registro, em anos. Representando o mais alto, o segundo mais alto, ..., o  $k$ -ésimo, o  $(k+1)$ -ésimo mais alto valor por  $X_{n,n}$ ,  $X_{n-1,n}$ , ...,  $X_{n-(k+1),n}$ ,  $X_{n-k,n} \equiv u$ , respectivamente, os estimadores dos parâmetros  $c$  e  $a$  são dados por:

$$\hat{c} = M_n^{(1)} + 1 - \frac{1}{2\{1 - (M_n^{(1)})^2 / (M_n^{(2)})\}} \quad (\text{IV.37})$$

$$\hat{a} = \frac{uM_n^{(1)}}{\rho_1} \quad (\text{IV.38})$$

$$\begin{aligned} \text{Onde, } \rho_1 = 1 \quad \hat{c} \geq 0 \\ \rho_1 = 1/(1-\hat{c}) \quad \hat{c} \leq 0 \end{aligned} \quad (\text{IV.39})$$

e os valores de  $M_n^r$ ,  $r = 1, 2$ , são calculados pela expressão:

$$M_n^r = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^{k-1} \left\{ \log(X_{n-1,n}) - \log(X_{n-k,n}) \right\}^r \quad (\text{IV.40})$$

O desvio padrão do estimador normal e assintótico de  $c$  será:

$$\text{sd}(\hat{c}) = \left[ \frac{1 + \hat{c}}{k} \right]^{1/2}, \quad \hat{c} \geq 0 \quad (\text{IV.41a})$$

$$\text{sd}(\hat{c}) = \left\{ (1 - \hat{c})^2 (1 - 2\hat{c}) \left[ 4 - \frac{8(1 - 2\hat{c})}{(1 - 3\hat{c})} + \frac{(5 + 11\hat{c})(1 - 2\hat{c})}{(1 - 3\hat{c})(1 - 4\hat{c})} \right] \div k \right\}^{1/2}, \quad \hat{c} < 0 \quad (\text{IV.41b})$$

A estimativa do parâmetro de cauda  $\hat{c}$  depende da escolha do patamar, sendo prática comum verificar os resultados da análise traçando o gráfico de  $\hat{c}$  como função do limite pré-estabelecido. Se para um conjunto de dados o patamar for alto, o número de excedentes será baixo, enquanto os erros de amostragem serão altos; baixando o limite pré-estabelecido, reduzem-se os erros de amostragem, mas uma redução excessiva do patamar provoca uma grande distorção no resultado. Oferece uma boa indicação do valor real do parâmetro de cauda  $c$ , o gráfico no qual  $\hat{c}$  apresenta pequena variação como função do limite pré-estabelecido. Deve ser sempre lembrado que esse estudo tem influência significativa nos fatores de carga a serem adotados no cálculo de estruturas sensíveis à ação do vento [6].

#### IV.3.4 Estimativa de Velocidade do Vento com Período de Retorno $\bar{N}$

Na seção anterior foi mostrado que, obtido um conjunto de dados com distribuição de valores extremos Tipo I, os parâmetros de distribuição poderão ser estimados, assim como o valor da variável relativo a um determinado período de retorno. Erros de amostragem fatalmente estarão embutidos nessas estimativas, todavia, sempre será possível estabelecer intervalos de confiança de forma que neles possa ser garantida a presença do valor real da variável estimada, sempre um valor desconhecido.

Adotando o método dos momentos e admitindo que a variável seja a velocidade máxima do vento, a Equação IV.34 pode ser reescrita na forma:

$$\hat{v}_{\bar{N}} \cong \bar{X} + 0,78(\ln \bar{N} - 0,5772)s \quad (\text{IV.42})$$

onde  $\bar{X}$  e  $s$  correspondem à média e ao desvio padrão da amostra,  $\hat{v}_{\bar{N}}$  representa o valor estimado da velocidade do vento com período de retorno  $\bar{N}$  e admite-se a seguinte aproximação:

$$\bar{N} = \frac{1}{1-p} \Rightarrow p = 1 - \frac{1}{\bar{N}}, \text{ logo } y = -\ln(-\ln p) \Rightarrow y = -\ln[-\ln(1 - 1/\bar{N})] \quad (\text{IV.43})$$

o que torna  $y \cong \ln \bar{N}$ .

Baseado no método dos momentos, o desvio padrão dos erros de amostragem contidos na estimativa de  $\hat{v}_{\bar{N}}$  pode ser obtido substituindo a Equação IV.31a na Equação IV.35, ou seja:

$$SD(\hat{v}_{\bar{N}}) = 0,78 \left[ 1,64 + 1,46(\ln \bar{N} - 0,5772) + 1,1(\ln \bar{N} - 0,5772)^2 \right]^{1/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (\text{IV.44})$$

onde  $n$  é o tamanho da amostra.

SIMIU e SCANLAN [6] utilizam os registros de dados obtidos no período de 1944 a 1977 na estação meteorológica de *Great Falls*, estado de *Montana*, EUA, para apresentar uma aplicação numérica dessa formulação e, além disso, mostrar também que o método dos momentos é bastante eficiente para aplicação em projeto estrutural. Transcrevendo esse exemplo, temos:

Tabela IV.1 – Estação Meteorológica de *Great Falls*, Ma, EUA  
Velocidade Máxima do Vento – Período de 1944 a 1977

Velocidade Máxima Anual (Elevação: 10m acima do nível do terreno) [mph] <sup>(*)</sup>																
57	65	62	58	64	65	59	65	59	60	64	65	73	60	67	50	74
60	66	55	51	60	55	60	51	51	62	51	54	52	59	56	52	49

<sup>(\*)</sup>1 mph = 0,447m/s

Determinando as características da amostra, resulta:

Tamanho:  $n=34$ ;

Média (Equação IV.32):  $\bar{X} = 59\text{mph}$ ;

Desvio Padrão (Equação IV.33):  $s=6,41\text{ mph}$ .

Imaginando períodos de retorno de 50 e 1000 anos, são encontrados os seguintes valores ao serem aplicadas as Equações IV.42 e IV.44, respectivamente, para calcular a velocidade máxima estimada e o desvio padrão:

$$\hat{v}_{50} \cong 76\text{mph} \quad SD(\hat{v}_{50}) \cong 3,7\text{mph}$$

$$\hat{v}_{1000} \cong 91\text{mph} \quad SD(\hat{v}_{1000}) \cong 6,4\text{mph}$$

Como já visto, a probabilidade da velocidade  $v_{\bar{N}}$  estar contida nos intervalos  $\hat{v}_{\bar{N}} \pm SD(\hat{v}_{\bar{N}})$ ,  $\hat{v}_{\bar{N}} \pm 2SD(\hat{v}_{\bar{N}})$  e  $\hat{v}_{\bar{N}} \pm 3SD(\hat{v}_{\bar{N}})$  será, de forma aproximada, 68%, 95% e 99%, respectivamente.

Foi mostrado também, que a extensão dos intervalos de confiança poderá ser reduzida se um estimador mais eficiente for adotado, no entanto, esses intervalos nunca serão menores que os obtidos teoricamente pelo limite inferior de Cramér-Rao, Equação IV.36, neste caso reescrita na forma:

$$SD_{CR}[\hat{v}_{\bar{N}}] = 0,78[0,60793(\ln\bar{N})^2 + 0,51404\ln\bar{N} + 1,10866]^{1/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (\text{IV.45})$$

Aplicando à estação meteorológica de *Great Falls*, resultam os seguintes valores:

$$SD_{CR}(\hat{v}_{50}) \cong 3,1\text{mph}$$

$$SD_{CR}(\hat{v}_{1000}) \cong 5,0\text{mph}$$

Justifica-se, portanto, a indicação do método dos momentos feita por SIMIU E SCANLAN na Referência [6] para fins de projeto estrutural visto que, empregando um estimador mais eficiente, Lieblein, por exemplo, os intervalos de confiança nunca seriam inferiores aos determinados teoricamente por Cramér-Rao. A Tabela IV.2 ilustra este comentário comparando, em função do nível de confiança, os intervalos encontrados pelos dois processos.

Tabela IV.2 – Intervalos de Confiança para Velocidade do Vento na Estação de *Great Falls*

Nível de Confiança	68%		95%		99%	
	50	1000	50	1000	50	1000
Método dos Momentos	76±3,7	91±6,4	76±7,4	91±12,8	76±11,1	91±19,2
Cramér-Rao	76±3,1	91±5,0	76±6,2	91±10,0	76±9,3	91±15,0

#### IV.4 MODELAGEM PROBABILÍSTICA DA VELOCIDADE MÁXIMA ANUAL DO VENTO

##### EVOLUÇÃO DA PESQUISA – COMENTÁRIOS

No início dos anos 70, estudos voltados para velocidade máxima do vento, independente da direção considerada e em regiões não expostas à ação de furacões, indicavam a distribuição de Frèchet (ou Fischer-Tippett Tipo II) como a que melhor se ajustava aos registros de dados. Essa era a distribuição adotada nas recomendações de carregamento de vento da *American National Standard ANSI A58.1* [21], publicada em 1972, tendo sido utilizada também na norma brasileira de vento NBR 6123, publicada em 1977 sob a forma de projeto (PNB 599/77) [12].

Com a evolução dos estudos e utilizando dados de um maior número de anos, em 1978 Emil Simiu e alguns colaboradores acabaram por concluir que a distribuição de Gumbel seria um modelo mais adequado, até que dois anos mais tarde, em 1980, pesquisas realizadas por ELLINGWOOD *et al*<sup>3</sup>. mostraram que os índices de segurança baseados no modelo de Gumbel, adotados para estruturas sensíveis ao efeito do vento, implicavam em probabilidade de falha bastante elevada e distante da realidade, fato atribuído, no mínimo em parte, ao comprimento do tramo superior - direção do valor máximo - ser considerado infinito na distribuição Tipo I.

Em artigo publicado em 1996, SIMIU e HECKERT [21] admitiam que a velocidade máxima do vento de origem extratropical, os já citados ventos bem comportados, eram descritos de forma predominante pela distribuição negativa de Weibull, que apresenta tramo superior finito, até porque isso refletiria no modelo probabilístico uma característica física: ventos extremos são de alguma forma limitados. No entanto, em outra referência, [6], SIMIU E SCANLAN comentando os resultados apresentados nesse mesmo artigo, admitem que a maioria dos registros de dados analisados se ajustavam à distribuição Tipo III, todavia, preferiam manter em [6] a indicação da distribuição de Gumbel, por levar a cálculos de confiabilidade estrutural mais conservadores: de forma modesta quando tratamos de velocidade básica do vento com período de retorno de 50 anos, mas muito significativa para velocidades de vento correspondentes à carga nominal última, ou seja, cargas de vento com período de retorno de 50 anos majoradas do fator de carga.

---

<sup>3</sup> ELLINGWOOD, B. et al. – “*Development of a probability-based load criterion for American National Standard A58.*”, NBS Spec. Publ. 577, National Bureau of Standards, Washington D.C., 1980

O artigo de SIMIU e HECKERT [21] foi interpretado por GALAMBOS E MACRI em trabalho que publicaram em 1999 [25], como um mero convite à discussão, em lugar de uma possível recomendação para futuras análises de registros de vento. GALAMBOS e MACRI [25] afirmam que a distribuição de Gumbel é na verdade a que melhor se ajusta a um grande número de registros de estações meteorológicas analisadas no trabalho de Simiu e Heckert, que cometeram o engano de promover um expurgo de pontos na análise por entendê-los como simples “*outliers*”.

Baseados na vasta experiência acumulada na área de avaliação de valores extremos, e não apenas no resultado do trabalho de verificação do artigo de Simiu e Heckert, GALAMBOS e MACRI [25] afirmam que, na avaliação estatística de valores extremos, não é possível tentar modificar uma conclusão com a justificativa da presença de “*outliers*” pois, extremos que não se ajustam a um determinado modelo adotado são uma clara indicação que a premissa sob análise não está correta e um novo tipo de distribuição deve ser estudado.

Finalmente é possível concluir que, até 1999 com o trabalho de Galambos e Macri (Referência 25) e de certa forma também com os trabalhos de Simiu, que teve o cuidado de recomendar a distribuição Tipo I em [6], a grande maioria dos registros de dados de vento de origem extratropical se ajustam à distribuição de Gumbel como modelo de distribuição de valores extremos. Assim, para todo trabalho que envolva análise estatística de registros de dados relativos a ventos bem comportados, o bom-senso indica como melhor caminho usar a distribuição de Gumbel como premissa inicial a ser verificada, até para ganhar tempo em vista da maior probabilidade de adequação, passando a verificar um outro tipo de distribuição caso isso não ocorra. Nesse estágio do trabalho será sempre bom lembrar as observações de HAHN e SHAPIRO [19] relativas à influência do tamanho da amostra, já comentadas na seção IV.3.1, e principalmente não esquecer a afirmativa de Gumbel quando diz “*Nec Babylonios temptaris numeros (Don't trust random numbers)*”.

#### **IV.5 ESTIMATIVA DE EXTREMOS EM REGIÕES COM REGISTROS DE DADOS INSUFICIENTES**

As propostas iniciais para tratamento de registros dados de velocidade do vento obtidos por um curto período consistiam em estimar a velocidade básica, ou seja, a velocidade de projeto, considerando como época, em lugar de anos do calendário,

meses, semanas, dias e, até mesmo, horas. Utilizando registros de 129 estações meteorológicas americanas, a análise realizada por SIMIU *et alli.*<sup>4</sup> para o *National Bureau of Standards* mostrava que era possível indicar o comportamento probabilístico da velocidade máxima do vento a partir de registros mensais, se coletados por um período mínimo de 3 anos. Esse trabalho de Simiu *et alli.* foi consolidado por GRIGORIU [26] que, valendo-se de simulações de registros de vento e dados reais de 42 estações meteorológicas, mostrou a superioridade da proposta de Simiu *et alli.* que, de modo geral, resulta em estimativas confiáveis de velocidade de vento com período de retorno de 50 anos.

Desse modo, estimativas de velocidade do vento baseadas em velocidades mensais, representada por  $\hat{v}_{\bar{N},m}$ , são obtidas [6] reescrevendo a Equação IV.42 na forma:

$$\hat{v}_{\bar{N},m} \cong \bar{X}_m + 0,78 [\ln(12\bar{N}) - 0,5772] s_m \quad (IV.46)$$

onde  $\bar{X}_m$  e  $s_m$  são, respectivamente, a média e o desvio padrão dos dados de velocidade máxima mensal e  $\bar{N}$  corresponde ao período de retorno em anos.

O desvio padrão dos erros de amostragem presentes na estimativa de  $\hat{v}_{\bar{N},m}$  é obtido de forma análoga pelas Equações IV.35 e IV.31a, ou ainda, Equação IV.44, resultando em:

$$SD(\hat{v}_{\bar{N}}) = 0,78 \left\{ 1,64 + 1,46 [\ln(12\bar{N}) - 0,5772] + 1,1 [\ln(12\bar{N}) - 0,5772]^2 \right\}^{1/2} \frac{s_m}{\sqrt{n_m}} \quad (IV.47)$$

onde  $n_m$  é o tamanho da amostra.

Novamente utilizando os registros de dados da estação meteorológica de *Great Falls*, EUA, Simiu e Scanlan mostram em [6] que a média e o desvio padrão da velocidade máxima mensal do vento a 10m acima do terreno no período de setembro de 1968 a agosto de 1971 (tamanho da amostra  $n_m=36$ ) são  $\bar{X}_m = 42\text{mph}$  e  $s_m = 6,96\text{mph}$ . Assim, aplicando as Equações IV.46 e IV.47, para períodos de retorno de 50 e 1000 anos resulta:

---

<sup>4</sup> SIMIU, E., CHANGERY, M. J., FILLIBEN, J. J. – *Extreme Wind Speeds at 129 Stations in the Contiguous Unites States*, Building Science Series, National Bureau of Standards, Washington D.C., 1979

$$\hat{v}_{50,m} \cong 74\text{mph} \quad \text{SD}(\hat{v}_{50,m}) \cong 3,7\text{mph}$$

$$\hat{v}_{1000,m} \cong 90\text{mph} \quad \text{SD}(\hat{v}_{1000,m}) \cong 8,85\text{mph}$$

Comentando esse resultado, SIMIU e SCANLAN [6] mostram que os valores de velocidade são levemente inferiores aos calculados na seção IV.3.4, onde foram utilizados registros de velocidade máxima anual de um período de 34 anos, todavia, os erros de amostragem são superiores aos encontrados anteriormente. Dando continuidade, justificam a aplicação do método com os resultados encontrados na análise de 67 conjuntos de registros obtidos de 36 estações meteorológicas, onde a diferença entre  $\hat{v}_{50,m}$  e  $\hat{v}_{50}$  foi menor que  $\text{SD}(\hat{v}_{50,m})$  em 66% dos casos e inferior a  $2\text{SD}(\hat{v}_{50,m})$  em 95% dos casos. Além disso, reportam-se aos resultados do trabalho de GRIGORIU [26] para afirmar que a estimativa de velocidade máxima mensal do vento utilizando registros de dados coletados por um período mínimo três anos fornece uma boa descrição de ventos extremos em regiões de ventos fortes bem comportados.

A respeito de propostas de modelos que adotam a velocidade máxima diária ou a velocidade medida em intervalos de uma hora, é fácil entender que a dificuldade consiste em assegurar a inexistência de correlação nos registros de dados de dois dias consecutivos, em geral fortemente correlacionados, além do fato de registros diários e horários reproduzirem diversos eventos não relacionados, no sentido meteorológico, aos ventos extremos, brisas matinais, por exemplo, e que devem ser interpretados como ruído, mascarando informações importantes na descrição da climatologia de ventos extremos.

As amostras oriundas de registros curtos também poderão ser tratadas admitindo-se patamares pré-estabelecidos (truncamento). Como referência, SIMIU e SCANLAN [6] recomendam o modelo PDSM (*Partial Duration Series Model*) utilizado por GUSELLA [27] na estimativa de ventos extremos com os registros de vento das estações emissoras de Sorrento e Monte Nerone, etapa inicial do programa de pesquisa desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Florença para a Agência Estatal Italiana de Rádio e Televisão (RAI), visando estabelecer cargas e procedimentos de projeto de antenas de transmissão.

## IV.6 EXEMPLO – DADOS DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE BOISE (IDAHO, EUA)

Seja a variável discreta  $X$  representada pelas velocidades máximas do vento medidas sobre 3s, obtidas na estação meteorológica de Boise, estado de Idaho, EUA, no período de janeiro de 1965 a dezembro de 1987. Admitindo não existir qualquer correlação entre os valores máximos mensais observados, as velocidades máximas anuais são apresentadas na Tabela IV.3.

Tabela IV.3 – Máximas Velocidades de Vento Anuais<sup>(\*)</sup> – Estação de Boise, Idaho, EUA

Ano	V [mph]	Ano	V [mph]	Ano	V [mph]	Ano	V [mph]	Ano	V [mph]
1965	36	1970	46	1975	42	1980	40	1985	40
1966	45	1971	44	1976	46	1981	47	1986	47
1967	34	1972	44	1977	42	1982	49	1987	42
1968	42	1973	47	1978	42	1983	41		
1969	41	1974	50	1979	40	1984	45		

<sup>(\*)</sup>1mph=0,447m/s

Considerando também que, durante o período de aquisição, (i) as condições de instalação do anemômetro permaneceram inalteradas e (ii) que estes dados correspondam à elevação 10m acima do terreno, em campo aberto e sem obstruções, a aplicação do modelo clássico de valores extremos adotado na previsão de ventos extremos conduz à distribuição assintótica de Gumbel (Tipo I) apresentada na Equação IV.15 que transcrevemos:

$$F_1(x) = \exp\left\{-\exp\left[-\frac{x-\mu}{\sigma}\right]\right\}$$

lembrando que  $\mu$  e  $\sigma$  são os parâmetros de escala e localização.

### IV.6.1 Características da Amostra

a) Histograma de Ocorrências:

O tamanho do intervalo de um histograma é definido em função da experiência ou de algumas expressões que podem ser encontradas na literatura [28].

No traçado do histograma de ocorrências representado na Figura IV.6 foi adotado o intervalo  $X_i \pm 0,5\text{mph}$ , o que corresponde a  $\Delta X_i=1\text{mph}$ .

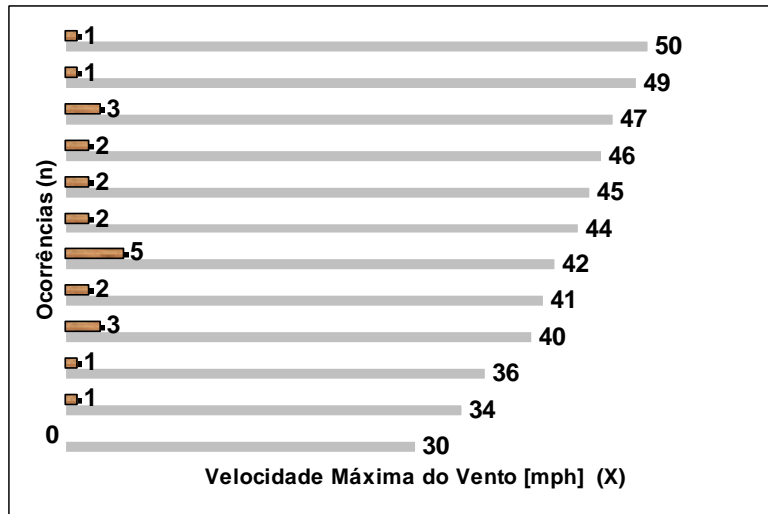


Figura IV.6 – Histograma de Ocorrências

b) Distribuição da Densidade de Freqüências:

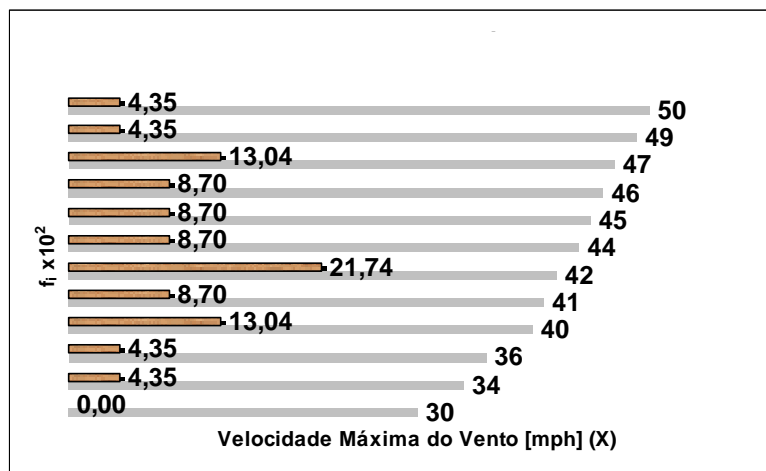


Figura IV.7 – Distribuição da Densidade de Freqüência

Verificando a área sob o diagrama representado na Figura IV.7, que deve ser unitária como indica a seção IV.2.1, temos:

$$A = \sum_{i=1}^{23} f_i \Delta X_i = 10^{-2} (4 \times 4,35 + 13,04 + 4 \times 8,70 + 21,74 + 13,04) 1\text{mph} \cong 1,00$$

$$\text{onde } f_i = \frac{n_i}{n \Delta X_i} \quad (\text{IV.48})$$

Na Equação IV.48, que aparece de forma implícita na mesma seção IV.2.1,  $n_i$  representa o número de ocorrências no intervalo  $\Delta X$  e  $n$  é igual ao total de observações da amostra que, neste caso, corresponde aos anos de amostragem.

c) Parâmetros Estatísticos:

Valor Esperado (Equação IV.5)

$$E(X) = \sum_{x_i=34}^{50} x_i f_i = 43,13 \text{ mph}$$

Média

Para uma variável discreta, a média tem a expressão:

$$\bar{X} = Me(X) = \sum_1^n \frac{x_i}{n} \Rightarrow Me=43,13 \text{ mph}$$

Modo ou Moda

Observando a Figura IV.7, a velocidade do vento que corresponde ao máximo da função densidade de probabilidade é 42mph, logo:

$$Mo(X)=42 \text{ mph}$$

Variança

Para a variável discreta temos [28]:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 = 14,37 \text{ mph}^2$$

Desvio Padrão

$$\sigma = 3,79 \text{ mph}$$

Coeficiente de Variação

$$\delta_x = \frac{\sigma}{E(X)} \cong 0,088$$

#### IV.6.2 Velocidade Máxima para o Intervalo de Recorrência de 50 anos

Considerando o período de retorno  $\bar{N}$  igual a 50 anos na Equação IV.1, resulta:

$$50 = \frac{1}{(1-p)} \Rightarrow p = 0,98$$

Dessa forma, considerando os parâmetros estatísticos da amostra e a função cumulativa de probabilidade relativa ao período de retorno de 50 anos, temos (Equação IV.15, Equações.IV.16):

$$SD(X) = \frac{\pi}{6} \times 3,79 = 4,86 \text{ mph}$$

$$\mu = E(X) - 0,5772\sigma = 43,13 - 0,5772 \times 3,79 \Rightarrow \mu = 40,94 \text{ mph}$$

substituindo na Equação IV.15, vem:

$$0,98 = \exp\left\{-\exp\left[-\frac{x - 40,94}{3,79}\right]\right\} \Rightarrow x = 55,73 \text{ mph}$$

ou diretamente, aplicando a função ponto percentual (Equação IV.20) para  $F_T=0,98$ :

$$x(0,98) = 40,94 - 3,79 \ln(-\ln 0,98) \quad \therefore \quad x(0,98) = 55,73 \text{ mph}$$

#### Conclusão

Na forma clássica, admitindo a distribuição assintótica de Gumbel, os dados de velocidade máxima do vento, medida sobre 3 segundos, obtidos pela estação de Boise, ID, EUA, ao longo de 23 anos consecutivos (1965-1987), indicam a velocidade máxima de 25m/s (55,73mph) com período de retorno de 50 anos.

## CAPÍTULO V

### AÇÃO DO VENTO EM TORRES E LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

---

#### V.1 INTRODUÇÃO

A ocorrência de colapsos de torres de transmissão de energia elétrica tem como causa principal as forças dinâmicas geradas pela ação do vento nos condutores elétricos e pára-raios. Essas forças constituem o carregamento fundamental numa análise de estabilidade estrutural porém, em virtude de seu caráter probabilístico, os critérios de verificação de riscos de colapso são passíveis de incertezas, já que os parâmetros estatísticos são afetados pela amostragem das variáveis de projeto.

O mapeamento rigoroso, ao longo do tempo, das alterações da rugosidade superficial do terreno e a utilização de dispositivos mais sensíveis para aquisição de dados sobre a variação da velocidade do vento, permite estimar mais precisamente a velocidade máxima para um determinado período de retorno e, conseqüentemente, valores mais adequados de cargas de vento a serem considerados no projeto estrutural. Deve-se observar que a confiabilidade e homogeneidade dos registros de velocidade dependem de um número satisfatório de amostras, influenciando diretamente na redução dos erros de modelagem na fase de tratamento estatístico.

O cálculo de cargas de vento em linhas de transmissão é um assunto sempre em discussão e as causas de alguns acidentes foram atribuídas ao fato das cargas adotadas no projeto corresponderem a um período de retorno muito inferior aos cinquenta anos requeridos. A análise do desempenho estrutural de linhas de transmissão tem sido feita segundo diferentes procedimentos de cálculo e alguns pesquisadores, ELIAS e SILVA em [29], por exemplo, recomendam a realização de estudos mais apurados que incluam a coleta e tratamento de dados estatísticos de vento e de resistência das torres. Entretanto, mesmo com o avanço desses estudos, a aplicação de seus resultados fica comprometida, porque as análises têm sido realizadas com base numa modelagem matemática que não representa o comportamento real do sistema estrutural formado por torres e cabos elétricos acoplados.

É importante ressaltar, portanto, a necessidade de revisão dos procedimentos prescritos nas normas de projeto de torres de linhas de transmissão, de forma que a

interação dinâmica entre as forças do escoamento turbulento e os cabos seja sempre considerada no modelo estrutural acoplado – estrutura da torre e cabos – para obtenção das respostas dinâmicas e para análise de estabilidade das torres sob ação do vento.

## **V.2 O PROJETO CONVENCIONAL DAS TORRES**

O projeto de torres de linhas de transmissão de energia elétrica – torres TEE – tem início na análise do conjunto de desenhos que compõem o projeto básico da linha e nos quais poderão ser encontradas as informações sobre o traçado a ser cumprido, elevação, tipos de cabos especificados para os condutores elétricos e pára-raios, se feixes de condutores ou condutores singelos, além dos respectivos tensionamentos que deverão ser instalados nos cabos.

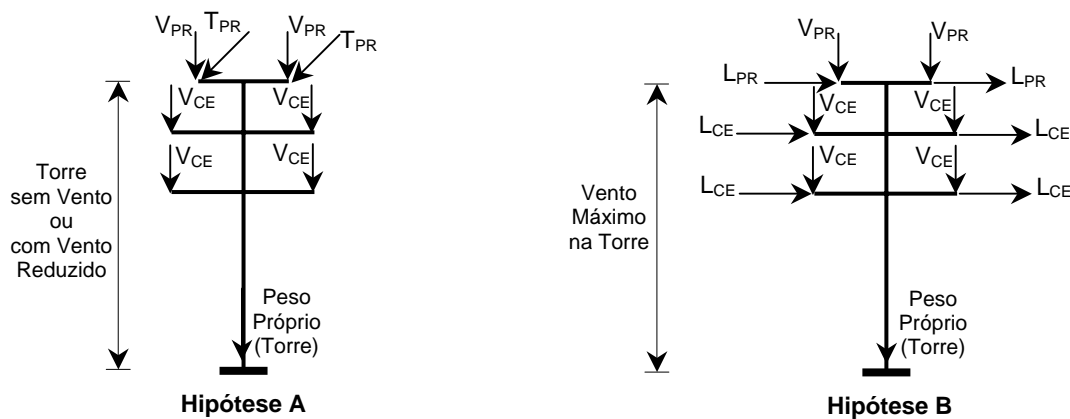
No que diz respeito à arquitetura das estruturas-suporte, o projeto básico fornece o tipo e dimensões principais da torre que, somados ao número e distribuição dos circuitos elétricos a serem suportados, servem de ponto de partida para a definição da silhueta dessas estruturas. As torres TEE cumprem diversos objetivos, em função de sua localização na linha de transmissão, por esta razão ficam expostas a variados tipos de carregamentos, mandatórios na fase de concepção estrutural.

Classificando-as quanto à função, as torres do tipo suspensão, por exemplo, servem de suporte à linha e tem sua localização restrita a trechos em alinhamento ou com pequeno ângulo que, usualmente, não deverá ultrapassar cinco graus; aquelas do tipo ancoragem, devem resistir à tração provocada pela ruptura de alguns sub-condutores, limitando esta sobrecarga a um determinado trecho do sistema de transmissão, o que configura no projeto da torre um carregamento do tipo ruptura postulada. Além de suspensão e ancoragem, existem torres tipo terminal, de ângulo, de transposição etc.

Em relação ao tipo estrutural, existem torres autoportantes – estruturas rígidas que, por definição, não devem apresentar deformações elásticas perceptíveis, mesmo sob a ação de solicitações máximas – e torres estaiadas, que tem aplicação limitada a terrenos de topografia regular.

Existe ainda a classificação quanto à forma – piramidal, delta, cara de gato e torre em V (estaiada) – e outras categorias relacionadas à Engenharia Elétrica. Essas silhuetas encontram-se ilustradas nas Referências [1, 30].

Na seqüência do projeto, a próxima etapa é a formulação das hipóteses de carregamento, intrinsecamente ligadas à função a ser cumprida pela torre durante a vida útil da linha de transmissão. São montadas, nesse estágio, as chamadas *árvores de carregamento* (Figura V.1), desenhos esquemáticos onde são lançadas as cargas relativas aos condutores elétricos, pára-raios e cadeias de isoladores: peso próprio, ação do vento e ruptura de cabos quando aplicável, além das cargas especiais que ocorrem durante a montagem e manutenção da linha.



**LEGENDA**

V = Carga Vertical  
L = Carga Lateral  
T = Carga Transversal

Índices:  
PR = Pára-Raios  
CE = Conductor Elétrico

Figura V.1 – Árvore de Carregamento

Na Figura V.1, a árvore correspondente à hipótese A representa o caso de carga de ruptura de um dos pára-raios, sem vento ou com vento reduzido, e condutores elétricos preservados; na hipótese B, os condutores elétricos e pára-raios permanecem íntegros e o vento é máximo na direção ortogonal à linha de transmissão.

Nesse ponto, encerra-se a tarefa do grupo de projeto da linha propriamente dita e tem início o trabalho da equipe responsável pelo cálculo estrutural e detalhamento das torres, a quem caberá definir as respectivas cargas de peso próprio e ação do vento, sempre levando em conta as informações contidas nas árvores de carregamento. Configura-se nesse instante o momento em que, durante o projeto de sistemas de transmissão de energia elétrica, os cabos são inadvertidamente desconectados das torres.

No Brasil, a definição das cargas que atuam na linha de transmissão e nas torres segue as recomendações da NBR 5422 – Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de

Energia Elétrica [31]. Para cada novo projeto de torre TEE, protótipos são submetidos a ensaios de carga normais e destrutivos, ficando a aprovação condicionada à sua capacidade de suportar 100% da carga de todas as hipóteses de carregamento previstas no projeto estrutural.

### V.3 FENÔMENOS INDUZIDOS PELA AÇÃO DO VENTO EM LTS

Em função da magnitude da velocidade do vento e, principalmente, quando a incidência é ortogonal à LT, a ação do vento pode induzir a grandes deslocamentos angulares das cadeias de isoladores, assim como dos cabos elétricos: a parcela do escoamento de ar em regime suave arrasta os cabos e cadeias de isoladores para uma posição de equilíbrio em torno da qual eles passam a apresentar diversas configurações, em função da flutuação da velocidade do vento – turbulência. As forças de arrasto definidas pela velocidade instantânea do vento podem ser tais que levem a linha de transmissão, por exemplo, à posição praticamente horizontal, como mostra o registro feito por W. LEIBFREID e H.MORS, em 1964, na Estação Experimental de Hornsgrinde, Alemanha, ilustrado na Figura V.2.

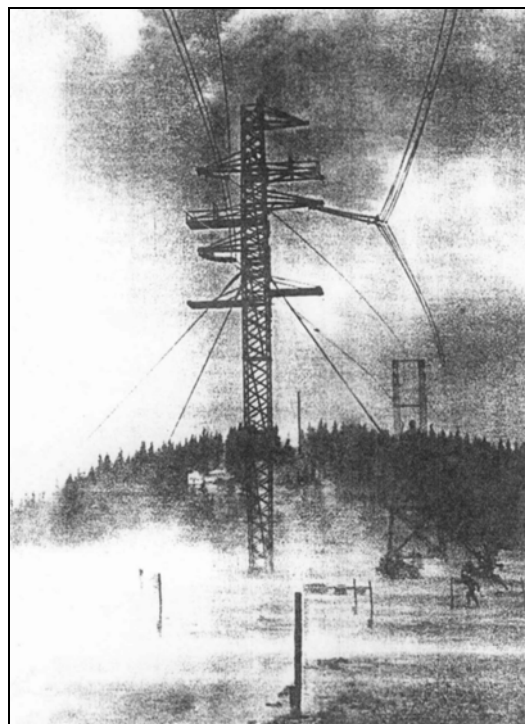


Figura V.2 – Estação Experimental de Hornsgrinde (1964)

Os problemas de vibração causados pela ação do vento em linhas de transmissão estão relacionados às oscilações induzidas pelo desprendimento de vórtices, ao

fenômeno de galope despertado em linhas expostas a baixas temperaturas e conseqüente formação de gelo e, ainda, ao chamado galope de subvão, comum nos feixes de condutores, onde alguns cabos estão posicionados na esteira de outros, localizados a barlavento. Na seqüência são apresentadas, de forma resumida, outras características de cada um desses eventos, assim como algumas das medidas preventivas habituais.

### Oscilações Induzidas por Vórtices

Referenciadas pelos grupos de projeto de LTs como “vibrações eólicas”, essas oscilações ocorrem em cabos de grandes vãos, na presença de ventos com velocidade da ordem de 2 a 10m/s [6] – ventos do tipo brisa – em regiões de terreno plano ou levemente ondulado e travessias de grandes lagos, condições naturais favoráveis ao escoamento com baixa turbulência. A formação de turbilhões na esteira, na face posterior do cabo posicionado a barlavento, provoca ciclos de tensões de flexão nos pontos de suspensão dos cabos que, por não serem perfeitamente flexíveis nessa região, tornam-se passíveis de danos por fadiga, podendo até mesmo chegar à ruptura, a menos que medidas preventivas sejam adotadas.

No caso de cordoalhas e cabos de alumínio com alma de aço, os danos são provocados por cisalhamento induzido por abrasão, afetando principalmente os fios internos, o que requer interrupção na operação da linha para manutenção preventiva, já que os primeiros fios rompidos não podem ser identificados por inspeção visual [6, 30].

Na prevenção da falha por fadiga são adotados acessórios especiais que aliviam as tensões de flexão, assim como amortecedores do tipo massa-mola (Figura V.3), *stockbridges* clássicos, com a finalidade de atenuar esses movimentos de pequena amplitude e alta frequência induzidos pelo desprendimento de vórtices, previstos para ocorrer por mais tempo durante a vida útil da linha de transmissão.

Os *stockbridges* – amortecedores tipo ADS (amortecedores dinâmicos sintonizados) – trabalham em ressonância com o cabo (Figura V.3). Visando a obtenção de eficiência máxima, esses dispositivos são posicionados nos ventres dos modos de vibração identificados nas proximidades dos pontos de suspensão dos condutores elétricos e pára-raios. A especificação do número de amortecedores é função da tensão média de serviço e tipo de cabo no qual são instalados, do comprimento do vão e características do terreno na rota da linha. Dentro da classificação de amortecedores

ADS, outros poderiam ser citados, no entanto, todos não passam de pequenas modificações introduzidas no projeto original desenvolvido por G. H. Stockbridge<sup>1</sup>, comercializados por seus fabricantes na Itália, Japão e Finlândia, entre outros.

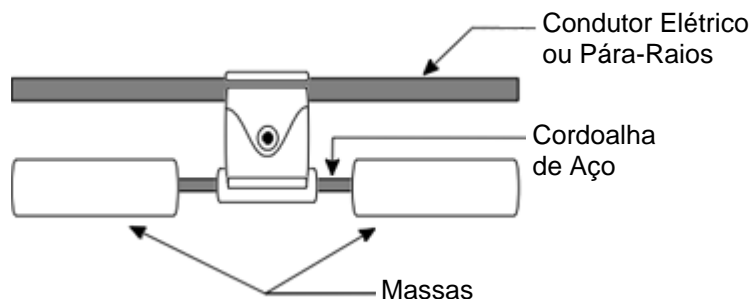


Figura V.3 – Amortecedor tipo ADS – *Stockbridge*

Dentre os acessórios indicados para alívio de tensões de flexão destaca-se o pré-formado com núcleo de neoprene, empregado em larga escala em todo mundo e de desempenho altamente satisfatório (Figura V.4). Trata-se de um bloco de neoprene que envolve o condutor na região de suspensão e sobre o qual se instala um jogo de armaduras pré-formadas, ampliando a região do apoio, além de suavizar a curvatura [30].

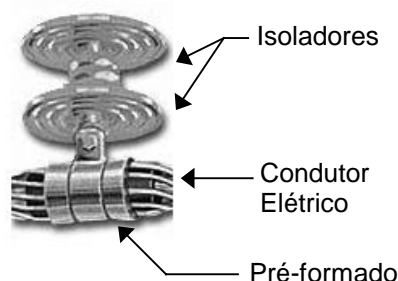


Figura V.4 – Armadura Pré-Formada

### Galope

O fenômeno de galope em linhas de transmissão ocorre quando existe formação de gelo nos cabos que, com o novo contorno, passam a chicotear na direção perpendicular à ação do vento, apresentando oscilações de grande amplitude no plano vertical, em frequências muito aquém daquelas que seriam observadas, por desprendimento de vórtices, em seções transversais com a mesma configuração.

<sup>1</sup> Stockbridge, G.H. — “Overcoming Vibration in Transmission Cables”, *Electr. World* 86, 26 (Dec.1925), pp. 1304-1305

Usualmente, as seções transversais passíveis de instabilidade aerodinâmica por galope são as cantoneiras e os prismas de seção poligonal ou semicircular.

No galope, a amplitude de oscilação na direção perpendicular à incidência do vento é diretamente proporcional à velocidade do vento e, durante esta oscilação, o ângulo de incidência em relação ao corpo em movimento muda continuamente.

SCANLAN E SIMIU [6] mostram que, identificados os valores médios dos coeficientes de arrasto e sustentação de uma seção transversal em condições *quasi-estáticas*, em função do ângulo de ataque, é possível estabelecer um modelo analítico satisfatório que descreva esse evento, ou seja, o fenômeno de galope é governado por forças *quasi-estáticas*.

A instabilidade por galope é um fenômeno de intensidade violenta e aparecimento súbito sempre que a velocidade do vento atinge um determinado valor tratado na literatura por “*onset velocity*” ou velocidade de disparo [32]. A amplitude de oscilação vertical alcança vários metros, podendo dar origem a um curto-circuito entre as fases da linha de transmissão [30].

Métodos para suavizar o fenômeno de galope incluem, obviamente, o aquecimento dos cabos para derreter o gelo, com a indução temporária de correntes elétricas mais altas, o que devolve a seção transversal à sua forma original – cilindros circulares não são passíveis de galope. Outras opções são (i) a instalação de alarmes nas torres, em regiões onde a formação de gelo nos cabos é comum, (ii) a instalação de dispositivos dinâmicos antigalope com a finalidade de perturbar o escoamento e, ainda, (iii) a instalação de amortecedores do tipo ADS no centro do vão do cabo [6]. É oportuno lembrar aqui, no entanto, que fracassaram as tentativas de projeto de amortecedores do tipo *stockbrige* para vencer oscilações de grande amplitude e baixa frequência, como as que ocorrem no fenômeno de galope, porque os valores determinados para as massas mostraram-se impraticáveis.

### Galope de Subvão

Galope de subvão ou galope lateral induzido pela esteira é um fenômeno comum aos feixes de condutores elétricos, onde as fases da linha de transmissão são mantidas a uma distância ótima de projeto com a instalação de espaçadores mecânicos

posicionados na direção transversal ao eixo da linha. Uma vez instalados esses dispositivos, o trecho livre de cabos entre eles – subvão – torna-se uma região favorável ao aparecimento de galope lateral, tendo em vista a exposição de alguns cabos à turbulência presente na esteira dos condutores localizados a barlavento (Figura V.5). Esse evento é passível de ocorrer sempre que a frequência de resposta do condutor posicionado na esteira for inferior à sua própria frequência de desprendimento de vórtices, bem como às frequências de resposta e desprendimento de vórtices do condutor a barlavento.

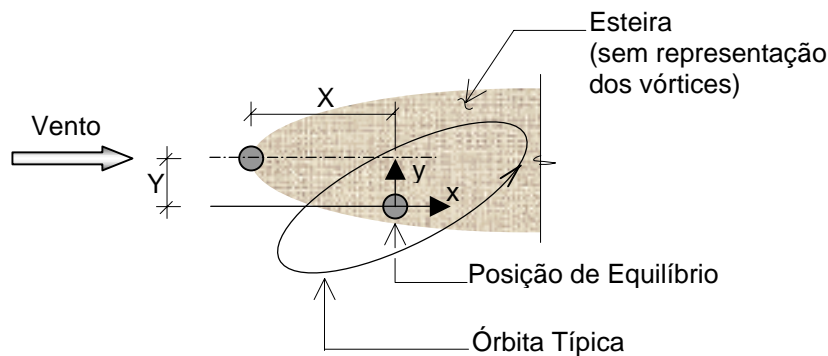


Figura V.5 – Galope de Subvão – Desenho Esquemático [6]

Como medidas preventivas encontram-se (i) manter o espaçamento dos cabos de um feixe com a instalação de espaçadores especiais (Figura V.6) e (ii) aumentar o amortecimento, ou com a instalação de espaçadores do tipo dissipador de energia, ou com a redução da tração nos condutores, que é uma medida que também leva a um maior amortecimento do cabo. Entretanto, nenhum desses procedimentos tem sido completamente satisfatório.

Soluções conceitualmente mais simples, ainda que bastante onerosas, incluem o aumento expressivo do número de espaçadores instalados entre as torres (Figura V.6c), de forma que os comprimentos de subvão fiquem bastante reduzidos e, conseqüentemente, aumentando bastante a frequência; e a rotação contínua do feixe de condutores, de uma torre a outra, perturbando o desprendimento de vórtices na esteira do condutor a barlavento. Esta última solução – rotação contínua dos condutores – tem mostrado-se, no entanto, impossível de ser aplicada em campo [6].

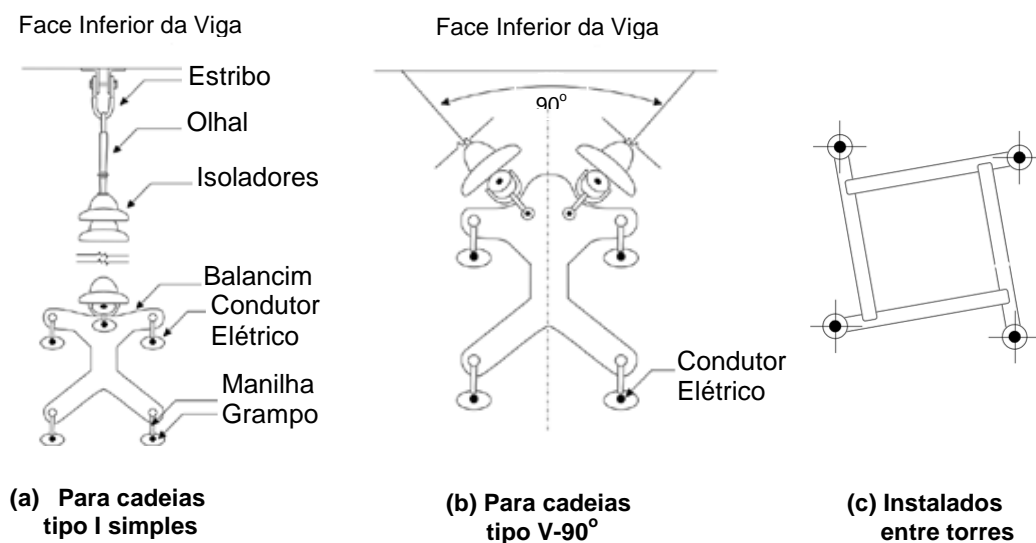


Figura V.6 – Espaçadores de Feixe

#### V.4 – AÇÃO DE TORMENTA ELÉTRICA

O Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul possui registros de vento obtidos com a instrumentação de uma torre estaiada localizada na região de Passo Fundo, RS, nos quais as leis de Hellman e Prandtl não são obedecidas. O tratamento estatístico dos dados coletados por cinco anemômetros (copo e direcionais) instalados ao longo dos 50 metros de altura da torre resulta num perfil vertical de velocidades médias do vento que se aproxima da forma retangular, indicando, portanto, velocidade média praticamente constante do nível do terreno ao topo da torre. Esse fenômeno está associado às tormentas elétricas (temporais) e tornados [33], o qual temos denominado “língua de vento” (Figura V.7).

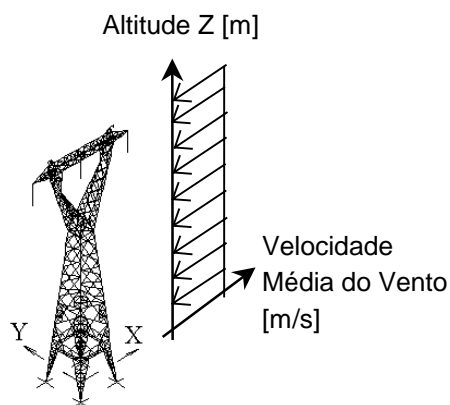


Figura V.7 – Ação de Língua de Vento sobre uma Torre Autoportante

Tendo em vista ser muito pequena a probabilidade de uma língua de vento atingir uma estrutura durante sua vida útil, não parece adequado recomendar, de forma generalizada, a inclusão desse carregamento no projeto de novas estruturas. Uma análise caso a caso deve substanciar a decisão de incluí-lo, ou não, no projeto estrutural. As torres TEE, por exemplo, a primeira vista parecem indicadas para tal análise, já que sua ruína pode inviabilizar inclusive serviços essenciais. A finalidade da inclusão deste item é, justamente, dar os primeiros passos no sentido de entender o que representa, para um sistema de transmissão, a ação de uma língua de vento sobre uma torre.

## **V.5 – MODELAGEM DAS FORÇAS DE VENTO SOBRE A ESTRUTURA**

A ação do vento sobre uma estrutura constitui um fenômeno aleatório, porém com um grau de regularidade estatística que leva à sua abordagem como um processo aleatório, estacionário e ergódico. Num processo aleatório (ou estocástico) suas características são definidas como uma seqüência infinita de variáveis aleatórias que recebem tratamento estatístico.

O processo aleatório estacionário é dito ergódico se esses parâmetros, quando calculados sobre um conjunto de amostra possíveis, é igual aos correspondentes parâmetros calculados no tempo em qualquer uma das amostras do processo.

A ação do vento é constituída por componentes relativas à velocidade média – ação estática – e à flutuação da velocidade média – ação dinâmica. Grande parte das estruturas civis não sofrem influência da parcela flutuante da velocidade do vento, entretanto, estruturas altas, leves e flexíveis, tais como edifícios altos, torres e chaminés, poderão ter sua estabilidade comprometida se os efeitos da turbulência atmosférica forem subestimados.

### **V.5.1 – Forças de Vento**

Definindo o campo de velocidades de vento segundo o sistema cartesiano de coordenadas, seja  $x$  a direção da componente horizontal  $U$ , coincidente com a direção da velocidade média, e  $z$  a direção vertical. Representando a velocidade média do vento na altura  $z$  sobre o terreno por  $\bar{U}(z)$  e fazendo  $u$ ,  $v$  e  $w$  corresponderem às flutuações da velocidade segundo as direções horizontal, lateral e vertical, respectivamente, o campo de velocidades de vento é expresso em termos de suas componentes pelas Equações V.1:

$$U = \bar{U}(z) + u(y, z, t) \quad (\text{V.1a})$$

$$V = v(y, z, t) \quad (\text{V.1b})$$

$$W = w(y, z, t) \quad (\text{V.1c})$$

Deixando de lado as componentes V e W, pequenas flutuações que podem ser desprezadas ao serem comparadas a U, a força global de vento,  $F_{\text{vento}}$ , definida no tempo t é descrita em termos de sua componente na direção da velocidade média – força de arrasto – expressa por:

$$F_D(t) = \frac{1}{2} \rho A C_D(\alpha) [U(t)]^2 \quad (\text{V.2})$$

$\rho$  - massa específica do ar;

A - área frontal efetiva da estrutura;

$C_D(\alpha)$  - coeficiente de arrasto relativo ao ângulo de ataque  $\alpha$ .

No modelo estrutural, portanto, o campo de velocidade do vento é expresso apenas em termos da componente horizontal U apresentada na Equação V.1a, onde  $\bar{U}(z)$  é constante em direção e magnitude, função da altura z, e a flutuação  $u(y,z,t)$  na direção da velocidade média – turbulência – é determinada estatisticamente em função de  $\bar{U}(z)$ , do comprimento de rugosidade e da altura sobre o terreno.

Na caracterização da componente longitudinal da flutuação do vento,  $u(y,z,t)$ , é utilizada a função densidade espectral  $S_u$  sugerida por Kaimal [6]:

$$\frac{f S_1(f)}{u_*^2} = \frac{200 Y_1}{(1 + 50 Y_1)^{5/3}} \quad (\text{V.3a})$$

onde f é frequência em Hertz,  $u_*$  é a velocidade de fricção e a frequência adimensional  $Y_1$  é dada por:

$$Y_1 = \frac{f(z - z_d)}{\bar{U}(z)} \quad (\text{V.3b})$$

A função densidade espectral cruzada entre as velocidades  $u_1$  e  $u_2$  correspondentes a dois pontos ao longo do vão de cabos elétricos é considerada como o produto do espectro  $S_u$  por uma função de decaimento exponencial da distância l entre os dois pontos [6], onde C é o coeficiente de decaimento, neste caso, C=16.

$$S_{u_1, u_2} = S_u e^{-\frac{f C l}{\bar{U}(z)}} \quad (\text{V.4})$$

A geração de um campo de velocidades de vento  $\mathbf{cv}(t)$  não correlacionadas é feita com a aplicação do método da auto-regressão, que consiste em expressar uma

velocidade instantânea  $cv(t)$  como uma combinação linear de valores anteriores de  $cv(t)$  mais um impulso aleatório. O campo de flutuação de velocidades do vento,  $\mathbf{u}(t)$ , com correlação espacial é obtido com a pré-multiplicação de  $cv(t)$  por uma matriz que contenha informações de correlação cruzada entre os sinais gerados, dados pela função densidade espectral cruzada [34].

### V.5.2 – Simulação Numérica da Turbulência Atmosférica

Usualmente, duas técnicas são empregadas na geração de sinais no tempo: séries temporais e decomposição espectral. Dentre as séries temporais aparece o método da auto-regressão, no qual se baseia o trabalho de BUCHHOLDT *et alli*. [34]. Neste método a simulação da turbulência  $u(y,z,t)$  é feita como uma combinação linear de  $p$  valores prévios somada a um impulso aleatório de média zero e variância  $\sigma_{Nu}^2$ .

$$u(t) = \sum_{s=1}^p \phi_s u(t - s\Delta t) + \sigma_{Nu} N(t) \quad (V.5)$$

$\phi_s$  – parâmetros da auto-regressão;

$p$  – ordem da auto-regressão;

$N(t)$  – processo aleatório de média zero e variância 1.

Os parâmetros  $\phi_s$  são determinados com a solução do sistema de equações:

$$R_u(k\Delta t) = \sum_{s=1}^p \phi_s R_u((k-s)\Delta t), \quad k=1,2,\dots,p. \quad (V.6)$$

Na Equação V.6,  $R_u$  é a função autocorrelação do processo  $u(t)$ , determinada pela transformada inversa de Fourier do espectro de energia  $S_u(n)$ .

A variância  $\sigma_{Nu}^2$  é dada pela Equação V.7, onde  $\sigma_u^2$  é a variância do sinal  $u(t)$ :

$$\sigma_{Nu}^2 = \sigma_u^2 - \sum_{s=1}^p \phi_s R_u(s\Delta t) \quad (V.7)$$

## CAPÍTULO VI

### MODELAGEM DO SISTEMA ESTRUTURAL TORRES – LINHAS TEE

---

#### VI.1 – DESCRIÇÃO DO MODELO DE ANÁLISE ESTRUTURAL

Na simulação do comportamento de um sistema de transmissão sob ação do vento, os condutores e pára-raios devem ser incluídos no modelo tridimensional em elementos finitos (Figura VI.1), que deverá ser composto pela torre central e vãos de cabos adjacentes. A continuidade da linha de transmissão, representada na Figura VI.1 em linhas tracejadas, é incorporada ao modelo estrutural nas condições de contorno elásticas, cinemáticas e inerciais [1].

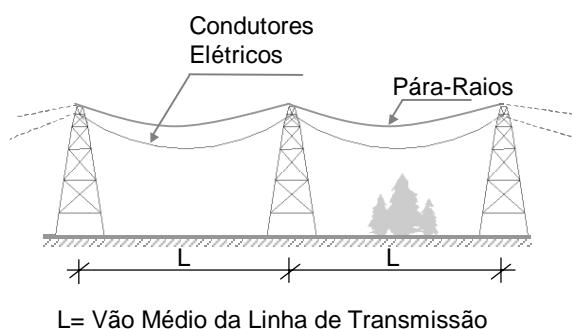


Figura VI.1 – Modelo Estrutural

Na discretização, torres e cabos são modelados com elementos de pórtico espacial. Na torre, o objetivo é considerar as tensões de flexão introduzidas pelas ligações parafusadas, importantes muitas vezes nas verificações de estabilidade e resistência da torre; nos cabos, a finalidade é evitar instabilidade numérica na análise dinâmica não-linear, nas situações em que os cabos, passíveis de grandes amplitudes de deslocamentos, sofram variações de tensão que levem à reversão de sinal. Assim, na discretização dos condutores elétricos e pára-raios adota-se a rigidez à flexão do cabo, ainda que muito pequena. É importante enfatizar que a frequência fundamental dos cabos não é afetada pelo tipo de elemento usado em sua discretização, quer seja elemento de pórtico ou treliça espacial.

As cadeias de isoladores e a ligação dos pára-raios à torre são modeladas com o mesmo tipo de elemento porém, neste caso, com extremidades rotuladas, de modo a reproduzir corretamente o comportamento mecânico destes componentes – bielãs de suspensão.

## VI.2 – MODELAGEM MATEMÁTICA – EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO

Numa primeira etapa é executada a análise estática não-linear (Equação VI.1) para os carregamentos de peso próprio e tração de projeto nos condutores elétricos e pára-raios, observando-se, portanto, a não-linearidade dos cabos em catenária:

$$[K_E + K_G] X = F_0 \quad (VI.1)$$

onde,  $K_E$  e  $K_G$  representam, respectivamente, as matrizes de rigidez elástica linear e de rigidez geométrica, e  $F_0$  é o vetor de forças estáticas externas.

A etapa seguinte, ainda estática não-linear, será a instalação da componente estática das forças de vento no modelo – parcela da velocidade média – representada na Equação VI.2 pelo vetor de forças externas  $F_{\text{vento,estático}}$ .

$$[K_E + K_G] X = F_{\text{vento,estático}} \quad (VI.2)$$

Alcançado o estado de equilíbrio estático, a resposta do sistema estrutural sob ação do vento, no domínio do tempo, é obtida numa análise dinâmica não-linear, com a solução da Equação VI.3:

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = F_{\text{vento}}(t) \quad (VI.3)$$

onde, no sistema global de coordenadas,  $X(t)$ ,  $\dot{X}(t)$  e  $\ddot{X}(t)$  representam o vetor de deslocamentos nodais e suas derivadas,  $M$ ,  $C$  e  $K$  correspondem às matrizes de massa, amortecimento e rigidez, respectivamente, e  $F_{\text{vento}}(t)$  é o vetor de forças nodais definidas no tempo.

Os modos de vibração e frequências naturais do modelo são determinados numa análise de vibrações livres sem amortecimento e sob tensões iniciais com a solução do problema de autovalor representado pela Equação VI.4, onde  $\omega_n$  é a frequência natural de ordem  $n$  e o vetor  $X_n$  contém a forma modal de vibração associada à frequência  $\omega_n$ .

$$[(K_E + K_G) - \omega_n^2 M] X_n = 0 \quad (VI.4)$$

O algoritmo de solução do problema dinâmico não-linear, representado pela Equação VI.3, utiliza o método de integração direta de Newmark ( $\beta=1/4$  e  $\gamma=1/2$ ) para solução do sistema de equações de movimento e o método de Newton-Raphson para atingir o equilíbrio em cada passo de carga.

Modelos estruturais similares ao proposto em [1] foram sugeridos por MOMOMURA *et alli.* [35] e YASUI *et alli.* [36], mas com outra finalidade – analisar o comportamento dos condutores elétricos em função do tipo de torre às quais são fixados, se torres de suspensão ou torres de ancoragem, por exemplo. MOMOMURA *et alli.* [35] alertam para a existência de problemas relacionados à influência exercida pela oscilação dos condutores sobre a torre e a necessidade de solucioná-los. Este tem sido o enfoque de trabalhos já apresentados por BATTISTA e RODRIGUES [1, 2, 37, 38], agora sendo implementado.

### VI.3 – MODELAGEM SIMPLIFICADA DO CONJUNTO ISOLADORES – CONDUTORES

#### VI.3.1 Efeito Dinâmico das Cadeias de Isoladores

Resultados obtidos de análises dinâmicas lineares [1] já mostram que o sistema formado pelas cadeias de isoladores e cabos elétricos tende a comportar-se como um pêndulo duplo, na direção ortogonal ao eixo da linha de transmissão, quando esta é exposta à ação do vento. Nesta seção apresenta-se uma modelagem simplificada que permite uma avaliação preliminar do comportamento dinâmico não-linear e da frequência fundamental do sistema estrutural, a partir de um modelo mecânico análogo com dois graus de liberdade ilustrado na Figura VI.2, no qual pode-se observar que a cadeia de isoladores se constitui numa biela de suspensão.

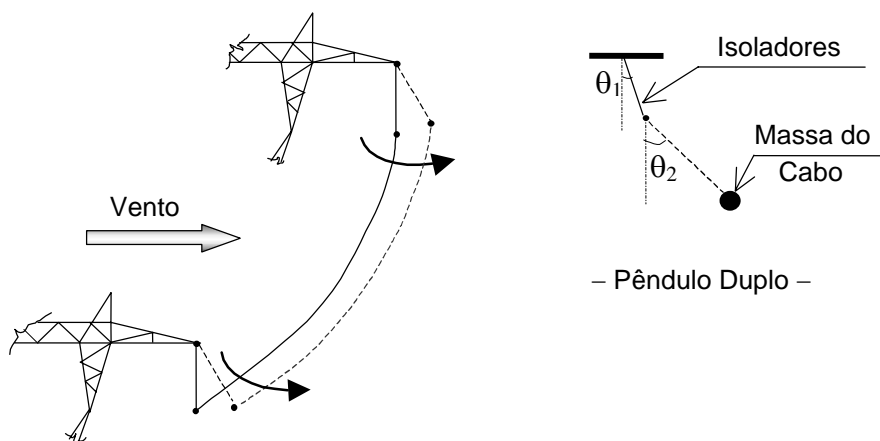


Figura VI.2 – Comportamento do Pêndulo Duplo - Comparação

Certamente um dos resultados mais importantes deste estudo é a compreensão do papel desempenhado por essas bielas de suspensão no comportamento da linha, quando exposta à ação dinâmica das forças de vento. Se, no contexto da Engenharia Elétrica, a altura das cadeias de isoladores garante a distância de segurança entre as partes energizadas do sistema de transmissão e as partes aterradas da estrutura-suporte, do ponto de vista da Engenharia Estrutural a altura dessas cadeias define as características dinâmicas do sistema formado por torres e cabos elétricos.

Essas afirmativas baseiam-se numa pesquisa que envolveu (i) análises estáticas segundo as premissas do projeto convencional – torre e cabos sem acoplamento, pressão dinâmica do vento – e com o modelo acoplado sob ação de forças de vento sem turbulência, assim como (ii) análises dinâmicas lineares no domínio do tempo sob ação de vento turbulento, ora admitindo as bielas de suspensão restringidas, ora oscilando livremente. Os resultados dessas análises encontram-se nas referências [2,37,38] e são transcritos no próximo subitem VI.3.2 onde é apresentado detalhadamente um modelo analítico 2D a ser utilizado na fase preliminar de projeto de linhas de transmissão.

### VI.3.2 Modelo Matemático Simplificado – Pêndulo Duplo

Apresenta-se a seguir a formulação de um modelo analítico 2D baseada nas equações de movimento do pêndulo duplo não-linear. Este modelo pode ser utilizado como uma ferramenta auxiliar para a fase de projeto de novas linhas de transmissão, assim como na identificação de áreas de risco em sistemas de transmissão já energizados, onde medidas corretivas deverão ser implementadas.

Admitindo o pêndulo duplo ilustrado na Figura VI.3, MEIROVITCH [39] mostra que a energia cinética,  $T$ , e a energia potencial,  $V$ , do modelo são expressas pelas Equações VI.5 e VI.6, sendo  $g$  a aceleração da gravidade:

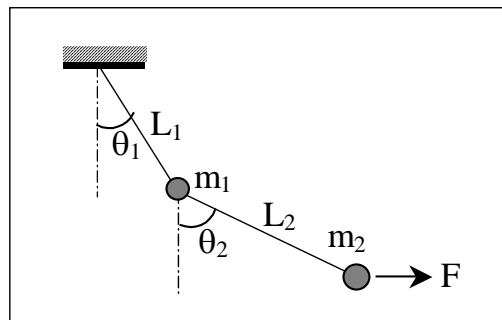


Figura VI.3 –Pêndulo Duplo

$$T = \frac{1}{2}[(m_1 + m_2)L_1^2\dot{\theta}_1^2 + 2m_2L_1L_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) + m_2L_2^2\dot{\theta}_2^2] \quad (\text{VI.5})$$

$$V = (m_1 + m_2)gL_1(1 - \cos\theta_1) + m_2gL_2(1 - \cos\theta_2) \quad (\text{VI.6})$$

As equações Lagrangeanas de movimento em termos das coordenadas generalizadas  $q_j$ , para os  $n$  graus de liberdade do sistema estrutural, podem ser obtidas aplicando a Equação VI.7, onde  $Q_j$  representa as forças não conservativas,

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} + \frac{\partial V}{\partial q_j} = Q_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (\text{VI.7})$$

ou, na forma compacta representada pela Eq. VI.8:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = Q_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (\text{VI.8})$$

onde  $L$  representa o Lagrangeano definido por:

$$L = T - V \quad (\text{VI.9})$$

Lembrando que as forças não-conservativas  $Q_j$  podem ser separadas em forças dissipativas e forças externas impostas ao sistema estrutural, na formulação do pêndulo duplo sem amortecimento (Figura VI.3) teremos  $Q_j$  designando apenas a parcela relativa às forças externas.

Utilizando como coordenadas generalizadas os deslocamentos angulares,  $q_1 = \theta_1$  e  $q_2 = \theta_2$ , as equações Lagrangeanas de movimento do pêndulo duplo podem ser re-escritas na forma:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = \Theta_1 \quad \text{e} \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} = \Theta_2 \quad (\text{VI.10})$$

onde  $L$  é o Lagrangeano,  $\Theta_1$  e  $\Theta_2$  são as forças generalizadas.

A partir do trabalho realizado pelas forças externas, é possível determinar as expressões das forças generalizadas. Seja, então, a componente de deslocamento na direção da força  $F$ :

$$x_2 = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin \theta_2 \quad (\text{VI.11})$$

e o trabalho virtual realizado será, portanto:

$$\delta \bar{W} = F \delta x_2 = F \delta (L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin \theta_2) = FL_1 \cos \theta_1 \delta \theta_1 + FL_2 \cos \theta_2 \delta \theta_2 \quad (\text{VI.12})$$

que, comparado à expressão do trabalho virtual escrita em termos de forças generalizadas e deslocamentos virtuais generalizados,

$$\delta\bar{W} = \Theta_1 \delta\theta_1 + \Theta_2 \delta\theta_2 \quad (\text{VI.13})$$

leva a concluir que as forças generalizadas são expressas simplesmente por:

$$\Theta_1 = FL_1 \cos\theta_1 \quad \text{e} \quad \Theta_2 = FL_2 \cos\theta_2 \quad (\text{VI.14})$$

Finalmente, MEIROVITCH [39] apresenta as equações de movimento do pêndulo duplo em sua forma explícita, com a solução da Equação VI.10:

$$(m_1 + m_2)L_1^2\ddot{\theta}_1 + m_2L_1L_2[\ddot{\theta}_2\cos(\theta_2 - \theta_1) - \dot{\theta}_2^2\sin(\theta_2 - \theta_1)] + (m_1 + m_2)gL_1\sin\theta_1 = FL_1\cos\theta_1 \quad (\text{VI.15a})$$

$$m_2L_1L_2[\ddot{\theta}_1\cos(\theta_2 - \theta_1) + \dot{\theta}_1^2\sin(\theta_2 - \theta_1)] + m_2L_2^2\ddot{\theta}_2 + m_2gL_2\sin\theta_2 = FL_2\cos\theta_2 \quad (\text{VI.15b})$$

### Linearização das Equações de Movimento

Restringindo as oscilações a pequenas amplitudes de deslocamentos angulares e desprezando os termos de segunda ordem ou superior, ou seja,

$$\sin\theta_1 \cong \theta_1, \quad \cos(\theta_2 - \theta_1) \cong 1 \quad \text{e} \quad \dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \cong \dot{\theta}_1^2 \cong \dot{\theta}_2^2 \cong 0$$

temos as equações de movimento linearizadas:

$$(m_1 + m_2)L_1^2\ddot{\theta}_1 + m_2L_1L_2\ddot{\theta}_2 + (m_1 + m_2)gL_1\theta_1 = FL_1 \quad (\text{VI.16a})$$

$$m_2L_1L_2\ddot{\theta}_1 + m_2L_2^2\ddot{\theta}_2 + m_2gL_2\theta_2 = FL_2 \quad (\text{VI.16b})$$

Em regime de vibração livre, essas equações transformam-se em:

$$(m_1 + m_2)L_1\ddot{\theta}_1 + m_2L_2\ddot{\theta}_2 + (m_1 + m_2)g\theta_1 = 0 \quad (\text{VI.17a})$$

$$L_1\ddot{\theta}_1 + L_2\ddot{\theta}_2 + g\theta_2 = 0 \quad (\text{VI.17b})$$

Considerando  $L_2 = \alpha L_1$  e  $m_2 = \varphi m_1$ , as equações linearizadas de movimento, em regime de vibração livre, são reduzidas a:

$$(1 + \varphi)L_1\ddot{\theta}_1 + \varphi\alpha L_1\ddot{\theta}_2 + (1 + \varphi)g\theta_1 = 0 \quad (\text{VI.18a})$$

$$L_1\ddot{\theta}_1 + \alpha L_1\ddot{\theta}_2 + g\theta_2 = 0 \quad (\text{VI.18b})$$

Admitindo a solução na forma  $\theta_1 = a_1 \cos \omega_n t$  e  $\theta_2 = a_2 \cos \omega_n t$ , em que  $a_i$  representa a amplitude de movimento da  $i$ -ésima coordenada, teremos:

$$\ddot{\theta}_1 = -a_1 \omega_n^2 \cos \omega_n t \quad (\text{VI.19a})$$

$$\ddot{\theta}_2 = -a_2 \omega_n^2 \cos \omega_n t \quad (\text{VI.19b})$$

Em seguida, substituindo no sistema de equações linearizadas (Eqs. VI.18), resulta:

$$[(1 + \varphi)g a_1] \cos \omega_n t - \omega_n^2 [(1 + \varphi)L_1 a_1 + \varphi \alpha L_1 a_2] \cos \omega_n t = 0 \quad (\text{VI.20a})$$

$$g a_2 \cos \omega_n t - \omega_n^2 (L_1 a_1 + \alpha L_1 a_2) \cos \omega_n t = 0 \quad (\text{VI.20b})$$

ou, em notação vetorial,

$$[\mathbf{R}]\{\mathbf{a}\} \cos \omega t - \omega^2 [\mathbf{S}]\{\mathbf{a}\} \cos \omega t = \{0\} \quad (\text{VI.21a})$$

ou, ainda,

$$[[\mathbf{R}] - \omega^2 [\mathbf{S}]]\{\mathbf{a}\} = \{0\} \quad (\text{VI.21b})$$

um problema clássico de autovalores, cuja solução não-trivial (aquela em que nem todos  $a_i=0$ ) exige que o determinante da matriz dos fatores de  $\{\mathbf{a}\}$  seja igual a zero; neste caso,

$$|[\mathbf{R}] - \omega^2 [\mathbf{S}]| = 0 \quad (\text{VI.22})$$

em que,

$$[\mathbf{R}] = \begin{bmatrix} (1 + \varphi)g & 0 \\ 0 & g \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad [\mathbf{S}] = \begin{bmatrix} (1 + \varphi)L_1 & \varphi \alpha L_1 \\ L_1 & \alpha L_1 \end{bmatrix} \quad (\text{VI.23})$$

A solução da Equação VI.22 resulta na equação característica do sistema de equações, ou ainda, na equação de frequências do pêndulo duplo linearizado:

$$(1 + \varphi)(g - L_1 \omega_n^2)(g - \alpha L_1 \omega_n^2) - \varphi \alpha L_1^2 \omega_n^4 = 0 \quad (\text{VI.24})$$

Os resultados numéricos obtidos com a Equação VI.24 servem, portanto, à uma avaliação prévia e expedita do comportamento dinâmico de sistemas de transmissão de energia elétrica sob ação do vento.

### Estimativa da Frequência Fundamental do Modelo da Torre Delta

O modelo da torre autoportante tipo delta analisado neste trabalho (Figura I.1) apresenta as seguintes características:

- a) Vão médio da linha:  $L=450\text{m}$ ;
- b) Cadeia de isoladores: Tipo I,  
 comprimento= $2,65\text{m} \Rightarrow$  comprimento da biela de suspensão  $L_1=2,90\text{m}$ ,  
 peso próprio= $1000\text{ N}$ ;
- c) Condutores elétricos: Grosbeak,  
 peso próprio:  $\mu=13,0\text{ N/m}$ ,  
 tração máxima:  $T_{r_{\max}} = 31500\text{ N}$ ,  
 flecha: fazendo  $T_{r_0}=T_{r_{\max}}$ , já que a variação do esforço de tração no cabo é muito pequena quando os pontos de suspensão estão na mesma elevação, temos
- $$s = \frac{T_{r_0}}{\mu} \left[ \cosh \frac{\mu L}{2T_{r_0}} - 1 \right] = 10,45\text{m} ,$$
- e a distância ao centro de massa da catenária,  $L_2$  no modelo do pêndulo duplo (Figura VI.3), resulta em:  $L_2=2s/3 \Rightarrow L_2=6,967\text{m}$ ;
- d) Aceleração da gravidade:  $g=9,807\text{m/s}$ ;

que, aplicadas à Equação VI.24, levam à determinação da equação de frequências do pêndulo duplo linearizado, para as características geométricas e inerciais do modelo da torre delta:

$$20,443\omega_n^4 - 1251,171\omega_n^2 + 1243,569 = 0 \quad (\text{VI.25})$$

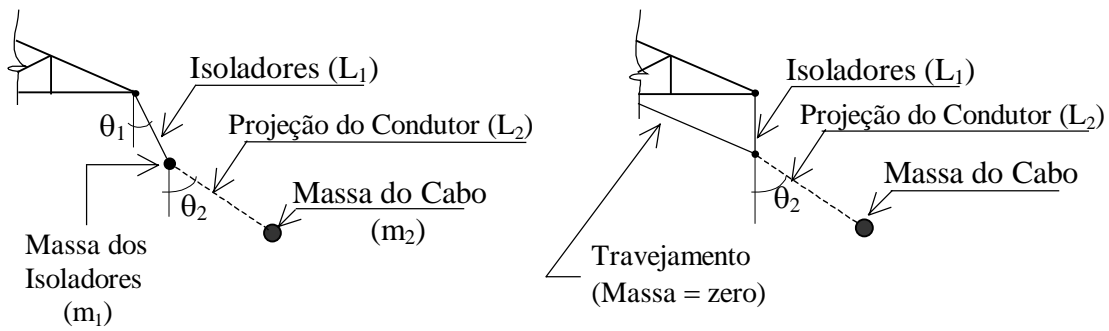
A solução da Equação VI.25 fornece a frequência fundamental  $\omega_{pd}=1,005\text{ rad/s}$ , isto é,  $f_{pd}=0,161\text{ Hz}$  [40], uma excelente aproximação da frequência fundamental do modelo acoplado para a fase preliminar de projeto, se comparada ao resultado obtido com o modelo 3D em elementos finitos,  $f_1=0,158\text{Hz}$ , apresentado na Referência [1].

### Resultados de Análises 3D-MEF

O emprego de análises dinâmicas lineares simplificadas e fórmulas aproximadas para cálculo da frequência fundamental de pêndulos permite identificar a influência das cadeias de isoladores tipo I no comportamento do sistema acoplado torre–cabos elétricos exposto a forças de vento. Ainda que relativos a análises dinâmicas lineares, esses resultados mantêm-se qualitativamente importantes, e, por esta razão, são agora transcritos das Referências [2,37,38] para esta seção.

No estudo da influência das bielas de suspensão no comportamento da linha de transmissão é executada uma análise com o modelo acoplado torre–cabos elétricos, onde o movimento das cadeias de isoladores é restringido. Observa-se então que, impedindo o movimento das bielas de suspensão, o sistema passa a apresentar o comportamento aproximado de um pêndulo simples; com conseqüente redução da amplitude de oscilação do modelo estrutural sob ação de vento. Neste caso, é boa a aproximação do resultado do modelo linearizado do pêndulo simples (Equação VI.26),  $f_{ps}=0,189$  Hz (Figura VI.4), com a freqüência fundamental de vibração obtida com o modelo tridimensional,  $f_1=0,168$  Hz (Tabela VI.1).

$$f_{ps} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L_2}} \text{ [Hz]} \quad [39] \quad \text{(VI.26)}$$



$f_{pd}$ : Equação VI.24

$$f_{ps} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L_2}} \text{ Hz} \quad g = \text{aceleração da gravidade}$$

(a) Pêndulo Duplo <sup>(1)</sup>		(b) Pêndulo Simples <sup>(2)</sup>	
3D-MEF	$f_1=0.158\text{Hz}$		$f_1=0.168\text{Hz}$
Pêndulo	$f_{pd}=0.161\text{Hz}^{(1)}$		$f_{ps}=0.189\text{Hz}^{(2)}$

Figura VI.4 – Formulação do Pêndulo – Resultados

As características dinâmicas do modelo 3D-MEF com bielas restringidas são comparadas na Tabela VI.1 àquelas encontradas com o modelo que admite a livre oscilação das bielas de suspensão. Observa-se que os valores das freqüências pouco se alteram de um modelo para o outro: a principal diferença é a maior mobilização da torre quando as bielas de suspensão podem oscilar livremente e, como conseqüência, no topo da torre resultam deslocamentos laterais de maior amplitude. Com as bielas restringidas, ou seja, com o modelo aproximando-se do comportamento de pêndulo simples, os resultados obtidos com o modelo tridimensional aproximam-se daqueles observados no projeto convencional, onde os cabos não são discretizados.

Tabela VI.1 – Frequências Naturais e Formas Modais – Efeito das Bielas de Suspensão

Bielas de Suspensão Livres				Bielas de Suspensão Restringidas		
Modo	Frequência (Hz)	Modo de Vibração	Direção do Deslocamento	Frequência (Hz)	Modo de Vibração	Direção do Deslocamento
1	0,158	To/CE	Lateral	0,168	To/CE	Lateral
2	0,172	CE	Longitudinal	0,202	To/PR	Lateral
3	0,200	To/PR	Lateral	0,241	CE/PR	Longitudinal
4	0,283	CE/PR	Longitudinal	0,283	CE/PR	Longitudinal
5	0,297	CE/PR	Longitudinal	0,330	CE/PR	Longitudinal
6	0,331	CE/PR	Longitudinal	0,340	CE/PR	Longitudinal
7	0,481	To/CE/PR	Lateral	0,510	To/CE/PR	Lateral
8	0,877	CE/PR	Longitudinal	0,877	CE/PR	Longitudinal
9	1,351	To/CE/PR	Lateral	1,389	To/CE/PR	Lateral
10	1,786	To/CE/PR	Longitudinal	2,128	To/CE/PR	Longitudinal
<b>To = Torre</b>		<b>CE = Condutor Elétrico</b>		<b>PR = Pára-Raios</b>		

A Tabela VI.2, a seguir, apresenta e compara os resultados dos deslocamentos na extremidade do balanço (Figura VI.2 - ligação das cadeias de isoladores à torre) para quatro modelos diferentes, considerando a incidência do vento sempre na direção transversal ao eixo da linha de transmissão. Esses resultados foram obtidos de análises dinâmicas lineares, de acordo com a proposta apresentada em [1], e já foram expostos em [2,37,38], antecedendo, portanto, a análise dinâmica não-linear do modelo acoplado torre-cabos elétricos, o principal objetivo deste trabalho:

#### 1. Projeto Convencional (Análise Estática)

Os cabos elétricos não são discretizados; pressão dinâmica do vento  $q=2,4\text{kN/m}^2$  (pressão de projeto) uniformemente distribuída ao longo dos cabos e da altura da torre, considerando a área efetiva de obstrução. As resultantes de força de vento nos cabos são aplicadas ao nó de ligação na torre.

#### 2. Modelo Acoplado Torre-Cabos Elétricos (Análise Estática)

O modelo apresentado na seção VI.I, considerando apenas a velocidade média do vento, sem turbulência.

#### 3. Modelo Acoplado Torre-Cabos Elétricos (Análise no Domínio do Tempo com Vento Turbulento)

O modelo apresentado na seção VI.I, admitindo as bielas de suspensão restringidas.

4. Modelo Acoplado Torre-Cabos Elétricos (Análise no Domínio do Tempo com Vento Turbulento)

O modelo apresentado na seção VI.I, ou seja, com as bielas de suspensão podendo oscilar livremente.

Tabela VI.2 – Deslocamentos na Extremidade da Viga (Figura VI.2)

Hipótese de Cálculo		Deslocamentos [m]	
		Direção X <sup>(*)</sup> (Ortogonal à LT)	Direção Z (Vertical)
1. Projeto Convencional (Análise Estática)	mín.	-0,51	-0,51
	máx.	0,51	0,51
2. Modelo Proposto Análise Estática Velocidade Média do Vento	mín.	-0,60	-0,61
	máx.	0,60	0,61
3. Modelo Proposto Análise no Domínio do Tempo Bielas de Suspensão Restringidas e Vento Turbulento	mín.	-0,73	-0,003
	máx.	0,002	0,67
4. Modelo Proposto Análise no Domínio do Tempo Vento Turbulento	mín.	-1,26	-0,12
	máx.	0,10	1,34
Valor Esperado para o Novo Modelo Proposto (4) (Desvio Padrão $\cong$ 0,08)		1,16	1,24

(\*) Direção X = Incidência do Vento; LT = Linha de Transmissão.

O valor esperado para os deslocamentos na extremidade do balanço (Tabela VI.2) foi determinado com o tratamento estatístico dos máximos observados nas histórias no tempo, admitindo que a resposta estrutural seja um processo gaussiano estacionário, uma simplificação que permite considerar a convergência da função densidade de probabilidade para a função de Cartwright e Lonquet-Higgins [2,36].

No entanto, os valores apresentados na Tabela VI.2 – 1,16m na direção X e 1,24m na direção Z – poderão ser ainda reduzidos, tendo em vista que a modelagem das forças de vento foi representada por séries não-lineares e, portanto, não-gaussianas, já que o termo  $u(t)^2$  não foi desprezado. Desse modo, a resposta estrutural também é representada por séries não-gaussianas.

A teoria quase-estática de Davenport, comum na engenharia, é, justamente, uma linearização estatística do carregamento, cujo objetivo ao desprezar o termo  $u(t)^2$  na expressão das forças de vento sobre o modelo é evitar que o carregamento seja representado por séries não-lineares e, conseqüentemente, não-gaussianas [41].

## CAPÍTULO VII

### EXEMPLOS DE APLICAÇÃO E ANÁLISE

#### VII.1 – DESCRIÇÃO DA TORRE AUTOPORTANTE TIPO DELTA

A torre analisada (Figura VII.1) é do tipo suspensão em alinhamento reto, projetada em perfis cantoneira com padrão em polegadas, aço carbono ASTM A36 e de alta resistência A572 Gr.50, com ligações parafusadas. Essa torre pertence a um sistema de transmissão de 230kV, composto por três condutores elétricos Grosbeak (diâmetro 25,16mm), dois cabos pára-raios em aço galvanizado EHS 3/8 in (diâmetro 9,15mm), vão médio de 450m e cadeias de isoladores de disco com corpo isolante em vidro formando bielas de suspensão de 2,90m.

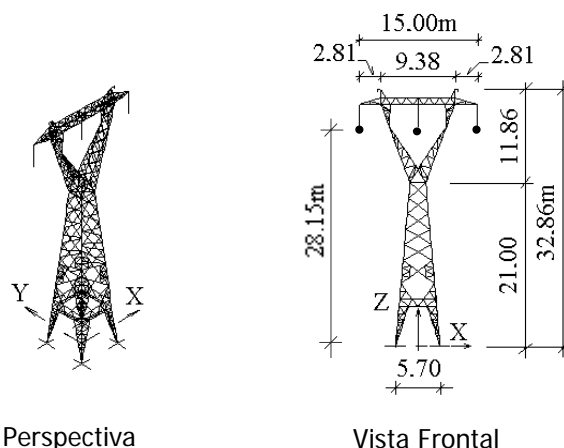


Figura VII.1 – Torre Delta – Silhueta

Nos condutores elétricos e pára-raios são instalados amortecedores ADS (Stockbridge), não discretizados no modelo 3D-MEF. Como indicado na seção V.3, estes dispositivos são projetados para trabalhar em ressonância com os cabos, e têm a finalidade de atenuar movimentos de pequena amplitude despertados por ventos de baixa velocidade, em faixas de frequência bastante elevadas.

##### VII.1.1 Interação Solo-Estrutura

Para efeito de interação solo-estrutura, o modelo em elementos finitos foi analisado em [1] para fundação direta assentada em dois tipos de terreno: areia média e argila com baixa resistência à compressão. Molas elásticas lineares e elementos de barra

com elevada rigidez à flexão simularam no modelo tridimensional o solo e as sapatas em concreto armado, respectivamente.

Os resultados da análise comprovaram que, para efeito de comportamento dinâmico da torre sob ação do vento, não importa o tipo de fundação utilizada, seja ela fundação direta, indireta ou fixação na rocha. A fundação dessas torres quando assentada diretamente sobre o terreno tem a finalidade de servir de lastro, para evitar o tombamento provocado pela ação do vento, resultando sempre em tensões de compressão no solo muito baixas e, conseqüentemente, recalques de fundação também muito pequenos.

### VII.1.2 Características Dinâmicas do Modelo Estrutural

A Tabela VII.1 [1] apresenta a resposta da estrutura em regime de vibração livre não amortecida sob tensões iniciais – peso próprio e tração de projeto nos cabos – e as Figuras VII.2 a VII.5 os modos de vibração 1, 3, 7 e 10 [1].

Tabela VII.1 – Freqüências Naturais e Formas Modais de Vibração – Classificação [1]

Modo	Freqüência [Hz]	Modo de Vibração	Oscilação
1	0,158	To/CE	Lateral
2	0,172	CE	Longitudinal
3	0,200	To/PR	Lateral
4	0,283	CE/PR	Longitudinal
5	0,297	CE/PR	Longitudinal
6	0,331	CE/PR	Longitudinal
7	0,481	To/CE/PR	Lateral
8	0,877	CE/PR	Longitudinal
9	1,351	To/CE/PR	Lateral
10	1,786	To/CE/PR	Longitudinal

**To** = Torre

**CE** = Condutor Elétrico

**PR** = Pára-raios

Apesar da recomendação para obter a resposta estrutural a partir de autovalores que também incluam as tensões iniciais referentes à ação da parcela estática das forças

de vento, as frequências naturais associadas aos primeiros modos de oscilação dos cabos apresentam valores muito próximos, quer as forças relativas à velocidade média do vento tenham sido consideradas ou não: uma variação de 0,158 Hz para 0,217 Hz, por exemplo, na frequência fundamental. Esse comportamento pôde ser observado também no trabalho de YASUI *et alli* [36] e, além disso, esse é um detalhe que perde a importância quando a análise dinâmica é do tipo não-linear.

A frequência fundamental inferior a 1,0 Hz significa que o sistema formado por torre e cabos elétricos, quando exposto aos efeitos dinâmicos da turbulência atmosférica, pode apresentar resposta flutuante significativa na direção da velocidade média, assim como na direção ortogonal à incidência do vento.

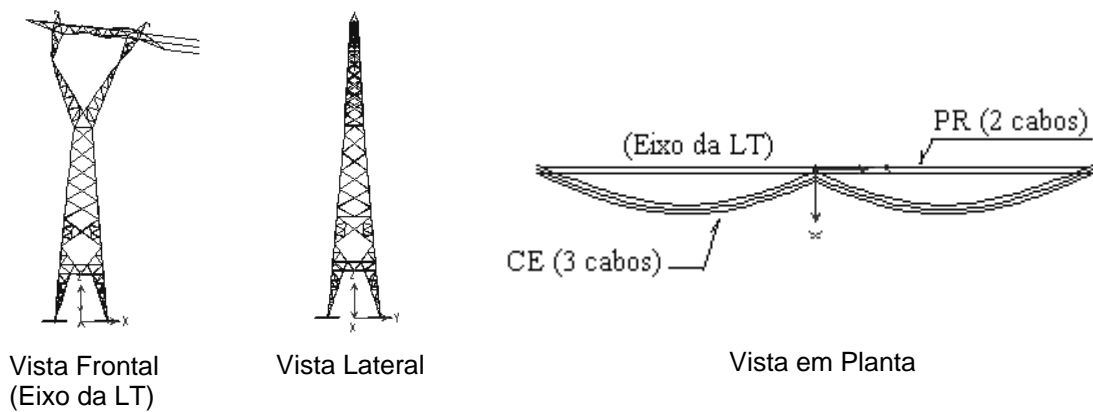


Figura VII.2 – Modo 1 – Oscilação Lateral ( $f_1=0,158$  Hz) [1]

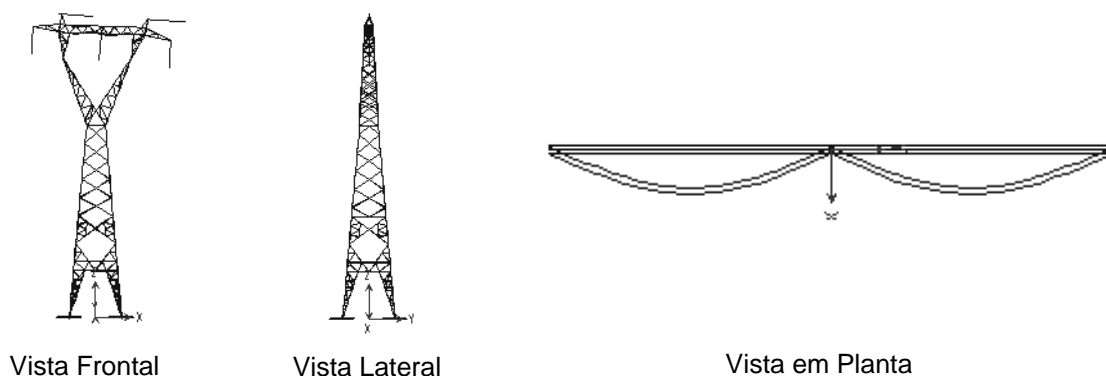


Figura VII.3 – Modo 3 – Oscilação Lateral ( $f_3=0,200$  Hz) [1]

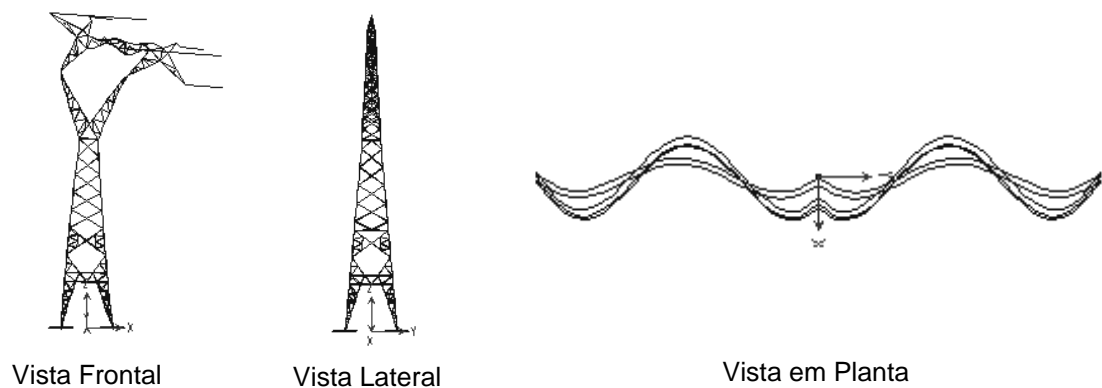


Figura VII.4 – Modo 7 – Oscilação Lateral ( $f_7=0,481$  Hz) [1]

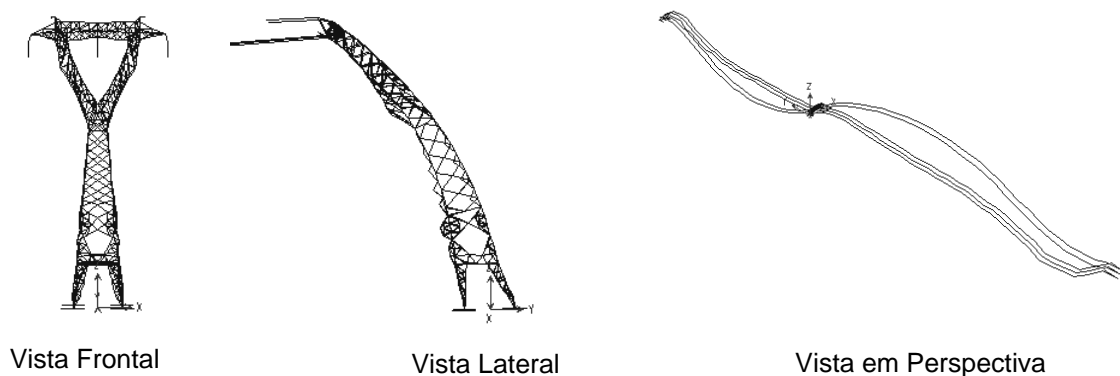


Figura VII.5 – Modo 10 - Oscilação Longitudinal ( $f_{10}=1,786$  Hz) [1]

A idéia de reproduzir essas formas modais (Figuras VII.2 a VII.5) é, justamente, enfatizar o aspecto mais importante do comportamento do sistema estrutural: a oscilação lateral dos cabos elétricos sob ação do vento desperta os principais modos de vibração da torre.

### VII.1.3 Forças de Vento – Histórias no Tempo

Baseados nas recomendações da norma brasileira NBR 6123 [5], foram obtidos os parâmetros estatísticos e aerodinâmicos necessários para a definição das forças de vento sobre o modelo estrutural.

Sabendo-se que a torre analisada pertence a um sistema de transmissão instalado na região sul do Brasil, onde o mapa de isopletras da NBR 6123 [5] recomenda a velocidade básica do vento igual a 50 m/s (média sobre 3s, altura de referência igual a 10m e período de retorno igual a 50 anos), a velocidade média de projeto, na elevação 10m, é determinada pela Equação VII.1:

$$\bar{U}(10) = 0,69 U_0 S_1 S_3 = 37,95 \text{ m/s} \quad (\text{VII.1})$$

onde, o fator 0,69 representa uma adequação do tempo de exposição à 10 minutos,  $S_1=1,0$  é o fator topográfico relativo a terreno plano ou fracamente acidentado e  $S_3=1,1$  é o fator estatístico recomendado para os casos em que a ruína total ou parcial da estrutura possa afetar a segurança e possibilidade de socorro.

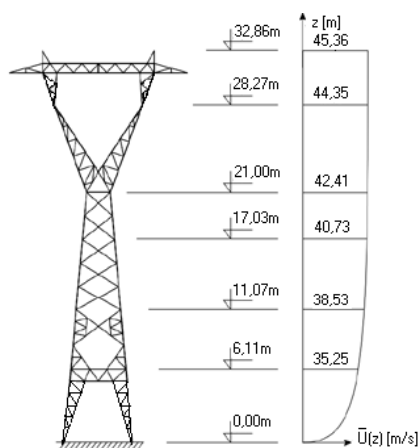
O perfil vertical de velocidades médias ao longo da altura da torre é traçado com a aplicação da lei de Hellmann (Equação VII.2), admitindo seis trechos com altura média inferior a 6m (Figura VII.6). No topo da torre,  $z=32,86\text{m}$ , a velocidade média atinge o valor máximo de 45,36m/s.

$$\bar{U}(z) = \bar{U}(z_{\text{ref}}) \left( \frac{z}{z_{\text{ref}}} \right)^p \quad (\text{VII.2})$$

$\bar{U}(z)$  – velocidade média do vento na altura  $z$ ;

$\bar{U}(z_{\text{ref}})$  – velocidade média do vento na altura de referência  $z_{\text{ref}}$  ( $\bar{U}(10) = 37,95 \text{ m/s}$ );

$p$  – expoente relativo à rugosidade do terreno ( $p=0,15$  para edificações situadas em terreno aberto e aproximadamente em nível).



Notas:

1. Ligação dos condutores elétricos às bielas de suspensão: El.28,15m.
2. Ligação dos pára-raios aos estribos de fixação na torre: El.32,61m.

Figura VII.6 – Perfil Vertical de Velocidades Médias [1]

### Simulação Numérica da Turbulência Atmosférica

Na simulação numérica da turbulência atmosférica foi adotado o mesmo algoritmo utilizado por PFEIL em [42, 43], baseando-se no trabalho de BUCHHOLDT *et alli*. [34]. Desse modo, na elevação  $z=28,15\text{m}$  – ligação dos condutores elétricos às cadeias de isoladores – foram geradas, empregando o método da auto-regressão, dez funções  $u(y,z,t)$  relativas a dez pontos ao longo dos 900m de linha de transmissão considerados no modelo estrutural, a partir das seguintes premissas:

Tempo de geração do sinal:  $T_{\text{máx}}=840$  segundos;

Intervalo de tempo para geração:  $\Delta t=0,10$  segundos;

Velocidade média do vento na altura de referência:  $\bar{U}(10) = 37,95\text{m/s}$ ;

Comprimento de rugosidade:  $z_0=0,07\text{m}$ .

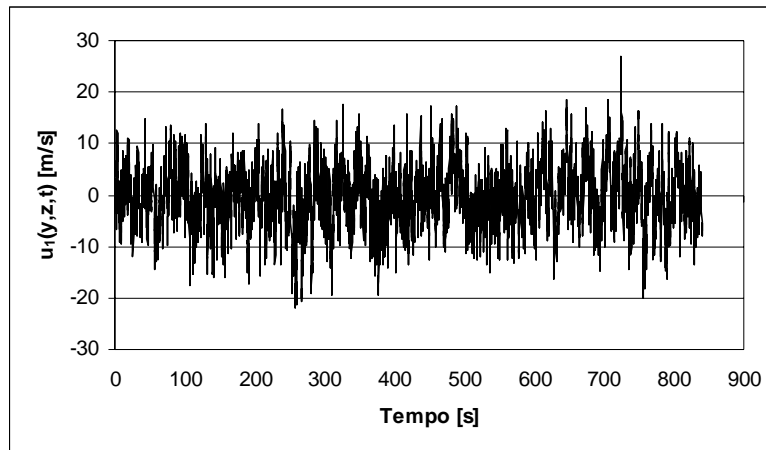
Essas dez funções configuram, portanto, a flutuação da velocidade do vento com correlação espacial ao longo da LT e apresentam as seguintes características:

Intensidade da turbulência longitudinal:  $I_y=0,14$ ;

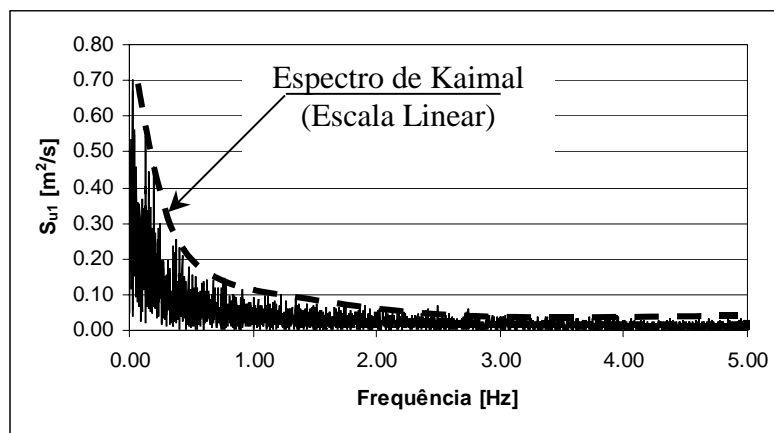
Valor raiz da média quadrática (RMS):  $\psi_u= 6,29\text{m/s}$ .

A intensidade de turbulência longitudinal – medida de dispersão em relação a  $\bar{U}(z)$  – é definida pela relação entre o desvio padrão e a velocidade média e, de modo geral, encontra-se no intervalo  $0,07\sim 0,15$ , como indicam SCANLAN E SIMIU [6] ou num intervalo mais amplo –  $0,05\sim 0,25$  – de acordo com DAVENPORT E NOVAK [44]. Convém lembrar que, por serem processos com média zero, o desvio padrão das funções representativas da turbulência longitudinal é igual ao valor RMS.

Como ilustração, a Figura VII.7 apresenta uma dessas funções,  $u_1(y,z,t)$ , acompanhada da respectiva densidade espectral,  $S_{u_1}$ , que reproduz o espectro de Kaimal em escala linear. A função densidade espectral é obtida com a aplicação da transformada rápida de Fourier à função  $u_1(y,z,t)$ .



(a) – História no Tempo



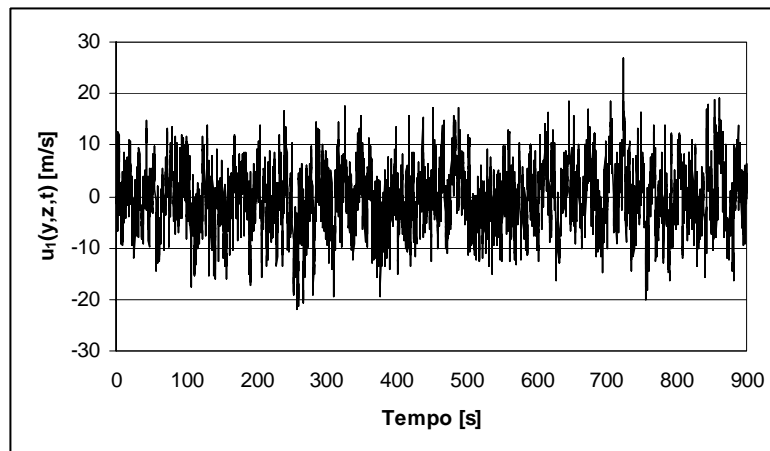
(b) – Função Densidade Espectral

Figura VII.7 – Turbulência – Função 1 ( $T_{\text{máx}}=840$  segundos)

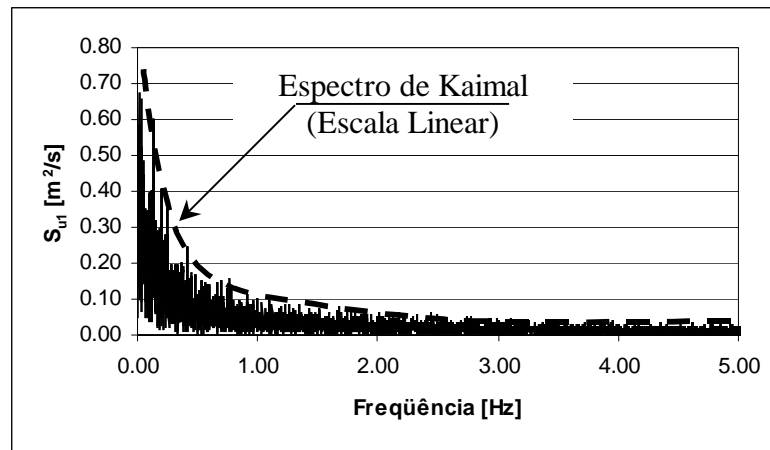
A natureza não-linear da solução do modelo estrutural pode acarretar instabilidade numérica que inviabilize a solução para determinadas histórias de turbulência, sem caracterizar, no entanto, qualquer comprometimento qualitativo na simulação numérica da turbulência atmosférica.

Esse comportamento pôde ser observado com a geração de histórias de vento para o tempo  $T_{\text{máx}}=900$  segundos, mantidas as mesmas características de rugosidade do terreno, velocidade do vento e intervalo de geração  $\Delta t$ . Essas novas funções apresentam os mesmos parâmetros estatísticos determinados para as funções geradas para 840 segundos,  $I_y=0,14$  e valor  $\text{RMS}=6,29$  m/s, assim como a função densidade espectral também reproduz o espectro de Kaimal (Figura VII.8). Entretanto, pequenas alterações de densidade espectral observadas na região de baixa frequência (Figura VII.9) certamente têm influência sobre os resultados, ainda que na quarta ou quinta casa

decimal, mas o bastante para inviabilizar a solução numérica não-linear num tempo  $t$  inferior até mesmo a 840 segundos.



(a) – História no Tempo



(b) – Função Densidade Espectral

Figura VII.8 – Turbulência – Função 1 ( $T_{m\acute{a}x}=900$  segundos)

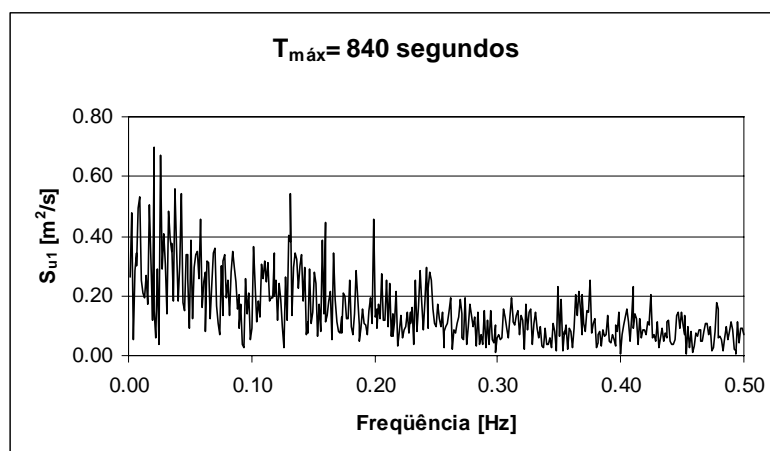


Figura VII.9a –  $T_{m\acute{a}x}=840$  s – Função Densidade Espectral – Intervalo 0,00 ~0,50 Hz

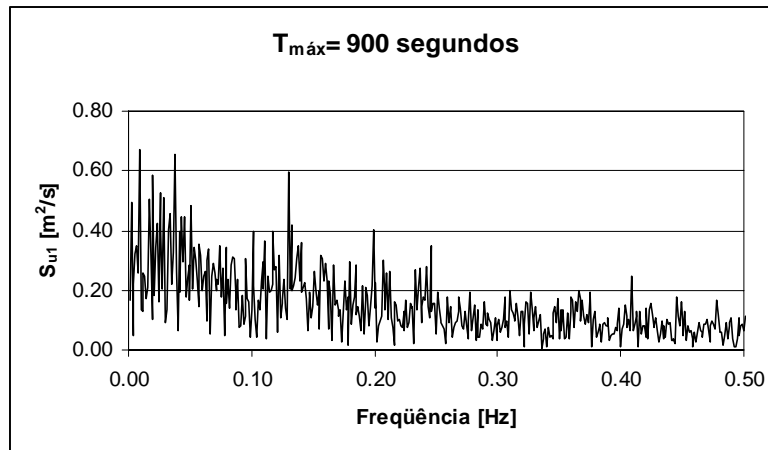


Figura VII.9b –  $T_{máx}=900$  s – Função Densidade Espectral – Intervalo 0,00 ~0,50 Hz

#### VII.1.4 Resultados do Modelo Dinâmico Não-Linear

A resposta do modelo 3D – MEF, definida no tempo  $T_{máx}$  igual a 840 segundos, é obtida para intervalos de tempo 0,001 e 0,01 segundos. A ação do vento sobre o modelo tem incidência na direção ortogonal à linha de transmissão e é discretizada na forma de cargas concentradas aplicadas aos nós, respeitando a área frontal efetiva de contribuição de cada nó.

Admite-se amortecimento proporcional à massa, característica das estruturas esbeltas, e taxa de 2% sobre o primeiro modo vibração, um valor típico de estruturas em aço com ligações parafusadas. Em relação aos cabos, essa taxa de amortecimento estrutural é elevada, YASUI *et alli*. [36], por exemplo, adotam  $\xi=0,4\%$  para os condutores elétricos, pára-raios e cadeias de isoladores. Desse modo, ao adotar uma única taxa de amortecimento,  $\xi=2\%$ , em todo o modelo estrutural reduz-se a influência da oscilação dos cabos na resposta dinâmica da torre.

A função densidade espectral  $S_x$  relativa à resposta em deslocamentos do ponto de suspensão dos condutores elétricos (Figura VII.10 – Nó 1), na direção de incidência do vento, mostra os picos correspondentes aos oito primeiros modos de vibração do condutor, incluídas as tensões iniciais induzidas pela componente estática das forças de arrasto (Figuras VII.11 e VII.12).

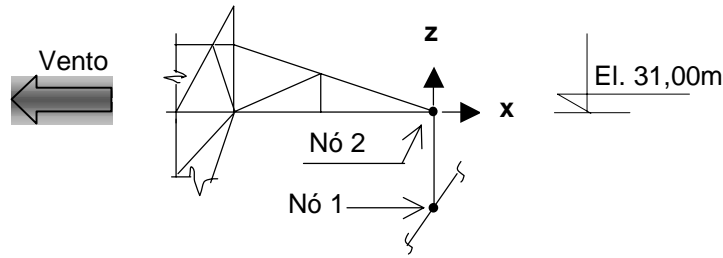


Figura VII.10 – Nós 1 e 2 - Detalhe

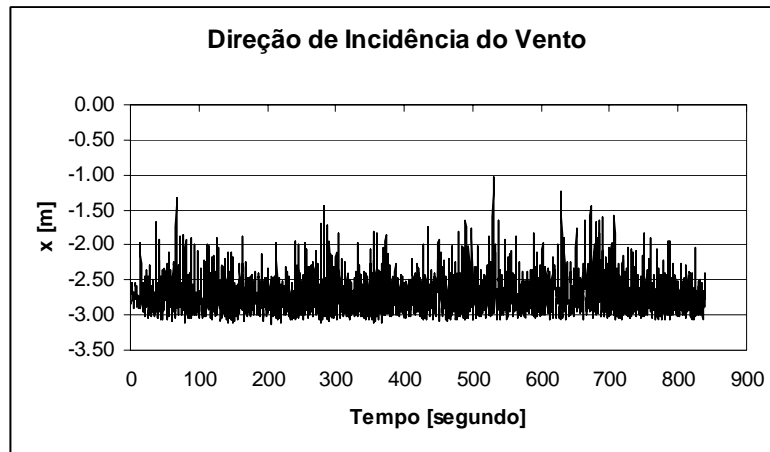


Figura VII.11 – Nó 1 – História de Deslocamentos na Direção X

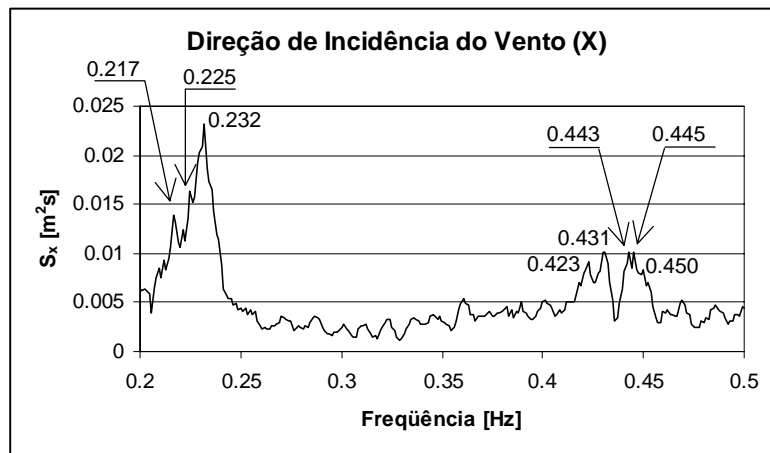


Figura VII.12 – Nó 1 – Densidade Espectral de Resposta (Direção X)

A influência da oscilação lateral dos cabos sobre as características dinâmicas da torre é comprovada ao observarmos a função densidade espectral relativa à resposta em deslocamentos (Figura VII.13), na direção do vento, da extremidade livre da viga em treliça (Figura VII.10 – Nó 2). O resultado da transformada rápida de Fourier (Figura

VII.14) mostra picos no intervalo 0 ~ 0,6 Hz, correspondentes aos primeiros modos de vibração da torre, uma faixa de frequências inferior à esperada – acima de 0,74 Hz. Esta última é a frequência fundamental que resulta da análise de vibração livre do modelo sem acoplamento, com as massas relativas aos condutores elétricos, pára – raios e cadeias de isoladores concentradas nos respectivos nós de ligação na torre, calculadas para o vão médio de 450m.

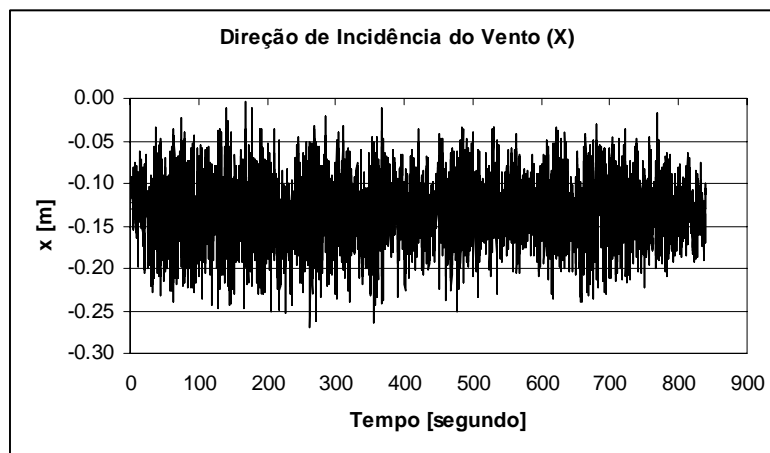


Figura VII.13 – Nó 2 – História de Deslocamentos na Direção X

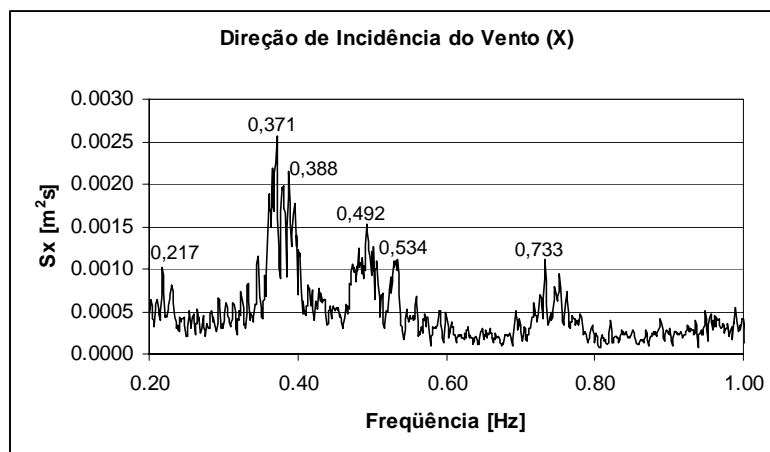


Figura VII.14 – Nó 2 – Densidade Espectral de Resposta (Direção X)

### VII.1.5 Verificação de Estabilidade e Resistência da Torre

Confirmando os resultados da análise dinâmica linear apresentados em [1], a análise dinâmica não-linear mostra com maior clareza o subdimensionamento dos montantes, assim como de outras barras localizadas no delta da torre (Figura VII.15).

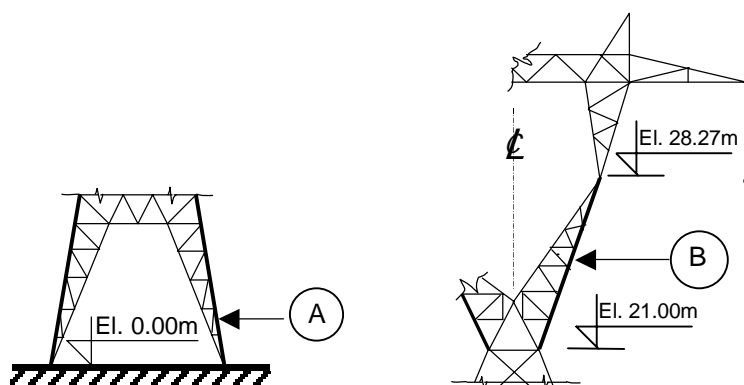


Figura VII.15 – Barras Subdimensionadas

A análise das histórias no tempo dos esforços axiais resultantes nos elementos do modelo estrutural indica o colapso da torre por falha dos montantes, sem que as cargas nominais de ruptura dos condutores elétricos e pára-raios tenham sido atingidas. A resultante de esforços utilizada nesse estudo está associada ao tempo  $t$  de ocorrência de máximos e mínimos de esforço axial, de modo a evitar hipóteses com nenhuma probabilidade de ocorrência.

Na verificação estrutural são obedecidas as prescrições da norma AISC – *Load and Resistance Factor Design* [45], desprezando-se os coeficientes de majoração de cargas. Os dois critérios de verificação – resistência e estabilidade – são violados.

A Tabela VII.2 apresenta os esforços axiais máximos de tração (positivo) e compressão (negativo) nos montantes, na ligação com a fundação. Os eixos ortogonais 2 e 3 são eixos geométricos da seção transversal. A verificação dos elementos estruturais, entretanto, foi realizada segundo os eixos principais de inércia da seção em perfil cantoneira.

Tabela VII.2 – Esforços Internos nos Montantes (El. 0,00m)

Elemento (Figura VII.15)	Tempo [s]	Esforço Axial [kN]	Momento [kNm]		
			M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	
(A) Montantes (El. 0,00m) L3” x 5/16” (ASTM A36)	Mín.	204,8	-233,0	42,7	17,6
	Máx.	204,8	219,0	48,6	13,3

A Tabela VII.3 contém os resultados da verificação das equações de interação (Equações VII.3) previstas na norma AISC – LRFD [45] para análise de elementos estruturais sujeitos a combinações de esforços axiais e de flexão:

A estabilidade elástica é verificada com a equação,

$$\left| \frac{P_u}{\phi P_n} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{uw}}{\phi_b M_{nw}} \cdot B_{1w} + \frac{M_{uz}}{\phi_b M_{nz}} \cdot B_{1z} \right) \right| \leq 1.0 \quad \text{para} \quad \frac{P_u}{\phi P_n} \geq 0.2 \quad (\text{VII.3a})$$

e a resistência é verificada com a equação,

$$\left| \frac{P_u}{\phi P_n} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{uw}}{\phi_b M_{nw}} + \frac{M_{uz}}{\phi_b M_{nz}} \right) \right| \leq 1.0 \quad \text{para} \quad \frac{P_u}{\phi P_n} \geq 0.2 \quad (\text{VII.3b})$$

onde,

$P_u$  – esforço normal solicitante de cálculo;

$P_n$  – esforço normal resistente de cálculo;

$M_u$  – momento fletor solicitante de cálculo;

$M_n$  – momento fletor resistente de cálculo;

$\phi$  – fator de minoração da resistência à tração/compressão = 0.90;

$\phi_b$  – fator de minoração da resistência à flexão = 0.90;

w, z – eixos principais de inércia (maior e menor inércia, respectivamente);

e, ainda,

$$B_1 = \frac{C_m}{1 - \frac{P_u}{P_{el}}} \geq 1.0 \quad (\text{VII.4})$$

onde  $C_m$  é o coeficiente de equivalência de momentos e  $P_{el}$  é a carga de flambagem elástica, definidos na AISC – LRFD [45].

Tabela VII.3 – Resultado da Verificação dos Montantes (Equações VII.3)

Elemento (Figura VII.15)	Estabilidade (Equação VII.3a)	Resistência (Equação VII.3b)
(A) Montantes (El. 0,00m) 3" x 5/16" (ASTM A36)	31,5 > 1(!)	22,0 > 1(!)

As histórias no tempo dos esforços axiais instalados nos montantes (Figura VII.16) mostram que, antes mesmo dos valores - pico serem atingidos no tempo  $t=204,8$  segundos, a estabilidade da torre está comprometida, e garantida a integridade dos cabos, já que a tração nestes instalada é sempre inferior às respectivas cargas nominais de ruptura; assunto a ser detalhado no próximo item.

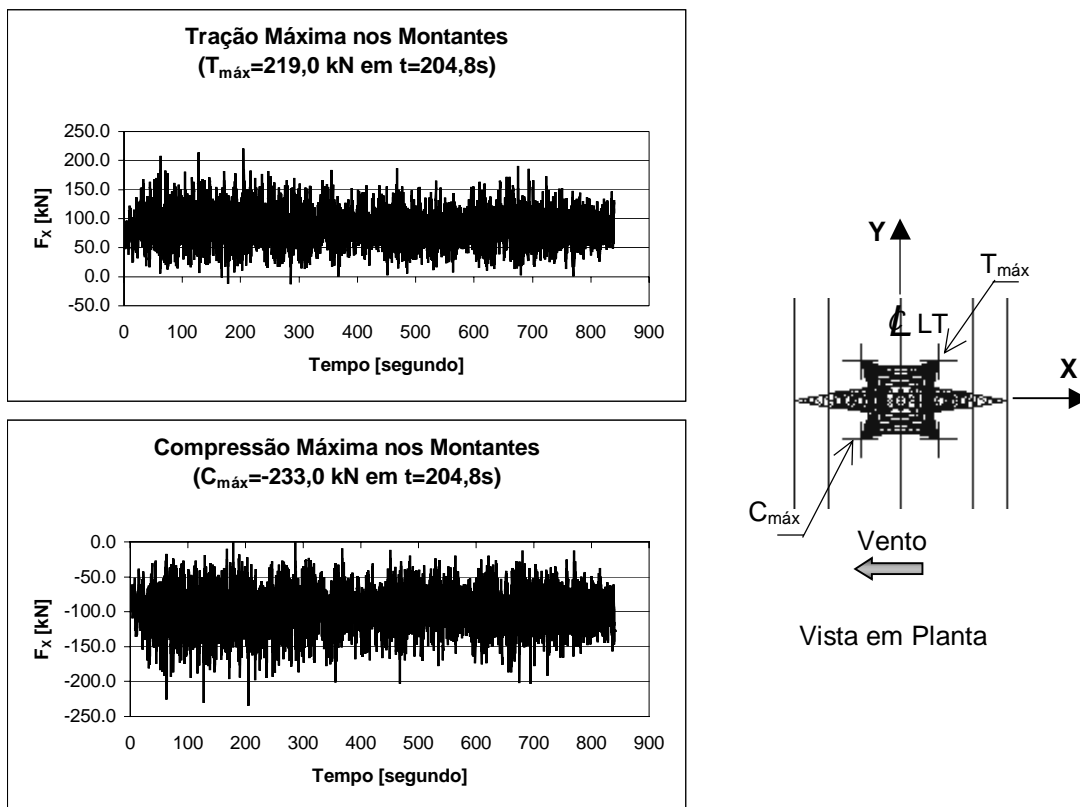


Figura VII.16 – Esforços Axiais nos Montantes – Histórias no Tempo

Novamente, enfatizando a influência da oscilação lateral dos cabos sobre o comportamento dinâmico da torre, a função densidade espectral,  $S_{F_x}$ , relativa à história dos esforços axiais no montante que apresenta tração máxima (Figura VII.16), mostra que essa força ocorre na faixa de frequências naturais do condutor elétrico, uma região

onde os picos antecedem a frequência natural estimada para a torre isolada,  $f_1=0,74$  Hz, (Figura VII.17).

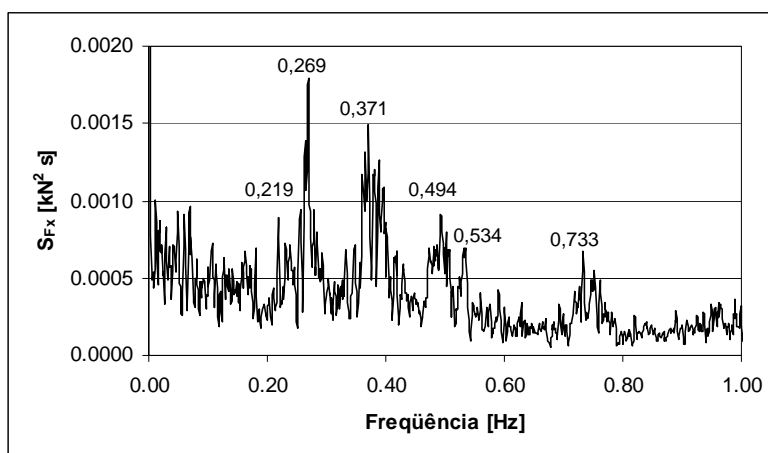


Figura VII.17 – Densidade Espectral de Resposta (Esforço Axial no Montante)

### VII.1.6 Análise dos Condutores Elétricos e Pára-Raios

Os esforços de tração instalados nos condutores elétricos e pára-raios são inferiores às respectivas cargas nominais de ruptura, como mostra a Tabela VII.4.

Tabela VII.4 – Forças de Tração nos Cabos

Cabo	Tração Instalada T [kN]		Carga Nominal de Ruptura $R_n$ [kN]	Coeficiente de Utilização $T/R_n$
	Mínimo	Máximo		
Condutor Elétrico	21.2	122.0	137.8	0.15 – 0.89
Pára-Raio	25.5	30.3	69.9	0.36 – 0.43

Nos condutores elétricos (Figura VII.18), ainda que tenha sido ultrapassado o coeficiente de utilização recomendado pela norma brasileira NBR 5422 [31] – 50% para linhas de transmissão sob ação de velocidade máxima do vento – a taxa de trabalho não é tão elevada que leve à atribuição do colapso à ruptura de cabos. Além disso, antes mesmo da tração máxima nos condutores elétricos ocorrer – 122,0 kN no tempo  $t=147,1$  segundos – a integridade da torre está comprometida por falha dos montantes e/ou barras localizadas no delta (Figura VII.15 – Elementos A e B), afastando a possibilidade da causa do colapso ser o rompimento de cabos elétricos. Observa-se ainda que

acidentes com ruptura de cabos estão associados, normalmente, ao fenômeno de vorticidade, sob ação de ventos de baixa velocidade (Tabela VII.5).

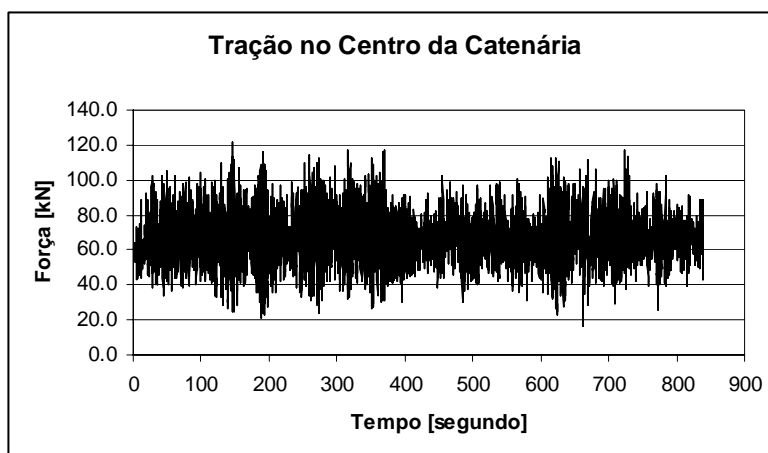


Figura VII.18 – História no Tempo do Esforço Axial no Condutor Elétrico

Tabela VII.5 – Análise da Torre no Tempo  $t=61,0$  segundos (Equações VII.3)\*

Elemento (Figura VII.15)	Esforço Axial [kN]	Momento [kNm]		Estabili- dade (VII.3a)*	Resis- tência (VII.3b)*	
		$M_2$	$M_3$			
(A) Montantes (Elevação 0,00m) L3" x 5/16" (A36)	Mín.	-197,7	32,5	-13,4	15,0	10,8
	Máx.	184,8	31,4	-15,7		
(B) Barras localizadas no delta L3" x 3/16"(A572 Gr.50)	Mín.	-46,4	92,4	-18,3	58,0	49,7
	Máx.	112,5	103,1	-27,9		

Os grandes deslocamentos dos condutores elétricos e bielas de suspensão no tempo  $t=147,1s$  correspondente ao máximo esforço de tração no cabo são ilustrados numa vista geral apresentada na Figura VII.19 e, em seguida, na Figura VII.20, aparecem, separadamente, para uma melhor visualização, as projeções horizontal e vertical relativas às deformadas do condutor elétrico. Estes resultados reproduzem o comportamento de uma linha de transmissão real, conforme o registro de W. LEIBFREID e H.MORS apresentado na Figura V.2 (Estação Experimental de Hornisgrinde, Alemanha, 1964).

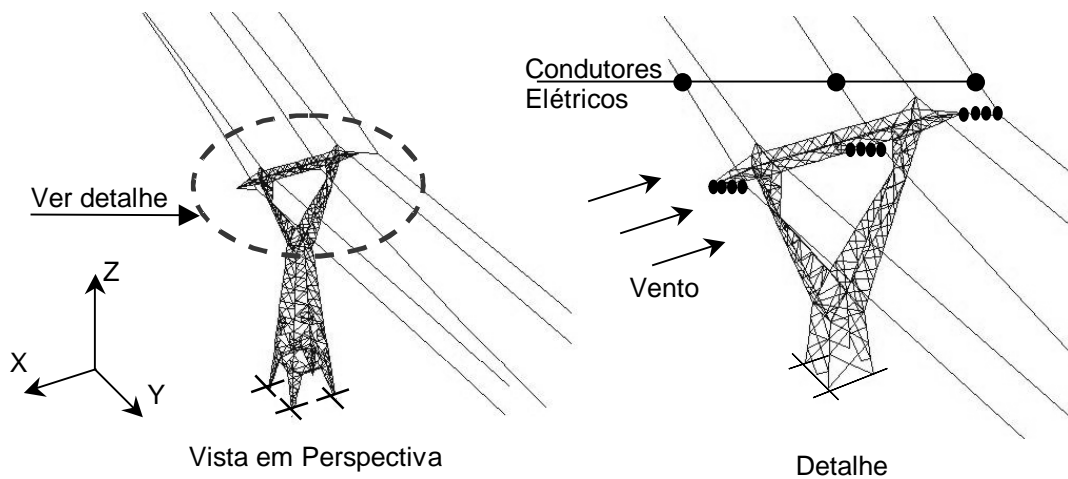


Figura VII.19 – Deformada no Tempo  $t=147,1$  segundos (Vista Geral)

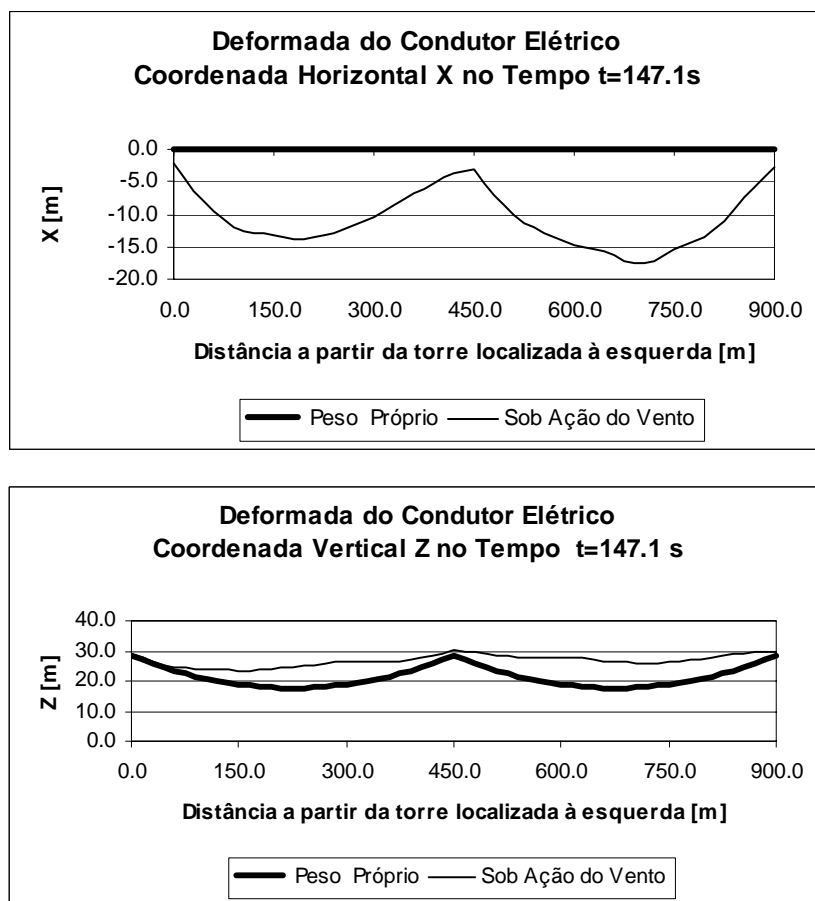


Figura VII.20 – Geometria do Condutor Elétrico no Tempo  $t=147,1$  segundos (Máximo Esforço de Tração no Cabo)

A Figura VII.21 mostra a variação da força de tração instalada nos pára-raios, definida no tempo. Em seguida, nas Figuras VII.22, delinea-se a geometria do cabo, no tempo  $t=147,1s$ , com as coordenadas X e Z indicadas separadamente. De modo a evitar resultados muito conservadores, uma vez que a correlação espacial da flutuação da velocidade do vento com a altura acima do terreno é desprezada, e, principalmente, com a finalidade de melhor caracterizar a causa do colapso, já identificada na oscilação dos condutores elétricos, estes resultados foram obtidos admitindo os pára-raios sem a parcela flutuante da velocidade do vento.

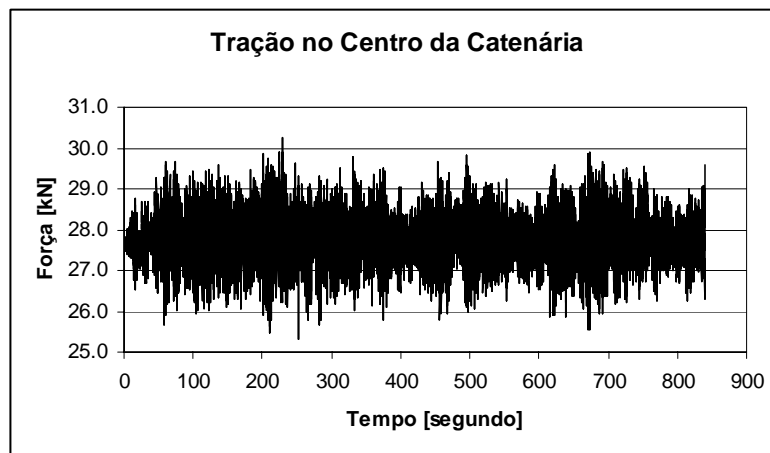


Figura VII.21 – História no Tempo do Esforço Axial no Pára-Raio

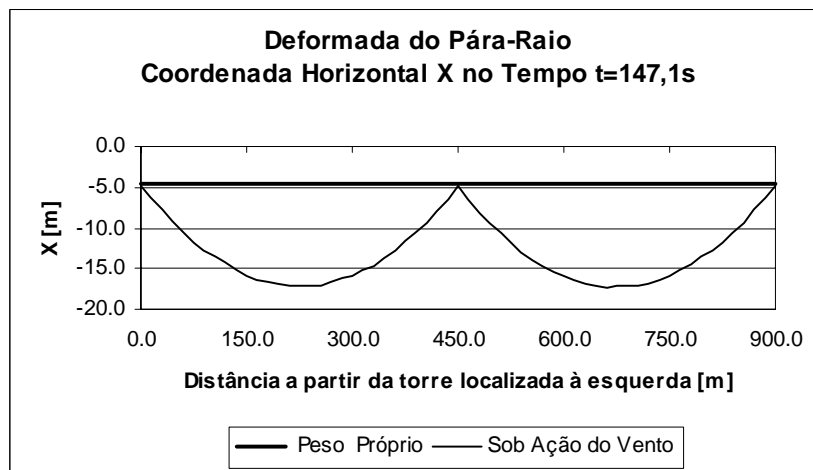


Figura VII.22a – Geometria do Pára-Raio no Tempo  $t=147,1 s$  – Coordenada Horizontal

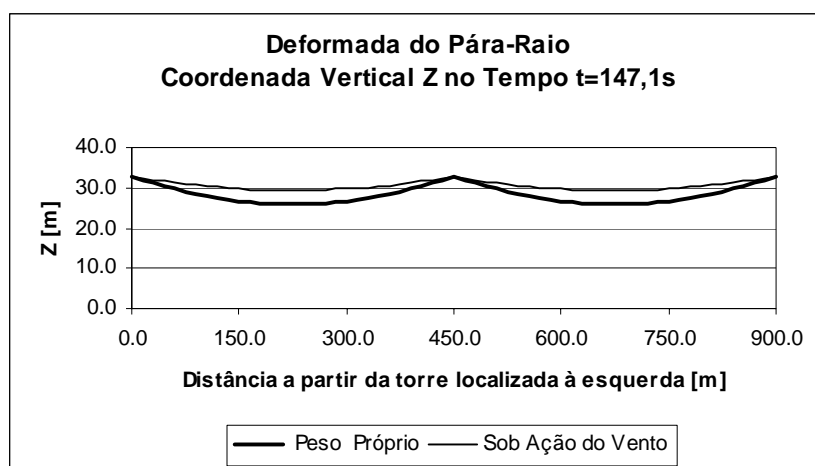


Figura VII.22b – Geometria do Pára-Raio no Tempo  $t=147,1$  s – Coordenada Vertical

### VII.1.7 Comportamento do Conjunto Cadeias de Isoladores - Condutores Elétricos

O objetivo deste item é analisar o comportamento mecânico das cadeias de isoladores por meio das histórias das respostas das oscilações não-lineares e de esforços axiais a que estão submetidas, quando as linhas estão expostas à ação do vento. Observa-se na Figura VII.23 que esses elementos encontram-se tracionados durante os 840 segundos utilizados na análise.

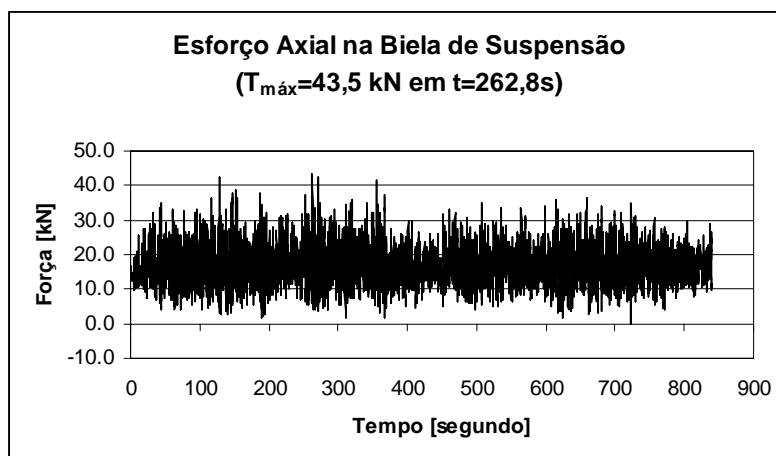


Figura VII.23 – Esforço Axial na Biela de Suspensão – História no Tempo

As diversas configurações a que está sujeito o conjunto formado pelas cadeias de isoladores e condutores elétricos são traçadas na Figura VII.24, a partir da análise dos ângulos no plano XZ,  $\theta_1$  e  $\theta_2$ , observados nas ligações torre – isoladores e isoladores – condutor (projeção da catenária no centro do vão); uma dessas configurações já foi apresentada na Figura VII.19 e na ilustração fotográfica da Figura V.2. Esses ângulos,

calculados a partir dos respectivos deslocamentos nodais nos eixos X e Z, são predominantemente negativos tendo em vista que a incidência do vento se dá no sentido negativo do eixo global X, e têm as respectivas histórias no tempo apresentadas na Figuras VII.25 e VII.26.

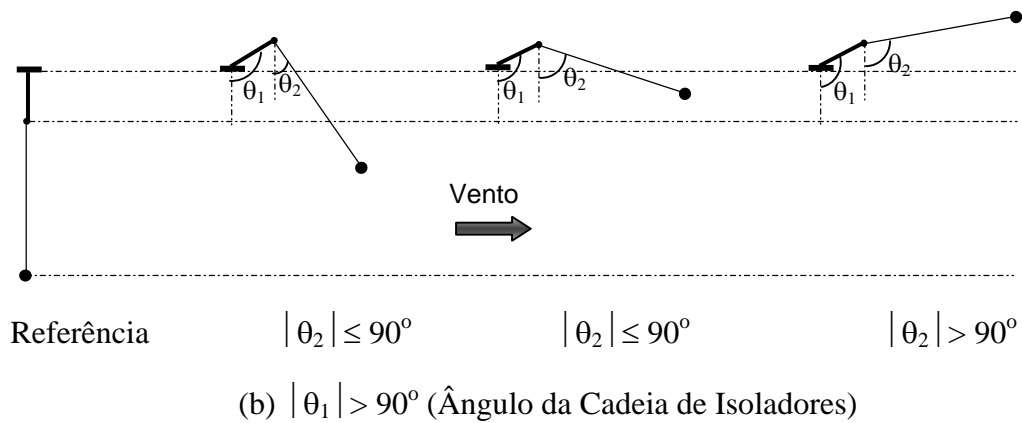
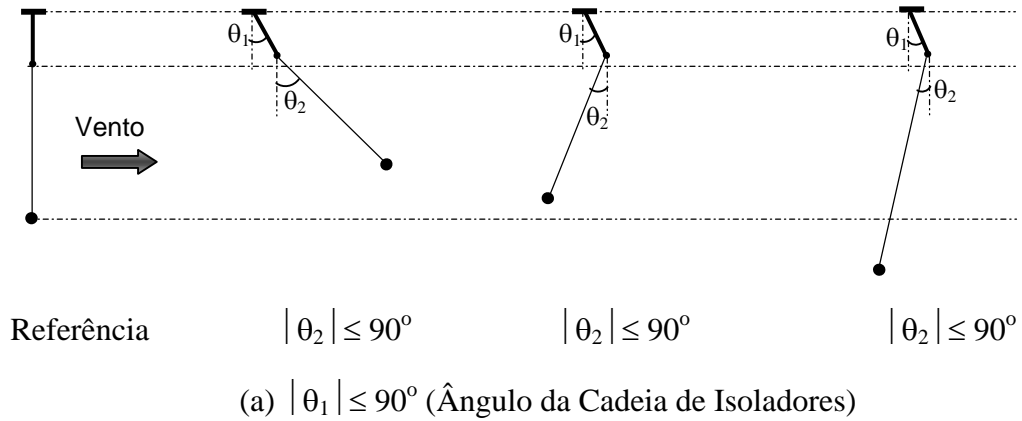


Figura VII.24 – Configurações do Conjunto sob Ação do Vento

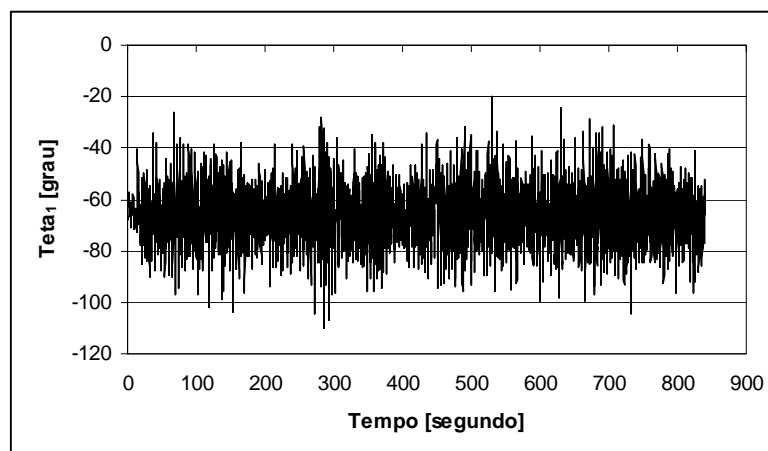


Figura VII.25 – Ângulo da Cadeia de Isoladores ( $\theta_1$ )– História no Tempo

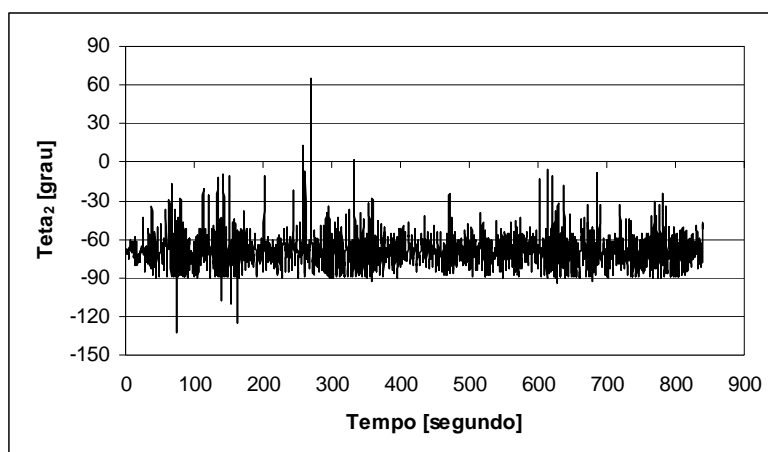


Figura VII.26 – Ângulo do Condutor Elétrico ( $\theta_2$ ) – História no Tempo

Dentre as configurações delineadas na Figura VII.24, a última delas requer uma justificativa. Uma estrutural real, ou seja, uma linha de transmissão em operação, exposta à ação do vento, mantém-se numa posição praticamente horizontal apenas se a velocidade média do vento sustentar-se por algum tempo e, além disso, seu valor for tal que desperte forças de tração nos cabos semelhantes àsquelas induzidas pela ação da gravidade. Os resultados obtidos com o modelo estrutural, entretanto, mostram que, além de posicionarem-se na horizontal ( $\theta_2 \cong 90^\circ$ ), é possível ultrapassar esta configuração e atingir ângulos da ordem de  $130^\circ$ . Ora, se a força de sustentação é nula em cabos singelos, e foi omitida no modelo estrutural, a configuração que apresenta o ângulo  $\theta_2 \cong 130^\circ$  deve ser atribuída à aproximação de um outro modo de vibração, possivelmente um modo de oscilação longitudinal dos condutores elétricos.

A variação do ângulo  $\theta_2$  no tempo (Figura VII.26) mostra a flutuação do condutor elétrico em torno da posição de equilíbrio –  $\theta_2 \cong 69,2^\circ$  – induzida pelas forças de arrasto e flecha no centro do vão da linha de transmissão igual a 14,5m (Figura VII.27).

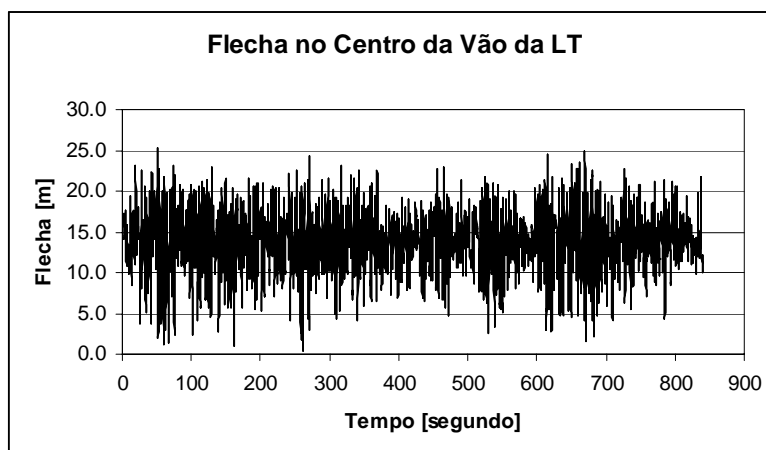
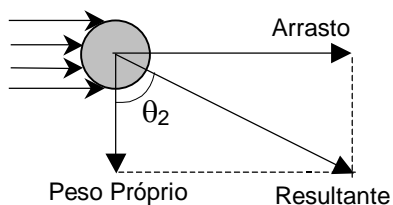


Figura VII.27 – Flecha do Condutor Elétrico – História no Tempo

Essa posição de equilíbrio é estimada na fase de detalhamento da linha de transmissão, onde o ângulo do condutor elétrico e a flecha da catenária no meio do vão são determinados pelas Equações VII.5 e VII.7, respectivamente, apresentadas por LABEGALINI *et alli.* em [30]. Aplicando-as ao modelo em estudo, são confirmados os valores obtidos na análise numérica, como mostra o cálculo detalhado a seguir.

Ângulo do Condutor Elétrico



$$\theta_2 = \arctan \frac{\text{Arrasto}}{\text{Peso Próprio}} \quad (\text{VI.5})$$

Figura VII.28 – Ângulo do Condutor Elétrico sob Ação de Forças de Arrasto

No modelo analisado temos:

- Peso Próprio =  $p_p = 13,0 \text{ N/m}$
- Arrasto =  $F_a = \frac{1}{2} \rho D C_D \bar{U}_{El.28,15m}^2 = 33,32 \text{ N/m}$

onde,

$\rho$  – massa específica do ar =  $1,226 \text{ kg/m}^3$ ,

$D$  – diâmetro do condutor elétrico =  $25,16 \text{ mm}$ ,

$C_D$  – coeficiente de arrasto =  $1,10$ ,

$\bar{U}_{El.28,15m}$  – velocidade média = 44,32 m/s.

Logo, de acordo com a Equação VII.5, temos  $\theta_2 \cong 68,7^\circ$ .

### Flecha do Condutor Elétrico no Centro do Vão

A flecha do condutor no ponto médio do vão é calculada a partir de uma estimativa da força de tração num vão isolado de cabo, sob ação do peso próprio e forças de vento. Para tanto, partindo-se de um estado de referência – estado 1– onde o condutor elétrico encontra-se sob ação da tração de projeto  $T_{01}$ , por exemplo, determina-se a tração no cabo relativa a um estado 2,  $T_{02}$ , em que o condutor elétrico encontra-se sob ação do peso próprio, forças de vento e, até mesmo, variação de temperatura. As equações de “mudança” de estado utilizadas nessa estimativa (Equações VII.6 e VII.7) são encontradas na referência [30] e foram deduzidas em função da curva descrita pelo cabo: a catenária tradicional (Equação VI.6) ou a forma simplificada de uma parábola (Equação VII.7).

#### **Catenária:**

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{1}{\alpha_t} \left[ \left( \frac{C_2 \sinh \frac{L}{2C_2}}{C_1 \sinh \frac{L}{2C_1}} - 1 \right) - \frac{1}{EA} (T_{02} - T_{01}) \right], \text{ onde } C_i = \frac{T_{0i}}{p_i}, i = 1,2 \quad (\text{VII.6})$$

#### **Parábola:**

$$T_{02}^3 + T_{02}^2 \left[ \frac{EA p_1^2 L^2}{24 T_{01}^2} + EA \alpha_t (t_2 - t_1) - T_{01} \right] = \frac{EA p_2^2 L^2}{24} \quad (\text{VII.7})$$

onde, referentes ao condutor elétrico no estado  $i$ ,  $i=1,2$ , temos:

$T_{0i}$  – força de tração [N],

$t_i$  – temperatura [ $^\circ\text{C}$ ],

$p_i$  – carga distribuída no cabo [N/m],

$E$  – módulo de elasticidade do material [ $\text{N/m}^2$ ],

$L$  – vão médio da linha de transmissão [m],

$A$  – área da seção transversal [ $\text{m}^2$ ],

$\alpha_t$  – coeficiente de dilatação térmica do material [ $^{\circ}\text{C}$ ].

A solução mais simples consiste em evitar equações transcendentais, ou seja, admitir o traçado do cabo na forma de parábola. Desse modo, aplicando a Equação VII.6 ao modelo em estudo, temos:

- Estado 1 – tração de projeto:

$$T_{0_1} = 31500 \text{ N},$$
$$p_1 = \text{peso próprio} = 13,0 \text{ N/m};$$

- Estado 2 – peso próprio e ação de vento, sem variação de temperatura:

$$T_{0_2} = \text{a determinar},$$
$$p_2 = \text{Resultante (Figura VI.28)} = \sqrt{pp^2 + F_a^2} = 35,77 \text{ N/m},$$
$$t_2 = t_1 \Rightarrow \Delta t = 0;$$

e as características do condutor elétrico:

$E = 7,66 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ,  $L = 450 \text{ m}$ ,  $A = 3,75 \times 10^{-4} \text{ m}^2$  e  $\alpha_t = 1,8 \times 10^{-5} /^{\circ}\text{C}$  que, substituídos na Equação VI.7, resulta  $T_{0_2} \cong 64\ 600\text{N}$ .

Finalmente, a flecha estimada no centro da catenária será:

$$s = \frac{T_{0_2}}{p_2} \left[ \cosh \frac{p_2 L}{2T_{0_2}} - 1 \right] = \frac{64600}{35,77} \left[ \cosh \frac{35,77 \times 450}{2 \times 64600} - 1 \right] \cong 14,03 \text{ m} \quad (\text{VII.8})$$

ou, por coerência, admitindo a forma parabólica,

$$s = \frac{p_2 L^2}{8T_{0_2}} = \frac{35,77 \times 450^2}{8 \times 64600} \cong 14,02 \text{ m}. \quad (\text{VII.9})$$

### VII.1.8 Resultados para o Modelo Estrutural sob Ação de Tormenta Elétrica

Considere no modelo dinâmico não-linear do sistema estrutural sob análise, a incidência de uma língua de vento (Figura V.7) sobre a torre delta, com velocidade média de 44,32 m/s. No perfil vertical traçado segundo a lei de Hellman (Figura VII.6), essa é a velocidade corresponde à El. 28,15m, ou seja, à ligação dos condutores elétricos às cadeias de isoladores. Desse modo, mantém-se sobre os cabos elétricos as mesmas forças de vento definidas anteriormente, e aumenta-se as forças de arrasto sobre a torre.

A Figura VII.29 apresenta a resposta em deslocamentos, definida no tempo, relativa à extremidade livre da viga em treliça (Nó 2 – Figura VII.10). Comparada à resposta apresentada na seção VII.1.4 (Figura VII.13) observa-se que, em termos de deslocamentos, a resposta da torre sofre pequena alteração quando sob efeito de uma língua de vento com velocidade média de 44,32m/s. Da mesma forma, como mostra a Figura VII.30, os esforços axiais nos montantes também sofrem pequena variação quando comparados aos resultados apresentados na Figura VII.16.

Esse comportamento reforça o comentário apresentado nas Referências [1,2] a respeito da composição dos esforços resultantes na torre sob ação de vento com incidência ortogonal à linha de transmissão: a maior parcela desses esforços (80% ~ 90%) deve-se às forças de vento nos cabos; esse também é um dos motivos da correlação espacial da velocidade do vento ao longo da altura da torre ter sido desprezada no modelo estrutural proposto [1,2].

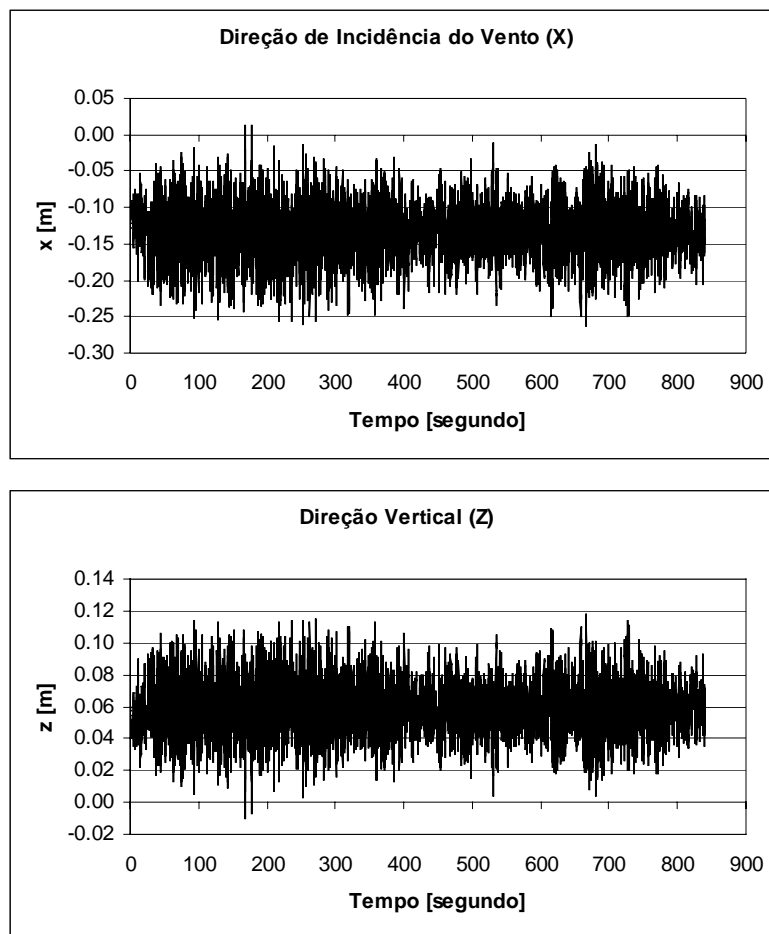


Figura VII.29 – Deslocamentos na Extremidade da Viga em Treliça sob Ação de Língua de Vento com Velocidade Média 44,32 m/s (Nó 2 – Figura VII.10)

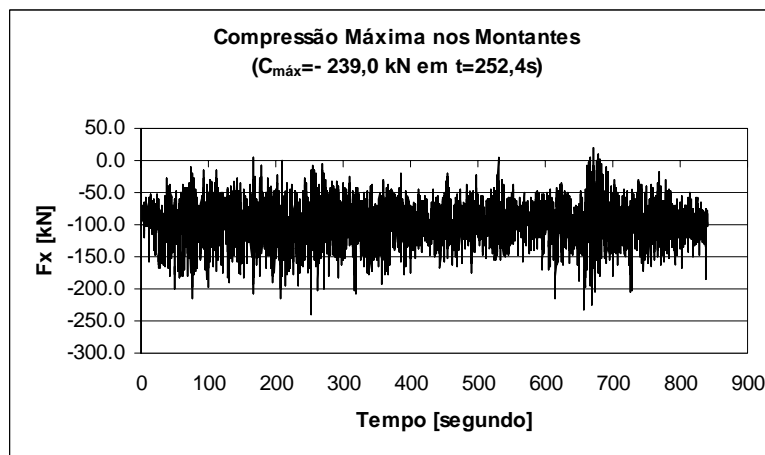
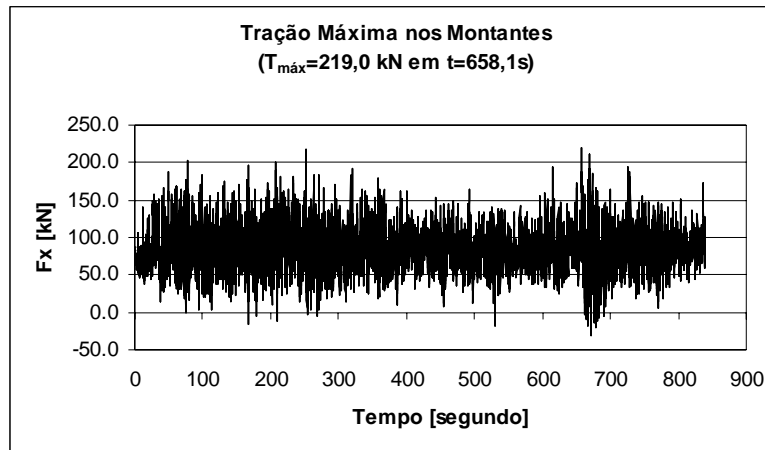


Figura VII.30 – Esforços Axiais nos Montantes sob Ação de Língua de Vento

A Tabela VII.6 resume os resultados encontrados na verificação desses elementos estruturais, na seção transversal de ligação com a fundação.

Tabela VII.6 – Verificação dos Montantes sob Ação de Língua de Vento sobre a Torre

Elemento	Esforço Axial [kN]	Momento [kNm]		Estabilidade (Eq.VII.3a)	Resistência (Eq.VII.3b)
		$M_2$	$M_3$		
Montantes (Elevação 0,00m)	Mín. -239,0	38,7	-16,9	17,9 (!)	20,6 (!)
L3" x 5/16" (A36)	Máx. 219,0	54,2	-11,1		

Esses resultados ao serem associados à pequena probabilidade de ocorrência de uma língua de vento sobre uma torre TEE, apontam para a não inclusão deste carregamento no projeto de novas torres.

### VII.1.9 Resultados do Modelo Dinâmico Linear

A análise dinâmica linear foi executada pelo método da superposição modal, admitindo a contribuição dos primeiros cinquenta modos de vibração no cálculo da resposta do modelo estrutural à ação do vento, o que significa incluir as frequências naturais no intervalo de 0,217Hz a 0,715Hz.

Assim como na análise dinâmica não-linear, o tempo de duração é  $T_{\max}=840s$ , entretanto, o intervalo de integração pôde ser aumentado para 0,10 segundos, ou seja, inferior a um décimo do maior período do modelo estrutural considerado na análise,  $P_{50} = 1,4s$ .

Na avaliação do número representativo de modos de vibração a serem considerados no cálculo da resposta estrutural foi observado que já não haviam alterações significativas a partir de trinta modos de vibração, o que pode ser confirmado com a análise da função densidade espectral,  $S_x$ , relativa à história de deslocamentos horizontais na extremidade da viga em treliça (Figura VII.10 – Nó 2) obtida na análise dinâmica não-linear (Figura VII.31): os picos entre as frequências  $f_{33} = 0,574Hz$  e  $f_{50} = 0,715Hz$  têm, praticamente, a mesma densidade espectral  $S_x$ , todos de pequena magnitude.

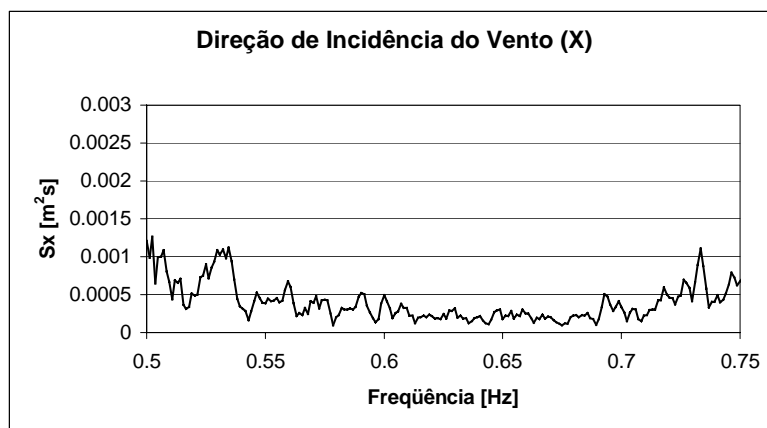


Figura VII.31 – Espectro de Resposta no Intervalo 0,5~0,75 Hz – Nó 2

Questionamentos a respeito do grande número de modos de vibração necessários para a análise dinâmica linear são justificados pela não-implementação, no algoritmo numérico, do método de Lanczos-Ritz para a solução do problema de autovalor. Baseando-se no princípio de que a resposta dinâmica de uma estrutura é também função da distribuição espacial do carregamento dinâmico a que está submetida, o método de

Lanczos utiliza esta distribuição nos vetores de Ritz – método de Lanczos-Ritz – para reduzir a dimensão do problema de autovalores e, conseqüentemente, o tempo de processamento, ao eliminar aqueles modos de vibração que não contribuirão para a resposta estrutural. Assim sendo, otimiza-se o número de modos de vibração sem comprometer quantitativa e qualitativamente os resultados da análise.

Desse modo, já que na análise dinâmica linear a distribuição espacial do carregamento dinâmico não foi considerada no cálculo dos autovalores, os modos de oscilação lateral e longitudinal dos condutores elétricos e pára-raios são identificados um a um, ou seja, os tres primeiros modos de vibração têm a mesma freqüência, 0,217Hz, e caracterizam a oscilação lateral de cada um dos condutores elétricos individualmente.

Assim como na análise não-linear, as mesmas características de amortecimento foram admitidas para todo o modelo: amortecimento proporcional à massa, com taxa de 2% sobre o primeiro modo de vibração.

#### Verificação de Estabilidade e Resistência da Torre

A Tabela VII.7 apresenta os esforços internos nos montantes no tempo  $t$  correspondente aos esforços axiais máximos, lembrando sempre que o sinal negativo indica compressão na barra. Os eixos locais 2 e 3 são os eixos geométricos da seção transversal.

Neste caso também, os montantes encontram-se subdimensionados na região de ligação com a fundação, conforme a verificação das equações de iteração da AISC – LRFD [45], Equações VII.3, que resulta em 21,6 para efeito de estabilidade da barra (Eq. VII.3a) e 14,7 na verificação do escoamento da seção bruta (Eq. VII.3b).

Tabela VII.7 – Esforços Internos nos Montantes (Análise Dinâmica Linear)

Elemento (Figura VII.15)	Tempo [s]	Esforço Axial [kN]	Momento [kNm]		
			M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	
(A) Montantes (El. 0.00m) L3" x 5/16" (ASTM A36)	Mín.	330,7	-254,0	32,8	4,4
	Máx.	330,7	226,0	33,3	4,7

### Análise dos Condutores Elétricos e Pára-Raios

A envoltória de esforços de tração nos cabos (Tabela VII.8) mostra que o coeficiente de utilização 1,31 referente aos condutores elétricos é, aproximadamente, 50% acima do valor máximo encontrado na análise não-linear dinâmica, 0,89 (Tabela VII.4). Esse resultado é bastante conservador e mostra que a análise dinâmica linear é insuficiente e inadequada para a análise do comportamento aeroelástico e da estabilidade estrutural do sistema acoplado torres – cabos elétricos.

Além disso, convém ressaltar que a taxa de utilização igual a 131% pode induzir à interpretação incorreta do colapso de torres porque, em termos de esforços no condutor elétrico, torna possível atribuir a queda das torres à ruptura de condutores elétricos.

Tabela VII.8 – Esforços de Tração nos Cabos (Análise Dinâmica Linear)

Elemento	Tração Instalada T [kN]		Carga Nominal de Ruptura R <sub>n</sub> [kN]	Coeficiente de Utilização $T/R_n$
	Mínimo	Máximo		
Condutor Elétrico	2,7	180,0	137,8	0,02 – 1,31
Pára-Raio	26,1	29,2	69,9	0,37 – 0,42

### Cadeias de Isoladores

Este é o componente da linha de transmissão que apresenta o pior resultado quando tratado de forma dinâmica linear: a história dos esforços axiais ilustrada na Figura VII.32 mostra que as cadeias de isoladores encontram-se sempre tracionadas, no entanto, o valor máximo do esforço de tração é muito superior ao encontrado na análise dinâmica não-linear, passando de 43,5 kN a 26600,0 kN.

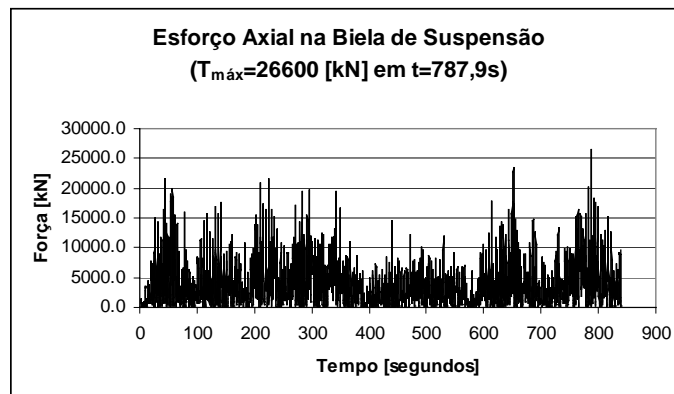


Figura VII.32 – Esforço Axial na Biela de Suspensão – História no Tempo

### VII.1.10 Comparação entre Resultados dos Modelos Dinâmicos Linear e Não-Linear

Com a finalidade de enfatizar a importância do modelo dinâmico não-linear para a análise de sistemas de transmissão de energia elétrica sob ação do vento, as Tabelas VII.9 a VII.11 resumem e comparam os resultados obtidos com os dois modelos: linear e não-linear.

#### Torre

Tabela VII.9 – Comparação dos Resultados de Esforços Internos nos Montantes

Montante (Figura VII.15)		Tempo [s]	Esforço Axial [kN]	Momento [kNm]	
				M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>
Modelo Dinâmico Não-Linear	Mín.	204,8	-233,0	42,7	17,6
	Máx.	204,8	219,0	48,6	13,3
Modelo Dinâmico Linear	Mín.	330,7	-254,0	32,8	4,4
	Máx.	330,7	226,0	33,3	4,7

#### Condutores Elétricos

Tabela VII.10 – Comparação dos Resultados de Esforços Internos nos Condutores Elétricos

Condutor Elétrico	Tração Instalada T [kN]		Carga Nominal de Ruptura R <sub>n</sub> [kN]	Coeficiente de Utilização $T/R_n$
	Mínimo	Máximo		
Modelo Dinâmico Não-Linear	21,2	122,0	137,8	0,15 – 0,89
Modelo Dinâmico Linear	2,7	180,0		0,02 – 1,31

#### Cadeias de Isoladores

Tabela VII.11 – Comparação dos Resultados de Esforços Internos nas Cadeias de Isoladores

Cadeia de Isoladores	Tração Máxima Instalada T [kN]
Modelo Dinâmico Não-Linear	43,5
Modelo Dinâmico Linear	26600,0

## VII.2 – VERIFICAÇÃO DA TORRE DA CEEE VIA MODELAGEM DINÂMICA NÃO-LINEAR

Esta seção é dedicada à verificação da torre da CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica do Rio Grande do Sul, com histórico de acidente ocorrido em maio de 1998, envolvendo o colapso de tres torres, no município de Uruguaiana – RS, durante um temporal acompanhado de fortes ventos. Na época, os jornais locais noticiaram que a velocidade do vento teria ultrapassado 80 km/h, havendo também registros de que na cidade de Manoel Viana, próxima a Uruguaiana, os ventos teriam atingido 150 km/h. No entanto, essas indicações a respeito da velocidade atingida pelo vento devem ser vistas com reserva, já que a origem desses dados não pôde ser identificada.

A estrutura analisada apresenta silhueta tipo delta (Figura VII.33), é do tipo suspensão em alinhamento reto, foi projetada em perfis cantoneira com padrão em pogramadas, aço ASTM A36 e de alta resistência ASTM A242, com ligações parafusadas.

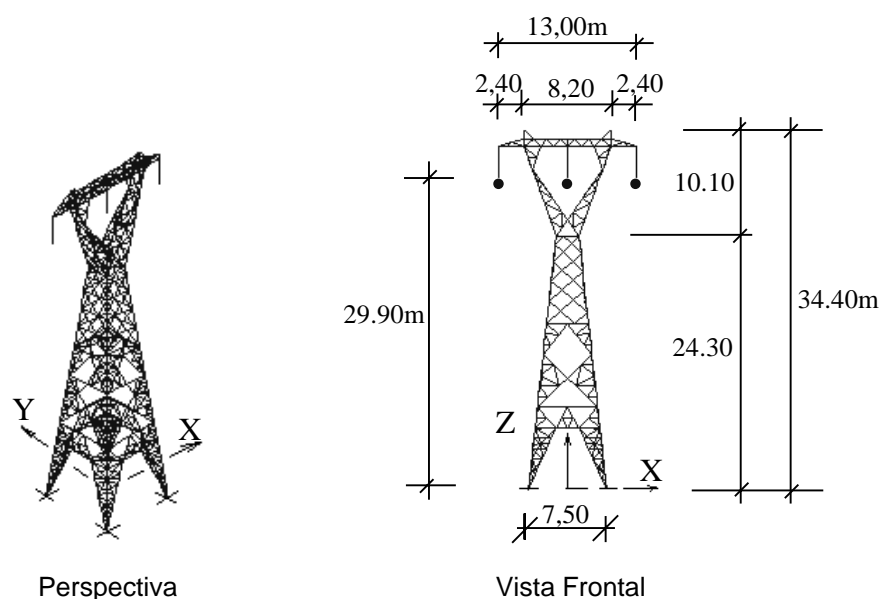


Figura VII.33 – Silhueta da Torre da CEEE

Na época da construção da linha, a CEEE tinha concessão na mesma área da Eletrosul e, portanto, sistema de transmissão com as mesmas características daquele apresentado na seção VII.1. Assim sendo, temos o mesmo sistema de 230 kV composto por três condutores elétricos padrão Grosbeak (diâmetro 25,16mm), dois cabos pára-

raios em aço galvanizado EHS 3/8 in (diâmetro 9,15mm), vão médio de 450m e cadeias de isoladores formando bielas de suspensão de aproximadamente 2,90m<sup>1</sup>.

### VII.2.1 – Características Dinâmicas do Modelo Estrutural

Por tudo que foi dito até aqui sobre o comportamento do sistema estrutural, as características dinâmicas do modelo são previsíveis, já que a linha de transmissão tem as mesmas características daquela analisada na seção VII.1: são os mesmos modos de vibração e frequências naturais obtidos em [1] e rerepresentados na Tabela VII.1 e Figuras VII.2 a VII.5.

A Tabela VII.12 apresenta a resposta da estrutura em regime de vibração livre não amortecida, sob tensões de iniciais – peso próprio e tração de projeto nos cabos – e, em seguida, as Figuras VII.34 a VII.43 ilustram os dez primeiros modos de vibração do modelo estrutural.

Tabela VII.12 – Torre CEEE – Frequências Naturais e Formas Modais de Vibração

Modo	Frequência [Hz]	Modo de Vibração	Oscilação
1	0,160	To/CE	Lateral
2	0,174	CE	Longitudinal
3	0,207	To/PR	Lateral
4	0,290	CE/PR	Longitudinal
5	0,323	CE/PR	Longitudinal
6	0,335	CE/PR	Longitudinal
7	0,486	To/CE/PR	Lateral
8	0,689	CE/PR	Longitudinal
9	1,830	To/CE/PR	Lateral
10	2,303	To/CE/PR	Longitudinal

**To** = Torre                      **CE** = Condutor Elétrico                      **PR** = Pára-raios

<sup>1</sup> LT 230 kV Alegrete 2 – Uruguaiana 5, Correspondência CEEE (DELT – Dpto. Exp. LT’s) em 14/11/2003.

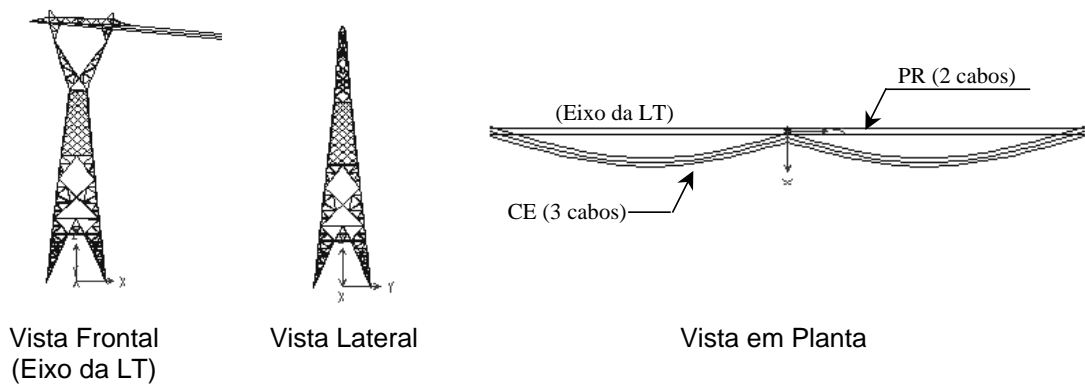


Figura VII.34 – Torre CEEE – Modo 1 – Oscilação Lateral ( $f_1=0,160$  Hz)

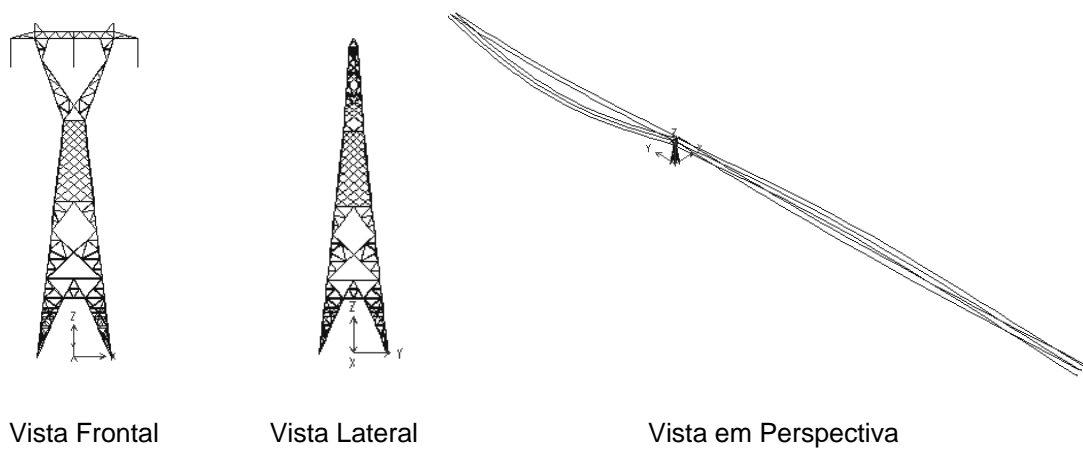


Figura VII.35 – Torre CEEE – Modo 2 – Oscilação Longitudinal ( $f_2=0,174$  Hz)

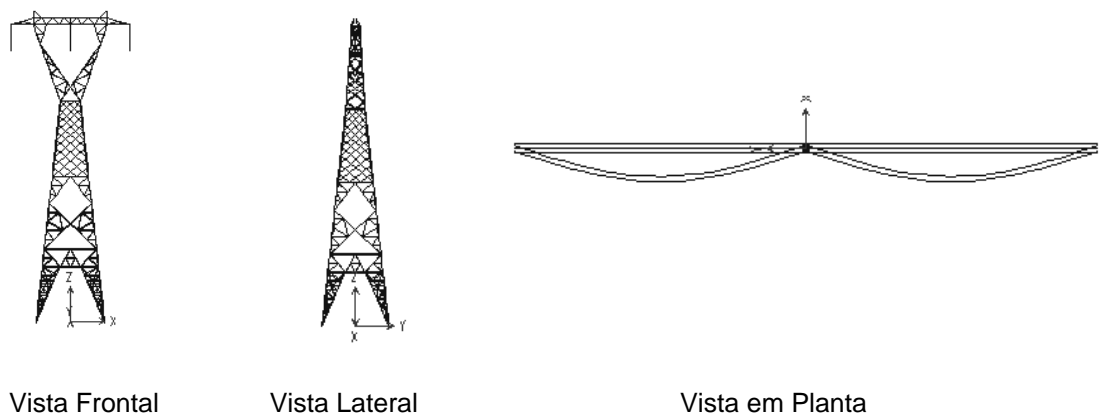
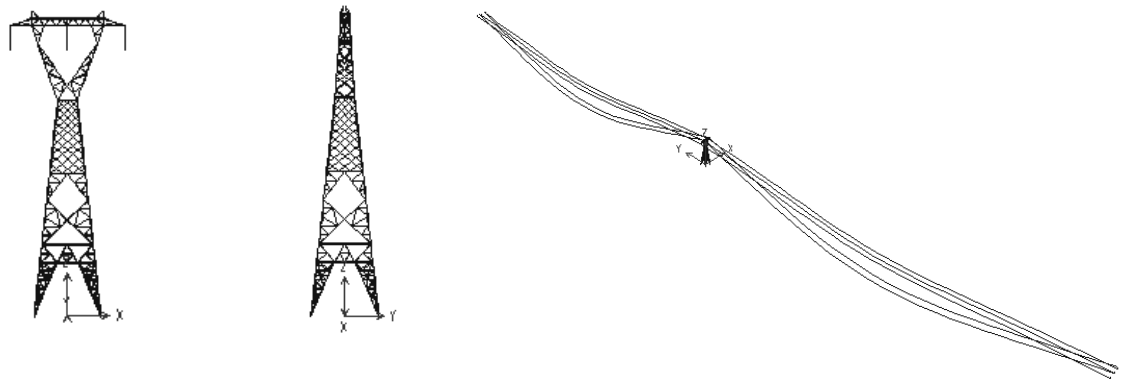


Figura VII.36 – Torre CEEE – Modo 3 – Oscilação Lateral ( $f_3=0,207$  Hz)

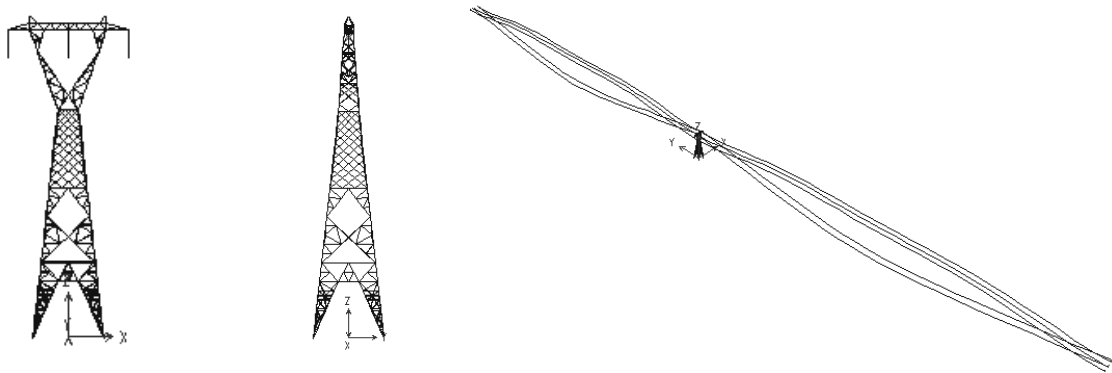


Vista Frontal

Vista Lateral

Vista em Perspectiva

Figura VII.37 – Torre CEEE – Modo 4 – Oscilação Longitudinal ( $f_4=0,290$  Hz)

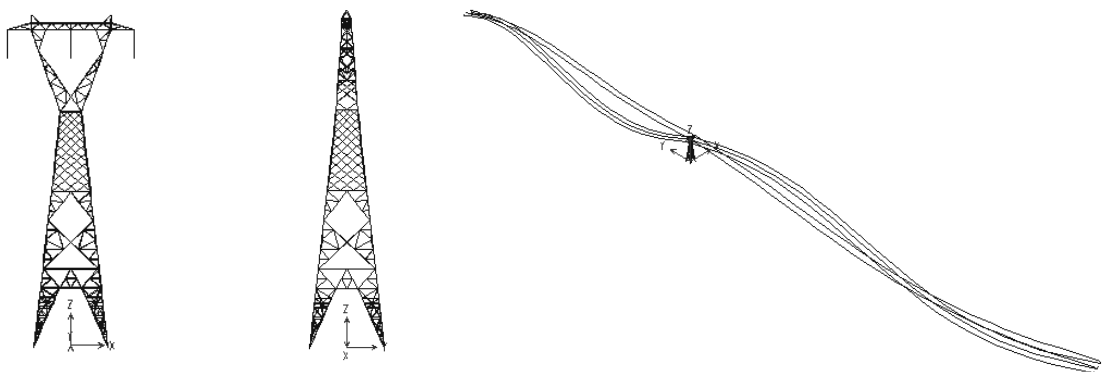


Vista Frontal

Vista Lateral

Vista em Perspectiva

Figura VII.38 – Torre CEEE – Modo 5 – Oscilação Longitudinal ( $f_5=0,323$  Hz)



Vista Frontal

Vista Lateral

Vista em Perspectiva

Figura VII.39 – Torre CEEE – Modo 6 – Oscilação Longitudinal ( $f_6=0,335$  Hz)

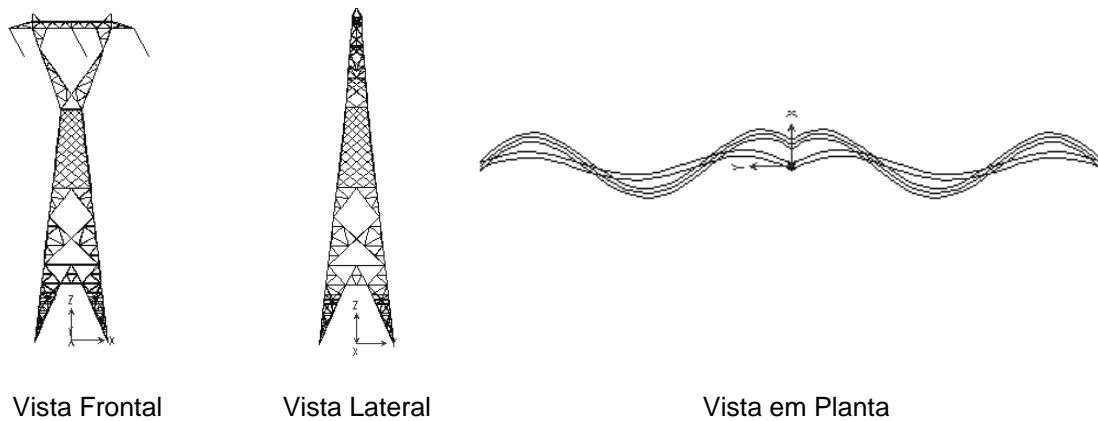


Figura VII.40 – Torre CEEE – Modo 7 – Oscilação Lateral ( $f_7=0,486$  Hz)

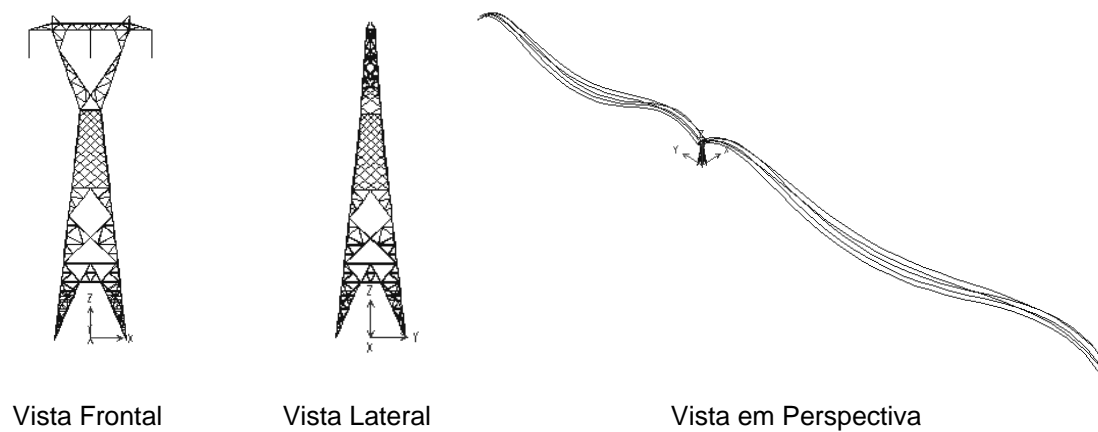


Figura VII.41 – Torre CEEE – Modo 8 – Oscilação Longitudinal ( $f_8=0,689$  Hz)

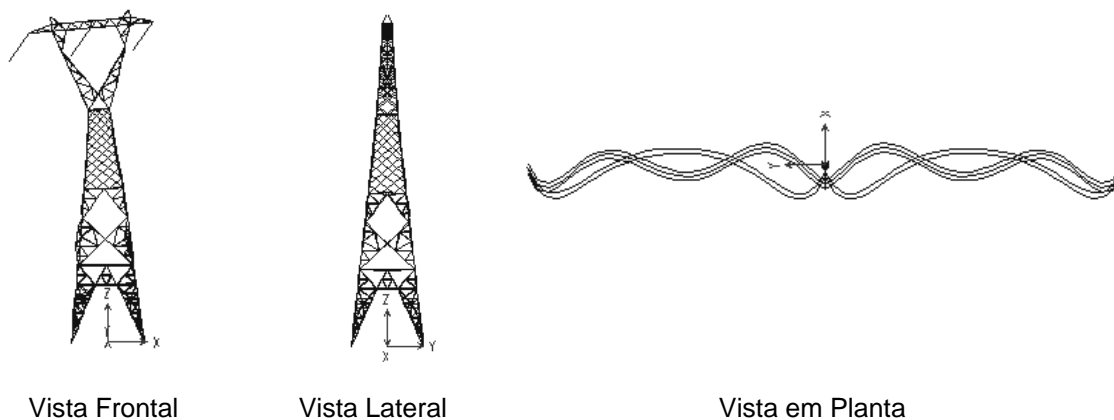


Figura VII.42 – Torre CEEE – Modo 9 – Oscilação Lateral ( $f_9=1,830$  Hz)

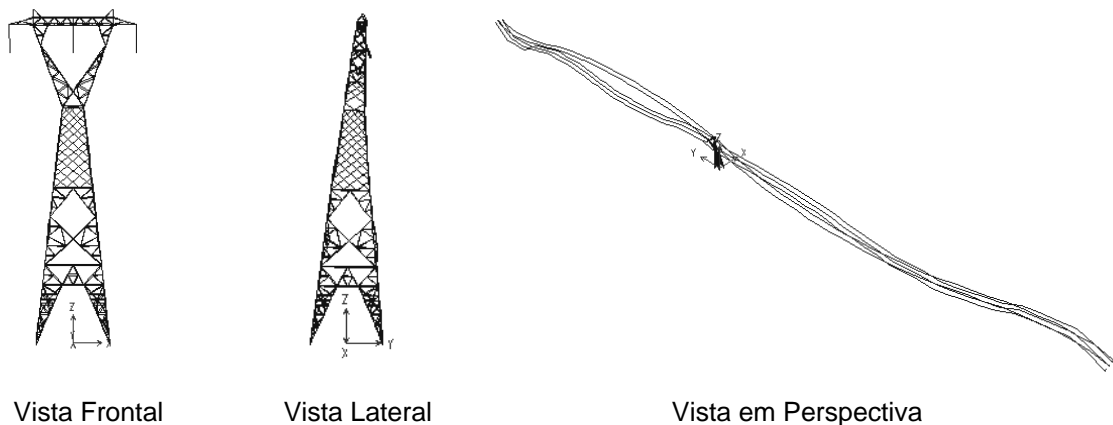


Figura VII.43 – Torre CEEE – Modo 10 – Oscilação Longitudinal ( $f_{10}=2,303$  Hz)

## VII.2.2 – Forças de Vento – Histórias no Tempo

Usando como referência a NBR 6123 [5], as forças de vento sobre o modelo foram determinadas de forma análoga à da torre da Eletrosul apresentada na seção VII.1.

### Velocidade Média de Projeto

$$\bar{U}(10) = 0,69 U_0 S_1 S_3 = 34,50 \text{ m/s} \quad (\text{VII.10})$$

Lembrando sempre que o fator 0,69 representa uma adequação do tempo de exposição à 10 minutos e que  $S_1=1,0$  é o fator topográfico relativo a terreno plano ou fracamente acidentado. Neste caso, porém, como trata-se da verificação de uma estrutura acidentada, decidiu-se tornar unitário o fator estatístico associado ao grau de segurança e tempo de vida útil da estrutura, ou seja,  $S_3=1,0$ .

O perfil vertical de velocidades médias ao longo da altura da torre é traçado com a aplicação da lei de Hellmann (Equação VII.2), admitindo seis trechos ao longo da altura da torre, e expoente relativo à rugosidade do terreno,  $p$ , igual a 0,15 (Tabela VII.13). No topo da torre,  $z=34,40\text{m}$ , a velocidade média atinge o valor máximo de 41,52m/s.

Tabela VII.13 – Torre CEEE – Velocidade Média de Projeto

		Trecho	Cota z [m]	$\bar{U}(z)$ [m/s]	
Torre	Tronco	A	0,000m a 8,000m	8,000	33,36
		B	8,000m a 16,000m	16,000	37,02
		C	16,000m a 20,950m	20,950	38,55
		D	20,950m a 24,300m	24,300	39,41
	Delta	E	24,300m a 30,600m	30,600	40,80
		F	30,600m a 34,400m	34,400	41,52
Condutores Elétricos			29,900	40,66	
Bielas de Suspensão			29,900	40,66	
Pára-Raios			34,150	41,48	

### Turbulência Atmosférica

Foram utilizadas as dez funções turbulência geradas para o modelo da torre da Eletrosul ( $T_{\text{máx}}=840$  segundos) analisado na seção VI.1, tendo em vista, principalmente, a igualdade entre as condições geográficas (velocidade básica do vento) e topográficas (rugosidade do terreno) das duas torres. A diferença de 10% entre os coeficientes estatísticos adotados no cálculo da velocidade média de projeto –  $S_3=1,10$  (Eletrosul) *versus*  $S_3=1,0$  (CEEE) – perde-se ao imaginarmos que os condutores elétricos da linha da CEEE encontram-se entre as Elevações 19,45m e 29,90m e as funções turbulência referem-se à Elevação 28,15m.

### Coefficiente de Arrasto

Por definição, índice de área exposta é a relação entre a área frontal efetiva da estrutura e a área frontal da superfície limitada por seu contorno. Os coeficientes de arrasto são calculados em função deste índice, quer sejam aqueles relativos ao tronco da torre (Figura 9 da NBR 6123 [5] – Torres reticuladas de seção quadrada formadas por barras prismáticas), quer sejam os referentes ao delta da torre (Figura 6 da NBR 6123 [5] – Reticulados planos formados por barras prismáticas de cantos vivos).

De acordo com BLESSMANN [33], o índice de área exposta de torres de transmissão situa-se no intervalo 0,1 ~ 0,2. Na torre da Eletrosul, onde as áreas de influência de cada um dos nós foi determinada com rigor na Referência [1], o índice

médio relativo à face lateral da torre (incidência do vento ortogonal à linha de transmissão) é igual a 0,16.

Em virtude da semelhança entre as duas silhuetas e, além disso, da pequena contribuição das forças de vento relativas à torre na composição da resposta do sistema estrutural (80% a 90% deve-se à ação do vento nos cabos), serão utilizados os mesmos índices de área exposta atribuídos a cada um dos trechos da torre da Eletrosul e, conseqüentemente, os coeficientes de arrasto serão os mesmos, trecho a trecho.

Nos trechos E e F, localizados no delta da torre, será desprezado qualquer efeito de proteção, já que os reticulados não são igualmente espaçados e não apresentam a mesma geometria.

A Tabela VII.14 apresenta os coeficientes de arrasto adotados na torre.

	Trecho	Coeficiente de Arrasto
Tronco	A	2,60
	B	3,35
	C	3,35
	D	3,25
Delta	E	1,84
	F	1,74

Nos componentes elétricos da linha de transmissão, os coeficientes de arrasto também serão os mesmos adotados na análise anterior:  $C_a=1,10$  nos condutores elétricos e  $C_a=1,25$  nos pára-raios, uma vez que foram mantidos a seção transversal e o regime de escoamento;  $C_a=1,20$  nas cadeias de isoladores. Esses valores foram obtidos, respectivamente, na Tabela 14 (Coeficientes de arrasto  $C_a$  para fios e cabos com  $l/d > 60$ ) e na Tabela 10 (Coeficientes de arrasto  $C_a$  para corpos de seção constante) da NBR 6123 [5]. As cadeias de isoladores foram interpretadas como um corpo de seção cilíndrica com saliências (as “abas” dos isoladores).

### VII.2.3 – Resultados do Modelo Dinâmico Não-Linear

A resposta do modelo acoplado torre – cabos, definida no tempo  $T_{m\acute{a}x}$  igual a 840 segundos, é obtida para intervalos de tempo 0,01, 0,001 e 0,0001 segundos.

Admite-se amortecimento proporcional à massa, com taxa de 2% sobre o primeiro modo de vibração, e a ação do vento com incidência ortogonal à linha de transmissão.

A verificação estrutural mostra a falha da estrutura por subdimensionamento dos montantes e outras barras localizadas no delta da torre, sem que as cargas nominais de ruptura dos condutores elétricos e pára-raios tenham sido atingidas.

Apesar de não estarem disponíveis os registros fotográficos da área do acidente ocorrido com as torres da CEEE, no mês de maio de 1998, é possível imaginar um quadro como o da Figura VII.44, admitindo que a instabilidade tenha se iniciado no delta da torre e a queda da estrutura antes da falha dos montantes, na seção transversal correspondente à ligação com a fundação.

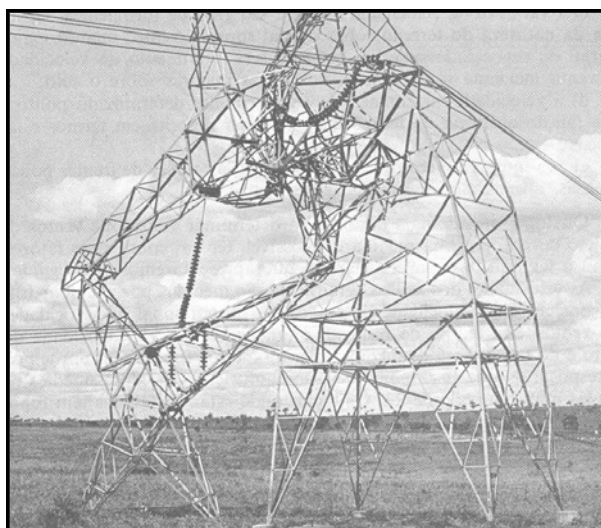


Figura VII.44 – Estrutura Danificada pela Ação do Vento [46]

#### Verificação de Estabilidade e Resistência da Torre

A Tabela VII.15 apresenta os esforços axiais máximos de tração (positivo) e compressão (negativo) nos elementos da torre (Figura VII.15). Os eixos ortogonais 2 e 3 são eixos geométricos da seção transversal.

A verificação dos elementos estruturais foi realizada segundo os eixos principais de inércia da seção em perfil cantoneira, segundo as premissas da AISC – LRFD [45], desprezando-se os coeficientes de majoração de cargas. Os dois critérios de verificação – resistência e estabilidade – são violados.

Tabela VII.15 – Análise da Torre CEEE (Equações VII.3)\*

Elemento (Figura VI.15)	Esforço Axial [kN]	Momento [kNm]		Estabili- dade (VII.3a)*	Resis- tência (VII.3b)*
		M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>		
(A) Montantes (Elevação 0,00m) L3" x 1/4" (A242)	Mín.	-300,5	-3,4	2,7	1,8
	Máx.	254,8	-3,3		

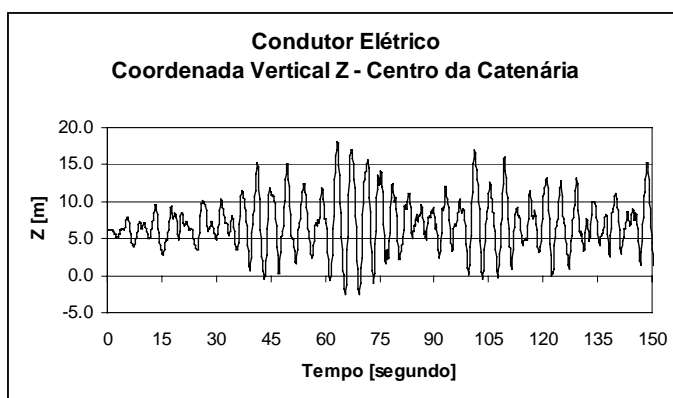
### Análise dos Condutores Elétricos e Pára-Raios

Os esforços de tração instalados nos condutores elétricos e pára-raios são inferiores às respectivas cargas nominais de ruptura, como mostra a Tabela VII.16.

Tabela VII.16 – Forças de Tração nos Cabos

Cabo	Tração Instalada T [kN]		Carga Nominal de Ruptura R <sub>n</sub> [kN]	Coeficiente de Utilização $\frac{T}{R_n}$
	Mínimo	Máximo		
Condutor Elétrico	16,0	110,9	137,8	0,12 – 0,80
Pára-Raio	20,9	27,3	69,9	0,30 – 0,39

A Figura VII.45 mostra os primeiros 150 segundos da resposta do condutor elétrico, em termos da coordenada vertical Z relativa ao ponto nodal situado na centro da catenária. O objetivo ao apresentar esta figura é permitir a “visualização” rápida do comportamento dos cabos sob ação do vento, destacando-se o intervalo 60 s ~75 s, onde o condutor elétrico atinge uma altura aproximada de 18,0 metros e, em seguida, retorna para uma posição anterior à da configuração de peso próprio e tração de projeto nos cabos, no sentido negativo da incidência do vento.



#### Notas:

1. Coordenada Z=0,00 m : corresponde à configuração de peso próprio + tração de projeto nos cabos;
2. Coordenada Z=6,25 m no tempo t= zero: ação estática do vento (Velocidade Média).

Figura VII.45 – História de Deslocamentos do Condutor Elétrico (Detalhe)

### **VII.3 – TORRE DA CEEE – VERIFICAÇÃO SEGUNDO A NBR 6123**

No que se segue é apresentada a verificação da torre da CEEE segundo a norma brasileira NBR 6123 [5], que estabelece a metodologia de cálculo de forças devidas à ação estática e dinâmica do vento em edificações. Da mesma forma que o apresentado na seção V.5 (Modelagem das Forças de Vento sobre a Estrutura), na determinação da resposta estrutural na direção da velocidade média, a NBR 6123[5] também considera apenas a influência da componente flutuante  $u(y,z,t)$  nesta direção, desprezando as componentes lateral e vertical,  $v(y,z,t)$  e  $w(y,z,t)$ , respectivamente.

A consideração dos efeitos dinâmicos da turbulência atmosférica é condicionada ao valor da frequência fundamental da estrutura, e deverá ser considerada sempre que a frequência for inferior a 1Hz. Neste caso, a metodologia de cálculo da resposta dinâmica total, aqui tratada por “método dinâmico simplificado”, indica a superposição das respostas média e flutuante.

Estruturas que apresentam frequência fundamental superior à 1Hz sofrem pequena influência da flutuação da velocidade do vento [5] e, na NBR 6123, têm os efeitos da turbulência atmosférica considerados num fator de correção relativo à rugosidade do terreno e intervalo de tempo, inserido no cálculo da pressão dinâmica do vento, configurando aquele que pode ser chamado de “método do equivalente estático”.

#### **VII.3.1 – Identificação da Metodologia**

O primeiro passo é a determinação das características dinâmicas do modelo estrutural: no modelo acoplado torre-cabos, a análise dinâmica em regime de vibração livre resultou na frequência fundamental  $f_1=0,160$  Hz, correspondente à oscilação lateral dos condutores elétricos (Figura VII.34). Impõe-se, dessa forma, a inclusão dos efeitos dinâmicos da turbulência atmosférica no cálculo da resposta estrutural, obtida segundo os preceitos do método dinâmico simplificado.

#### **VII.3.2 – Método Dinâmico Simplificado**

Dois modelos podem ser adotados: o modelo contínuo, aplicável a edificações com seção constante e distribuição aproximadamente uniforme de massa, e o modelo

discreto, no caso geral de uma edificação com propriedades variáveis com a altura. O modelo acoplado torre-cabos configura, portanto, um caso típico do modelo discreto.

Em síntese, a torre será representada pelo modelo esquematizado na Figura VII.46 e, para cada modo de vibração  $j$ , com coordenadas  $(x_i)_j=x_i$ , a força total de vento  $X_i$ , na direção da coordenada  $i$ , será dada por:

$$X_i = \bar{X}_i + \hat{X}_i \quad [N] \quad (VII.11)$$

onde  $\bar{X}_i$  e  $\hat{X}_i$  representam as componentes relativas à velocidade média do vento e à flutuação da velocidade média (turbulência).

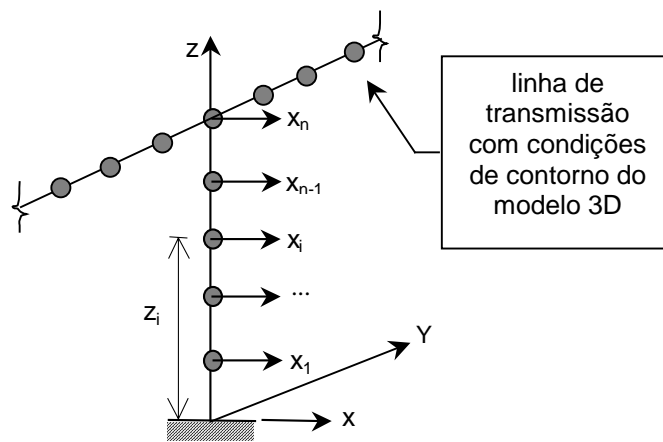


Figura VII.46 – NBR 6123 – Modelo Discreto 3D Acoplado (Torre-Cabos) [5]

### Parcela da Velocidade Média

$$\bar{X}_i = \bar{q}_0 b^2 C_{a_i} A_i \left( \frac{z_i}{z_{ref}} \right)^{2p} \quad [N] \quad (VII.12)$$

$\bar{q}_0 = 0,613 \bar{V}_p^2$  - pressão dinâmica de projeto em  $N/m^2$ ;

$\bar{V}_p$  - velocidade média de projeto (de acordo com Equação VII.10,  $\bar{V}_p = 34,50$  m/s);

$b$  - fator de correção da categoria de rugosidade do terreno a 10m de altura (terreno plano ou fracamente acidentado – Categoria II –  $b=1,00$ );

$C_{a_i}$  - coeficiente de arrasto relativo à coordenada  $i$ ;

$A_i$  - área de influência correspondente à coordenada  $i$ ;

$z_i$  - altura do elemento  $i$  sobre o nível do terreno;

$z_{ref}$  - altura de referência (10m).

### Parcela da Flutuação da Velocidade Média

A componente flutuante  $\hat{X}_i$  é dada por:

$$\hat{X}_i = F_H \varphi_i x_i \quad [\text{N}] \quad (\text{VII.13})$$

$F_H$  – força modal relativa ao modo  $j$ ;

$\varphi_i = m_i/m_o$  – relação de massas onde  $m_i$  é a massa discreta relativa à coordenada  $i$  e  $m_o$  é uma massa arbitrária de referência, considerada igual à massa total da torre;

$x_i$  – coordenada  $i$  do modo de vibração  $j$ .

A força modal  $F_H$  é determinada pela expressão:

$$F_H = \bar{q}_o b^2 A_o \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i x_i}{\sum_{i=1}^n \varphi_i x_i^2} \xi \quad [\text{N}] \quad (\text{VII.14})$$

onde  $A_o$  é uma área arbitrária admitida igual à área frontal efetiva da torre,  $\beta_i$  é determinado pela Equação (VII.15) e  $\xi$  representa o coeficiente de amplificação dinâmica determinado com o auxílio de ábacos encontrados na própria NBR 6123.

$$\beta_i = C_{a_i} \frac{A_i}{A_o} \left( \frac{z_i}{z_{\text{ref}}} \right)^p \quad (\text{VII.15})$$

### Resposta Estrutural para Vários Modos de Vibração

Sempre que houver necessidade de considerar mais de um modo de vibração no cálculo da resposta da estrutura à ação dinâmica das forças de vento, a NBR 6123 recomenda que as contribuições modais relativas aos  $r$  modos de vibração ( $j=1,2,\dots,r$ ) sejam combinadas pelo critério da raiz quadrada da soma dos quadrados, quando as frequências naturais forem razoavelmente espaçadas. Dessa forma, na análise de estruturas que apresentem frequências naturais pouco espaçadas, fica a critério do analista a definição da forma mais adequada de combinar as contribuições modais.

#### **VII.3.3 – Resposta Estrutural na Direção Transversal à Incidência do Vento**

Muitas vezes a flutuação da velocidade do vento é responsável por vibrações da estrutura na direção perpendicular ao escoamento médio [5]. A NBR 6123 sugere,

então, que forças de vento  $Y_i$ , na direção transversal à velocidade média, sejam consideradas na análise estrutural. Essas forças são calculadas a partir das forças globais na direção do vento,  $X_i$ , de acordo com a expressão:

$$Y_i = \frac{1}{3} X_i \quad [\text{N}] \quad (\text{VII.16})$$

### VII.3.4 – Forças de Vento no Sistema de Transmissão da CEEE

Apresenta-se a seguir, na forma de tabelas, os passos de cálculo das forças de vento no modelo estrutural, segundo o método discreto da NBR 6123.

#### Parcela da Velocidade Média

Na torre, as cargas relativas à parcela da velocidade média (Equação VII.12) são determinadas admitindo os mesmos trechos, A a F, definidos, anteriormente, na seção VII.2.2 (Tabela VII.13).

Tabela VII.17 – Torre CEEE – Parcela da Velocidade Média (Equação VII.12)

Coordenada i	$C_{a_i}$	$A_i \text{ [m}^2\text{]}$	$z_i \text{ [m]}$	$\bar{X}_i \text{ [kN]}$	
Tronco	A	2,60	3,88	8,000	6,88
	B	3,35	3,65	16,000	10,27
	C	3,35	2,38	20,950	7,26
	D	3,25	1,88	24,300	5,82
Delta	E	1,84	3,11	30,600	5,84
	F	1,74	1,72	34,400	3,16

Na Tabela VII.18 encontram-se as cargas a serem aplicadas nos nós dos elementos que compõem os condutores elétricos, cadeias de isoladores e pára-raios (trinta elementos discretizam cada um dos vãos de 450m de condutores e pára-raios). As cargas relativas aos condutores elétricos e bielas de suspensão são calculadas para a velocidade média na coordenada  $z_i=29,900\text{m}$ , que corresponde à conexão dos cabos às cadeias de isoladores; a área das cadeias de isoladores é determinada admitindo uma

faixa central de largura igual 1/3 da largura dos isoladores. Nos pára-raios, é adotada a coordenada  $z_i=34,150\text{m}$ , correspondente à ligação com os elementos de fixação na torre.

Tabela VII.18 – Cabos – Parcela da Velocidade Média (Equação VII.12)

Coordenada i	$C_{a_i}$	$A_i [\text{m}^2]$	$z_i [\text{m}]$	$\bar{X}_i [\text{kN}]$
Condutor Elétrico	1,10	$25,16 \times 10^{-3} \times 15,0$	29,900	0,42
Cadeia de Isoladores	1,20	$(0,254/3) \times 2,90/2$	29,900	0,15
Pára – Raios	1,25	$9,15 \times 10^{-3} \times 15,0$	34,150	0,18

#### Parcela da Flutuação da Velocidade Média

No cálculo da parcela das forças de vento relativas à turbulência, adota-se como valores arbitrários a massa total e a área frontal efetiva da torre:  $m_o=4559,0 \text{ kg}$  e  $A_o=16,92 \text{ m}^2$ , respectivamente.

A resposta do modelo estrutural é determinada admitindo apenas a contribuição do primeiro modo de vibração (oscilação lateral dos condutores elétricos) e taxa de amortecimento de 2%, a mesma utilizada na análise temporal.

Com o cálculo prévio do coeficiente de amplificação,  $\xi = 2,033$ , a força modal  $F_H \cong 9339,0 \text{ kN}$  pôde ser facilmente calculada com o auxílio de uma planilha e, da mesma forma, as componentes flutuantes  $\hat{X}_i$  (Equação VII.13), que são apresentadas no próximo item.

#### Força Total de Vento (Equação VII.11)

Finalmente, a Tabela VII.19 e Figuras VII.47 e VII.48 apresentam as forças de vento sobre o modelo acoplado torre-cabos, conforme as prescrições do método discreto sugerido pela NBR 6123. No modelo estrutural, as forças de vento  $X_i$  relativas ao tronco e ao delta da torre são igualmente distribuídas pela totalidade dos nós em cada trecho, considerando as faces de barlavento e sotavento. As forças correspondentes aos cabos e cadeias de isoladores são aplicadas em cada um dos nós que os discretizam.

Excepcionalmente, não é considerada a contribuição das forças  $Y_i$  (Equação VII.16), na direção perpendicular à velocidade média. Segundo SIMIU E SCANLAN [6],

nos casos de torres esbeltas e chaminés de seção transversal circular, a turbulência na direção perpendicular à de incidência do vento é responsável pela resposta flutuante nesta direção, que é da ordem de 25% da resposta (total) na direção da velocidade média. Tudo indica, portanto, que a intenção ao incluir as forças  $Y_i$  na NBR 6123 [5] é, justamente, não desprezar esse efeito naquelas estruturas que apresentem tal comportamento.

Concluindo, na análise do sistema de transmissão da CEEE, a contribuição das forças  $Y_i$  não é considerada tendo em vista que (i) o tipo de estrutura não se enquadra naqueles citados por SIMIU E SCANLAN [6], (ii) o primeiro modo de vibração é na mesma direção da incidência do vento, (iii) a turbulência na direção perpendicular à velocidade média não foi considerada na análise temporal e, principalmente (iv) tornar clara, mais uma vez, a importância da incidência do vento nos condutores elétricos na resposta dinâmica da torre.

Tab. VII.19 – Força Global de Vento sobre a Torre e Bielas de Suspensão (Eq. VII.11)

Coordenada i		$\bar{X}_i$ [kN]	$\hat{X}_i$ [kN]	$X_i = \bar{X}_i + \hat{X}_i$ [kN]	
Torre	Tronco	A	6,88	$2,33 \times 10^{-4}$	6,88
		B	10,27	0,02	10,29
		C	7,26	0,03	7,29
		D	5,82	0,02	5,84
	Delta	E	5,84	0,08	5,92
		F	3,16	0,10	3,26
Bielas (BS1=BS2=BS3)		0,30	0,45	0,75	

No aspecto qualitativo, ao expor a composição das forças de vento sobre a torre e bielas de suspensão, a Tabela VII.19 auxilia na melhor compreensão da importância do modelo acoplado torre-cabos, na determinação da resposta dinâmica da torre: enquanto sobre a torre o domínio é da parcela da velocidade média (ação estática do vento), nas bielas de suspensão já é possível observar uma mudança de comportamento, que é confirmado com o diagrama de forças de vento no condutor elétrico ilustrado na Figura VII.47.

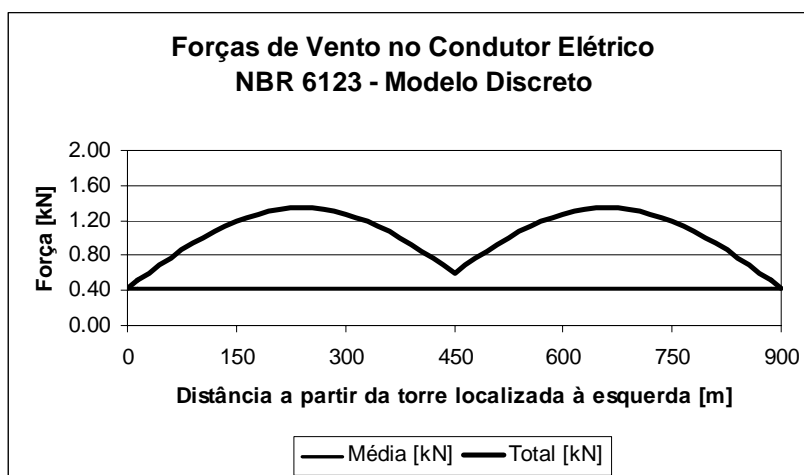


Figura VII.47 – Composição das Forças de Vento no Condutor Elétrico

A Figura VII.48 ilustra o diagrama de forças de vento sobre o pára-raio, e mostra que a turbulência, neste caso, não é importante, pois trata-se de um modo de oscilação lateral dos condutores elétricos (modo fundamental), considerado dominante na resposta dinâmica do sistema estrutural analisado. É importante observar que a parcela flutuante é praticamente nula, uma vez que a variação entre a força média e a força total ocorre apenas na terceira casa decimal.

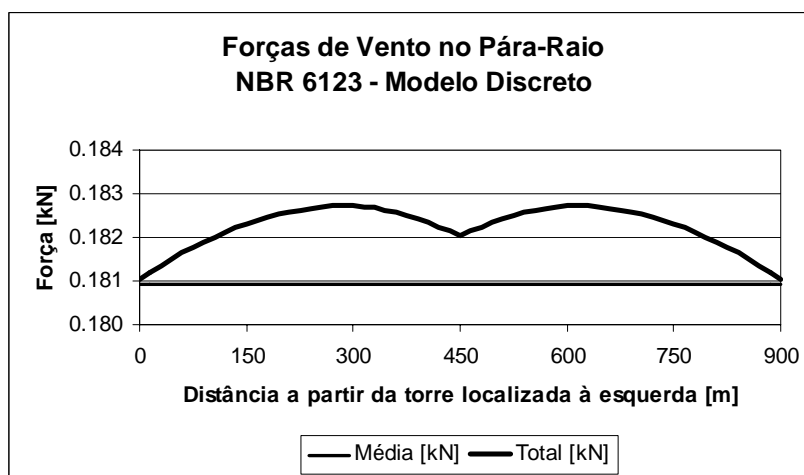


Figura VII.48 – Composição das Forças de Vento no Pára-Raio

### VII.3.5 – Esforços Internos, Verificações de Estabilidade e Resistência da Torre

Os resultados obtidos com o modelo discreto apontam o subdimensionamento dos montantes (Tabela VII.20), entre outros elementos localizados no delta da torre. Os valores encontrados violam os critérios de verificação de estabilidade e resistência

previstos na AISC – LRFD [45]. Aqui também os coeficientes de majoração de cargas foram considerados unitários.

Tabela VII.20 – Verificação dos Montantes (Modelo Discreto – NBR 6123)

Elemento (Figura VII.15)	Esforço Axial [kN]	Momentos [kNm]		Estabilidade Equações VII.3	Resistência	
		M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>			
(A) Montantes (Elevação 0,00m) L3" x 1/4" (A242)	Mín.	-202,6	2,2	-1,8	1,9	1,5
	Máx.	176,2	2,1	1,6		

(\*) Sinal Negativo = Compressão Axial

É importante observar que os esforços axiais obtidos com a análise dinâmica não-linear (Tabela VII.15) são superiores àqueles obtidos com o modelo discreto da NBR 6123 (Tabela VII.20). Entretanto, estimativas realizadas segundo as prescrições da NBR 6123, incluindo os outros modos de oscilação lateral do modelo, também importantes para o cálculo da resposta da torre sob ação do vento, certamente serão suficientemente conservadoras, tornando necessária, e atrativa economicamente, uma análise refinada não-linear.

### VII.3.6 – Esforços Internos nos Cabos

Os esforços de tração instalados nos condutores elétricos e pára-raios são inferiores às respectivas cargas nominais de ruptura, como mostra a Tabela VII.21.

Tabela VII.21 – Forças de Tração nos Cabos (Modelo Discreto – NBR 6123)

Cabo	Tração Instalada T [kN]	Carga Nominal de Ruptura R <sub>n</sub> [kN]	Coeficiente de Utilização T/R <sub>n</sub>
	Máximo		
Condutor Elétrico	98.9	137.8	0.72
Pára-Raio	21.9	69.9	0.31

Assim como na análise temporal, os resultados mostram que o colapso da torre não foi provocado pela ruptura de cabos.

### VII.3.7 – Método do Equivalente Estático

É pouco provável que a torre da CEEE não tenha sido verificada após o colapso ocorrido em maio de 1998. Na hipótese da verificação pós-acidente ter sido realizada de acordo com a NBR 6123, com os dados de vento indicados pela imprensa, a queda das torres teria sido atribuída a qualquer outra causa, exceto o subdimensionamento da estrutura, só identificado com a aplicação do modelo acoplado torre-cabos proposto na Referência [1] e utilizado neste trabalho.

Este item apresenta a verificação da torre da CEEE, segundo as prescrições da NBR 6123, admitindo a velocidade básica do vento,  $V_0$ , igual a 150 km/h (41,6 m/s), valor máximo indicado, na época, pela imprensa regional.

#### Modelo estrutural

O mesmo adotado no projeto convencional: a torre isolada com as cargas relativas aos condutores elétricos, pára-raios e cadeias de isoladores concentradas nos nós de ligação na torre.

#### Frequência Fundamental

Admitindo as massas dos cabos e cadeias de isoladores concentradas nos nós da torre, a resposta da estrutura em regime de vibração livre indica o 1º modo de vibração com frequência natural de 1,53Hz, correspondente à oscilação lateral da torre, perpendicular à LT. De acordo com a NBR 6123, este tipo de estrutura, com frequência natural superior a 1 Hz, não é sensível aos efeitos dinâmicos da turbulência atmosférica, e pode ser calculada pelo método do equivalente estático.

#### Velocidade Característica do Vento

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad [\text{m/s}] \quad (\text{VII.17})$$

onde  $V_0=41,6$  m/s (na altura de referência 10 m),  $S_2$  é o fator definido pela Equação VII.18 e os fatores topográfico e estatístico,  $S_1$  e  $S_3$ , respectivamente, são unitários.

$$S_2 = b F_r \left( \frac{z}{10} \right)^p \quad (\text{VII.18})$$

Os parâmetros meteorológicos  $b$ ,  $F_r$  e  $p$  são obtidos em tabelas da NBR 6123, e determinados em função das dimensões da estrutura analisada.

### Força de Vento sobre o Modelo Estrutural

A força de vento é definida pela Equação VII.19:

$$F_i = q_i C_{a_i} A_i \quad [N] \quad (VII.19)$$

onde, relativo ao trecho  $i$ , temos o coeficiente de arrasto  $C_{a_i}$ , a área frontal efetiva  $A_i$  e a pressão dinâmica do vento  $q_i$  ( $q_i = 0,613V_k^2$  em  $N/m^2$ ).

### Forças de Vento – Parcela da Torre

Para estruturas cuja maior dimensão encontra-se no intervalo entre 20m e 50m (Classe B), a Tabela 1 da NBR 6123 (Parâmetros Meteorológicos) indica para terrenos Categoria II (terrenos abertos ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados) os seguintes valores para as variáveis da Equação VII.18:  $b=1,00$ ,  $F_r=0,98$  e  $p=0,09$ .

A Tabela VII.22 apresenta, então, o perfil da velocidade característica do vento definido ao longo da altura da torre.

Tabela VII.22 – Perfil da Velocidade Característica do Vento (Eq. VII.17)

Coordenada i	$z_i$ [m]	$S_2$	$V_{k_i}$ [m/s]	
Tronco	A	8,000	0,961	40,0
	B	16,000	1,022	42,5
	C	20,950	1,047	43,6
	D	24,300	1,062	44,2
Delta	E	30,600	1,084	45,1
	F	34,400	1,095	45,6

A Tabela VII.23 apresenta as forças de vento em cada um dos trechos da torre, definida pela Equação VII.19. Como nas análises anteriores, essas forças são

distribuídas pela totalidade dos nós de cada trecho da torre, admitindo as faces de barlavento e sotavento.

Tabela VII.23 – Forças de Vento – Parcela da Torre (Equação VII.19)

Coordenada i	$C_{a_i}$	$A_i$ [m <sup>2</sup> ]	$q_i$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$F_i$ [kN]	
Tronco	A	2,60	3,88	0,98	9,88
	B	3,35	3,65	1,11	13,56
	C	3,35	2,38	1,16	9,28
	D	3,25	1,88	1,20	7,31
Delta	E	1,84	3,11	1,25	7,13
	F	1,74	1,72	1,27	3,81

#### Forças de Vento – Parcela dos Cabos

Para estruturas cuja maior dimensão é superior a 80m (vão médio da LT=450m) – Classe C – são obedecidas as prescrições do Anexo A da NBR 6123, no cálculo do fator  $S_2$ , que resulta em  $S_2=0,93$  para os condutores elétricos e  $S_2=0,94$  nos pára-raios. No cálculo admite-se, respectivamente, a cota z de ligação dos condutores elétricos às cadeia de isoladores ( $z=29,900m$ ) e a cota z de ligação dos pára-raios aos estribos de fixação na torre ( $z=34,150m$ ).

A velocidade característica será, então:

- condutores elétricos:  $V_k = 41,6 \times 1,0 \times 0,93 \times 1,0 = 38,7m/s$ ;
- pára-raios:  $V_k = 41,6 \times 1,0 \times 0,94 \times 1,0 = 39,1m/s$ .

E as forças de vento nos nós de ligação na torre serão (Equação VII.19):

- condutores elétricos:  $F_{CE} = (0,613 \times 38,7^2) \times 1,10 \times (25,16 \times 10^{-3}) \times 450 \Rightarrow 11,43$  kN;
- pára-raios:  $F_{PR} = (0,613 \times 39,1^2) \times 1,25 \times (9,15 \times 10^{-3}) \times 450 \Rightarrow 4,82$  kN;

### Forças de Vento – Parcela das Cadeias de Isoladores

Para elementos de fixação e/ou estruturas cuja maior dimensão é inferior a 20m (Classe A) e terreno Categoria II, a Tabela 1 da NBR 6123 (Parâmetros Meteorológicos) indica os seguintes valores para as variáveis serem utilizadas na determinação do fator  $S_2$  (Equação VII.18):  $b=1,00$ ,  $F_r=1,00$  e  $p=0,085$ .

A velocidade característica do vento relativa à cota  $z=31,350\text{m}$ , correspondente à altura média das cadeias de isoladores será:

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 = 41,6 \times 1,00 \times 1,10 \times 1,00 = 45,8 \text{ m/s.}$$

De acordo com a Equação VII.19, a força de vento nos nós de fixação das bielas de suspensão à torre será:

$$F_{BS} = (0,613 \times 45,8^2) \times 1,20 \times (2,90 \times 0,254/3) \Rightarrow 0,38 \text{ kN;}$$

### Verificação de Estabilidade e Resistência da Torre

Os resultados apresentados na Tabela VII.24 mostram que a torre da CEEE, se calculada pelo método do equivalente estático, resiste com folga à ação do vento na direção perpendicular à LT e velocidade básica da ordem de 150 km/h (rajada de 3 segundos, na altura  $z=10\text{m}$ , em terreno aberto e plano). Este resultado é mais um indicativo da necessidade do modelo acoplado para cálculo da resposta de torres TEE expostas a ação do vento.

Tabela VII.24 – Verificação dos Montantes (Equivalente Estático – NBR 6123)

Elemento (Figura VII.15)	Esforço Axial [kN]	Momentos [kNm]		Estabilidade Equações VII.3	Resistência	
		$M_2$	$M_3$			
(A) Montantes (Elevação 0,00m) L3" x 1/4" (A242)	Mín.	-110,8	-1,0	0,9	0,88 < 1	0,78 < 1
	Máx.	102,3	0,9	0,8		

(\*) Sinal Negativo = Compressão Axial

## VII.4 – CORRELAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS COM OS VÁRIOS MODELOS DE ANÁLISE DA TORRE DA CEEE

As Tabelas VII.25 e VII.26, a seguir, apresentam e comparam os resultados obtidos com quatro modelos de análise estrutural:

1. Modelo dinâmico não-linear ( $V_o=50$  m/s):  
Modelo 3D-MEF, análise dinâmica não-linear no domínio do tempo;
2. Método dinâmico simplificado da NBR 6123 ( $V_o=50$  m/s):  
Modelo discreto 3D acoplado (torre-cabos), análise dinâmica linear;
3. Método do equivalente estático da NBR 6123 ( $V_o=50$  m/s):  
Os cabos não são discretizados (as resultantes de força de vento nos cabos são aplicadas ao nó de ligação na torre), análise estática;
4. Método do equivalente estático da NBR 6123 ( $V_o=41,6$  m/s):  
O modelo 3 com a velocidade de vento estimada na época do acidente.

### Torre

Tabela VII.25 – Torre CEEE – Comparação dos Resultados de Esforços Internos nos Montantes (Equações VII.3)\*

Montante (Figura VII.15)		Esforço Axial [kN]	Momento [kNm]		Estabilidade (VII.3a)*	Resistência (VII.3b)*
			M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>		
(1) Modelo Dinâmico Não-Linear ( $V_o=50$ m/s)	Mín.	-300,5	-3,4	3,1	2,7>1(!)	1,8>1(!)
	Máx.	254,8	-3,3	2,8		
(2) Método Dinâmico Simplificado ( $V_o=50$ m/s)	Mín.	-202,6	2,2	-1,8	1,9>1(!)	1,5>1(!)
	Máx.	176,2	2,1	1,6		
(3) Método do Equivalente Estático ( $V_o=50,0$ m/s)	Mín.	-160,2	-1,4	1,3	1,3>1(!)	1,1>1(!)
	Máx.	147,9	1,3	1,2		
(4) Método do Equivalente Estático ( $V_o=41,6$ m/s)	Mín.	-110,8	-1,0	0,9	0,88<1	0,78<1
	Máx.	102,3	0,9	0,8		

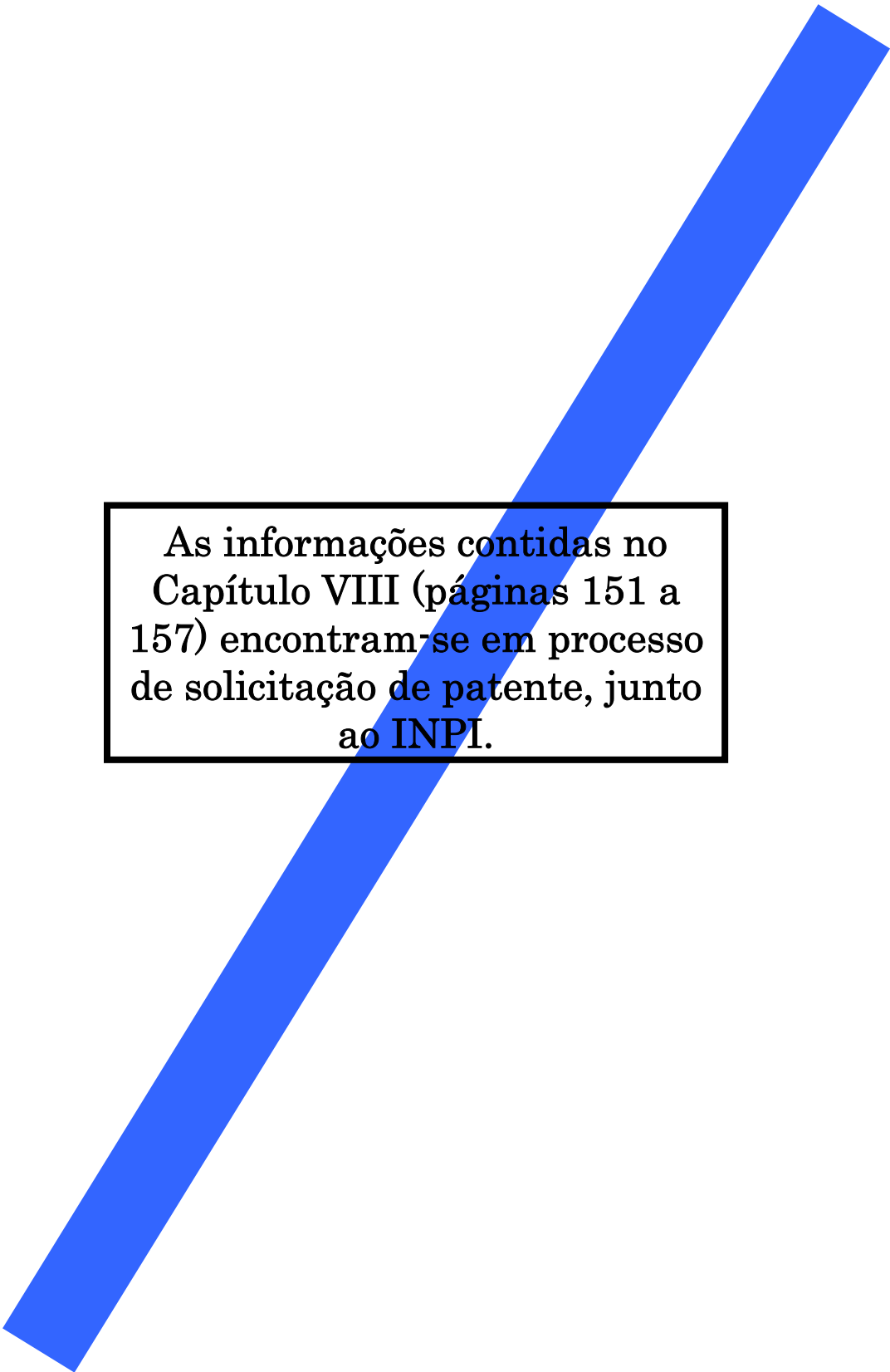
### Condutores Elétricos

Tabela VII.26 – Torre CEEE – Comparação dos Resultados das Forças nos Cabos

Condutor Elétrico	Tração Instalada T [kN]		Carga Nominal de Ruptura R <sub>n</sub> [kN]	Coeficiente de Utilização $\frac{T}{R_n}$
	Mínimo	Máximo		
(1) Modelo Dinâmico Não-Linear (V <sub>o</sub> =50 m/s)	16,0	110,9	137,8	0,12 – 0,80
(2) Método Dinâmico Simplificado (V <sub>o</sub> =50 m/s)	—	98,9		0,72

Nos modelos 3 e 4 (método do equivalente estático e modelo da torre isolada, conforme o projeto convencional) a tração nos condutores elétricos é da ordem de 50% da carga nominal de ruptura, como mostra o cálculo baseado nas equações de estado citadas por LABEGALINI *et alli*. [30] apresentado no item VII.1.7.

## **REDUÇÃO DE VIBRAÇÕES COM ATENUADORES TIPO APNL**



As informações contidas no Capítulo VIII (páginas 151 a 157) encontram-se em processo de solicitação de patente, junto ao INPI.

## CAPÍTULO VIII

### REDUÇÃO DE VIBRAÇÕES COM ATENUADORES TIPO APNL

#### VIII.1 INTRODUÇÃO

Identificado o mecanismo de colapso das torres sob ação do vento, a etapa seguinte é a redução das amplitudes dos deslocamentos horizontais observados no topo da torre, na direção de incidência do vento, com a instalação de um sistema de atenuação apropriado. Na área de redução e controle de vibrações são encontradas diferentes soluções para minimizar amplitudes de vibração; essas soluções são recomendadas em função do tipo de estrutura e do carregamento dinâmico a que está submetida.

Baseada nos trabalhos de PINHEIRO [3] e BATTISTA *et alli* [47,48] sobre o controle dinâmico de torres esbeltas expostas a carregamentos ambientais, a proposta é a instalação de amortecedores pendulares não-lineares (APNL), com a finalidade de atenuar as amplitudes dos deslocamentos horizontais despertados pela oscilação lateral dos cabos sob ação do vento, na direção transversal à linha de transmissão (Figura VIII.1), e, conseqüentemente, reduzir os esforços internos nos elementos da torre. Pode ser estudada ainda a redução dessas amplitudes por meio de atenuadores fluido-dinâmicos [49], entretanto, dentre esses dois tipos de atenuadores, o pendular parece ser o mais simples e prático no caso de torres TEE.

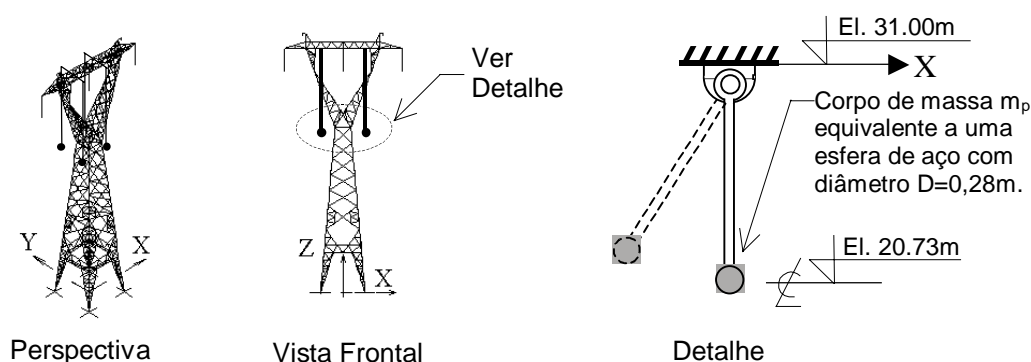


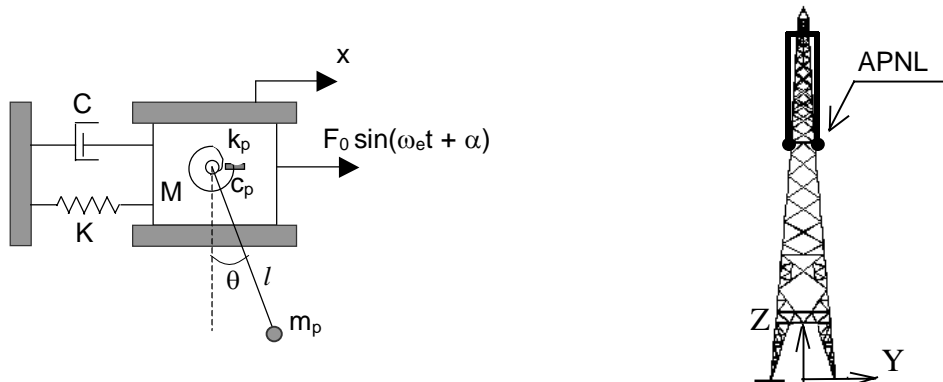
Figura VIII.1 – Torre Delta com Amortecedores Pendulares Não-Lineares

As dimensões do dispositivo pendular de controle (APNL) indicadas na Figura VIII.1 foram determinadas com a solução do sistema de equações não-lineares de

movimento relativas a um modelo com dois graus de liberdade, formuladas na próxima seção.

### VIII.2 – FORMULAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE MOVIMENTO

Os amortecedores APNL são projetados para atenuar as amplitudes de deslocamento do modo de vibração dominante da estrutura – oscilação lateral da torre e condutores elétricos – a partir da solução do sistema de equações modais do modelo analítico com dois graus de liberdade ilustrado na Figura VIII.2, onde o índice p refere-se às propriedades do pêndulo. Para tanto, as características modais do modelo estrutural, relativas ao modo fundamental de vibração, são extraídas do modelo tridimensional em elementos finitos apresentado na seção VII.1 (massa modal  $M$ , força  $F$ , rigidez  $K$  e/ou frequência natural  $\Omega$ ).



(a) Sistema Mecânico Análogo Simplificado

(b) Torre com o Amortecedor Pendular Não-Linear – APNL (Vista Lateral)

Figura VIII.2 – Torre com APNL e Sistema Mecânico Análogo Simplificado

As Equações VIII.1 constituem o sistema de equações não-lineares [3] que representa o modelo da Figura VIII.2. Na solução desse sistema de equações é utilizado o método de Runge-Kutta.

$$\begin{cases} (M + m_p) \ddot{x} + C \dot{x} + Kx + m_p l (\sin\theta)'' = F_0 \sin(\omega_e t + \alpha) \\ m_p l^2 \ddot{\theta} + c_p \dot{\theta} + k_p \theta + m_p g l \sin\theta + m_p l \ddot{x} \cos\theta = 0 \end{cases} \quad (\text{VIII.1})$$

onde,  $(\sin\theta)'' = \ddot{\theta} \cos\theta - \dot{\theta}^2 \sin\theta$ .

### VIII.3 – MODELO ANALÍTICO APLICADO À TORRE TIPO DELTA

Inicialmente é importante esclarecer a razão pela qual o atenuador é projetado no regime não-linear. O funcionamento desses dispositivos é caracterizado, basicamente, pelas forças de inércia geradas pelo movimento pendular, que se opõem ao movimento de oscilação transversal da torre, e o seu melhor desempenho ocorre dentro de uma faixa não-linear de grandes amplitudes angulares [50].

PINHEIRO [3] mostra que é importante um melhor conhecimento dos parâmetros que levam à uma maior eficiência desse dispositivo no regime não-linear, numa certa faixa de grandes amplitudes de oscilação angular.

A partir de estudos paramétricos e relações ótimas de atenuação apresentadas por PINHEIRO [3], e de limitações físicas da torre delta, é projetado o sistema APNL ilustrado na Figura VIII.1, com as seguintes características: massa total  $m_p = 364$  kg (equivalente a quatro esferas de aço com diâmetro  $D = 0,28$ m), taxa de amortecimento  $\xi_p = 5\%$ , rigidez  $k_p = 1$  kN.m/rad e comprimento de haste  $l = 10,27$ m, parâmetros associados às relações de frequências  $\omega_p/\omega_1 = 1,0$  e  $\omega_e/\omega_1 = 1,0$ .

A Figura VIII.3 apresenta e compara a resposta do sistema estrutural controlado e não-controlado, assim como a história no tempo da amplitude angular do APNL, que foi projetado admitindo pêndulo e excitação em ressonância com a estrutura original.

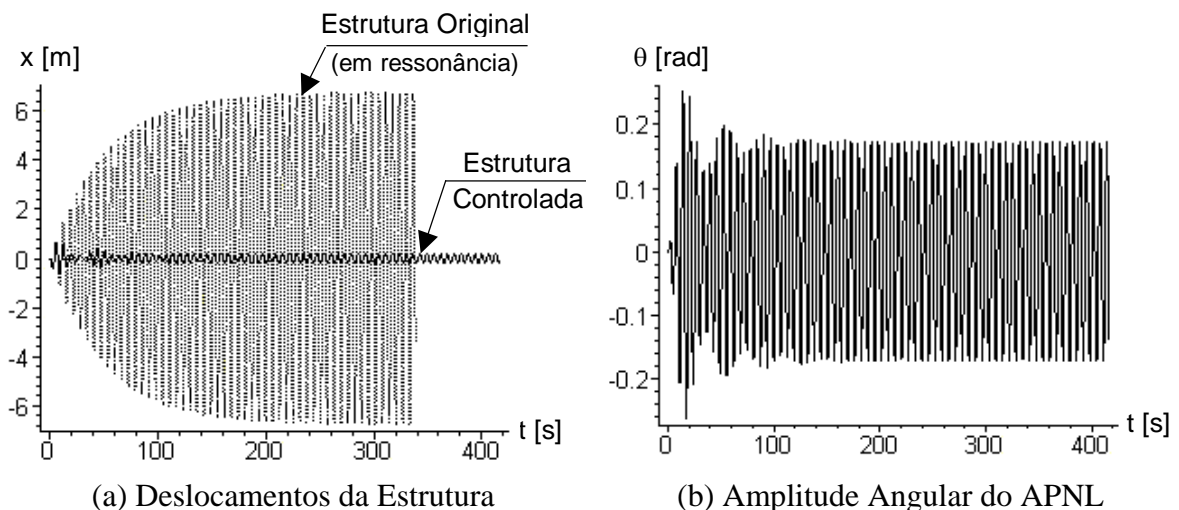


Figura VIII.3 – Resposta da Estrutura Controlada e Não-Controlada

$$\omega_1 = \omega_p = \omega_e = 0,99 \text{ rad/s}$$

As respostas obtidas com a estrutura original em ressonância com a excitação (Figuras VIII.3a,b) visam apenas exemplificar a efetividade do APNL na atenuação das grandes amplitudes de deslocamento horizontal despertadas pela ação do vento.

Para uma frequência de excitação  $\omega_e=0,9$  rad/s, na faixa de quase-ressonância com a frequência fundamental da estrutura (na prática, o intervalo  $0,7\omega_1 \geq \omega_e \geq 1,3\omega_1$ ), que corresponde a  $\omega_e \cong 0,9\omega_1$ , a Figura VIII.4 mostra que a resposta da estrutura original controlada apresenta ainda uma grande redução de amplitude em relação àquela obtida na análise dinâmica linear [2,37,38]. Observa-se que essas respostas dinâmicas foram obtidas com o modelo dinâmico linear sem qualquer prejuízo da análise do desempenho dos dispositivos de controle propostos.

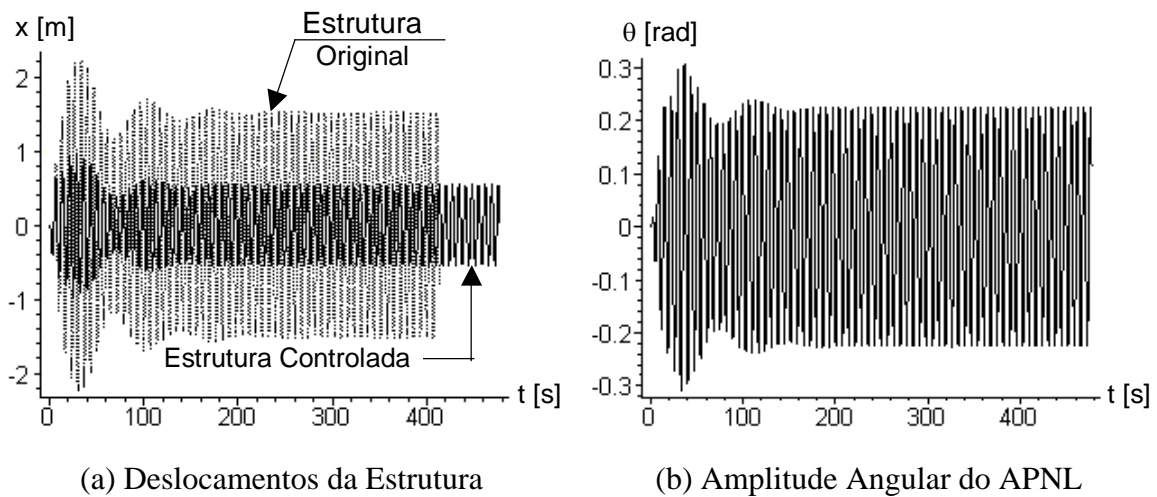


Figura VIII.4 – Resposta da Estrutura Controlada e Não-Controlada –  $l = 10,27\text{m}$   
 $\omega_p = \omega_1 = 0,99$  rad/s e  $\omega_e \cong 0,9\omega_1 = 0,90$  rad/s

Por outro lado, a dificuldade de execução de pêndulos com frequência natural perfeitamente sintonizada à da estrutura ( $\omega_p = \omega_1$ ) leva a um sistema atenuador no qual a frequência natural do pêndulo é alterada, por exemplo, para  $\omega_p = 0,90$  rad/s, mantendo a massa correspondente às quatro esferas de aço,  $m_p=364$  kg, o que exige uma revisão nas características elásticas e de amortecimento do APNL.

Inicialmente, o novo comprimento da haste é estimado, imaginando um pêndulo simples ( $k_p=0$ ) com frequência natural  $\omega_{ps} = 0,90$  rad/s:

$$\omega_{ps} = \sqrt{\frac{g}{l_{ps}}} \therefore l_{ps} = \frac{9,807}{0,90^2} = 12,10\text{m} \quad (\text{VIII.2})$$

Em seguida, o comprimento do pêndulo elástico é determinado pela Equação VIII.3, para as características inerciais e elásticas previstas no projeto:  $m_p=364$  kg e  $k_p=1000$  Nm/rad.

$$l = \frac{1}{2} l_{ps} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4k_p}{g l_{ps} m_p}} \right) = \frac{1}{2} \times 12,10 \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4 \times 1000}{9,807 \times 12,10 \times 364}} \right) = 12,37 \text{ m} \quad (\text{VIII.3})$$

Confirmando a frequência natural do pêndulo elástico temos:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{\frac{k_p}{m_p} + g}{l}} = \sqrt{\frac{\frac{1000}{364} + 9,807}{12,37}} = 0,90 \text{ rad/s} \quad (\text{VIII.4})$$

Finalmente, mantendo-se a taxa de amortecimento  $\xi_p=5\%$ , o coeficiente de amortecimento desse segundo sistema atenuador será:

$$C_p = 2\xi_p m_p l^2 \omega_p = 5012,8 \text{ kg m}^2 \text{ rad/s} \quad (\text{VIII.5})$$

A Figura VIII.5 apresenta, então, as respostas da estrutura controlada e não controlada, assim como a resposta do APNL em termos da variação no tempo da amplitude de oscilação angular para a frequência da excitação  $\omega_e = 0,90$  rad/s.

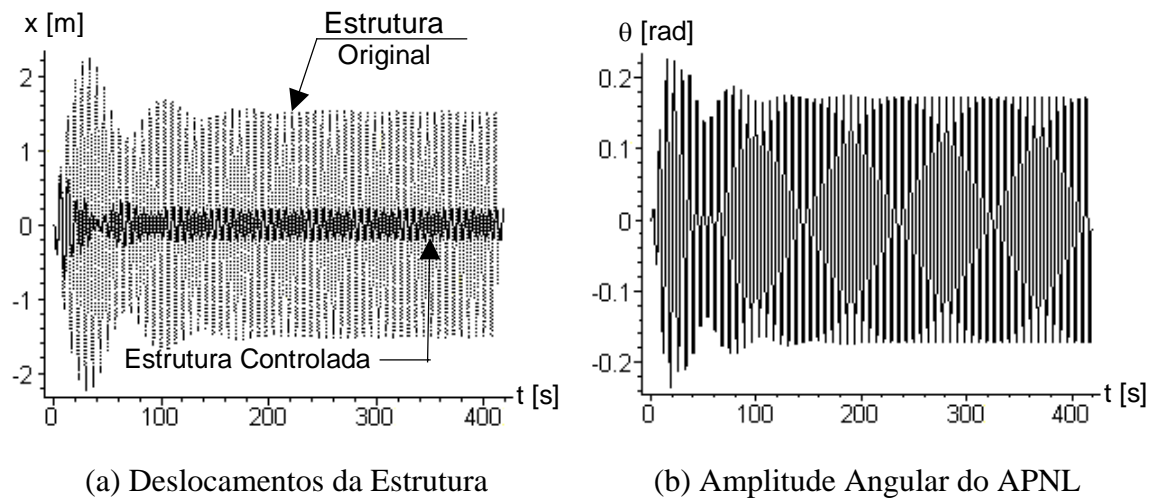


Figura VIII.5 – Resposta da Estrutura Controlada e Não-Controlada –  $l = 12,37$  m  
 $\omega_1 = 0,99$  rad/s e  $\omega_p = \omega_e \cong 0,9\omega_1 = 0,90$  rad/s

As duas soluções propostas para o atenuador APNL ( $\omega_p/\omega_1=1,0$  e  $0,9$ ) são viáveis tecnicamente, sendo mais eficiente a segunda proposta de APNL (Figura VIII.5), ainda que penalizada, em relação à primeira (Figura VIII.4), pelo acréscimo de

1,9m no comprimento da haste, o que pode comprometer sua funcionalidade, por exemplo, por limitação da amplitude para evitar choques com a estrutura.

A Figura VIII.6 apresenta um exemplo em que os deslocamentos da estrutura original são amplificados com a instalação do mesmo sistema de atenuadores ( $l=12,37m$ ), mas com a frequência de excitação alterada para  $\omega_e=1,10$  rad/s e, portanto,  $\omega_e/\omega_1=1,10$ . Como  $\omega_e$  corresponde à frequência angular do conjunto isoladores-condutores, este valor de  $\omega_e/\omega_1$  só poderia ocorrer por uma estimativa incorreta da frequência angular do conjunto isoladores-condutores.

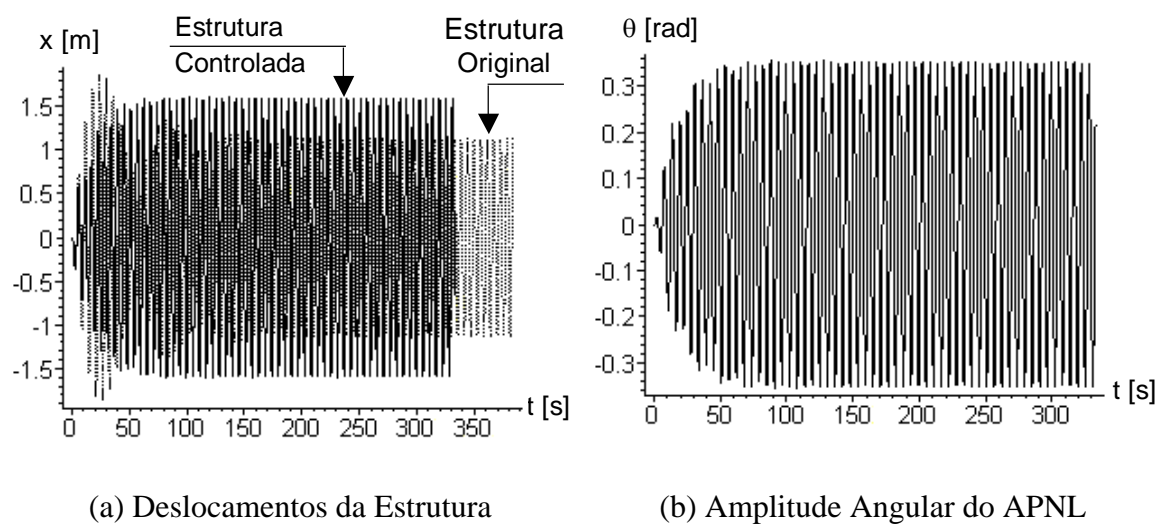


Figura VIII.6 – Resposta da Estrutura Controlada e Não-Controlada –  $l = 12,37m$   
 $\omega_1 = 0,99$  rad/s  $\omega_p \cong 0,9\omega_1 = 0,90$  rad/s  $\omega_e \cong 1,1\omega_1 = 1,10$  rad/s

#### VIII.4 – MODELO 3D-MEF COM ATENUADOR PENDULAR NÃO-LINEAR

Num sistema estrutural como o que representa a torre delta e vãos de cabos adjacentes – composto por  $N$  graus de liberdade, com frequências naturais pouco espaçadas e submetido à ação de vento turbulento – o modelo analítico representado pelas Equações VIII.1 deve ser interpretado como uma ferramenta auxiliar a ser empregada no pré-dimensionamento do sistema atenuador, cujas características inerciais, elásticas, de amortecimento e atenuação deverão ser certificadas com a análise estrutural segundo um modelo tridimensional em elementos finitos, em que se inclua o absorvedor pendular não-linear.

Além disso, no caso da torre delta aparecem como agravantes frequências naturais pouco espaçadas e inferiores a 1Hz; é importante avaliar o comportamento do pêndulo bidimensional e do sistema estrutural controlado para os outros modos de vibração. Essa verificação pode apontar, inclusive, para necessidade de um outro pêndulo, com localização e ajuste diferentes daquele estimado inicialmente com o modelo analítico, e destinado à atenuação de deslocamentos horizontais despertados por outro modo dominante de vibração. Numa estrutura com frequências naturais pouco espaçadas, um pêndulo projetado para um determinado modo de vibração pode vir a excitar outros modos próximos a ele.

Torna-se evidente, portanto, a necessidade de uma rotina numérica que, além de tratar adequadamente os grandes deslocamentos observados nas cadeias de isoladores, condutores elétricos e pára-raios expostos à ação do vento, permita associar a graus de liberdade distintos, múltiplos atenuadores com calibrações específicas. A técnica da sub-estruturação dinâmica para resolver esse problema pode ser adotada, sendo facilmente implementada com algoritmos numéricos destinados a análises 3D-MEF.

## CAPÍTULO IX

### COMENTÁRIOS FINAIS E CONTINUIDADE DA PESQUISA

---

#### IX.1 COMENTÁRIOS FINAIS

Os resultados aqui obtidos tanto com o modelo linear 3D-MEF proposto em [1] quanto com o atual modelo dinâmico não-linear mostram a necessidade de revisão das etapas de projeto de torres TEE ainda na fase de cálculo estrutural: impõe-se o modelo acoplado torre-cabos como ponto de partida para a análise da ação do vento sobre a linha de transmissão e, sempre que necessário, o projeto de amortecedores ADS visando a atenuação dos deslocamentos horizontais observados nas torres e conseqüente redução dos esforços internos em seus elementos.

Desse modo, as cargas de vento deixariam de ser apresentadas nas árvores de carregamento, sendo substituídas por modelos alimentados por parâmetros estatísticos e aerodinâmicos que deverão ser considerados na definição das forças de vento sobre o modelo. No desenho apareceria, então, uma simples referência às especificações de projeto, ou diretamente à NBR 5422 [31], numa versão mais extensa, completamente revista e ampliada.

É importante esclarecer que, na versão em que se encontra, a NBR 5422 [31] não considera as características dinâmicas do sistema estrutural – formas modais de vibração, taxas de amortecimento crítico e coeficientes de amplificação dinâmica – da torre com os cabos acoplados. A metodologia indicada na IEC 826 [51], na qual se baseia a NBR 5422 [31], é análoga à do Método do Equivalente Estático da NBR 6123 [5], recomendada apenas para estruturas que apresentem frequência fundamental superior a 1 Hz.

Fisicamente, aplicar o equivalente estático (NBR 5422, IEC 826, NBR 6123) significa levar a estrutura para uma configuração deformada inicial provocada pela ação estática do vento com sua velocidade média e, em seguida, para a configuração estática final acarretada pela soma da velocidade média com o pico de velocidade de vento associado a uma rajada, cujo tempo de duração é determinado em função das dimensões da estrutura. Este modelo de cálculo, no entanto, não representa a realidade, já que durante a resposta dinâmica, a estrutura oscila em torno da configuração estática inicial

(devido à velocidade média do vento), em função de suas características modais, de amortecimento e de amplificação dinâmica, assim como da flutuação da velocidade do vento.

Nos últimos anos tem-se observado uma crescente preocupação com o meio-ambiente, inclusive no que se refere à redução do impacto ambiental provocado pela instalação de novas linhas de transmissão.

A necessidade de soluções ecologicamente adequadas visando respeitar exigências legais e, principalmente, minimizar despesas com reposição florestal e subsequente manutenção e replantio ao longo de anos, leva a soluções de engenharia que passam pela utilização de torres mais altas, de forma que os condutores passem sobre a vegetação nativa, sem necessidade de corte.

Conclui-se, portanto, que essa nova e correta consciência ambiental nos leva a um novo estágio no projeto de torres TEE, que passarão a apresentar maior altura não apenas pela necessidade de linhas de maior potência em virtude da distância entre as unidades geradoras e os centros consumidores, mas também pela necessidade de preservar florestas nativas onde árvores de grande porte podem alcançar, por exemplo, 45 metros de altura, como as encontradas na Reserva Extrativista do Rio Cajari, no estado do Amapá.

Tomando como exemplo a interligação Venezuela – Brasil executada pela Eletronorte com a finalidade de suprir o estado de Roraima, respeitando o “gabarito ecológico”, a utilização de estruturas-suporte com extensões especiais acarretou um acréscimo de 50% no fornecimento total da LT. Este custo, entretanto, não deve ser comparado apenas ao referente à indenização pela supressão das árvores, como fizeram SALIBA *et alli* [52] pois, pelos estudos que têm sido feitos, a necessidade de reposição por queda pela ação do vento tornar-se-á mais freqüente com o emprego de torres cada vez mais altas, motivado pela nova política ambiental. De certa forma esses acidentes agregam também prejuízos de caráter social, independentemente de possíveis custos de reposição.

Pelo que foi exposto neste trabalho é possível afirmar que a ocorrência de acidentes provocados pela ação do vento se acentuará, se a análise de torres esbeltas com freqüências naturais extremamente baixas, e agora ainda mais baixas, forem

conduzidas utilizando um modelo inadequado para análise estrutural. Com a finalidade de facilitar a identificação das possíveis áreas de risco, este trabalho apresenta, também, o modelo do pêndulo composto para cálculo da frequência fundamental do sistema formado por torre e cabos elétricos acoplados.

Verificações realizadas com a LT estudada na seção VII.1 (Figura VII.1) – vão médio = 450m, torre tipo delta com altura  $\cong$  33m – mostraram que a estabilidade do sistema estrutural pode ser garantida no máximo até velocidades básicas de vento na faixa de 25 ~ 30 m/s (rajada de 3 segundos, a 10 metros de altura em terreno aberto e plano). Entretanto, a continuidade da pesquisa mostra que a simples instalação de atenuadores dinâmicos sincronizados – ADS – na torre, perfeitamente calibrados, permitirá que a estabilidade do sistema estrutural seja assegurada até velocidades de vento da ordem de 50 m/s (seção VIII.3).

Em resumo, este trabalho mostra a necessidade de um modelo refinado que considere a interação fluido – cabos – estrutura na análise do sistema torres-linhas de transmissão. As respostas, sob ação de ventos extremos, a serem obtidas com este modelo evitará como consequência, inerente a impropriedade de outros modelos, intervenções futuras tais como reforço estrutural das torres. A simples instalação de dispositivos projetados segundo as modernas técnicas de redução e controle de vibrações, mostra-se como uma solução atrativa, robusta e de baixo custo adicional.

## **IX.2 CONTINUIDADE DA PESQUISA**

Sugere-se que, na continuidade deste trabalho de pesquisa, os seguintes itens sejam abordados:

1. Apresentar num próximo trabalho as metodologias que têm sido propostas para análise da ação do vento em linhas de transmissão, desde o método do fator de resposta de rajada (FRR) sugerido por Davenport<sup>1</sup> em 1979, o método do fator de velocidade de rajada (FVR) adotado pelas normas, até o método estatístico usando linhas de influência (ELI) descrito por LOREDO-SOUZA em [53]. As Referências [54] e [55] são indicadas para dar início a este estudo.

---

<sup>1</sup> Davenport, A.G.-“*Gust Response Factors for Transmission Line Loading*”, Proceedings of the Fifth International Conference on Wind Engineering, Pergamon Press, Colorado State University, July 1979

- Cumprir os mesmos itens do Capítulo VII para uma nova silhueta, a da torre em V, estaiada, adotada por Furnas Centrais Elétricas S/A no Sistema de Transmissão da Hidrelétrica de Itaipu. Esta silhueta encontra-se ilustrada na Figura I.1, mas é rerepresentada, a seguir, na Figura IX.1.

Trata-se de uma torre com altura de 47 metros, do tipo suspensão em alinhamento reto, executada em perfis cantoneira de abas iguais, aço carbono ASTM A36 e aço de alta resistência ASTM A572 Gr.50. Os estais foram projetados em cordoalha de 37 fios, aço galvanizado e diâmetro 7/8 in.

A linha de transmissão é composta por três feixes de quatro cabos de alumínio com alma de aço, padrão *Bluejay*, e tem vão médio de 450m. Os pára-raios são em cordoalha de 7 fios, aço galvanizado EHS e diâmetro 3/8 in.

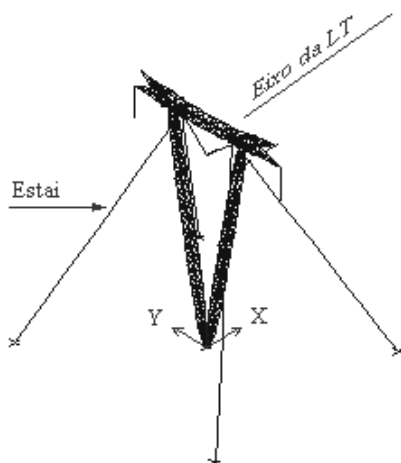


Figura IX.1 – Torre em V, estaiada – Silhueta

Uma forte razão para a escolha dessa silhueta é que, num período de pouco mais de cinco meses, entre novembro de 1997 e abril de 1998, foram registrados dois grandes acidentes no Sistema de Transmissão da Hidrelétrica de Itaipu, operado por Furnas Centrais Elétricas S/A, totalizando o colapso de dezessete torres com essa silhueta e altura sempre superior a 40 metros. Em nota oficial publicada em 18 de abril de 1998, Furnas Centrais Elétricas S/A informou que o projeto dessas torres baseou-se em parâmetros meteorológicos obtidos a partir de um estudo contratado junto à consultora internacional *MRI – Meteorology Research Inc.* que indicava ventos unidirecionais, na região, de até 150 km/h.

Uma filmagem na área do segundo acidente (6 de abril de 1998) foi realizada por jornalistas da Rede Globo de Televisão e a reportagem apresentada na edição de 7 de abril de 1998 do Jornal Nacional. Neste filme é possível observar que algumas torres restavam aparentemente intactas no solo, o que pode caracterizar a queda por falha na ligação dos estais, do próprio estai ou, ainda, por falha da fundação. Outras torres, no entanto, encontravam-se completamente retorcidas, um indicativo de colapso por instabilidade estrutural ocasionada por fenômeno de interação local-global (flambagem de barra seguida da flambagem da coluna treliçada), conforme observações realizadas em ensaios de protótipos.

Da mesma forma que as torres tipo delta analisadas neste trabalho, o modelo de análise dinâmico não-linear produzirá mais corretamente os grandes deslocamentos dos cabos elétricos e cadeias de isoladores sob ação do vento. Além disso, a rotina numérica utilizada nas análises aqui apresentadas (Apêndice C) já possui o tipo de elemento adequado para a discretização dos estais: o elemento de cabo-treliça, que é desativado sempre que um dos estais tende a se comportar como uma estronca, o que na prática corresponde ao relaxamento do cabo.

3. A terceira sugestão para a continuidade da pesquisa é, exatamente, dar início aos estudos que levem à modelagem adequada 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. Uma vez definida a modelagem adequada, a torre em V, estaiada, do Sistema de Transmissão de Itaipu pode ser utilizada aqui, também, representando uma economia de tempo na modelagem, já que a discretização da torre propriamente dita não sofre alteração, e apenas a modelagem dos feixes de condutores, objeto de estudo, seria modificada em relação àquela utilizada na análise da ação de vento forte e turbulento sugerida no item anterior.

Para efeito de estudo do comportamento dos condutores elétricos sob ação de vento forte e turbulento, os espaçadores de feixe dispostos ao longo do vão da LT e os balancins nos pontos de suspensão obrigam os cabos que compõem o feixe de condutores a trabalharem solidários, permitindo que no modelo estrutural o feixe seja representado por um único cabo, porém com características geométricas equivalentes às do feixe.

Nos estudos do fenômeno de vorticidade, entretanto, durante a ocorrência de vento em escoamento suave e de baixa velocidade, todos os cabos que compõem o feixe deverão ser modelados, assim como os espaçadores e balancins com suas características de amortecimento.

4. Dar continuidade à proposta de modelagem do absorvedor pendular não-linear para atenuação dos deslocamentos horizontais no topo da torre, conforme estudo iniciado no Capítulo VIII. É indispensável um algoritmo numérico que, além de retratar corretamente os grandes deslocamentos dos cabos e cadeias de isoladores expostos à ação de vento forte e turbulento, permita associar a graus de liberdade distintos, atenuadores com calibrações específicas.
5. Realizar um estudo de desempenho do APNL para vãos de cabos e alturas de torres de modo a facilitar o pré-dimensionamento ainda na fase de projeto estrutural.
6. Implementar um controle automático dos incrementos de tempo no processo de integração das equações diferenciais de movimento, de modo a obter maior eficiência do algoritmo, sem perda de precisão, ao selecionar o maior incremento de tempo possível no próximo passo do processo de integração numérica. Esta sugestão deve ser vista como ponto de partida para qualquer nova verificação estrutural.
7. Em função do processador aritmético, modelos estruturais como os analisados neste trabalho podem exigir desde algumas horas até mesmo dois ou três dias de processamento ininterrupto. Desse modo, apesar de não ser indispensável, é importante a implementação de uma rotina no algoritmo numérico que permita reiniciar a solução, a partir de um tempo  $t$  qualquer, sem que haja comprometimento dos resultados da análise dinâmica não-linear, já que esta é fortemente dependente das condições iniciais e do “caminho-solução”.
8. Estabelecer uma formulação não-linear, no domínio da frequência, de modo a facilitar a análise, pelos grupos de projeto, da ação do vento no sistema acoplado torre-cabos elétricos.
9. Investigar o comportamento de um modelo aeroelástico 3D no qual a interação escoamento de ar – cabos elétricos inclua a mudança de geometria dos condutores elétricos e pára-raios em função da variação do ângulo de incidência do vento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- [1] RODRIGUES, R. S., “*Colapso de Torres TEE sob Ação do Vento*”, Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Abril 1999.
- [2] RODRIGUES, R.S., BATTISTA, R.C. , PFEIL, M.S., “Desvendando o Mecanismo Dinâmico de Torres de Linhas de Transmissão sob Ação de Forças de Vento”, In: XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural’ – Jubileo Prof. Julio Ricaldoni, Punta del Este, Novembro 2000.
- [3] PINHEIRO, M. A. S., “*Absorsor Pendular Não-Linear para Redução de Vibrações em Torres Esbeltas*”, Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Fevereiro 1997.
- [4] BLESSMANN, J., *O Vento na Engenharia Estrutural*, 1 ed. Porto Alegre, Editora da Universidade/UFRGS, 1995.
- [5] NBR 6123, *Forças devidas ao vento em edificações*, ABNT –Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1988 (Incorpora Errata nº1 de dezembro/1990).
- [6] SIMIU, E., SCANLAN, R.H., *Wind Effects on Structures*, 3 ed. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [7] LE GOURIÈRES, D., *Energie Eolienne*, Paris, Ed. Eyrolles, 1980.
- [8] MACDONALD, J.A., *Wind Loading on Buildings*, 1 ed. London, Applied Science Publishers Ltd, 1975.
- [9] BYERS, H.R., *General Meteorology*, 3 ed. New York, McGraw-Hill Book Company, 1959.
- [10] DWTMA, Danish Wind Turbine Manufacturers Association ([www.windpower.org](http://www.windpower.org))
- [11] FMH-1, *Surface Weather Observations and Reports, Federal Meteorological Handbook No.1*, NOAA-National Oceanic and Atmospheric Administration, Silverspring, 1995.

- [12] RIERA, J.D., PADARATZ, I.J., *Velocidade Básica do Vento para Projeto de Estruturas no Brasil, Contribuição para a Revisão da NB5/1961*, ABNT, 1977.
- [13] STRINGER, E.T., *Foundations of Climatology*, 1 ed. San Francisco, W. H. Freeman and Company, 1972.
- [14] CORNELL UNIVERSITY, New York, (www.cornell.edu)
- [15] SACHS, P., *Wind Forces in Engineering*, 1 ed. Oxford, Pergamon Press Ltd., 1972.
- [16] BATTISTA, R.C., *Tópicos Especiais de Análise de Fadiga em Estruturas de Aço Soldadas*, Notas de Aula, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 1999.
- [17] TIELEMAN, H.W., “Universality of Velocity Spectra”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v.56, pp. 55-69, April 1995.
- [18] NEWLAND, D.E., *An Introduction to Random Vibrations and Spectral Analysis*, 1ed. London, Longman Group Ltd., 1975.
- [19] HAHN, G.J., SHAPIRO, S.S., *Statistical Methods in Engineering*, 1 ed. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1967.
- [20] GUMBEL, E.J., *Statistics of Extremes*, 1 ed. New York, Columbia University Press, 1958.
- [21] SIMIU, E., HECKERT, N.A., “Extreme Wind Distribution Tail: A Peak over Threshold Approach”, *Journal of Structural Engineering*, v.122, n.5, pp. 539-547, May 1996.
- [22] ZURITA, B.I.G., *Análise Estatística de Valores Extremos de Séries Temporais Gaussianas e Não-Gaussianas*, Tese de MSc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Abril 1999.
- [23] MIZE, J.H., COX, J.G., *Essentials of Simulation*, 1 ed. New Jersey, Prentice-Hall, Inc., 1968
- [24] HAMMERSLEY, J.M., HANDSCOMB, D.C., *Monte Carlo Methods*, 1 ed. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 1965.

- [25] GALAMBOS, J., MACRI N., “Classical Extreme Value Model and Prediction of Extreme Winds”, *Journal of Structural Engineering*, v.125, n.7, pp. 792-794, July 1999.
- [26] GRIGORIU, M., “Estimates of Extreme Winds from Short Records”, *Journal of Structural Engineering*, v.110, n.7, pp. 1467-1484, July 1984.
- [27] GUSELLA, V., “Estimation of Extreme Winds from Short-Term Records”, *Journal of Structural Engineering*, v.117, n.2, pp. 375-390, February 1991.
- [28] LIMA, E.C.P., ELLWANGER G.B., SAGRILO L.V.S. *et al.*, *Confiabilidade Estrutural*, Notas de Aula, Laboratório de Confiabilidade e Risco, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 1996.
- [29] ELIAS, R.A., SILVA, V.R., “Desempenho Estrutural de LTs do Sistema CEEE segundo Diferentes Procedimentos de Cálculo de Cargas de Vento”, In: XI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (Grupo III), pp. RJ/GLT/15, Rio de Janeiro, Outubro 1991.
- [30] LABEGALINI, P.R., LABEGALINI J.A., FUCHS R.D. *et al.*, *Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão*, 2 ed. São Paulo, Ed. Edgard Blücher Ltda, 1992.
- [31] NBR 5422, *Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica*, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1985.
- [32] BLESSMANN, J., *Introdução ao Estudo das Ações Dinâmicas do Vento*, 1 ed. Porto Alegre, Editora da Universidade/UFRGS, 1998.
- [33] BLESSMANN, J., *Acidentes causados pelo Vento*, 4<sup>a</sup> ed. revista e ampliada, Porto Alegre, Editora Universidade/UFRGS, 2002
- [34] BUCHHOLDT, H.A., MOOSSAVINEJAD, S., IANNUZZI, A., “Non-Linear Dynamic Analysis of Guyed Masts subjected to Wind and Guy Ruptures”, *Proceedings Institution of Civil Engineers*, Part 2, pp-353-359, September 1986.
- [35] MOMOMURA, Y., MARUKAWA, H., OHKUMA, T., “Wind-Induced Vibration of Transmission Line System”, *J. Wind Eng. and Industrial Aerodynamics* 41-44, pp 2035-2046, Elsevier, 1992.

- [36] YASUI, H., MARUKAWA, H., MOMOMURA, et al., “Analytical Study on Wind-Induced Vibration of Power Transmission Towers”, *J. Wind Eng. and Industrial Aerodynamics* 83, pp 431-441, Elsevier, November 1999.
- [37] RODRIGUES, R.S., BATTISTA, R.C., PFEIL, M.S., “A New Model for an Old Problem – The Dynamic Mechanism of Collapse of Transmission Line Towers under Wind Forces”, In: *Americas Conference on Wind Engineering 2001*, Clemson University, South Carolina, USA, June 2001.
- [38] BATTISTA, R.C., RODRIGUES, R.S., PFEIL, M.S., “Dynamic Behaviour and Stability of Transmission Line Towers under Wind Forces”, *J. Wind Eng. and Industrial Aerodynamics* 91, pp.1051-1067, Elsevier, 2003.
- [39] MEIROVITCH, L., *Elements of Vibration Analysis*, McGraw-Hill Books Co., Singapore, 1986.
- [40] RODRIGUES, R.S., BATTISTA, R.C., PFEIL, M.S., “Colapso de Torres TEE sob Ação do Vento – Proposta para Revisão de Normas e Procedimentos de Projeto”, In: *XVII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (Grupo III)*, Uberlândia, Outubro 2003.
- [41] AMBROSINI, R.D., RIERA, J.D., DANESI, R.F., “Analysis of Structures Subjected to Random Wind Loading”, In: *Wind Effects on Buildings and Structures – Jubileum Conference*, Gramado, Maio 1998.
- [42] PFEIL, M.S., “*Comportamento Aeroelástico de Pontes Estaiadas*”, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Julho 1993.
- [43] PFEIL, M.S., BATTISTA, R.C., “Aerodynamic Stability Analysis of Cable Stayed Bridges”, *J. Struct. Eng.*, Vol.121-n.12 pp 1784-1788, ASCE, 1995.
- [44] HARRIS, C.M., CREDE, C.E., *Shock and Vibration Handbook*, 3<sup>rd</sup> ed., McGraw-Hill Books Co., 1988
- [45] *AISC Manual of Steel Construction, Load and Resistance Factor Design*, American Institute of Steel Construction Inc., Chicago, 1994.

- [46] FUCHS R.D, ALMEIDA, M.T., *Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão*, São Paulo, Ed. Edgard Blücher Ltda, 1982.
- [47] BATTISTA, R.C., EBECKEN N.F.F., BEVILACQUA, L., “Dynamical Analysis of an Offshore Platform with Vibration Absorbers”, In: IUTAM-Symposium on Recent Developments in Non-Linear Oscillations of Mechanical Systems, Vietnam, 1999.
- [48] BATTISTA, R.C., PINHEIRO, M.A.S., “Oscillations Reduction of Compliant Structures of Offshore Platforms”, 21<sup>st</sup> Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, Rio de Janeiro, 2000.
- [49] SOUZA, R.A., “*Controle Passivo/Ativo das Oscilações de Estruturas Esbeltas por meio de Dispositivos Fluido-Dinâmicos*”, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Junho 2003.
- [50] KORENEV, B.G., RESNIKOV, L. M, *Dynamic Vibrations Absorbers, Theory and Applications*, John Wiley & Sons Ltd., England, 1993
- [51] IEC 826, *Loading and Strength of Overhead Transmission Lines*, IEC – International Electrotechnical Commission, 2<sup>nd</sup> Edition, 1991.
- [52] SALIBA, A., FERNANDES, J.H.M., RAYOL, C.A.P., “Linhas de Transmissão e os Requisitos Ambientais: A Experiência da Eletronorte”, In: XVII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (Grupo III), Uberlândia, Outubro 2003.
- [53] LOREDO-SOUZA, A.M., “*The Behaviour of Transmission Lines under High Winds*”, PhD Thesis, University of Western Ontario, Ontario, Canada, 1996.
- [54] LOREDO-SOUZA, A.M., DAVENPORT, A.G., “Resposta de Torres de Transmissão à Ação do Vento”, In: XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural’ – Jubileo Prof. Julio Ricaldoni, Punta del Este, Novembro 2000.
- [55] LOREDO-SOUZA, A.M., DAVENPORT, A.G., “Wind Action on Transmission Towers”, In: Americas Conference on Wind Engineering 2001, Clemson University, South Carolina, USA, June 2001.

## APÊNDICE A

### ANEMÔMETROS

Neste apêndice são apresentados os tipos de anemômetros disponíveis para diferentes condições de monitoração da velocidade e direção do vento, assim como algumas informações sobre a técnica empregada por cada um deles.

#### TIPOS DE ANEMÔMETROS

a) Anemômetro Termoelétrico (“*hot wire*”):

A velocidade do ar é proporcional à taxa de resfriamento calculada a partir da diferença de temperatura entre dois fios, um deles exposto ao vento e o segundo colocado a sotavento. Esses anemômetros oferecem uma resposta muito rápida e apresentam boa sensibilidade, podendo medir fluxos de ar inferiores a 1m/s. Entretanto, são extremamente delicados, não sendo indicados para meio ambiente poluído, úmido, corrosivo ou com mudanças bruscas de temperatura. Os anemômetros termoelétricos cobrem o intervalo de 0.01 a 5m/s.

b) Anemômetros de Palheta:

Estes anemômetros têm como princípio a velocidade de rotação livre da hélice ser diretamente proporcional à velocidade do vento, apresentando sensibilidade no intervalo de 0,15 a 40m/s ou até mesmo superior, se necessário. Esses sensores podem ser utilizados em meio ambiente agressivo, todavia o tempo de resposta é inferior ao dos anemômetros termoelétricos, em virtude do pequeno atrito inicial que deve ser vencido pela palheta antes de começar a girar.

c) Anemômetros por Diferença de Pressão:

Estes sensores medem a pressão que, posteriormente, é convertida em velocidade do ar, segundo a técnica do tubo de Pitot, detalhada na próxima seção deste apêndice. Uma vez que as sondas de pressão diferencial são simples tubos metálicos, estes anemômetros são os mais robustos dentre os três tipos já apresentados e os únicos que podem ser facilmente limpos. Sensíveis a velocidades de vento superiores a

1m/s, os anemômetros por diferença de pressão são ideais para meio ambiente agressivo.

d) Anemômetros Sônicos:

Baseados na mudança de fase do som, eles foram desenvolvidos há aproximadamente vinte e cinco anos. Com o aprimoramento, chegamos aos atuais anemômetros ultrasônicos que utilizam tecnologia digital *solid-state* e custo que pode chegar a dez vezes o de um sensor do tipo mostrado na Fig.4c. Esses anemômetros são sensores de velocidade e direção do vento, sem apresentar partes móveis (Figura A.1), o que os torna menos vulneráveis a danos. Além disso, podem ser utilizados continuamente durante geadas e nevascas, têm sensibilidade no intervalo 0 ~ 50m/s, resolução 0,1m/s para velocidade e 1,0° para direção do vento, operando em temperaturas entre -40° e +70°C.

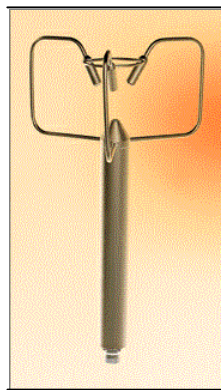


Figura A.1 – Anemômetro Ultrasônico

### A TÉCNICA DO TUBO DE PITOT

Os anemômetros por diferença de pressão baseiam-se no princípio do tubo de Pitot, um dos métodos mais precisos de determinação da velocidade de escoamento de um fluido. Essa técnica consiste na determinação da velocidade de forma indireta, ou seja, a partir de uma outra grandeza mensurável, a pressão.

O tubo de Pitot mostrado na Figura A.2 é composto por um tubo de vidro com curva em ângulo reto, utilizado para medir a velocidade  $v$  num canal. A abertura do tubo é dirigida para montante, de tal modo que o fluido escoe para dentro da abertura até que se estabeleça uma pressão no interior do tubo – *pressão dinâmica*. Estabelecida a linha de corrente entre os pontos 1 e 2, na entrada do capilar o fluido encontra-se em repouso,

onde se divide e passa a envolver o tubo, daí o ponto 2 ser tratado como *ponto de estagnação*. A pressão em 2 é conhecida a partir da coluna de líquido no interior do capilar.

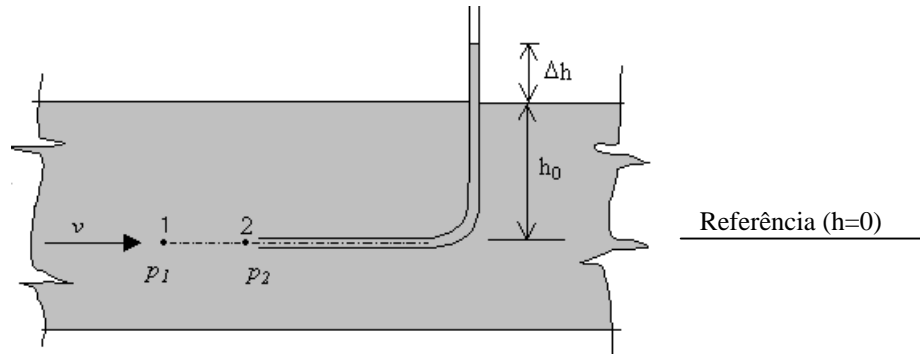


Figura A.2 – Tubo de Pitot Simples

Escrevendo a equação de Bernoulli entre os pontos 1 e 2, desprezando as perdas, por serem muito pequenas, teremos:

$$gh_1 + \frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = gh_2 + \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} = \text{constante} \quad (\text{A.1})$$

onde  $\rho$  é a massa específica do fluido e  $g$  a aceleração da gravidade. Lembrando que a velocidade no ponto 2 é nula e que o peso específico tem a expressão  $\gamma = \rho g$ , a Equação A.1 pode ser escrita na forma:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} = \frac{p_2}{\gamma} \quad (\text{A.2})$$

$p_1/\gamma$  tem dimensão [L] e corresponde a altura de fluido acima do ponto 1, ou seja, é igual a  $h_0$ ;  $p_2/\gamma$ , por sua vez, é dado pelo piezômetro e tem valor igual a  $(h_0 + \Delta h)$ , desprezando o efeito capilar. Substituindo na Equação A.2, vem:

$$v = \sqrt{2g\Delta h} \quad (\text{A.3})$$

O tubo de Pitot mede a *pressão de estagnação*, também chamada de *pressão total*, composta pelas parcelas da pressão estática ( $h_0$ ) e da pressão dinâmica ( $\Delta h$ ), expressas em comprimento de coluna de líquido que está escoando (Figura A.2). A pressão dinâmica está relacionada com a velocidade do escoamento, como mostra a Equação (A.3).

O tubo de Pitot é insensível quanto ao alinhamento com o escoamento, resultando num erro de alguns pontos percentuais se o tubo estiver desalinhado de um ângulo menor que 15°. Entretanto, se este ângulo for da ordem de 45°, além da dificuldade de relacionar a pressão com a velocidade, pequenas variações no ângulo irão provocar grandes variações na pressão. Essa característica é explorada no projeto de sensores destinados à determinação da direção do escoamento, permitindo também a construção de pequenas sondas destinadas ao estudo da camada limite.

Em virtude da dificuldade de leitura de  $\Delta h$  a partir de uma superfície livre, é comum combinar as medidas de pressão estática e pressão total, por meio de um manômetro diferencial, obtendo-se a altura correspondente à pressão dinâmica (Figura A.3). Neste caso, o sistema obedece à Equação (A.4), onde  $d$  corresponde à densidade do fluido.

$$v = \sqrt{2gR' \left( \frac{d_0}{d} - 1 \right)} \quad (\text{A.4})$$

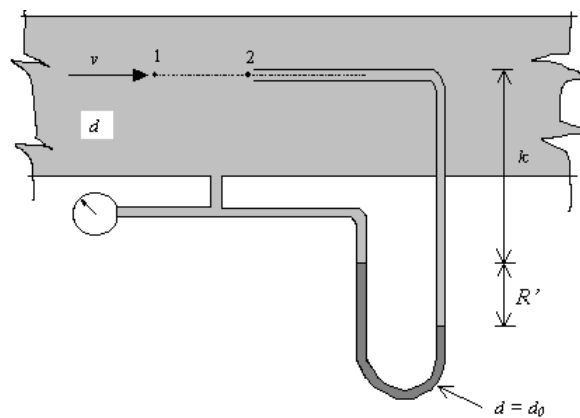


Figura A.3 – Tubo de Pitot com Tomada Piezométrica para Medida de Velocidade

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- STREETER, V.L. – *Mecânica dos Fluidos*, 1 ed. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil Ltda., 1974
- GABULIN, J.C., FREIRE J.T., - *Laboratório Didático - Tópicos Especiais em Fenômenos de Transporte*, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, 1990

## APÊNDICE B

### NBR 6123 – COEFICIENTES DE ARRASTO SUPERFICIAL

Os coeficientes de arrasto superficial,  $c_{as}$ , utilizados na norma brasileira NBR 6123, são:

DESCRIÇÃO	$c_{as} \cdot 10^3$
<p><b>CATEGORIA I</b> – Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5km de extensão, medidas na direção e sentido do vento incidente. Exemplos:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ mar calmo,</li><li>▪ rios e lagos,</li><li>▪ pântanos sem vegetação.</li></ul>	2,8
<p><b>CATEGORIA II</b> – Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas. Exemplos:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ zonas costeiras planas,</li><li>▪ pântanos com vegetação rala,</li><li>▪ campos de aviação,</li><li>▪ pradarias e charnecas,</li><li>▪ fazendas sem sebes ou muros.</li></ul> <p>A cota média do topo dos obstáculos é considerada inferior ou igual a 1,0m.</p>	6,5
<p><b>CATEGORIA III</b> – Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas. Exemplos:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ granjas e casas de campo, com exceção das partes com matos,</li><li>▪ fazendas com sebes e/ou muros,</li><li>▪ subúrbios a considerável distância do centro, com casas baixas e esparsas.</li></ul> <p>A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 3,0m.</p>	13
<p><b>CATEGORIA IV</b> – Terrenos cobertos com obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada. Exemplos:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ zonas de parques e bosques com muitas árvores,</li><li>▪ cidades pequenas e seus arredores,</li><li>▪ subúrbios densamente construídos de grandes cidades,</li><li>▪ áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas.</li></ul> <p>A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10m. Esta categoria também inclui zonas com obstáculos maiores e que ainda não possam ser consideradas na Categoria V.</p>	30
<p><b>CATEGORIA V</b> – Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. Exemplos:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ florestas com árvores altas de copas isoladas,</li><li>▪ centros de grandes cidades,</li><li>▪ complexos industriais bem desenvolvidos.</li></ul> <p>A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual ou superior a 25m.</p>	83

#### REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA:

BLESSMANN, J., *O Vento na Engenharia Estrutural*, 1ed. Porto Alegre, Editora Universidade/UFRGS, 1995

## APÊNDICE C

### PROGRAMA MEDIFEM – ENTRADA DE DADOS

O programa MEDIFEM utilizado neste trabalho é baseado no programa MINIFEM, elaborado na Universidade da Califórnia, Berkeley, pelo Prof Taylor, e foi assunto do Seminário de Qualificação para Doutorado da Prof<sup>a</sup>. Michèle S. Pfeil, realizado no mês de maio de 1991, no Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ.

O escopo deste trabalho não incluía o desenvolvimento de uma rotina numérica para solução do problema dinâmico não-linear; na verdade, até mesmo algumas tentativas com pacotes comerciais foram realizadas, com o intuito de facilitar a aplicação do modelo proposto no projeto e verificação de torres TEE. Entretanto, não foi possível reproduzir, adequadamente, o comportamento dos cabos sob ação de vento, com os tipos de elementos estruturais encontrados nos pacotes comerciais disponíveis, daí a decisão de adotar o MEDIFEM com pequenas adaptações.

Essa é a razão pela qual este apêndice apresenta apenas uma descrição sumária do programa MEDIFEM, além de um registro da entrada de dados no trecho relativo à seqüência de macro-instruções necessárias para solução de problemas estáticos e dinâmicos, quer sejam lineares ou não-lineares. Toda e qualquer informação sobre o MEDIFEM pode ser obtida nas referências bibliográficas indicadas no fim do apêndice.

#### DESCRIÇÃO SUMÁRIA DO PROGRAMA MEDIFEM

O MEDIFEM (PFEIL, 1991) resulta da implementação de rotinas e módulos de elementos no programa MINIFEM. Em relação aos tipos de elemento, manteve-se o elemento isoparamétrico de estado plano e foram acrescentados (i) os elementos de treliça e pórtico, planos e espaciais, (ii) o elemento de pórtico plano com não-linearidade geométrica, (iii) as molas plana e espacial e (iv) o elemento de cabo-catenária. As macro-instruções implementadas destinaram-se à solução de:

- problemas não-lineares geométricos com controle de deslocamentos;
- análise de vibração livre pelo método de Iteração por Subespaço;
- análise de vibrações livres sob tensões iniciais;
- análise dinâmica no domínio do tempo pelo método de Newmark;
- análise dinâmica pelo método da superposição modal.

No MEDIFEM não foram implementados os módulos do MINIFEM destinados à solução de problema de vibração livre calculando apenas o autovalor mais baixo por iteração inversa e análises no domínio do tempo por integração explícita pelo método da diferença central.

Na solução de problemas não-lineares – estáticos e dinâmicos – o MEDIFEM utiliza o método de Newton-Raphson para atingir o equilíbrio em cada passo de carga.

Problemas não-lineares geométricos com controle de deslocamentos

São descritos pela Equação C.1, onde,  $K_{NL}$  representa a matriz de rigidez do sistema incluindo os efeitos não-lineares,  $X$  é o vetor de deslocamentos nodais e  $F_0$  é o vetor de forças estáticas externas.

$$K_{NL} X = F_0 \quad (C.1)$$

Análise de vibração livre pelo método de Iteração por Subespaço

O problema de vibração livre sem amortecimento é descrito pela Equação C.2, onde  $K_L$  é a matriz de rigidez elástica linear,  $M$  é a matriz de massa,  $\omega_n$  é a frequência natural de ordem  $n$  e o vetor  $\phi_n$  contém a forma modal de vibração associada à frequência  $\omega_n$ .

$$(K_L - \omega_n^2 M) \phi_n = 0 \quad (C.2)$$

Análise de vibração livre sob tensões iniciais

O problema de vibração livre sem amortecimento sob tensões iniciais é descrito pela Equação C.3, onde  $K_{NL}$  é a matriz de rigidez do sistema incluindo os efeitos não-lineares (que instalaram as tensões iniciais no sistema estrutural),  $M$  é a matriz de massa,  $\omega_n$  é a frequência natural de ordem  $n$  e o vetor  $\phi_n$  contém a forma modal de vibração associada à frequência  $\omega_n$ .

$$(K_{NL} - \omega_n^2 M) \phi_n = 0 \quad (C.3)$$

Análise dinâmica no domínio do tempo pelo método de Newmark

Solução do sistema de equações de movimento representado pela Equação C.4 onde, no sistema global de coordenadas,  $M$ ,  $C$  e  $K$  correspondem às matrizes de massa, amortecimento e rigidez, respectivamente,  $X(t)$ ,  $\dot{X}(t)$  e  $\ddot{X}(t)$  representam o vetor de

deslocamentos nodais e suas derivadas e  $P(t)$  é o vetor de forças externas nodais definidas no tempo.

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = P(t) \quad (C.4)$$

O método de Newmark ( $\beta=1/4$  e  $\gamma=1/2$ ) é um método de integração direta das equações de movimento, recomendado para a solução de problemas dinâmicos com domínios rígido e flexível, por exemplo, problemas de interação fluido-estrutura (BATHE,1982).

O método de Newmark considera a fase entre os modos, uma vez que trata-se de um método de integração direta das equações de movimento enquanto, no método da superposição modal, os modos se superpõem temporal e espacialmente, podendo dar origem a resultados muito conservadores.

Cabe registrar que o algoritmo numérico empregado na solução do sistema estrutural é utilizado no Laboratório de Estruturas desde o início dos anos 90 e, sempre que sofre implementações, é recompilado no Lahey, versão 92-93. O processamento se dá, então, numa “janela” do MS-DOS, onde o primeiro passo é “enganar” o sistema operacional com o processamento prévio de uma versão alterada do Autoexec.bat.

Ora, se até então o único prejuízo era perder as facilidades das versões mais atualizadas de compiladores e do próprio FORTRAN, agora impõe-se a necessidade dessa atualização, já que as novas versões do sistema operacional tornaram-se completamente instáveis com tal procedimento, levando à sub-utilização de seus aplicativos e, algumas vezes, até mesmo à interrupção abrupta do processamento.

É muito importante enfatizar, no entanto, que este “início de incompatibilidade” observado entre a versão 92-93 do Lahey e as novas versões do sistema operacional, não causam qualquer dano aos resultados apresentados neste trabalho.

Alem dessa atualização, é importante a implementação do controle automático dos incrementos de tempo e de uma rotina numérica que permita reiniciar a solução sem comprometimento dos resultados da análise dinâmica não-linear, conforme indicação já apresentada no Capítulo IX (itens 5 e 6 da seção IX.2)

## SEQÜÊNCIAS DE MACRO-INSTRUÇÕES

Neste item são apresentadas as definições das macro-instruções utilizadas neste trabalho e, em seguida, as seqüências de macro-instruções empregadas na solução dos problemas dinâmico linear e não-linear. Encontram-se em negrito as macro-instruções implementadas por PFEIL (1991).

MACR – inicialização do bloco de macro-instruções

TOL – tolerância (Padrão= $10^{-9}$ )

MESH – leitura da entrada de dados (para cada carregamento, uma instrução MESH)

TANG – montar matriz de rigidez

FORM – montar o vetor de cargas externas

SOLV – solução do sistema de equações

DISP – controle de impressão de deslocamentos

STRE – controle de impressão de esforços internos

AMTC – parâmetro de amortecimento

SSPA – iteração por subespaço

LMAS – monta a matriz de massa discreta

**SAID** – controle de impressão

**RUNG** – solução das equações de movimento pelo método de Runge-Kutta

**VENT** – parâmetros de cálculo das forças de vento nos nós do modelo

TEMP – número da função turbulência associada aos nós do modelo

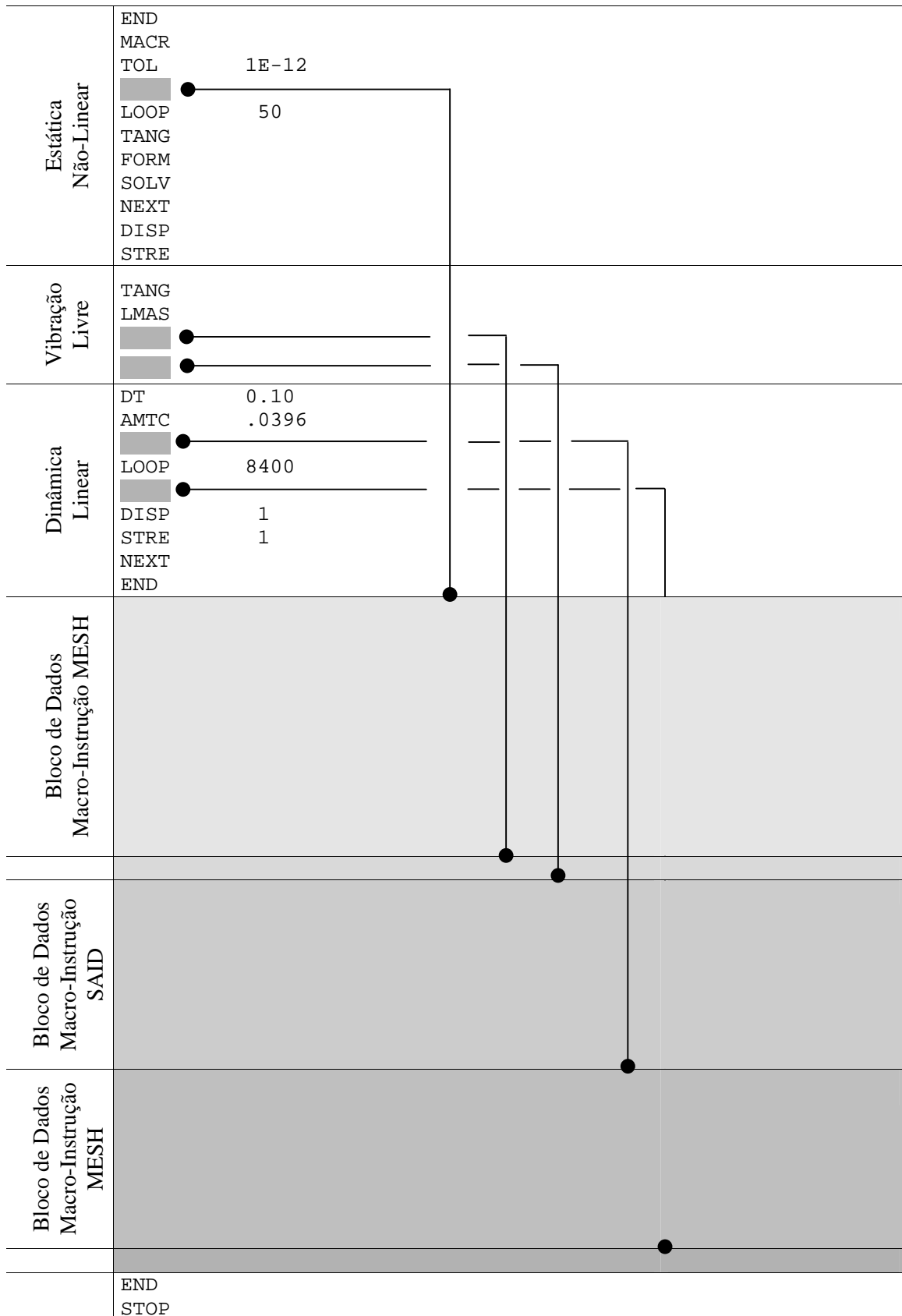
**NEWM** – leitura de parâmetro de amortecimento, método de Newmark

**DTAN** – forma a matriz de rigidez efetiva (método de Newmark)

Seguem os trechos da entrada de dados relativos às seqüências de macro-instruções.

Seqüências de Macro-Instruções

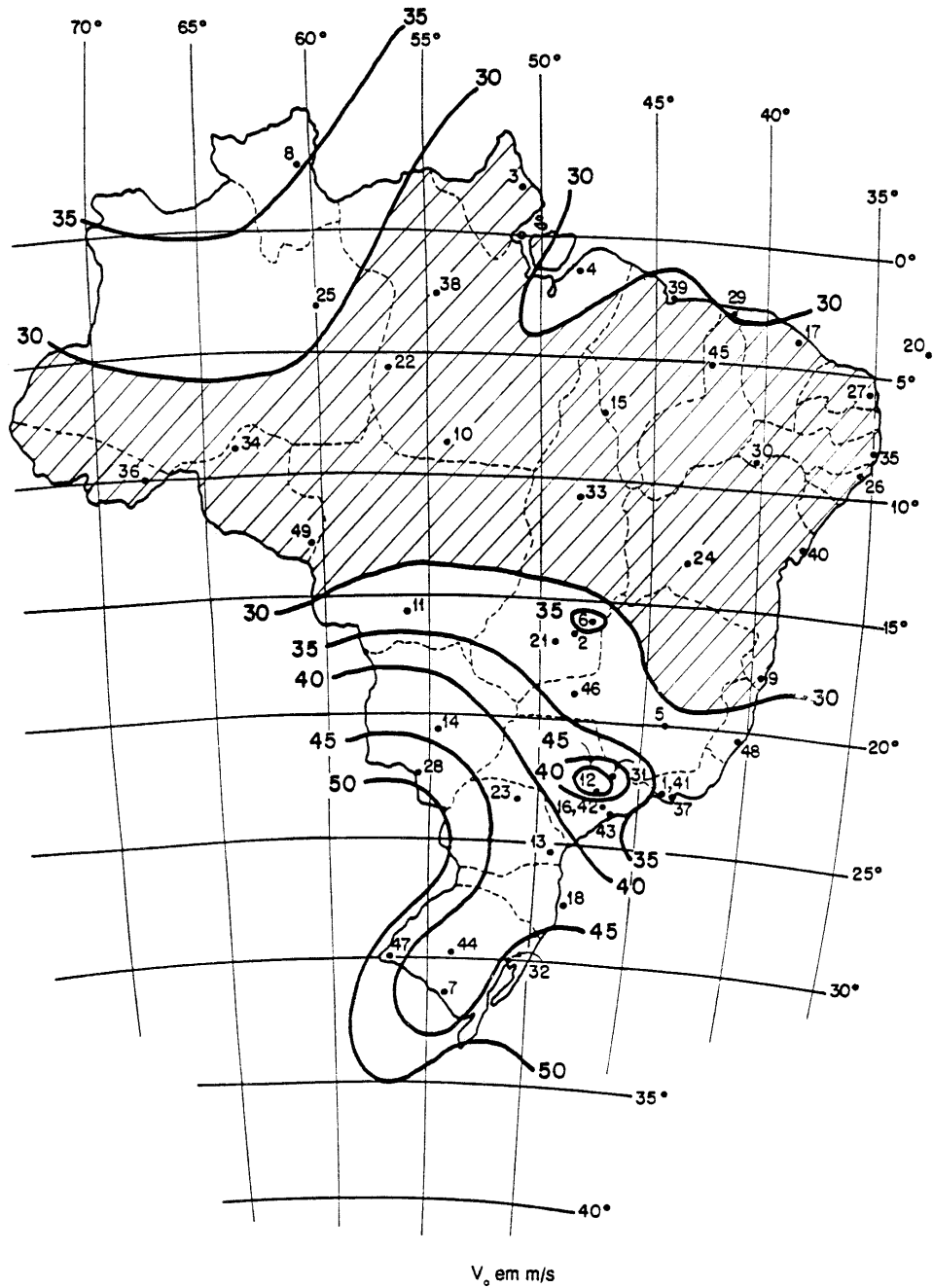
(a) Dinâmico Linear





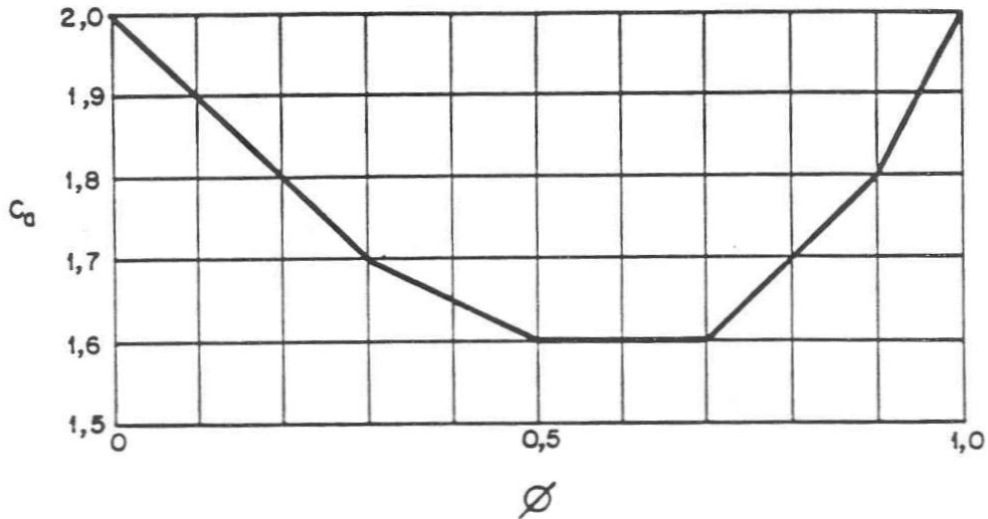
## APÊNDICE D

### FIGURAS E TABELAS DA NBR 6123



$V_0$  – máxima velocidade média medida sobre 3s, que pode ser excedida em média uma vez em 50 anos, a 10m sobre o nível do terreno em lugar aberto e plano

Figura D.1 – Figura 1 da NBR 6123  
Isopletas da Velocidade Básica  $V_0$  [m/s]



$\phi$  – índice de área exposta (área frontal efetiva de um reticulado dividida pela área frontal da superfície limitada pelo contorno do reticulado)

Figura D.2 – Figura 6 da NBR 6123

Coefficiente de arrasto,  $C_a$ , para reticulados planos formados por barras prismáticas de cantos vivos ou levemente arredondados

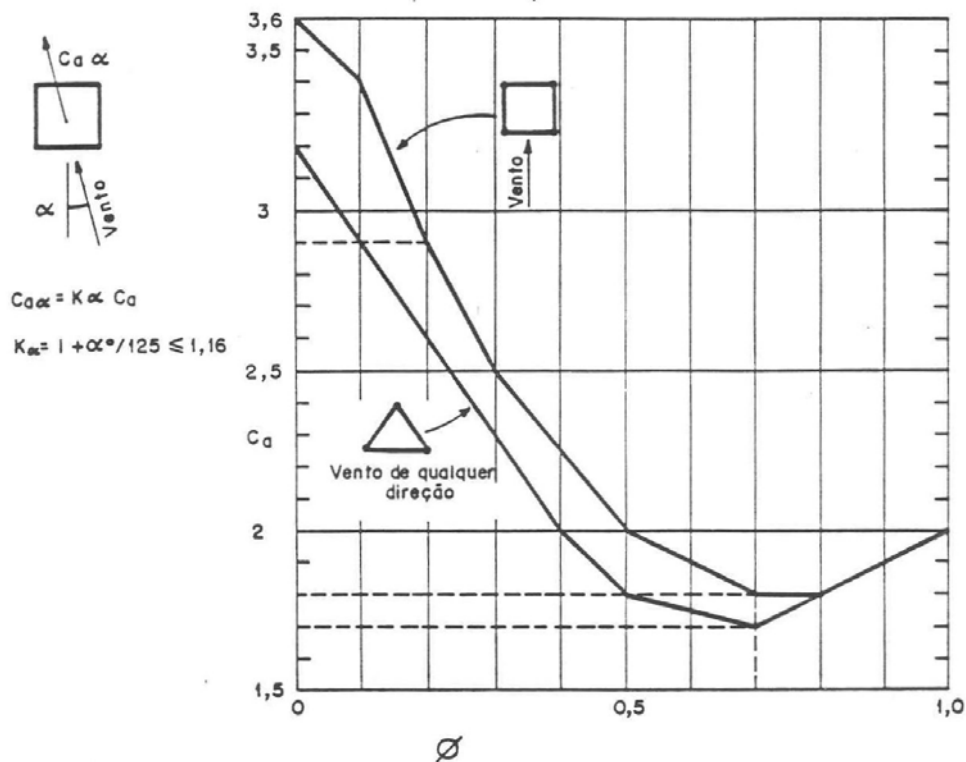


Figura D.3 – Figura 9 da NBR 6123

Coefficiente de arrasto,  $C_a$ , para torres reticuladas de seção quadrada e triangular equilátera, formadas por barras prismáticas de cantos vivos ou levemente arredondados

Categoria	$z_g$ (m)	Parâm.	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

Figura D.4 – Tabela 1 da NBR 6123  
Parâmetros Meteorológicos

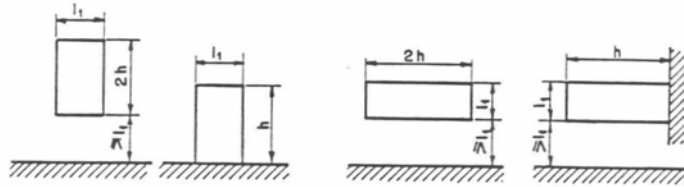
Regime do fluxo ( $Re = 70000 V_k d$ ) [ $V_k$ em m/s; d em m ]	Coeficiente de arrasto $C_a$ para:			
	Fio liso	Fio moderadamente liso (galvanizado ou pintado)	Cabos torcidos de fios finos $r/d \leq 1/30$	Cabos torcidos de fios grossos $r/d \geq 1/25$
$Re \leq 2,5 \cdot 10^4$	--	--	1,2	1,3
$Re \geq 4,2 \cdot 10^4$	--	--	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.

l – comprimento do fio ou cabo

d – diâmetro do círculo circunscrito da secção do fio ou cabo

Figura D.5 – Tabela 14 da NBR 6123  
Coeficiente de arrasto,  $C_a$ , para para fios e cabos com  $l/d > 60$



Vento perpendicular ao plano da figura


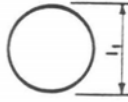
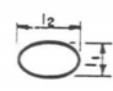
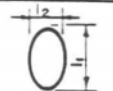
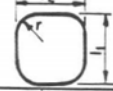
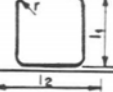

Planta	Re <sup>(A)</sup> x 10 <sup>-5</sup>	h/l <sub>1</sub>						
		1/2	1	2	5	10	20	∞
 liso (metal, concreto, avenaria rebocada)	≤ 3,5	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2
	≥ 4,2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6
 com rugosidade ou saliências = 0,02l <sub>1</sub>	Todos valores	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,2
	Todos valores	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,4
 ELIPSE l <sub>1</sub> /l <sub>2</sub> = 1/2	≤ 4,2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7
	≥ 7	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
 ELIPSE l <sub>1</sub> /l <sub>2</sub> = 2	≤ 7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3	1,7
	≥ 8	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3	1,5
 l <sub>1</sub> /l <sub>2</sub> = 1 r/l <sub>1</sub> = 1/3	≤ 3,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	1,0
	≥ 4,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
 l <sub>1</sub> /l <sub>2</sub> = 1 r/l <sub>1</sub> = 1/6	≤ 7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,0	1,3
	≥ 8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6
 l <sub>1</sub> /l <sub>2</sub> = 1/2 r/l <sub>1</sub> = 1/2	≤ 2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4
	≥ 3,5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3

Figura D.6 – Tabela 10 da NBR 6123  
 Coeficientes de arrasto C<sub>a</sub> para corpos de seção constante

**REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA:**

NBR 6123, *Forças devidas ao Vento em Edificações*, ABNT –Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1988 (Incorpora Errata nº1 de dezembro/1990).